SCIENCE.RESEARCH.PANNONIA.

Department Energie-Umweltmanagement (Hg.)

Technologie- und Klimawandel

Energie – Gebäude – Umwelt

leykam:

TECHNOLOGIE- UND KLIMAWANDEL

SCIENCE.RESEARCH.PANNONIA.
Fachhochschule Burgenland
Band 22

e·nova

INTERNATIONAL CONFERENCE

Technologie- und Klimawandel

Energie – Gebäude – Umwelt

26. und 27. November 2020

BAND 24

gefördert durch:
Bundesministerium für
Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

klimaaktiv

Leykam

Herausgeber und Verleger: Hildegard Gremmel-Simon
Fachhochschule Burgenland GmbH
Forschungs- und Studienzentrum Pinkafeld
Department Energie-Umweltmanagement
Steinamangerstraße 21
7423 Pinkafeld, Österreich
www.fh-burgenland.at

Organisationskomitee: Johann Binder
Ernst Blümel
Christian Heschl
Gernot Hanreich
Marcus Keding
Robert Kranner
Richard Krotil
Markus Puchegger
Werner Stutterecker
Christian Wartha

© by Leykam Buchverlagsgesellschaft m.b.H. Nfg. & Co KG, Graz 2020

Kein Titel des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotografie, Mikrofilm oder ein ande-res Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Die Beiträge der Autoren wurden unverändert in der zur Verfügung gestellten Fassung veröffentlicht.

Der internationale Kongress e·nova 2020 wurde aus Mitteln folgender Stelle gefördert:
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

ISBN 978-3-7011-0460-4

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. (FH) DI Ernst Blümel
Fachhochschule Burgenland GmbH, Department Energie-Umweltmanagement, Österreich

Mag.ª Hildegund Figl
IBO-Österr. Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Österreich

Prof. (FH) DI Dr. Gernot Hanreich (Vorsitz)
Fachhochschule Burgenland GmbH, Department Energie-Umweltmanagement, Österreich

DI Dr. Helmuth Kreiner
Technische Universität Graz, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie

DI Dr. Arne Ragoßnig
UTC Projekt- und Förderungsmanagement e.U., Österreich

DI Susanne Supper
Green Energy Lab, Cluster Manager, Österreich

Dr. Günter Wind
TB Wind, Ingenieurbüro für Physik, Präsident des Vereins pansol, Österreich

Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Franz Winter
Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik u. Techn. Biowissenschaften, Österreich

Vorwort

Kein Jahr wie jedes andere! Wie oft wurde diese Floskel in den letzten Monaten schon bemüht, aber sie trifft auch auf die heurige e·nova zu. Erstmalig in der über zwei Jahrzehnte langen Geschichte dieser internationalen Konferenz kann diese nicht als Präsenzveranstaltung durchgeführt werden, sondern muss online stattfinden. Die vor einem halben Jahr getroffene Entscheidung dazu hat sich angesichts der Tatsache, dass die e·nova 2020 nun mitten im Zeitraum des zweiten Lockdowns stattfindet, als richtig erwiesen.

Technologie- und Klimawandel: Energie – Gebäude – Umwelt ist der Titel der diesjährigen Konferenz. Als internationale wissenschaftliche Konferenz konzipiert, bietet die e-nova auch heuer wieder sowohl der wissenschaftlichen Gemeinschaft als auch berufsfeld-orientierten Fachleuten die Möglichkeit zur Diskussion und zum Austausch.

Wurde dem Klimawandel und Klimaschutz noch vor einem Jahr eine breite öffentliche und mediale Aufmerksamkeit zuteil, so wurde diese Thematik in den letzten Monaten von der Corona-Krise überschattet. Es handelt sich um zwei unterschiedliche Krisen, die jedoch gleichzeitig gelöst werden müssen. Maßnahmen gegen den Klimawandel und für den Klimaschutz können nicht auf das Ende der Corona-Krise warten. Genauso wenig, wie sich viele von uns vor einem Jahr die negativen Auswirkungen einer globalen Pandemie vorstellen konnten, können sich nach wie vor einige die Auswirkungen des Klimawandels nicht vorstellen. Die Bedrohung ist jedoch real und bereits spürbar. Die e·nova 2020 widmet sich dieser Thematik wieder in der gewohnten Breite und Tiefe mit themenspezifischen Vortragsblöcken.

Auch die FH Burgenland selbst hat im vorangegangenen Jahr wesentliche Weichenstellungen vorgenommen, um aktiv Maßnahmen gegen den Klimawandel zu setzen. Koordiniert werden diese Aktivitäten von einer eingerichteten Stabstelle für Nachhaltigkeit und Gemeinwohl. In der überarbeiteten Strategie 2030 sieht die FH Burgenland für sich eine besondere Verantwortung, an der Erreichung der Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen sowie an den Zielsetzungen des „Green Deal" der Europäischen Union in ihrem Einflussbereich mitzuwirken und sich insgesamt als „nachhaltige Organisation" weiterzuentwickeln.

Kein Jahr wie jedes andere war es für die FH Burgenland aber auch in einem positiven Sinne. Noch nie haben so viele Menschen an dieser Institution studiert, noch nie stand ein so breites Bildungsangebot zur Verfügung. Der neu eingerichtete Bachelorstudiengang Software Engineering und vernetzte Systeme hat am Standort Pinkafeld erfolgreich seinen Studienbetrieb aufgenommen. Mit dem Bachelorstudiengang Angewandte Elektronik und Photonik ist aktuell ein weiterer Studiengang für den Standort Pinkafeld in Entwicklung und wird seinen Studienbetrieb im Wintersemester 2021/2022 aufnehmen. Die im letzten Jahr vorgestellten Ausbauvorhaben schreiten plangemäß voran und werden das Bekenntnis der Fachhochschule Burgenland zur Nachhaltigkeit deutlich sichtbar machen.

Gernot Hanreich
Rektor

Foreword

No year like any other! Having been used many times in the past few months, this phrase also applies to this year's e-nova. For the first time in its more than two-decade-long history, this international conference cannot be held as a face-to-face event, but must take place online. The decision, taken six months ago, has proved to be the right one, given that e-nova 2020 is now taking place in the middle of the second lockdown period.

Technology and Climate Change: Energy - Buildings - Environment is the title of this year's conference. Conceived as an international scientific congress, e-nova will again offer the scientific community as well as professionals the opportunity for discussion and exchange.

Having received broad public and media attention just a year ago, climate protection and climate change have been overshadowed in recent months by the coronavirus pandemic. Although these are two different crises, they must be resolved at the same time. Measures against climate change and for climate protection cannot wait for the end of the coronavirus pandemic. Just as many of us could not envisage the negative impacts of a global pandemic a year ago, some of us still cannot imagine the effects of climate change. The threat, however, is real and already tangible. e-nova 2020 will again address this issue in the usual breadth and depth with thematic lecture blocks.

Last year, the University of Applied Sciences Burgenland also took significant steps to actively combat climate change. A staff unit for sustainability and the common good coordinates these activities. Thus, in the revised Strategy 2030, the University of Applied Sciences Burgenland emphasizes its responsibility to contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations as well as to the objectives of the "Green Deal" of the European Union within its sphere of influence and to further develop itself as a sustainable organisation.

However, for the University of Applied Sciences Burgenland it was no year like any other also in a positive sense. Never before have so many people studied at this institution, never before has such a broad range of educational opportunities been available. The newly established bachelor's degree programme in Software Engineering and Networked Systems has successfully started at the Pinkafeld campus. With the bachelor's degree programme in Applied Electronics and Photonics, a further degree programme is currently being developed for the Pinkafeld campus that will begin in the winter semester 2021/2022. The expansion projects presented last year are progressing according to plan and will be visible signs of the commitment of the University of Applied Sciences Burgenland to sustainability.

Gernot Hanreich
Rektor


green
energy
lab.at


Interreg
CENTRAL EUROPE
S3HubsinCE


NAREG
Interreg
Slovakia-Austria
European Regional Development Fund


PVadapt
This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 818342


HPT
HEAT PUMPS
55
ANNEX
34
AND STORAGES
ECES


IEA Forschungskooperation
im Rahmen von open4innovation


techFM4.0


Bundesministerium
Digitalisierung und
Wirtschaftsstandort


FFG
Forschung wirkt.


start
CIRCLES


SI-AT
Interreg
SLOWENIEN – ÖSTERREICH

Inhaltsverzeichnis

SESSION 2A: GREEN ENERGY LAB – ENERGIEGEMEINSCHAFTEN

Bewertung erneuerbarer Energiegemeinschaften
Nacht / 4ward Energy Research GmbH / AT 19

A Review on Local Energy Markets and Peer-to-Peer Energy Trading
Gnam, Pfeiffer, Rabelhofer, Maier / Forschung Burgenland / AT 27

Bewertung der Datenqualität von Energiezellen im Projekt R2EC
Weissenbacher, Nacht, Pratter, Schloffer / 4ward Energy Research GmbH / AT 33

SESSION 3A: GREEN ENERGY LAB-USER

Optimierung von Smart Home Energy Management Systemen mit Usability-Tests
Kremsner, Pfeiffer, Marhold / Forschung Burgenland / AT
Kummer / FH Burgenland GmbH / AT
Holper / EVN / AT 41

Finanzielle Auswirkungen eines Elektrofahrzeugs auf Haushalte mit PV Anlage
Sieberer, Strobel / FH Technikum Wien / AT 51

A typology of end users‘ willingness to share energy data
Pfeiffer, Maier, Kremsner / Forschung Burgenland / AT
Hatzl, Fleiß / University of Graz / AT 57

SESSION 4A: S3HUBSINCE

Connected by Materials – Application examples in Architecture and Design
Kunze, Mauersberger, Pagel / Fraunhofer Institute IWU /DE 69

SESSION 5A: GREEN ENERGY LAB – INTEGRIERTE ENERGIESYSTEME

Heat water storage pooling for RES-integration
Puchegger, Gnam, Jasek / Forschung Burgenland / AT 83

Großflächige Skalierungsansätze von Musterlösungen in der Vorzeigeregion Green Energy Lab
Kurz, Supper / Forschungsinitiative Green Energy Lab / AT
Lettner / TU-Wien, Energy Economics Group / AT
Fink / AEE INTEC / AT
Reinfeld / Energie Burgenland AG / AT 91

SESSION 6A: GREEN ENERGY LAB – WÄRMENETZE

A simulation study on the integration of wind in a district heating system.
Schindler, Gnam / Forschung Burgenland / AT
Nacht / 4ward Energy Research GmbH / AT 99

Effizienzsteigerung in Biomasseheizwerken mit Absorptionswärmepumpen
Jaunegg / Consulting – Engineering Ewald Jaunegg / AT 105

Flexibility as a main influencing parameter for a sustainable and renewable driven district heating sector
Kelz, Leusbrock, Binder, Schrammel / AEE INTEC / AT 113

SESSION 7A: WÄRME-, KÄLTE- UND ANERGIENETZE

Reduzierte Temperaturen in Wärmenetzen: Bewertung der energie-ökonomischen Effekte
Geyer / AIT Austrian Institute of Technology GmbH / AT
Krail / FH Burgenland / AT 123

SESSION 8A: SMART CONTROL AND ELECTRONIC CONVERSION TECHNOLOGIES

Einsatz von Energiespeichersystemen in Österreich im Jahr 2030
Leonhartsberger / Fachhochschule Technikum Wien / AT
Wychera / Energy Changes Projektentwicklung GmbH / AT
Buschmann, Skudelny / Klima- und Energiefonds / AT 131
Betrachtung der sommerlichen Überwärmung eines Bürogebäudes mittels dynamischer Gebäudesimulation unter Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien
Leindecker / FH OÖ Studienbetriebs GmbH / AT
Kugfarth / FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH / AT 139
Electrofuels – Synergie zur Reduktion des Saisonspeicherbedarfs
Wind / Wind – Ingenieurbüro für Physik / AT
Eder / Strateco OG / AT
Bußwald / akaryon GmbH / AT 147

SESSION 2B: DEKARBONISIERUNGSLÖSUNGEN FÜR QUARTIERE

Co-benefits of nearly zero energy buildings
Höfler, Weiß / AEE INTEC / AT 159
Net Zero Carbon Built Environment – Ein systemischer Ansatz zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen in der Entwurfsphase von Gebäuden
Scherz, Passer, Kreiner / TU Graz / AT 167
Cost and Greenhouse Gas optimization of urban districts using parametric calculations
Venus, Leusbrock, Mauthner / AEE INTEC / AT 177

SESSION 3B: KLIMAERWÄRMUNG UND GEBÄUDE

Klimadaten für die Gebäudesimulation
Steiner, Heisinger / IBO / AT 185
Energieeffizienz und Baudenkmal – Potentiale aus Sicht der Denkmalpflege
Seuschek, Hoche-Donaubauer / Bundesdenkmalamt, Graz, Österreich / AT 195
Gebäudebegrünung – Anforderungen und Einflussfaktoren auf Gesundheit und Behaglichkeit „Indoor“ und „Downtown“
Vondrus /CV-Consulting e.U. / AT
Erker / Slavonia Baubedarf GmbH / AT 201

SESSION 4B WÄRMEPUMPE/KÄLTETECHNIK

Aktuelle und zukünftige Entwicklungen von Kältemitteln für Raum- und Gewerbekühlung
Erös / Österreichische Gesellschaft der Kältetechnik (ÖGKT) / AT 209
Marktentwicklung und Trends der Wärmepumpe
Freimüller, Kopatsch, Kaineder / Wärmepumpe Austria / AT 217

SESSION 5B: TECHFM4.0 I

Digitales, Ergebnisorientiertes Techn. Facility Management
Fuhrmann / IBFM-Ingenieurbüro Facility Management / AT 231
Digital Twin with Multi-Input and Multi-Output optimisation for Air-Conditioning Systems
Heschl, Klanatsky, Wenig / FH Burgenland AT
Türk / Schrack Seconet AG / AT 237

SESSION 6B: TECHFM4.0 II

Ein Weg zur messdatengestützten bautechnischen Bauteilinspektion
Veitsberger, Markl / normconsult ZT GmbH / AT 245
IoT und Data Analytics zur Optimierung des Wiener Fernwärmenetzes
Lindmeier, Buchner / Wien Energie GmbH / AT 253

SESSION 7B: SMART BUILDING

Die Leuchte im smarten Gebäude – Kommunikation – Sensor – Service Provider
Weiss, Wenzl, Kröpfl / Joanneum Research Forschungsges.mbH/ AT 263
Soft Sensors for Perceived Human Comfort in Office Rooms Based on a Combination of Building Simulations and Data-Driven Modelling
Gursch, Schlager, Feichtinger / Know-Center GmbH / AT
Brandl / TU Graz / AT 271

SESSION 8B: SMART CONTROL AND ELECTRONIC CONVERSION TECHNOLOGIES

Linear Model Predictive Control of Small-Scale Furnaces
Fallmann, Böhler, Kozek / TU Wien / AT 281
The efficiency potential and application readiness of Wide Bandgap technology
Díaz Triana / Ecodesign company engineering & management consultancy GmbH / AT
Makoschitz / AIT Austrian Institute of Technology GmbH / AT 289
The Total Energy Model for Connected Devices
Díaz Triana / Ecodesign company engineering & management consultancy GmbH / AT 297

SESSION 2C: UMWELTTECHNIK

Der Kachelofen in der CFD-Simulation
Mantler, Schiffert, Haselböck / Österreichischer Kachelofenverband / AT
Schüssler, Riebenbauer, Stangl / ACAM Engineering GmbH / AT 307
Effizienzsteigerung einer Müllverbrennungsanlage durch Integration einer Rauchgaskondensation
Huemer / FH Burgenland / AT 313
Untersuchung eines Elektroabscheiderkonzepts zur Reduktion von Staubemissionen
Schittl, Jauschnik / Forschung Burgenland / AT
Pöttler / Herz Energietechnik GmbH / AT
Krail / FH Burgenland / AT 321

SESSION 3C: ABFALLENTSORGUNG - NEUE WEGE

Stoffflussanalyse einer thermochemischen Vorbehandlungsanlage
Peinsipp, Meirhofer / Forschung Burgenland / AT
Wartha, Kranner / FH Burgenland / AT 333
Ökologischer Vergleich unterschiedlicher Abfallentsorgungsprozesse in der Slowakei und Österreich mittels Ökobilanzierung
Wartha, Lang / FH Burgenland / AT 341
Abfallrecht-Herausforderungen für Holzgasanlagen – Vergaserrückstand Quo Vadis?
Ragossnig / RM Umweltkonsulenten ZT GmbH / AT 347

SESSION 4C: KREISLAUFWIRTSCHAFT

Das „Recht auf Reparatur“
Kuhlmann / FH Burgenland / AT 355
Die Gestaltung von temporären Unterkünften im Sinne einer Kreislaufwirtschaft
Scherhaufer, Zeilinger, Huber-Humer / Universität für Bodenkultur Wien / AT 361

SESSION 5C: KUNSTSTOFFRECYCLING

Technische Herausforderungen beim Kunststoffrecycling
Archodoulaki / TU Wien / AT 371
Für und Wider Kunststoffpfand als Maßnahme zur Erhöhung der Recyclingquote
Hauer / Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH / AT 375

SESSION 6C: KLIMAAKTIV GEBÄUDE - TECHNIK & PRAXISBEISPIELE

Smart Building & Mobility – Nutzung von E-Auto-Batterien als Energiespeicher für PV-Anlagen
Leindecker / FH OÖ Studienbetriebs GmbH / AT
Kugfarth / FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH / AT 381
Das Konzept der Intelligenzfähigkeit von Gebäuden - Entwicklungen und erste Umsetzungen
Knotzer / AEE INTEC / AT 389

SESSION 7C: BEWERTUNG

CO_2-neutrale Gebäude & Quartiere – Chancen, Herausforderungen & Herangehensweise am Beispiel des Technologiezentrums Seestadt
Schulz, Haugeneder / ATP sustain GmbH / AT 399
Treibhausgasemissionen in der Betonstahlerzeugung
Truger, Scherz, Passer / TU Graz / AT
Fohringer / Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH / AT 405
Virtual Green World und Fair Construction Code
Lunzer / Dr. Lunzer Energie und Umwelt e.U. / AT
Osztovits / Bee Green World Ltd / LI 415

SESSION 8C: HYGIENE - LUFT/WASSER

Ultra Feinstaub: Allgemein und Strategien zur Vermeidung in Bezug auf COVID 19
Braunegg / ConsultAIR GmbH / AT 425
Hygienezustand großer Klimaanlagen - ausgewählte Beispiele aus der Praxis
Twrdik, Tappler, Damberger / IBO Innenraumanalytik OG / AT 431

SESSION 2D: PV ADAPT

Using FusiX platform for Intelligent Energy Management Systems' development
Georgoutsos, Soulioti / EMTech GmbH / DE
Alifragkis, Livanos / EMTech Space P. C. / GR 453
An Integrated Framework for Building's Energy Man-agement based on Deep Learning
Meintanis, Monios, Livieris, Kampourakis, Fourakis, Kyriakoulis, Kokkorikos,
Chondronasios / Core-Innovation / GR 465
Complex glass façade modelling for Model Predictive Control of thermal loads: impact of the solar load identification on the state-space model accuracy.
Veynandt, Heschl, Klanatsky, Plank / FH Burgenland / AT 473

SESSION 5D: EFFICIENCY ENHANCEMENT OF ENERGY SYSTEMS

Experimental evaluation of wall heating and cooling system with thermally insulating core
Šimko, Krajčík, Petráš, Szabó / Slovak University of Technology Bratislava / SK 485
Designing a radiant wall cooling system with pipes located in inner plaster – first results
Junasová, Krajčík, Šimko / Slovak University of Technology Bratislava / SK
Šikula / Brno University of Technology / CZ 493
Recuperation of waste heat produced by public pools and low-enthalpy energy utilization
Predajnianska, Takács / Slovak University of Technology Bratislava / SK 501

Autor*innenverzeichnis 509

Session 2a

Green Energy Lab – Energiegemeinschaften

Bewertung erneuerbarer Energiegemeinschaften

Nacht / 4ward Energy Research GmbH / AT

A Review on Local Energy Markets and Peer-to-Peer Energy Trading

Gnam, Pfeiffer, Rabelhofer, Maier / Forschung Burgenland / AT

Bewertung der Datenqualität von Energiezellen im Projekt R2EC

Weissenbacher, Nacht, Pratter, Schloffer / 4ward Energy Research GmbH / AT

Bewertung erneuerbarer Energiegemeinschaften

Th. Nacht
4ward Energy Research GmbH, Graz, Österreich

ABSTRACT: The Clean Energy for all Europeans package made way for a new approach to allow small consumers to be an active part of the energy transition. The new Renewable Energy Directive (RED II) allows private customers, SME and public authorities to participate in Renewable Energy Communities and enables them for instance to exchange renewable electricity over the public grid without an electricity supplier as intermediary. The corresponding federal laws are currently in the making.

To promote renewable energy communities in Austria certain reductions on grid fees as well as an exclusion from certain taxes and fees will apply for the energy shared within the community. This yields a certain economic potential for realising energy communities, nevertheless there is still much uncertainty which needs to be addressed. The two research projects LEC Steyr and SchaltWerk2030 both funded by the Klima- und Energiefonds in the program "Smart Cities Demo" focus on that issue by analysing different organisational and tariff models for renewable energy communities.

For that purpose, an energy community model was developed which defines how the energy is shared amongst the members and how the legal entity of the energy community and the members generate an economic benefit. For calculating the distribution of the renewable generation within the community a simulation model was developed which results are used within a complex economic evaluation model facilitating the net present value approach. Additionally, a delta-tariff-approach was developed which settles the community internal tariffs.

For evaluation purpose six different renewable energy communities were analysed, two rather homogenous communities existing only of households and 4 heterogenous communities. The results indicated that the homogenous community would result in a more even distribution of the economic advantages amongst the members, but will due to the setup of only households and low overall community energy usage only result in very limited financial benefits. The other communities yielded more promising results but had a very heterogenous distribution of the financial benefits amongst the members. The results indicate that the main influencing factor for the financial success of the energy community approach is the amount of energy shared within the community. Other influencing factors are whether the legal entity of energy community owns the generation capacity. The height of the delta-tariff shifts the financial benefits between the members and the legal entity of the community. Furthermore, the delta-tariff-approach has the potential to shift the benefits between the members generating electricity and the ones using it.

1. EINLEITUNG

Die Europäische Union hat sich im „Clean Energy for all Europeans Package" das Ziel gesetzt bis zu 32 % des Energiebedarfs bis 2030 durch erneuerbare Energieträger zu decken (Europäische Kommission 2017). Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein starker Ausbau der erneuerbaren Energieträger auf allen Ebenen notwendig. Dazu ist die aktive Einbindung der Nutzer*innen notwendig. Ein Teil dieser aktiven Einbindung der Verbraucher*innen ist die Möglichkeit zur Schaffung von erneuerbaren Energiegemeinschaften (EEG). EEG sollen im Erneuerbaren Ausbaugesetz (EAG), welches Anfang 2021 in Kraft treten soll, verankert sein. Mitglieder in einer erneuerbaren Energiegemeinschaft sollen erneuerbaren Strom miteinander ohne Einbindung eines Stromlieferanten und über das öffentliche Netz tauschen können - vorerst ist nur Strom betroffen, in weiterer Folge soll jedoch die Möglichkeit auf den Tausch aller erneuerbaren Energieträger geboten werden. Für die innergemeinschaftlich bezogenen Energiemengen sollen für die Verbraucher*innen

reduzierte Netznutzung- und Netzverlustentgelt anfallen, weiters sollen die Elektrizitätsabgabe und der Ökostromförderbeitrag entfallen. Energiegemeinschaften werden eine eigene Rechtpersönlichkeit aufweisen müssen, diese wird im weiteren Verlauf dieses Beitrags als Trägerorganisation bezeichnet, weiters ist der Mitgliederkreis auf Privatpersonen, KMU und lokale Behörden beschränkt. Zusätzlich werden zwei unterschiedliche Größenkategorien von Energiegemeinschaften von Relevanz wein, die regionale EEG (Netzebenen 5/6/7) und die lokale EEG (Netzebenen 6/7) (Hodasz 2020).

Da es zum aktuellen Zeitpunkt (September 2020) noch kein Gesetz zu Energiegemeinschaften gibt und bislang auch keine Energiegemeinschaften realisiert wurden, herrscht eine Unsicherheit hinsichtlich der Umsetzbarkeit dieses Modells und der Auswirkungen für die Mitglieder und die Trägerorganisation. Diese Unsicherheit bedingt den Forschungsbedarf in den beiden Projekten LEC Steyr und SchaltWERK 2030. Beide Projekte werden aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Smart Cities Demo“ durchgeführt. Hierbei stellen sich vor allem Fragen der Wirtschaftlichkeit sowohl für die Trägerorganisation als auch deren Mitglieder.

2. METHODE

Für die Verteilung der Energie innerhalb der Energiegemeinschaft wurde anhand der verfügbaren Informationen ein Schema für den Energieaustausch entwickelt. Innerhalb eines 15 Minuten-Zeitfensters werden die Überschüsse der Mitglieder (Erzeuger oder Prosumer) in einen gemeinsamen Pool eigespeist. Die Trägerorganisation übernimmt die gesamten Überschüsse. In weiterer Folge erfolgt die Verteilung an die verbrauchenden Mitglieder anhand eines Verteilschlüssels in Analogie zu den gemeinschaftlichen Erzeugungsanlagen gemäß ElWOG §16a. Verbleibende Überschüsse werden durch die Trägerorganisation der Energiegemeinschaft zu netzüblichen Konditionen vermarktet. Dieses Modell setzt voraus, dass die Betreiber der erneuerbaren Erzeugungsanlagen, so es nicht die Trägerorganisation selbst ist, ihr Recht zur Nutzung von Überschüssen an die Trägerorganisation der Energiegemeinschaft abtreten.

Aufbauend auf diesem Modell wurde ein Simulationsmodell für die Berechnung der Energieverteilung in der EEG in Python entwickelt. In dem vorliegenden Modell wurden die Lastprofile (15 Minuten, gemessen oder synthetisch) der einzelnen Energiegemeinschaftsmitglieder berücksichtigt, etwaige Lastverschiebungspotenziale wurden vernachlässigt. Für die Erzeugungslastgänge der PV-Anlagen wurden gemessen Profile von Vergleichsanlagen herangezogen. Als Simulationsdauer wurde ein Jahr gewählt.

Tab. 1: Anwendungsfälle für die Simulation der Energiegemeinschaften

Anwendungsfall	**Beschreibung**
Haushalts-gemeinschaft 1	10 Haushalte (Summenverbrauch: 31 MWh) 12,5 kWp PV (neue Anlage der Trägerorganisation)
Haushalts-gemeinschaft 2	5 Haushalte als Verbraucher (Summenverbrauch: 12 MWh) 5 Haushalte (Summenverbr.: 19 MWh) jeweils 5 kWp PV (Bestand)
Gemischte Gemeinschaft 1	5 Haushalte (Summenverbrauch: 16 MWh) 1 Seniorenheim (Verbrauch: 194 MWh) 1 Schule (Verbrauch: 112 MWh) 150 kWp PV (neue Anlage der Trägerorganisation)
Gemischte Gemeinschaft 2	5 Haushalte (Summenverbrauch: 16 MWh) 1 Seniorenheim (Verbrauch: 194 MWh) 1 Schule (Verbrauch: 112 MWh) und 70 kWp PV (Bestand) 150 kWp PV (neue Anlage der Trägerorganisation)
Gemischte Gemeinschaft 3	1 Gemeindegebäude (Verbrauch: 25.000 kWh) und 125 kWp PV (Bestand) 4 Gewerbe (Summenverbrauch: 263.000 kWh) 22 Wohnungen (Summenverbrauch: 63.800 kWh)

Die Erzeugung der erneuerbaren Erzeugungsanlagen können in einem ersten Schritt für die Deckung des Eigenbedarfs herangezogen werden. Die resultierenden Überschüsse stehen für eine weitere Verwendung zur Verfügung.

$$VS(N,t) = \frac{P_{Last}(N,t)}{\sum_{N=1}^{\#Nutzer} \frac{P_{Last}(N,t)}{4}} \quad (1)$$

N	Nutzer*in der §16a Anlage
VS	Verteilschlüssel

Aufbauend auf dem Modell für die Energieflüsse in der Energiegemeinschaft wurde ein Modell für die Zahlungsflüsse der Trägerorganisation erstellt. Für die Vergütung der Energieflüsse in und aus dem Energiepool der Energiegemeinschaft wurde ein Delta-Tarif-Ansatz angewendet. Dieser sieht vor, dass die Einspeisung in die Energiegemeinschaft mit einem höheren Tarif vergütet wird als eine Einspeisung in das öffentliche Netz (Gleichung 2). Die Entnahme aus dem Energiepool der Energiegemeinschaft hingegen erfolgt mit einem geringeren Energietarif als ein Bezug aus dem öffentlichen Netz (Gleichung 3).

$$p_{EEGe_V} = p_V - \Delta p_{Tarif_V} \quad (2)$$

$$p_{EEGe_E} = p_E + \Delta p_{Tarif_E} \quad (3)$$

p_{EEGeV}	Bezugspreis für Strom aus der EEG in cent/kWh
p_V	Energiepreis für den Strombezug aus dem öffentlichen Netz in cent/kWh
Δp_{TarifV}	Delta-Tarif für den Verbrauch in cent/kWh
p_{EEGeE}	Einspeisetarif für die Einspeisung in die EEG in cent/kWh
p_E	Einspeisetarif für die Einspeisung in das öffentliche Netz in cent/kWh
Δp_{TarifE}	Delta-Tarif für die Einspeisung in cent/kWh

Um den Vergleich unterschiedlicher Rechtsformen zu ermöglichen und die Einnahmen, Kosten und Steuern richtig abzubilden, wurde ein detailliertes Wirtschaftlichkeitsmodell entwickelt. Dieses berücksichtigt laufende Kosten, Zinsen für Investitionen, Abschreibungen etc. Für das Mitgliedermanagement und die gesamte gemeinschaftsinterne Verrechnung wurden keine Kosten angenommen (Eigenleistung der EEG). Für die Mitglieder der Energiegemeinschaft wurde angenommen, dass monatliche Kosten von 50 cent pro Zählpunkt als zusätzliche Netzkosten (Analogie zu ElWOG §16a) entstehen. Die weiteren getroffenen wirtschaftlichen Annahmen sind in Tab. 2 dargestellt. Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit erfolgte anhand der Kapitalwertmethode. Für die Strompreise der Kund*innen wurden die mittleren Strompreise laut Strompreismonitor der e-Control herangezogen (e-Control 2020a). Die Netzkosten, Steuern und Abgaben entsprechen den für die Versorgungsgebiete üblichen Werten (Netz Oberösterreich 2020b; e-Control 2020b; Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft 2018; Netz Oberösterreich 2020c; Netz Oberösterreich 2020a).

Tab. 2: Wirtschaftliche Parameter für die Simulationen

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Invest.-kosten PV	900 €/kWp (netto)	Betriebskosten PV	0.5 % Invest. p.a.
WR-Tausch	15 Jahre	Ertragsminderung	0,5 % p.a.
Rechtsform EEG	Verein	Vorsteuerabzug	Ja
Kosten Gründung	€ 46	Lauf. Kosten EEG	€ 180
Preissteigerung	0,5 %	Inflationsrate	1,6 %
Fremdfinanzierung	100 % bei Neubau	Effektiver Zinssatz	2,5 %
Interner Zinssatz	2 %	Überschusstarif	4,5 cent/kWh

3. ERGEBNISSE

Um die wirtschaftlichen Ergebnisse in Relation zu den Energiemengen der Erzeugung zu stellen, wird in Abb. 1 die Aufteilung der erneuerbaren Erzeugung auf Eigenverbrauch, Verbrauch in der Gemeinschaft und Netzeinspeisung dargestellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Energiegemeinschaften sehr unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich ihrer Eigenverbrauchsquoten aber auch hinsichtlich der innergemeinschaftlichen Verbräuche aufweisen.

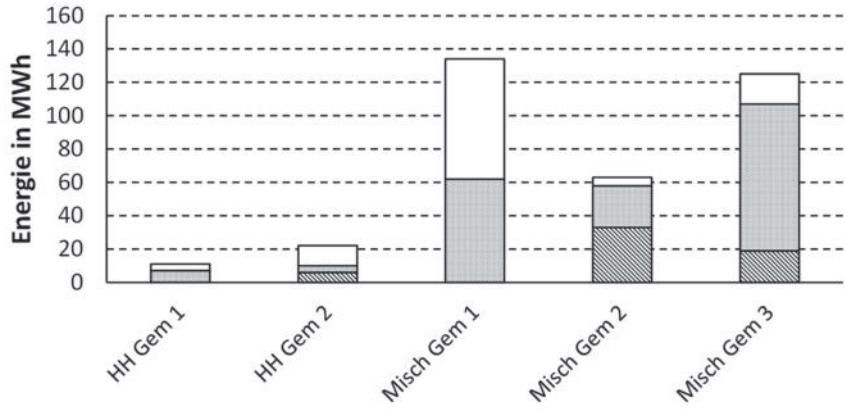


Abb. 1: Aufteilung der Energieerzeugung in den einzelnen betrachteten Gemeinschaften

Tab. 3 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der Wirtschaftlichkeit für die Trägerorganisation. Dargestellt sind die Kapitalwerte nach einer Laufzeit von 25 Jahren in Abhängigkeit der gewählten Delta-Tarife (Einspeisung-Delta = Entnahme-Delta). Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein wirtschaftlicher Betrieb der Energiegemeinschaften nicht in jedem Fall gegeben ist, da in einigen der dargestellten Fälle sich negative Kapitalwerte ergeben.

Tab. 3: Kapitalwert in € aus dem Betrieb der EEG nach einer Laufzeit von 25 Jahren

Energiegemeinschaft	Delta Tarife 0,5 cent/kWh	Delta Tarife 1 cent/kWh	Delta Tarife 2 cent/kWh	Delta Tarife 3 cent /kWh
HH-Gemeinschaft 1	4.200	3.600	2.500	1.400
HH-Gemeinschaft 2	134	- 1.750	- 5.700	- 9.600
Gem. Gemeinschaft 1	46.000	39.000	26.000	13.000
Gem. Gemeinschaft 2	13.000	9.000	1.000	- 9.400
Gem. Gemeinschaft 3	76.600	60.000	29.000	- 3.500

Tab. 4 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der Mehrkosten (negatives Vorzeichen) und der Einsparungen (positives Vorzeichen) der Energiegemeinschaftsmitglieder durch die Einspeisung und Entnahme aus der Energiegemeinschaft. Auffällig ist, dass die Bandbreite der Ergebnisse für homogene Energiegemeinschaften deutlich schmäler ist als für heterogene Energiegemeinschaften. Es ist auch nicht sichergestellt, dass alle Mitglieder einen wirtschaftlichen Vorteil aus der Teilnahme in der Energiegemeinschaft haben.

Tab. 4: Bandbreite der Einsparungen (+) bzw. Mehrkosten (-) der Energiegemeinschaftsmitglieder

Energiegemeinschaft	Delta Tarife 0,5 cent/kWh 0,5 cent/kWh (€/a)	Delta Tarife 1 cent/kWh 1 cent/kWh (€/a)	Delta Tarife 2 cent /kWh 2 cent /kWh (€/a)	Delta Tarife 3 cent /kWh 3 cent /kWh (€/a)
HH-Gemeinschaft 1	-4 bis 3	-3 bis 13	0 bis 26	3 bis 50
HH-Gemeinschaft 2	-4 bis 14	-2 bis 34	1 bis 73	5 bis 113
Gem. Gemeinschaft 1	-4 bis 318	-3 bis 641	1 bis 1289	4 bis 1936
Gem. Gemeinschaft 2	-5 bis 146	-5 bis 297	-3 bis 600	-2 bis 838
Gem. Gemeinschaft 3	-2 bis 175	2 bis 357	11 bis 719	19 bis 1100

4. ERKENNTNISSE

Das wirtschaftliche Potenzial von EEG hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Der wesentlichste Faktor für die Gesamtwirtschaftlichkeit der Energiegemeinschaft ist die innergemeinschaftlich genutzte Energiemenge. Diese Erkenntnis ist naheliegend, da sämtliche Tarifreduktionen sowie Reduktionen von Steuern und Abgaben an die Energiemenge gekoppelt sind. Das lässt den Schluss zu, dass Energiegemeinschaften mit wenigen Verbrauchern und geringem Strombezug aus wirtschaftlicher Sicht nicht attraktiv sind. Dieser Umstand birgt ein gewisses Risiko, wenn es zu einer Änderung der Netztarif-Struktur kommt, bspw. sollte von arbeitsabhängigen Netztarifen auf leistungsbasierte Tarife gewechselt werden (e-Control 2020c, 1). In diesem Fall müsste eine Anpassung des Energiegemeinschaftsmodells erfolgen.

Die Verteilung der wirtschaftlichen Vorteile zwischen Trägerorganisation und Mitgliedern wird über die Höhe des Delta-Tarifs bestimmt. Desto höher der Delta-Tarif festgelegt wird, desto höher sind die Einsparungen der Mitglieder. In diesem Zusammenhang spielt auch der Energietarif der einzelnen Mitglieder eine entscheidende Rolle. Dieser bestimmt neben dem Delta-Tarif das Grundeinsparungspotenzial. Eine weitere Stellgröße ist das Verhältnis von Einspeise-Delta-Tarif zu Entnahme-Delta-Tarif, das eine Verlagerung der Einsparungspotenziale zwischen Erzeugern und Verbrauchern erreichen würde. Dieses Verhältnis wurde im Rahmen dieser Arbeit noch nicht untersucht, soll aber in weiterer Folge betrachtet werden.

Aus Sicht der Trägerorganisation spielt vor allem der Umstand ob die erneuerbare Erzeugungsanlage im eigenen Eigentum ist, eine wesentliche Rolle. Wird die Anlage durch die EEG betrieben, wirkt sich das

positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Trägerorganisation aus. Das ist damit zu begründen, dass die Energie nicht von Mitgliedern zugekauft werden muss, dafür sind die Investitionskosten bzw. die aus der Investition resultierenden Kreditkosten zu kompensieren. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass dieses Ergebnis aus den angenommenen Konditionen für die Errichtung der PV-Anlage resultieren. Welche Sensitivitäten sich in diesem Zusammenhang ergeben ist noch zu beforschen.

Die Analysen haben gezeigt, dass bei Verwendung des dynamischen Verteilschlüssels ein großer Unterschied bei den Einsparungen der einzelnen Mitglieder resultiert. Das liegt daran, dass jene Mitglieder, die einen größeren Verbrauch aufweisen, auch einen höheren Anteil der erzeugten Energie zugewiesen bekommen. Das ist gerade bei inhomogenen Energiegemeinschaften problematisch. Hier wäre ein alternativer Verteilschlüssel notwendig, um die Einsparungsmöglichkeiten kleinerer Verbraucher zu erhöhen. Das Thema der fairen Verteilung der Einsparungen auf die Energiegemeinschaftsmitglieder wird ein Kernpunkt bei der Definition geeigneter innergemeinschaftlicher Modelle sein. Das hier untersuchte Modell eignet sich jedenfalls nur sehr bedingt für die Anwendung in heterogenen Energiegemeinschaften.

5. FAZIT

In dieser Arbeit wurde die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher erneuerbarer Energiegemeinschaften beleuchtet. Dafür war die Entwicklung des Energiegemeinschaftsmodells auf Basis der vorhandenen Informationen zur Rechtslage notwendig. Zur weiteren Validierung des Modells und unterschiedlicher Energiegemeinschaften wurde ein Simulationsmodell zur Bestimmung der durch die Mitglieder der Gemeinschaft bezogenen Energiemengen erstellt. Es wurde ein dynamischer Verteilschlüssel für die Energie festgelegt, der sich als nicht ideal für heterogene Energiegemeinschaften herausgestellt hat. Aufbauend auf den Ergebnissen des Simulationsmodells wurde eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Die detaillierte Berechnung war zur korrekten Abbildung der Rechtsform, angenommen wurde ein Verein, in Hinblick auf die laufenden Kosten sowie Steuern notwendig.

Die Auswertungen haben ergebene, dass der Betrieb einer Energiegemeinschaft nicht zwingend für alle Beteiligten aus wirtschaftlicher Sicht von Vorteil sein muss. Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit muss zwischen der Trägerorganisation der Energiegemeinschaft und den Mitgliedern der Energiegemeinschaft unterschieden werden. Als wesentliche Faktoren für den wirtschaftlichen Erfolg von Energiegemeinschaften wurde die Menge an innergemeinschaftlich bezogener Energie identifiziert. Aus Sicht der Trägerorganisation ist es von Vorteil, eigene Erzeugungsanlagen zu betreiben und die Energiegemeinschaftsmitglieder damit zu beliefern. Aus Sicht der Mitglieder spielt, wie bereits erwähnt der Verteilschlüssel eine wesentliche Rolle. Der entwickelte Delta-Tarif-Ansatz für die Energiegemeinschaften hat sich insofern als gute Möglichkeit zur Abrechnung der innergemeinschaftlichen Energiebezüge herausgestellt, als dass man damit die Verlagerung des wirtschaftlichen Vorteils zwischen Erzeugern und Verbraucher und der Trägerorganisation und den Mitgliedern gut einstellen kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Modell der erneuerbaren Energiegemeinschaften sich für „kleine“ Energiegemeinschaften nicht auszahlt, der resultierende Aufwand führt nur zu unwesentlichen Einsparungen, was die Umsetzung in Frage stellt. Bei „größeren“ Energiegemeinschaften, stellt das Modell einen interessanten Ansatz dar, da hier das Potenzial für Einsparungen gegeben ist und damit auch die Kosten für das Aufsetzen und den Betrieb der Energiegemeinschaften gedeckt werden können.

Inwieweit sich die Ausweitung der Energiegemeinschaft auf die NE 5/6/7 auswirkt, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich diese Erweiterung nur dann auszahlt, wenn dadurch eine erheblich größere Anzahl an Mitglieder eingebunden werden können.

LITERATUR

Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft. (2018) Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft über die Bestimmung des Ökostromförderbeitrags

für das Kalenderjahr 2018. Wien. https://www.oem-ag.at/fileadmin/user_upload/Dokumente/gesetze/OekostromfoerderbeitragsVO_2018.pdf.

e-Control (2020a) e-Control: Preisentwicklung. Preisentwicklung. 2020. https://www.e-control.at/statistik/strom/marktstatistik/preisentwicklung.

e-Control (2020b) „e-Control: Steuern". Steuern & Abgaben. 1. Januar 2020. https://www.e-control.at/industrie/strom/strompreis/steuern.

e-Control (2020c). Weiterentwicklung der Netzentgeltstruktur für den Strom-Netzbereich. https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/Tarife_2-1_clean.pdf/42b82644-65d8-8d7a-f48f-62211259a36e?t=1592889197532.

Europäische Kommission (2017) „Clean Energy for All Europeans Package". 20. Oktober 2017 https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en.

European Union (2018) Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.

Hodasz M. (2020) Mein-Dein-Unser Sonnenstrom: Energiegemeinschaften. Vortrag gehalten auf der PV-Branchentreff, Wien, Juni 25.

Netz Oberösterreich (2020a) Preisblatt - Messentgelte. https://www.netzooe.at/Messentgelte-2.pdf?ch=axFY9Ns-&:hp=3;2;de.

Netz Oberösterreich (2020b) Preisblatt - Netznutzungs- und Netzverlustentgelte. https://www.netzooe.at/Netznutzung-u-Netzverlustentgelte.pdf?ch=qPWwJiJk&:hp=3;2;de.

Netz Oberösterreich (2020c) Preisblatt - Steuern und Abgaben. https://www.netzooe.at/Preisblatt-Steuern-und-Abgaben.pdf?ch=0QElZF-e&:hp=3;2;de.

Kontaktdaten:
Thomas Nacht
Reininghausstraße 13a
8020 Graz
Email: thomas.nacht@4wardenergy.at

A Review on Local Energy Markets and Peer-to-Peer Energy Trading

L. Gnam, C. Pfeiffer, M. Rabelhofer, C. Maier
Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: Traditional energy systems rely on large centralized energy producers (e.g., power stations) and many distributed passive consumers. However, to successfully tackle the challenge of transforming these energy systems into more sustainable and climate-friendly systems an increasing number of renewable energy systems (RESs) are included into the existing power systems. Furthermore, the installation of RESs, for example, photovoltaics, change more and more passive consumers into actively participating prosumers. Subsequently, this poses new challenges for the existing systems like the need for additional monitoring infrastructure or adapted forecasting methods. To overcome these challenges several different strategies have been implemented resulting in so-called local energy markets (LEMs). LEMs present the core of a consumer-centric system providing a platform to exchange energy between the different participants of a so-called local energy community (LEC). Furthermore, additional services from the individual participants in a LEC can be shared with others, such as energy storage systems to provide flexibility inside a LEC. Additionally, LEMs enable the individual market participants to aggregate their RESs as well as flexibility options in order to provide services for the regional or national market. In order to meet the demands of LEMs and LECs a decentralized and automated bottom-up approach is required in contrast to the traditional top-down centralized energy systems. So-called Peer-to-Peer (P2P) and community-based energy trading approaches allow, for example, for a direct consumption of locally produced surplus renewable energy from neighbors. Therefore, this work presents an overview on the state-of-the art of LEMs/LECs as well as P2P- and community trading approaches and methods. As in general, a LEM consists of market design, business model development, control architecture, ICT infrastructure, a particular focus of the study is on the specifically implemented market designs and their consequences. Additionally, an overview is given on the advantages and disadvantages of different LEM/LEC design and which questions remain open and thus require further research in the future.

1. INTRODUCTION

Traditional top-down centralized energy systems are undergoing a rapid transformation due to the increasing number of renewable energy resources (RESs) (e.g., photovoltaics and wind) being installed. Subsequently, the passive consumers become actively participating prosumers in the energy system. A prosumer usually has three different choices for using the locally produced energy: 1) self-consumption, 2) feeding into the grid at a fixed tariff, and 3) storing energy using different technologies. However, prosumers cannot actively participate in the wholesale market. This is due to their unreliability and inefficiency regarding energy production and consumption (Mengelkamp et al. 2017). Local Energy Markets (LEMs) and in particular Local Energy Communities (LECs) enable the integration of individual prosumers with highly fluctuating renewable energy generation into the existing energy systems.

However, novel strategies and methods regarding the trading of renewable energy have to be devised to create a market environment with potentially lower costs for locally produced energy. Hence, the local consumers benefit from lower energy prices. In addition, in a LEC the actively participating prosumers can obtain extra revenues for selling their energy locally using the existing energy grid, because they are able to directly sell their surplus to individual consumers instead of selling at a fixed feed-in tariff. Following this approach both, the prosumer and the consumer, benefit by higher selling and lower buying prices, respectively (Lilla et al. 2020). Such a market design is, for example, realized in so-called Peer-to-Peer (P2P)

trading approaches (Alam et al. 2017). Additionally, prosumers and consumers in a LEC can be aggregated and eventually providing additional flexibilities for the overall energy system (Jin et al. 2020).

All new approaches as LECs and P2P trading rely on a structural change of the existing energy systems. A fact that is also true for the underlying technologies, like market and trading platforms, or smart meters (as accurate price signals are highly important for P2P trading). Consequently, besides the structural change also adaptations and new approaches on the technological level are necessary. Digitization plays a major role in pursuing the goal of a successful transformation to an intelligent and decentralized energy system. This can be observed, for example, by the advent of more and more blockchain-based LEMs and LECs (Mengelkamp et al. 2018). Furthermore, smart meters offer the possibility to provide near real-time data for both, demand and production. This is key information required for determining price signals, which serve as basis for most local or community based energy trading platforms (Van Aubel & Poll 2019).

This work is organized as follows: Section 2 is dedicated to the definition of LEMs and LECs as well as to P2P trading and community trading. This is followed in Section 3 by a discussion of different market designs and potentially enabling technologies. Finally, the study is concluded in Section 4.

2. LOCAL ENERGY MARKETS AND COMMUNITIES

To overcome some of the challenges that traditional energy systems are facing nowadays (e.g., high penetration of RESs with volatile production characteristics), the concept of LEMs was introduced. A LEM usually consists of numerous consumers and prosumers, but can also include different industrial market participants. The latter can, for example, provide their surplus energy for the consumers in addition to the local production of the prosumers (Mengelkamp et al. 2017).

The European Union (EU) proposed a definition of a specific type of LEM, namely LEC. One key aspect of a LEC is the collective ownership or control of assets (e.g., photovoltaic systems) as well as an energy management system, which enables the interaction of the LEC as a single entity with other entities of the existing energy system. However, the proposed EU laws still have to be implemented into national legislation (European Commission 2019).

Although LEMs and LECs are comprised of significantly fewer market participants than a traditional centralized energy system, several challenges have to be tackled to guarantee a safe operation of the local energy system. These challenges include the balancing of demand and supply in a LEM or LEC, obeying distribution constraints, manage congestions and providing incentives for the participants to join, stay, and invest in the local market (Jin et al. 2020).

A key aspect in the new decentralized energy systems is the concept of P2P trading. A major advantage of the P2P concept is the fact that market participants, i.e., prosumers and consumers, are able to buy and sell energy locally to other consumers. On the one hand, this is particularly attractive as the need for a central authority is circumvented yielding higher revenues for the prosumers selling their surplus energy to local consumers. The latter, on the other hand, benefit from lower energy costs in a LEM or LEC compared to the electricity prices from the "outside" grid. However, the P2P trading leaves prosumers in a weak position when negotiating energy prices with large stakeholders (Zia et al. 2020).

3. MARKET DESIGNS AND TECHNOLOGICAL/SOCIAL ASPECTS

Economic benefit seems to be the main motivator to participate in these new forms of energy trading (Mengelkamp et al. 2019, Pumphrey et al. 2020). Other reasons are related to gaining independence and protecting the environment (Dukovska et al. 2018). Participants in a P2P energy market are on the one hand buyers, who demand energy from local generators, and on the other hand, sellers, who generate own energy and sell the produced surplus in the local market (Khorasany et al. 2018). The heterogeneity of preferences need to be considered - those can differ, but also overlap (Dukovska et al. 2018). Additional participants are independent mediators, like, for example, a Distributed System Operator (DSO), who delivers electricity to

customers in a cost-effective and sustainable way and who is responsible for congestion management, voltage control, loss minimization, and planning. There can also be a Balance Responsible Party (BRP), who balances consumption and supply and who is responsible for imbalances and deviation of prognoses. Aggregators are service providers, which manage groups of consumers and connects them with prosumers. Finally, a Local Flexibility Market Operator, who could be an energy supplier or has an independent role, provides the trading platform and runs the market (Jin et al. 2020). Fig. 1 shows an exemplary LEM (or LEC) consisting of a DSO, a BRP, and several aggregators who manage prosumers and consumers. The LEM is utilized as a competitive trading platform for trading energy and flexibility. For example, the DSO is responsible for voltage control and congestion management whereas the BRP aims at reducing imbalanced energy volumes thus reducing its imbalancing charges. The aggregators sell their flexibility earning profits (Jin et al. 2020).

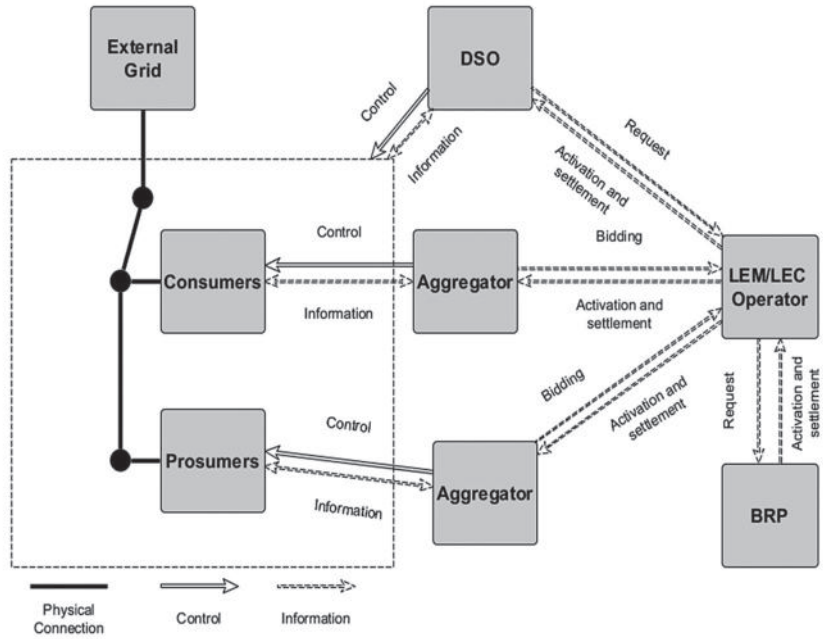


Fig. 1: An overview of a possible design for a LEM or LEC (adopted from Jin et al. 2020).

In literature, two different methods to establish a P2P energy market are mentioned: A centralized market design and a distributed/decentralized market design. While centralized markets are managed by an independent coordinator/mediator, in decentralized markets the interaction happens directly among the peers (Khorasany et al. 2018; Jin et al. 2020). The implementation of a centralized market design is less complicated compared to the decentralized design, as it is similar to conventional power systems and the control lies with a single central aggregator. However, it is more difficult to scale up such a model in case more participants enter the market at a later stage (Zia et al. 2020). In contrast to decentralized markets, in which appearing problems are divided into sub-problems which are easier to identify and solve, communication systems in centralized markets are not able to cope with the computing and communication requirements in the event of a market enlargement (Khorasany et al. 2018). Furthermore, transparency and reliability of centralized markets are lower, whereas computational and communication cost are higher than in a decentralized market. Another factor in favour of the decentralized market is the high customer centricity as different objectives based on consumers' preferences can be addressed (Zia et al. 2020). However, a de-

centralized market requires a sophisticated architecture with several market layers (e.g., user layer, network layer, system operator layer, market layer, distributed ledger layer, communication layer, and regulation layer) and a two-way communication system to ensure accurate communication flows among the participants, which makes its establishment more complex (Zia et al. 2020, Khorasany et al. 2018). Another issue that only occurs in decentralized markets, due to the lack of a mediator, is a competition among market participants that occasionally results in price peaks (Jin et al. 2020). Tab. 1 summarizes these differences.

Tab. 1: Comparison of centralized and distributed/decentralized markets

Market design	Centralized	Distributed/decentralized
Management	Independent coordinator	Directly among peers
Complexity	Similar to conventional power systems	Higher than conventional power systems
Market implementation	Less complex	More complex
Control	Single central aggregator	No aggregators required
Market scalability	Low	High
Transparency	Low	High
Reliability	Low	High
Computational cost	High	Low
Communication cost	High	Low
Market objectives	Operator-centric	Customer-centric
Communication system	One-way	Two-way

A compromise between centralized and fully decentralized market design is a partially decentralized market, in which the control is divided among more than one aggregator, which naturally leads to a competition among them and additionally among different power producers (Zia et al. 2020). To overcome issues concerning the competition or communication failure among participants, both in centralized and decentralized markets, Khorasany et al. (2019) refers to market segmentation based on participants' preferences, which could concern, for instance, economic benefits or environmental protection aspects. By segmentation of consumers and prosumers, communities can be created under the control of a community manager. This has the advantage that the single members are more involved in the LEM/LEC due to a social cooperation, resulting in the maximization of local energy sharing, prediction of participants' behaviour is possible and therefore a better handling with demand peaks and finally, customer centricity can be set to an even higher level (Zia et al. 2020).

Another distinguishing factor of energy markets is the timescale of energy transactions. These can be processed either in a day-ahead timescale (1 hour intervals) or in real-time (5 to 15 minutes intervals). Real-time markets may provide a lower average price of energy; however, real-time processing leads to a higher volatility of prices (Dowling et al., 2017). This could cause uncertainty for consumers. According to Alam et al. (2017) involatile prices in real-time markets lead to an imbalance of demand and supply as naturally the demand for energy increases if the price is low.

4. CONCLUSION

With the advent of the modern concepts of LECs and LEMs new opportunities arise while pursuing the path to sustainable and renewable energy systems. Especially the role of the individual market participants gains more and more importance as with the possibility of P2P energy trading the classical passive consumer can now actively participate in the energy trading system. Furthermore, the ongoing transformation of

more and more of these passive consumers into active prosumers yields additional opportunities and challenges for the existing infrastructure. On the one hand, additional revenues can be obtained by prosumers together with an active participation in the course of energy transition. On the other hand, for example, a DSO has to overcome new difficulties with the increasing penetration of RESs in the existing systems, by monitoring and balancing the volatile energy production (e.g., from photovoltaics or wind turbines). However, LEMs and LECs are a key development for achieving the goal of climate friendly energy systems and thus will play a major part in the short- and long-term future.

REFERENCES

Alam M. R., St-Hilaire M., Kunz T. (2017). An optimal P2P energy trading model for smart homes in the smart grid. In: Energy Efficiency, 10(6), p. 1475-1493.

Dowling A. W., Kumar R., Zavala V. M. (2017) A multi-scale optimization framework for electricity market participation. In: Applied energy, 190, p. 147-164.

Dukovska I., Paterakis N. G. Slootweg H. J. (2018) Local Energy Exchange Considering Heterogeneous Prosumer Preferences. In: 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). Sevilla, Spain: IEEE

European Commission (2019) Clean Energy for All Europeans. Online: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en. (Accessed on 12 August 2020).

Jin X., Wu Q., Jia H. (2020) Local flexibility markets: Literature review on concepts, models and clearing methods. In: Applied Energy, 261, p. 114387.

Khorasany M., Mishra Y., Ledwich G. (2018) Market framework for local energy trading: a review of potential designs and market clearing approaches. In: IET Generation, Transmission & Distribution, 12(22), p. 5899-5908.

Khorasany M., Mishra Y., Babaki B., Ledwich G. (2019) Enhancing scalability of peer-to-peer energy markets using adaptive segmentation method. In: Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 7(4), p. 791-801.

Lilla S., Orozco C., Borghetti A., Napolitano F., Tossani F. (2020) Day-Ahead Scheduling of a Local Energy Community: An Alternating Direction Method of Multipliers Approach. In: IEEE Transactions on Power Systems, 35(2), p. 1132-1142.

Mengelkamp E., Staudt P., Garttner J., Weinhardt C. (2017) Trading on local energy markets: A comparison of market designs and bidding strategies. In: 14th International Conference on the European Energy Market (EEM), p. 1-6.

Mengelkamp E., Schlund D., Weinhardt C. (2019) Development and real-world application of a taxonomy for business models in local energy markets. In: Applied Energy, vol. 256, dec 2019.

Pumphrey K., Walker S. L., Andoni M., Robu V. (2020) Green hope or red herring? Examining consumer perceptions of peer-to-peer energy trading in the United Kingdom. In: Energy Research and Social Science, vol. 68, oct 2020.

Van Aubel P., Poll E (2019) Smart metering in the Netherlands: What, how and why. In: International Journal of Eletrical Power & Energy Systems, 109, p. 719-715.

Zia M. F., Benbouzid M., Elbouchikhi E., Muyeen S. M., Techato K., Guerrero J. M. (2020) Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. In: IEEE Access, 8, p. 19410-19432.

Contact Information:
DI Dr. Lukas Gnam
Campus 1
7000 Eisenstadt
Email: lukas.gnam@forschung-burgenland.at

Bewertung der Datenqualität von Energiezellen im Projekt R2EC

M. Weissenbacher, Th. Nacht, R. Pratter, M. Schloffer
4ward Energy Research GmbH, Graz, Österreich

ABSTRACT: The effort to increase the share of renewables in energy consumption in the EU has sparked the idea to create regional and efficient energy cells supplied with up to 100 % renewable energy.
Within these energy cells, there is a strong incentive to promote energy autonomy by means of decentralized storage solutions, flexibility use and energy concepts. For these concepts power-supply PV-generation has established itself as a highly competitive decentralized source of energy, especially in central and southern Europe. Under the given conditions, the consortium of Regional Renewable Energy Cells (R2EC) wants to set up, investigate and compare the framework conditions, operation and interaction of such energy cells in different environments and climate zones. The project R2EC applies a holistic approach to analyse a system of interacting energy cells with a high concentration of renewables, storages and transport integration. During the project, energy cells in Austria, Belgium and Norway are analysed and used for the simulation of a regional and renewable energy cell system – with the energy cells producing, consuming, supplying and sharing renewable energy. This approach aims at developing tailor-made solutions that meet the local and regional requirements and demands of the observed energy cells.
As part of the project a simulation/optimisation model is developed which optimizes the energy flow within the energy cells and supports the economical assessment of the system that will be developed. This model will optimise the use of flexibilities for different target functions, such as own consumption maximisation. The quality of the model results is dependent on the data provided. Even if the basic requirements and framework conditions are similar in the different test beds, the data gathered or measured differs in quality and quantity. This is true if one is to compare the different test beds but will also occurs within one testbed. In some cases, there are no measurements available which leads to the use of synthetic load profiles. This leads to the main questions which will be answered in this paper: How much does the data quality influence the effects of the use of a flexibility? To answer different sets of data will be analysed with emphasis on their use in the R2EC project.

1. EINLEITUNG

Das internationale Forschungsprojekt R2EC (Regionale erneuerbare Energiezellen) zielt darauf ab, den Betrieb eines skalierbaren Systems dezentraler, interagierender Energiezellen mit einem hohen Anteil an lokaler erneuerbarer Energieerzeugung zu optimieren - als Energiezelle wird ein gleichzeitig über mehrere Schnittstellen verbundenes System aus Komponenten der Infrastruktur bzw. verschiedener Energieformen zum bidirektionalen Austausch von Energieflüssen verstanden. Dezentrale Energiezellen werden in diesem Zusammenhang in mehreren Musterregionen in Norwegen, Belgien und Österreich näher analysiert. Darüber hinaus sollen Geschäftsmodelle für die neuen Anwendungsgebiete entwickelt werden. Das Projekt wird von Partnern der ERA-Net SES 2018 Förderschiene RegSys sowie mit Fördermitteln des europäischen Forschungs- und Innovationsprogramms sowie des BMVIT gefördert.

Im Rahmen des Projektes werden umfassende Messdaten von Stromverbräuchen der einzelnen Haushalte in den Energiezellen erhoben. Die so erhobenen Daten weisen aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen Qualitätsunterschiede in Bezug auf zeitliche Auflösung, Vollständigkeit etc. auf. Dabei muss berücksichtigt werden, dass nicht immer Messwerte zur Verfügung stehen und deswegen synthetische Profile für Simulationen oder Systembewertungen herangezogen werden müssen. Während Simulations-

modelle grundsätzlich detaillierte Einblicke liefern können, sind die Ergebnisse immer nur so gut wie die bereitgestellten Daten. Auch wenn die Grundanforderungen und Rahmenbedingungen in den verschiedenen zu untersuchenden Energiezellen ähnlich sind, unterscheiden sich die gesammelten bzw. verfügbaren Daten maßgeblich. Die Durchführung von Messungen ist meist kosten- und zeitintensiv. Zudem können mögliche (Mess-)Lücken die Qualität der Simulation maßgeblich beeinflussen. Insgesamt ist die Aufbereitung von Messdaten meist mit größerem Aufwand verbunden, wohingegen normierte Standardlastprofile mit minimalem Aufwand skaliert werden können. Im direkten Vergleich zeigen sich allerdings deutliche Unterschiede zwischen dem normierten mittleren Verbrauch der Smart-Meter-gemessenen Haushaltskunden und dem VDEW-Profil (Hinterstocker et al. 2014; Stegner et al. 2019).

In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit sich die Wirtschaftlichkeit, gemessen an der Eigendeckungsquote (= jener Anteil des Summenstromverbrauchs, der durch die erneuerbare Erzeugungsanlage gedeckt werden kann und daher nicht aus dem Netz bezogen werden muss), eines Einsatzes von flexiblen Lasten zur Steigerung des Eigenverbrauchs einer PV-Anlage, unter Verwendung von Lastprofilen unterschiedlicher Quellen verändert. Es wird die These aufgestellt, dass sich zwar die Einsatzzeiten bei Verwendung genauerer Lastprofile verändern, die Wirtschaftlichkeit (Eigendeckungsquote) davon aber nicht wesentlich beeinflusst wird.

2. METHODE

Zur Evaluierung der Auswirkungen einer zeitlichen Verschiebung flexibler Lasten auf die Wirtschaftlichkeit auf Basis verschiedener Datenquellen wurden die Lastprofile unterschiedlicher Haushalte herangezogen. Diese Lastprofile weisen unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich Genauigkeit und Auflösung auf. Berücksichtigt wird die elektrische Last ohne Warmwasser- bzw. Heizwärmerzeugung - es wird zugrunde gelegt, dass die Wärme- und Warmwassererzeugung elektrisch erfolgt. Diese Grundlast wird zuerst durch eine vorhandene PV-Erzeugung gedeckt, wodurch zu gewissen Zeiten Überschüsse entstehen. Das daraus resultierende Überschuss-Profil wurde herangezogen, um den Einsatz einer zeitlich flexibel einsetzbaren Wärmepumpe zu bestimmen und diesen optimieren zu können. Dafür wurde ein im Projekt Hybrid Grids Demo entwickeltes Modell (Puchegger et al. 2016) adaptiert und für sämtliche Simulationen verwendet. Das Modell baut darauf auf, dass jedem Gebäude ein Wärme- und Warmwasserbedarf zugrunde gelegt wird. Dieser Bedarf wird durch den zeitlich flexibel einsetzbaren Wärmeerzeuger gedeckt, wobei der Einsatz der flexiblen Lasten hinsichtlich eines Eigenverbrauchsmaximums optimiert wird. Dadurch entsteht ein zusätzlicher elektrischer Verbrauch.

Um den Vergleich mit synthetischen Lastprofilen herzustellen, werden für jeden Datensatz synthetische Lastprofile erstellt. Hierfür werden einerseits skalierte Standardlastprofile (H0) bzw. Profile des Load Profile Generators (Pflugradt 2016) herangezogen. Danach wird der gesamte Vorgang ebenfalls mit diesen synthetischen Lastprofilen durchgeführt und anschließend die Auswirkungen auf die Eigendeckungsquote als Grundlage für die Wirtschaftlichkeit beleuchtet. Damit kann eine Aussage darüber getroffen werden, welche Auswirkungen die Verwendung synthetischer Lastprofile gegenüber gemessener Lastprofile mit sich bringen.

Die Datenbereiche der Messdatenreihen umfassen kein ganzes Jahr, da teilweise die Messungen nicht so lange erfolgten und teilweise lange Lücken in den Messungen auftraten. Bei der Auswahl der Datenbereiche der Messdatenreihen wurde darauf geachtet, dass diese möglichst wenige Lücken aufweisen, um die Datenreihen nicht durch die Befüllung der Lücken zu verfälschen. Die wenigen dennoch vorhandenen Lücken wurden nachträglich aufgefüllt. Dazu wurden zwei unterschiedliche Methoden, je nach Charakteristik der Lücke gewählt. Handelt es sich bei der Lücke lediglich um einen Zeitschritt, wurde der fehlende Wert mittels linearer Interpolation der beiden angrenzenden Wert ermittelt. Handelt es sich um eine größere Lücke, wurde auf die Daten des gleichen Tages der vorherigen Woche zurückgegriffen. Weitere Details zu den Messdaten sind nachfolgend in Tab. 1 dargestellt.

Aufgrund der Anonymisierung der Verbrauchsdaten bei der Datenerhebung konnte keine konkrete Zuordnung bezüglich der Haushaltgröße und Zusammensetzung getroffen werden. In weiterer Folge wurden daher fixe Parameter für jeden Haushalt definiert (siehe Tab. 2), die für alle Simulationen verwendet wurden.

Tab. 1: Relevante Details zu den Messdaten (Die Messdaten wurden mit Wandlermessungen erfasst.)

Messung	Zeitraum	Auflösung (min)	Verbrauch (kWh)	Vollständigkeit des Datensatzes (%)
Messung 1	01.02.20 - 26.05.20	15	2.544	99,74
Messung 2	01.02.20 - 26.05.20	15	2.360	98,44
Messung 3	01.07.19 - 30.06.20	15	8.473	100,00
Messung 4	01.02.20 - 25.07.20	1	984	83,00
Messung 5	01.02.20 - 26.05.20	15	2.525	99,93
Messung 6	01.02.20 - 26.05.20	15	2.436	96,61
Messung 7	01.02.20 - 26.05.20	15	3.102	99,94

Zur Überprüfung inwieweit sich die unterschiedlichen Datenquellen auf die Eigendeckungsquote als Grundlage für die Wirtschaftlichkeit des Flexibilitätseinsatzes auswirken, wurden die Optimierungen mit unterschiedlichen PV-Anlagengrößen (2,5 kWp, 5 kWp und 7,5 kWp) durchgeführt. Die für die Optimierung berücksichtigten Parameter sind in Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 2: Eingangsgrößen für die Simulation

Baustandard (HWB)	41	kWh/m²
Wohnfläche	150	m²
Anzahl Bewohner	4 (2 Erwachsene, 2 Kinder) 1 Erwachsener zu Hause, 1 in der Arbeit	
PV-Leistung	2,5; 5; 7,5	kWp
Speichertyp	Warmwasserspeicher für Heizung und Brauchwasser	
Speichergröße	ca.1.150	Liter
Wärmedurchgangskoeffizient Speicher (k-Wert)	0,35	W/(m²K)
Max. Speichertemperatur	70	°C
Min. Speichertemperatur	50	°C
Umgebungstemperatur	20	°C
Luft/Wasserwärmepumpe	5.000	W
Heizungsvorlauftemperatur	35	°C

Als Ergebnisse der Simulationen werden die Eigendeckungsquoten ermittelt. Diese können als Grundlage für die Wirtschaftlichkeit herangezogen werden.

3. ERGEBNISSE

Vorab ist auf die geringe Größe der Stichprobe hinzuweisen, die Ergebnisse sind damit als erster Indikator zu interpretieren. Eine statistisch fundierte Aussage würde eine deutlich größere Stichprobe verlangen.

Für die 7 erhobenen Datensätze wurde der Einsatz der Flexibilität bei Verwendung der gemessenen Werte und bei Verwendung der synthetischen Lastprofile miteinander verglichen. Als Grundlage für den Vergleich

wurde die Eigendeckungsquote, also jene Energiemenge, die nicht aus dem öffentlichen Netz bezogen werden muss, bezogen auf den gesamten Stromverbrauch, herangezogen.

Die Tab. 4 bis Tab. 6 zeigen die Eigendeckungsquoten bei Verwendung der unterschiedlichen Datenquellen und bei Berücksichtigung unterschiedlicher PV-Anlagengrößen. Generell zeigt sich, wie zu erwarten war, dass mit einer steigenden PV Leistung die Eigendeckungsquote steigt. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse ebenfalls, dass die verwendeten Lastprofile keinen maßgeblichen Einfluss auf die Eigendeckungsquote haben.

Tab. 4: Vergleich Eigendeckungsquote in % bei einer PV-Leistung von 2,5 kW_P

Datenreihe	Gemessenes Profil	Lastprofilgenerator	Standardlastprofil
1	19,4	17,3	18,7
2	18,1	17,8	19,2
3	17,8	16,8	19,7
4	30,0	30,8	32,2
5	18,5	17,3	18,7
6	16,4	15,7	17,3
7	19,6	17,0	19,0

Tab. 5: Vergleich Eigendeckungsquote in % bei einer PV-Leistung von 5,0 kW_P

Datenreihe	Gemessenes Profil	Lastprofilgenerator	Standardlastprofil
1	31,6	27,6	29,0
2	27,7	28,3	30,0
3	26,5	25,2	28,7
4	42,0	42,7	43,0
5	28,8	27,7	29,2
6	26,2	25,6	27,7
7	31,1	28,1	29,5

Tab. 6: Vergleich Eigendeckungsquote in % bei einer PV-Leistung von 7,5 kW_P

Datenreihe	Gemessenes Profil	Lastprofilgenerator	Standardlastprofil
1	38,0	34,0	34,7
2	32,7	34,2	37,9
3	39,3	36,7	42,7
4	48,0	48,6	48,4
5	34,3	34,1	34,7
6	31,7	31,9	33,3
7	37,3	34,4	35,0

4. ERKENNTNISSE

Die Ergebnisse legen nahe, dass es nur geringe Unterschiede in den Ergebnissen bei Verwendung von gemessenen Werten und synthetischen Profilen gibt, so lange es um die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines Flexibilitätseinsatzes geht, wobei dieser maßgeblich durch die Eigendeckungsquote definiert wird. Es ist zu vermuten, dass aufgrund der verfügbaren PV-Menge sich zwar die Zeitpunkte des Flexibilitätseinsatzes unterscheiden, sich jedoch immer Zeitpunkte finden, an denen ein Einsatz unter Verwendung von PV-Erzeugung möglich ist.

Die Analyse der Bandbreite der Abweichungen der Eigendeckungsquote zwischen Messungen und synthetischen Profilen hat gezeigt, dass die Verwendung von Standardlastprofile tendenziell zu höheren Eigendeckungsquoten führt, als dies bei der Verwendung der Lastprofile des Load Profile Generators der Fall ist. Diesen Umstand zu begründen, würde eines detaillierten Vergleichs der einzelnen Lastprofile benötigen, was zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgt ist.

Hinsichtlich der Höhe der Abweichungen sind die Ergebnisse der Optimierung der Eigendeckung bei Verwendung des Standardlastprofiles mit jenem des Load Profile Generators vergleichbar.

Die Größe der PV-Anlage hat ebenfalls eine Auswirkung auf die Abweichung der Eigendeckungsquoten aus dem Vergleich der Ergebnisse aus der Optimierung mit gemessenen Profilen und synthetischen Profilen. Es kann jedoch aus den verwendeten Daten und Ergebnissen kein eindeutiger Trend abgeleitet werden. Es gibt Datensätze, bei denen die Abweichungen der Eigendeckungsquoten mit der PV-Größe steigen und welche bei denen sie sinken. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass, die Form des Lastprofils einen höheren Einfluss auf die Abweichungen hat und weniger die Größe der PV-Anlagen. Diese Annahme wäre mit weiteren Vergleichen auf Basis längerer Zeiträume und unter Verwendung von mehr Daten zu validieren.

Eine der wesentlichsten Erkenntnisse ist, dass die Verwendung synthetischer Lastprofile sehr gute Ergebnisse für die Abschätzung der Eigendeckungsquote als Grundlage für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit ergeben. Die Verwendung synthetischer Lastprofile, je nach verwendetem Profil, kann sowohl zu Überschätzungen als auch Unterschätzungen der Eigendeckungsquote führen, jedoch belaufen diese sich auf maximal 2,4 % (Überschätzung) bzw. 4,1 % (Unterschätzung). Dies lässt die Vermutung zu, dass für eine Abschätzung der wirtschaftlichen Vorteile aus dem Einsatz von Flexibilitäten durchaus synthetische Lastprofile herangezogen werden können.
Bei dieser These ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Erkenntnisse auf einer sehr geringen Stichprobe an Messdaten basiert und dass keinerlei Aussagen über den resultierenden Leistungsverlauf nach dem Flexibilitätseinsatz getroffen wurden. Die resultierenden Lastprofile der Messdaten und synthetischen Daten werden sich unterscheiden. Weiters ist zu berücksichtigen, dass im Kontext des Energiezellen-Ansatzes noch zu überprüfen ist, inwieweit sich die Nutzung mehrerer synthetischer Lastprofile anstelle gemessener Profile auswirken würde.

5. FAZIT

Für die Realisierung der Energiezellen des Projektes R2EC sind umfassende Simulationen notwendig. Hierbei spielt vor allem der Einsatz von Flexibilitäten für unterschiedliche Ziele eine wesentliche Rolle. Ob Flexibilitäten wirklich verwendet werden, hängt maßgeblich davon ab, ob eine Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Diese zu bewerten ist jedoch aufgrund fehlender Daten oftmals schwierig. In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit sich die Eigendeckungsquote von 7 Haushalten nach einem Flexibilitätseinsatz ändert, wenn für den regulären Strombedarf der Gebäude gemessene Werte oder synthetische Werte verwendet werde.

Die Untersuchungen legten nahe, dass es hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, diese wurde anhand des Eigendeckungsgrades festgelegt, kaum einen Unterschied macht, ob tatsächlich gemessene Lastprofile oder synthetische Lastprofile für die Optimierung der Flexibilitäten verwendet werden. Die Verwendung der synthetischen Profile führte zu einer Überschätzung der Eigendeckungsquote von bis zu 2,4 % und einer Unterschätzung von bis zu 4,1 % nach dem Einsatz der Flexibilitäten, je nach betrachtetem Datensatz.

Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass es für die Bewertung der Eigendeckungsquote keine wesentliche Rolle spielt, ob gemessene Lastprofile oder synthetische Lastprofile verwendet werden.

Für diese Aussage ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine kleine Stichprobe verwendet wurde. Weiters ist zu berücksichtigen, dass der Vergleich sich ausschließlich auf die Eigendeckungsquote bezieht und nicht auf den genauen Zeitpunkt, an dem der Verbrauch stattfindet. Demnach lassen sich keine Aussagen über etwaige Spitzenlasten etc. treffen.

LITERATUR

Hinterstocker M., Von Roon S., Rau M. (2014) Bewertung der aktuellen Standardlastprofile Österreichs und Analyse zukünftiger Anpassungsmöglichkeiten im Strommarkt. In EnInnov2014 – 13. Symposium Energieinnovation; Kurzfassungsband. Bd. 13. Graz, Österreich.

Pflugradt N. D. (2016) Modellierung von Wasser und Energieverbräuchen in Haushalten. Dissertation, Chemnitz, Germany: Technische Universität Chemnitz.

Puchegger M., Steindl G., Nacht Th. (2016) Verknüpfung eines urbanen Strom- & Fernwärmenetzes zu einem funktionalen Stromspeicher. In Tagungsband zur enova 2016 - Nachhaltige Technologien, Fachhochschule Burgenland GmbH, Forschungs- und Studienzentrum Pinkafeld. Band 20 S. 191

Stegner C., Glaß O & Beichkircher T. (2019) Comparing smart metered, residential power demand with standard load profiles, 2019.

Kontaktdaten:
Martina Weissenbacher
Reininghausstraße 13a
8020 Graz
Email: martina.weissenbacher@4wardenergy.at

Thomas Nacht
Reininghausstraße 13a
8020 Graz
Email: thomas.nacht@4wardenergy.at

Robert Pratter
Reininghausstraße 13a
8020 Graz
Email: robert.pratter@4wardenergy.at

Martin Schloffer
Reininghausstraße 13a
8020 Graz
Email: martin.schloffer@4wardenergy.at

Session 3a

Green Energy Lab – User

Optimierung von Smart Home Energy Management Systemen mit Usability-Tests

Kremsner, Pfeiffer, Marhold / Forschung Burgenland / AT
Kummer / FH Burgenland GmbH / AT
Holper / EVN / AT

Finanzielle Auswirkungen eines Elektrofahrzeugs auf Haushalte mit PV Anlage

Sieberer, Strobel / FH Technikum Wien / AT

A typology of end users‘ willingness to share energy data

Pfeiffer, Maier, Kremsner / Forschung Burgenland / AT
Hatzl, Fleiß / University of Graz / AT

Optimierung von Smart Home Energy Management Systemen mit Usability-Tests

T.P. Kremsner, C. Pfeiffer, N. Marhold
Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich
C. Kummer
Fachhochschule Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich
M. Holper
EVN, Maria Enzersdorf, Österreich

ABSTRACT: Smart Home Energy Management Systems (SHEMS) provide users detailed insights into the energy flows of their households and possibilities for increasing energy efficiency, such as optimizing photovoltaic use. Despite the potential benefits, it must be guaranteed that the functions of SHEMS meet the needs of the target group to achieve a high frequency of use among customers. In order to discuss the success factors for customer-centred SHEMS, a study was conducted within the project "GEL-OpenDataPlatform". The main goal of the study was to find out, which main functions SHEMS need to offer to achieve a high customer satisfaction among potential users. Furthermore, factors that have a positive/negative effect on the usability of SHEMS were identified. Therefore, a qualitative usability study among 13 participants was conducted by means of a specific SHEMS. The participants were given nine search tasks to solve while using the SHEMS solution for their first time. The method of eye-tracking was used to track the participants' visual search behavior. During that process, it was analyzed how well the respective tasks could be completed and which factors of the app had a positive/negative effect on the app's user-friendliness. The study was supplemented by think-aloud protocols and qualitative interviews to find out more about desired functions of SHEMS. The results show that many factors play a decisive role in SHEMS. The design of graphics, the display of energy values and the choice of colors proved to enhance the user experience of SHEMS. Forecasting functions and comparisons with the previous year in terms of energy usage are only a few functions that respondents would like to see in SHEMS. Despite the limitation that this is a qualitative study, valuable insights for the successful design and conceptualization of SHEMS could be gained.

1. EINLEITUNG

Smart Home Energy Management Systems („SHEMS") sind Systeme, die eine genaue Überwachung und Steuerung der Stromerzeugung, -speicherung sowie des Stromverbrauchs möglich machen (Zhou et al. 2016, Son et al. 2010, Han et al. 2011). In diesen Systemen werden die Energiedaten in (Privat-)Haushalten meist in grafischer Form angezeigt, um einen ersten Überblick zu geben. Zusätzlich ist in vielen Fällen der Abruf detaillierterer Informationen möglich (Liu et al. 2016). Weiters besteht auch oftmals die Möglichkeit, Abnormitäten im Energieverbrauch als Alarm anzeigen zu lassen, wenn ein Gerät ein untypisches Verbrauchsmuster aufweist (Son et al. 2010, Zhou et al. 2016). Einige Softwarehersteller bieten die Funktion an, verbundene Geräte direkt vom Smartphone oder Computer ein- bzw. auszuschalten oder auch Prognosen bei Beibehaltung des aktuellen Stromverbrauchs zu generieren (Liu et al. 2016, Han et al. 2011, Zhou et al. 2016). Endnutzer*innen wird durch SHEMS ermöglicht, ihren Energieverbrauch im Haushalt besser nachvollziehen zu können. Durch diesen Einblick können sie ihren Energieverbrauch senken, Kosten sparen und belasten die Umwelt weniger stark. Durch die Installation von SHEMS selbst können jedoch noch keine Kosten eingespart und die Umwelt geschützt werden. SHEMS helfen lediglich dabei, ein besseres Verständnis über eigene Verbrauchsmuster zu erhalten, die man ändern könnte (Park et al. 2017, Straub & Volmer 2018).

Einige Studien haben bereits Hauptmotive zur Nutzung von SHEMS identifiziert. Darunter fällt beispielsweise die Möglichkeit, Kosten durch Optimierung des Energieverhaltens im eigenen Haushalt einzusparen. Andere Konsument*innen wiederum möchten vor allem einen positiven Beitrag zum Klimaschutz leisten (Park et al. 2017). Ein weiteres Motiv zur Nutzung von SHEMS ist, dass je nach Softwarelösung verbundene Geräte ein- bzw. ausgeschaltet werden können (Ellabban & Haitham 2016). Trotz der vielen potentiellen Funktionen von SHEMS muss garantiert werden, dass die Funktionen von SHEMS tatsächlich die Bedürfnisse der Zielgruppe decken, einen Nutzen stiften und eine gute Benutzerfreundlichkeit aufweisen, um eine hohe Nutzungshäufigkeit bei Kund*innen zu erzielen (Straub & Volmer 2018). Weiters muss sichergestellt werden, dass SHEMS einfach in der Nutzung sind, um die Nutzungsintention bei potentiellen Konsument*innen und die Zufriedenheit in der Nutzung zu erhöhen.

Im Rahmen des Projekts „GEL-OpenDataPlatform" galt es daher, sowohl die gewünschten Funktionen in SHEMS in der Zielgruppe als auch die Faktoren herauszufinden, die sich positiv oder negativ auf die Benutzerfreundlichkeit der Systeme auswirken. Diesbezüglich wurden folgende zwei Forschungsfragen definiert:

- Welche (Haupt-)Funktionen sollten SHEMS aufweisen, um eine hohe Resonanz bei potentiellen Nutzer*innen zu erzielen?
- Welche Faktoren wirken sich positiv/negativ auf die Benutzerfreundlichkeit von SHEMS aus?

Auf die Einfachheit der Nutzung (Benutzerfreundlichkeit, Usability) wird im nächsten Kapitel näher eingegangen (Jacobsen & Meyer 2017).

2. THEORETISCHER RAHMEN ZUR USABILITY VON SHEMS

Nach der DIN EN ISO 9241 wird Usability definiert als das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer*innen in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen (Jacobsen & Meyer 2017). In Kombination mit den Dimensionen Look & Feel einer Anwendung (d.h. Aussehen und Handhabung) wird Usability zur User Experience (UX) erweitert.

Wesentliche Faktoren, die Anwendungen generell benutzer(un)freundlich machen können, sind Strukturelemente wie z.B. Navigationsmenüs auf dem Smartphone: Listennavigation, Dropdown-Menü oder Klappmenü. Da Nutzer*innen Anwendungen oft nur überfliegen, ist eine aussagekräftige Benennung von Menüpunkten und Touch-Elementen essentiell (Keßler et al. 2015), um den User*innen die Orientierung zu erleichtern. Beim Einsatz von Grafiken ist es wichtig, die wahrnehmungslenkenden Faktoren von Farben, Größe und Formen zu kennen. Dabei haben gewisse Farben erlernte Signalfunktionen, wie z.B. Rot als Zeichen für Gefahr, „rote Zahlen", oder eine wichtige, dringende Botschaft, und im Gegensatz dazu Grün als Träger von Erlaubnis und Sicherheit, „alles im grünen Bereich" (Wäger 2016). Die Wahrnehmungsgesetze gebieten, auf Prägnanz und Einfachheit der Designelemente zu achten, und dass räumliche Nähe bzw. Ähnlichkeit von Elementen auch mit inhaltlicher Zusammengehörigkeit verbunden werden sollen. Nicht zuletzt kann die Missachtung von Konventionen (Usage Patterns), also von erlernten Verhaltensweisen, Nutzer*innen an der Zielerreichung hindern. So können z.B. Hauptnavigationselemente, die normalerweise rechts oben oder unter einem „Hamburger-Symbol" vermutet werden, nicht gefunden werden, wenn sie sich im linken unteren Eck verstecken. Auch die Unterscheidung von Touch-Elementen im Gegensatz zu nicht klickbarem Text wird von Konvention gesteuert (Keßler et al. 2015).

Für die Entwicklung von erfolgreichen Anwendungen werden oft Prototypen programmiert, die einer Evaluierung seitens der Endnutzer*innen unterzogen werden (Jacobsen & Meyer, 2017). Zu den bekannten Usability-Testformaten zählen (i) Remote Tests von zuhause aus, (ii) die Think-Aloud-Technik oder Nachexploration im Interview, oder (iii) das A/B-Testing, wenn experimentell zwischen zwei konkreten Varianten die bessere herausgefunden werden soll. Dazu können quantitative Werte wie die Erfolgsrate für den Abschluss einzelner Aufgaben, Zeitaufwand je Aufgabe oder Fehlerrate herangezogen werden. In ihrer

Studie kam Faulkner (2003) zu dem Schluss, dass 10 getestete Personen bereits durchschnittlich 94,69 % der Usability-Probleme aufdecken können. Dabei identifizieren Expert*innen und Anfänger*innen unterschiedliche Probleme bei der Anwendung.

Als apparative Beobachtungsmethode kommt in der Usabilityforschung häufig Eye-Tracking zum Einsatz, da das visuelle Suchverhalten dadurch direkt abgebildet werden kann (Bergstrom et al. 2014). Dabei wird eruiert, welche Elemente einer Anwendung wahrgenommen werden oder nicht und in welcher Reihenfolge. Weiters wird erörtert, wie schnell und wie intensiv die Bereiche wahrgenommen werden, ob es ablenkende Faktoren gibt oder an welcher Stelle gewisse Informationen gesucht werden. Durch die Augenkamera werden die Blickbewegungen, die aus Fixationen (kurzer Stillstand des Auges) und Sakkaden (Sprungbewegung) bestehen, aufgezeichnet und erlauben die Visualisierung als Fixationspfade. Werden die Daten mehrerer Versuchspersonen aggregiert, können in sogenannten „Heat Maps" lokale Aufmerksamkeitszentren (meist in roter Farbe) dargestellt werden (Sarodnick & Brau 2011). Die Fixierung eines Bereichs ist jedoch kein Garant dafür, dass eine Information verstanden wurde oder für die Testpersonen interessant ist – daher empfiehlt sich in der Praxis als Interpretationshilfe die Kombination mit einer kommunikativen Erhebungsmethode, wie dem Interview bzw. der Think-Aloud-Technik (Sarodnick & Brau 2011, Bergstrom et al. 2014).

In mobilen Anwendungen zeigten Eye-Tracking-Studien, dass die Bildschirmgröße eines Endgeräts die Art der Interaktion stark beeinflusst. Je kleiner der Bildschirm, desto weniger Informationen konnten zugleich auf dem Bildschirm angezeigt werden, was zu erhöhtem Scrollaufwand, Touch- oder Wischgesten führte (Bergstrom et al. 2014). Interessante Erkenntnisse zeigt Eye-Tracking auch zur Informationsverarbeitung von Grafiken mit Management- bzw. mathematischen Informationen. So zeigten Renshaw et al. (2003), dass benutzerfreundlich designte Grafiken (hinsichtlich Kontrast, konventioneller Farbcodierung, Beachtung der Gestaltprinzipien) überlegen sind gegenüber solchen, die sich gegen die Konventionen richteten (z.B. keine Struktur in der Farbgestaltung, Hinzufügen von nicht benötigten Informationen oder Designelementen, Platzierung der Legende weit entfernt von der Hauptabbildung, etc.). Die „guten" Grafiken wurden kürzer fixiert, und die Fixationspfade waren ebenfalls kürzer, was zu einer reduzierten kognitiven Belastung führt. Diese Annahme wird gestützt durch niedrigere Fehlerraten bei der Beantwortung von Fragen zur Grafik und durch eine kürzere Bearbeitungszeit (Renshaw et al. 2003).

3. METHODISCHE VORGEHENSWEISE

Um Optimierungspotentiale in der Usability von SHEMS und gewünschte Funktionen zu erörtern, wurde eine qualitative Usability-Studie mithilfe der Methode Eye-Tracking von Juli 2019 bis Januar 2020 am Beispiel der Smartphone App „Joulie" der EVN durchgeführt. Diese ermöglicht z.B. das Ablesen von Energieflüssen (Produktion aus Photovoltaik und Stromverbrauch) im (Privat-)Haushalt, das Einschalten einer PV-Optimierung sowie den Vergleich der Energieeffizienz mit anderen Joulie-Nutzer*innen (Joulie.at, 2020). Durch die Analyse einer konkreten SHEMS-Lösung sollten die Teilnehmer*innen ein besseres Verständnis über die Funktionen von SHEMS erhalten. Während der Aufgabendurchführung am Tablet trugen die Teilnehmer*innen eine mobile Eye-Tracking Brille der Firma SMI (ETG Eye-Tracking Glasses) zur Nachverfolgung der Blickbewegungen. Ergänzt wurde die Studie durch Think-Aloud Protokolle. Die Proband*innen müssen dabei während der Studie alle Gedankengänge zu den Suchvorgängen laut aussprechen, damit die Ergebnisse im Anschluss einfacher interpretiert werden können (Bojko 2013). Zusätzlich wurden nach der Erhebung qualitative Interviews durchgeführt, um mehr über gewünschte Funktionen in SHEMS erörtern zu können. Die Eye-Tracking Erhebung diente vor allem dazu, Faktoren zu identifizieren, die sich positiv oder negativ auf die Benutzerfreundlichkeit auswirken.

Durch ein postalisches Schreiben an Kund*innen der EVN konnten die Teilnehmer*innen für die Studie rekrutiert werden. Die Erhebung wurde im Zeitraum von 31.7.2019 bis 27.1.2020 in den Privathaushalten der Proband*innen im Raum Niederösterreich durchgeführt. Jedes Interview dauerte in etwa 1,5 Stunden. Um eine hohe Genauigkeit der Eye-Tracking Daten sicherzustellen, führte der Studienleiter vor jeder Untersuchung eine genaue Kalibrierung der Eye-Tracking Brille durch. Da die Augen aller

Teilnehmer*innen in irgendeiner Weise anders sind (unterschiedliche Farbe, Größe, Brille sitzt anders), ist dieser Schritt notwendig, um korrekte Untersuchungsergebnisse zu gewährleisten (Bojko 2013). Die Kalibrierung wurde so oft wiederholt, bis die Eye-Tracking Genauigkeit sehr hoch war. Bei allen Proband*innen funktionierte die Kalibrierung der Eye-Tracking Brille, sodass alle Teilnehmer*innen die Studie erfolgreich abschließen konnten. Weiters wurde die Studie über ein Tablet (anstatt eines Smartphones) durchgeführt, damit die Nutzer*innen die Daten gut lesen können und die Auswertung der Blickdaten aufgrund des größeren Bildschirms genauer durchgeführt werden kann (Chynał et al. 2012).

Tab. 1: Suchaufgaben

Aufgabe Nr.	Aufgabenbeschreibung
Aufgabe 1	Durchsehen der App für 1,5 Minuten
Aufgabe 2	Stromverbrauch und -produktion von heute und gestern ablesen
Aufgabe 3	Stromverbrauch und -produktion von diesem und letztem Monat finden
Aufgabe 4	Aktuellen Stromverbrauch und Solarproduktion erörtern
Aufgabe 5	Energieeffizienz der Anlage herausfinden
Aufgabe 6	E-Mail Kundensupport finden
Aufgabe 7	PV-Optimierung ausschalten
Aufgabe 8	Alarme ausstellen
Aufgabe 9	Energieverbrauch ablesen von Balkendiagrammen der App

In der Tab. 1 sind die neun Suchaufgaben für die Proband*innen dargestellt. Für jede Suchaufgabe hatten die Proband*innen 1,5 Minuten Zeit, die sie bei ihrer erstmaligen Nutzung der „Joulie“ App lösen sollten. Falls eine Aufgabe nicht in dieser Zeitspanne erfüllt werden konnte, unterbrach der Untersuchungsleiter die aktuelle Aufgabe und las dem/der Proband*in die nächste Aufgabe vor. Die Suchaufgaben bezogen sich zumeist darauf, konkrete Energiedaten innerhalb der App zu finden, aber auch verschiedene Einstellungsmöglichkeiten sollten gefunden werden (Alarmfunktion, PV-Optimierung, …). Die Blickdaten aus der Studie wurden in Folge mithilfe der Software iMotions ausgewertet, um ein möglichst objektives Bild darüber zu erhalten, welche Elemente in der App gut oder weniger gut wahrgenommen wurden. Diese Daten helfen dabei, jene Bereiche zu identifizieren, die möglicherweise zu Schwierigkeiten in der Nutzung führen können. Weiters wurden durch die Interviews und Think-Aloud Protokolle jene Faktoren identifiziert, die einen positiven Einfluss auf die Benutzerfreundlichkeit haben.

4. ERGEBNISSE DER STUDIE

4.1 ÜBERBLICK STUDIENTEILNEHMER*INNEN

Von den insgesamt 13 Studienteilnehmer*innen waren drei Personen weiblich und zehn Personen männlich. Das Durchschnittsalter lag bei 50 Jahren (+-10 Jahre).

Zehn der Teilnehmer*innen weisen zumindest das Maturaniveau auf beziehungsweise haben eine Hochschule besucht. Zwei Personen haben eine Lehre absolviert und eine Person eine berufsbildende, mittlere Schule. In Bezug auf die Wohnsituation kann gesagt werden, dass jeweils fünf der Befragten entweder zu zweit oder in einem Haushalt von mindestens 4 Personen gewohnt haben. Zwei Personen leben in einem 3 Personen Haushalt und eine Person wohnt alleine. Die Mehrheit der Befragten hatte entweder eine technische Ausbildung oder ein starkes Interesse an Energiethemen. Dadurch brachten alle Proband*innen zumindest ein Grundwissen zum Thema Energie mit. Im Haushalt wurde jene Person für die Befragung ausgewählt, die sich bisher am meisten mit dem Thema Energie beschäftigt hat.

4.2 GEWÜNSCHTE FUNKTIONEN IN SHEMS

Die erste Forschungsfrage betrifft Funktionen, die sich Proband*innen im Allgemeinen von SHEMS erwarten. Dabei wurden die Proband*innen zuerst ersucht, die vorhandenen Funktionen der App zu beurteilen. Im Anschluss wurden sie nach weiteren nützlichen Funktionen, die sie sich wünschen würden, befragt.

In Bezug auf die Funktionen der App kann gesagt werden, dass die Energieübersicht auf der Startseite von den Proband*innen als wichtigstes Feature der App identifiziert wurde, gefolgt vom Energieverbrauch der einzelnen Geräte. Hierbei kann angemerkt werden, dass etwa die Hälfte der Teilnehmer*innen die Ansicht der Energiedaten in grafischer Form anstelle von numerischen Werten bevorzugt.

Einen Vergleich der eigenen Energieeffizienz mit anderen Nutzer*innen der App erachten Proband*innen als weniger wichtig, demgegenüber bevorzugen sie eine Info, wie energieeffizient sie selbst im Haushalt agieren und ob hier Verbesserungen möglich wären. Grundsätzlich wünschen sich Proband*innen auch nähere Infos, was unter dem Begriff Energieeffizienz verstanden wird. Die Wetterübersicht wurde von den Teilnehmer*innen als *„nette Ergänzung"* eingestuft.

In Hinblick auf zusätzliche Funktionen wünschen sich, vor allem technikaffine Personen (Heavy-User), detailliertere Infos zum Energieverbrauch. Hierbei wären für die Proband*innen der Vergleich von Jetzt-Verbrauch und Jetzt-Erzeugung, eine Prognose-Funktion bei Beibehaltung des aktuellen Stromverbrauchs, Liniendiagramme zur Veranschaulichung der zeitlichen Änderung im Energieverbrauch sowie das Anzeigen von Stromverbrauchsspitzen besonders interessant. Im Gegensatz dazu wünschen sich Personen, die weniger technikaffin sind, eher weniger detailreiche Informationen. Eine Information, die beide Gruppen besonders interessiert, ist eine Information zur bisherigen Ersparnis in Bezug auf die PV-Anlage, also ob sich der Erwerb der Anlage auch in Bezug auf die Kosten rentiert. Neben diesen Daten gab es Vorschläge, Daten zum eigenen Strom-Vertrag und „Stromfresser" im Haushalt anzuzeigen. Die gewünschten Funktionen in SHEMS werden in Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Übersicht über die gewünschten Funktionen von SHEMS

(Haupt)Funktion	Beschreibung
Energieübersicht (grafisch und in Zahlen)	Tages-, Monats-, Jahresverbrauch sowie Minutenansicht der Energiedaten (Zeiträume müssen einfach verstellbar sein)
Verbrauch je Gerät	Energieverbrauch der mit dem System gekoppelten Geräte; Anzeigen von Stromfressern
Prognose-Funktion	Jahresstrompreis bei Beibehaltung des aktuellen Energieverbrauchs
Energieeffizienz	Anzeigen der eigenen Energieeffizienz im Haushalt
Energiekosteneinsparung	Bisherige Einsparung durch die PV-Nutzung in €
Daten zum Stromvertrag	Einspeisetarif, Strompreis
Detailinformationen	zeitliche Veränderung im Energieverbrauch als Liniendiagramm; Anzeigen von Stromverbrauchsspitzen

4.3 BENUTZERFREUNDLICHKEIT VON SHEMS

Neben der Bewertung der bestehenden und potentiellen Funktionen wurde auch die Benutzerfreundlichkeit der Applikation im Rahmen der zweiten Forschungsfrage genauer analysiert, um Vorschläge für die erfolgreiche Konzeption von SHEMS abzuleiten. Hierbei konnten ausschlaggebende Faktoren identifiziert werden, die für die Konzeption von SHEMS berücksichtigt werden sollten. Eine Übersicht der relevanten Faktoren wird in Tab. 3 gegeben. Diese sind in „visuelle Präsentation von Informationen" sowie „Aufbau und Struktur" gegliedert.

Tab. 3: Übersicht über die Faktoren, die sich auf die Benutzerfreundlichkeit auswirken

Faktor	Positive Auswirkung	Negative Auswirkung
Visuelle Präsentation von Informationen		
Farben	Hoher Kontrast zum Hintergrund	Geringer Kontrast zum Hintergrund
Art der Grafik	Säulen- und Tortendiagramme	Blasendiagramme
Klickfelder	Kennzeichnung von Klickfeldern (z.B. mit Farben)	Klickfelder ohne Kennzeichnung
Aufbau und Struktur		
Darstellung von Energiedaten	Absolutwerte	Prozent
Startseite	Einfache Übersicht der Daten	Zu viele Details
Intro	Verpflichtendes Intro bei der ersten App-Nutzung	Kein verpflichtendes Intro, nur optionale Hilfemöglichkeiten
Umschaltmöglichkeiten	Klickfelder zum schnellen Ändern von Zeiträumen	Grafiken ohne Änderungsmöglichkeiten des Zeitraums
Pfad zur Zielfunktion	Mehrere Pfade zu einer Einstellung	Ein Pfad zu einer Einstellung

Hinsichtlich *Farben* ist ein hoher Kontrast zum Hintergrund notwendig, damit die Texte gut lesbar sind (siehe dazu auch Renshaw et al. 2003). Während die Texte im Allgemeinen gut lesbar waren hat sich herausgestellt, dass hellgraue Schriftfarbe auf weißem Hintergrund eher vermieden werden sollte. Dies ist auch im linken Bild der Abb. 1 (Shadow Map aus den Eye-Tracking Daten) gut erkennbar. Die hier schwarz markierten Flächen wurden von Proband*innen besonders intensiv angesehen, die restlichen Bereiche weniger. Hierbei ist zu erkennen, dass die grauen Texte nicht gut wahrgenommen wurden. Generell kann man für die Konzeption von SHEMS ableiten, dass der Kontrast zum Hintergrund hoch sein sollte, sodass Proband*innen wichtige Informationen ablesen können. Ein Proband nannte dazu *„Graue Farbe ist nicht optimal, dies signalisiert unwichtige Informationen“*.



Abb. 1: Shadow Map Energieübersicht (n=13, t=1,5 Minuten)

In Bezug auf die *Art der Grafik* konnte festgestellt werden, dass User Tortendiagramme oder Säulendiagramme (wie Abb. 1 rechts angeführt) bevorzugen. Blasendiagramme, so wie in Abb. 1 links, werden von Proband*innen im Vergleich dazu weniger präferiert. Diese Darstellungsform ist ihnen weniger bekannt und sie benötigen daher länger, diese zu verstehen. Als Vorschlag nannten die Proband*innen, stattdessen eher Tortendiagramme zu verwenden.

Innerhalb der App ist es möglich, durch Klick auf den heutigen Tagesverbrauch (siehe Abb. 1 links) auf den Monatsverbrauch umzuschalten. Während dies für die Hälfte der Testpersonen sehr intuitiv und nachvollziehbar war, weil sie bereits ähnliche Applikationen genutzt haben, konnten manche Teilnehmer*innen dieses Klickfeld nicht erkennen. Daher sollten *Klickfelder* entweder farblich oder in anderer Form kenntlich gemacht werden.

Zur Verbesserung der Lesbarkeit sollte die *Darstellung von Energiedaten* eher in ganzen Zahlen erfolgen. Beispielsweise sollte der Tagesverbrauch im Vergleich zum Verbrauch des Vortages statt mit Prozentwerten in Absolutwerten dokumentiert werden. Proband*innen hätten sich in der Studie eher gewünscht, statt dem Prozentwert eine Zahlenangabe zu sehen (Abb. 1 links).

Manche der Proband*innen wünschen sich eine einfach lesbare *Startseite* mit den wichtigsten Daten zum Energieverbrauch und -produktion. Für Detailinformationen möchten sie auf Unterseiten gehen. Man könnte sich daher in SHEMS generell überlegen, noch eine einfache Übersichtsseite mit den wichtigsten Infos zu integrieren. Eine weitere Empfehlung ist, ein verpflichtendes *Intro* zu Beginn der App-Nutzung einzubauen, welches alle Funktionen der App genau erklärt und auch beschreibt, was die Nutzer im jeweiligen Bereich tun müssen oder können. Dieses Intro könnte die Nutzung von Beginn an erleichtern und dadurch zu einer höheren Zufriedenheit führen. Die Hilfestellungen zu den Funktionen im jeweiligen Bereich sollten in diesem Zusammenhang so konkret wie möglich sein. Manche Proband*innen gehen dabei noch einen Schritt weiter und schlagen vor, Info-Pakete mit grundlegenden Informationen zu Energiethemen bereitzustellen, damit Personen ohne großes Vorwissen durch Nachlesen auch relativ schnell verstehen können, was einzelne Einheiten wie „kWh" oder Begriffe wie „Energieeffizienz" bedeuten. Optionale Hilfefunktionen wurden in der Studie nur von der Hälfte der Proband*innen genutzt.

User wünschen sich für die grafischen Ansichten der Energiedaten schnelle *Umschaltmöglichkeiten* zwischen verschiedenen Zeiträumen. Im konkreten Fall waren das die Zeiträume Tag, Monat, Jahr und die Minutenansicht der Energiedaten. Weiters kam oftmals der Wunsch nach benutzerdefinierten Zeiträumen. In Abb. 2 wurden diese Ergänzungen in den Grafiken zum schnellen Umstellen von Zeiträumen eingefügt (dunkel eingerahmt). Einige Proband*innen gaben die Rückmeldung, dass ähnliche Darstellungsformen bereits bei anderen SHEMS angewandt werden.

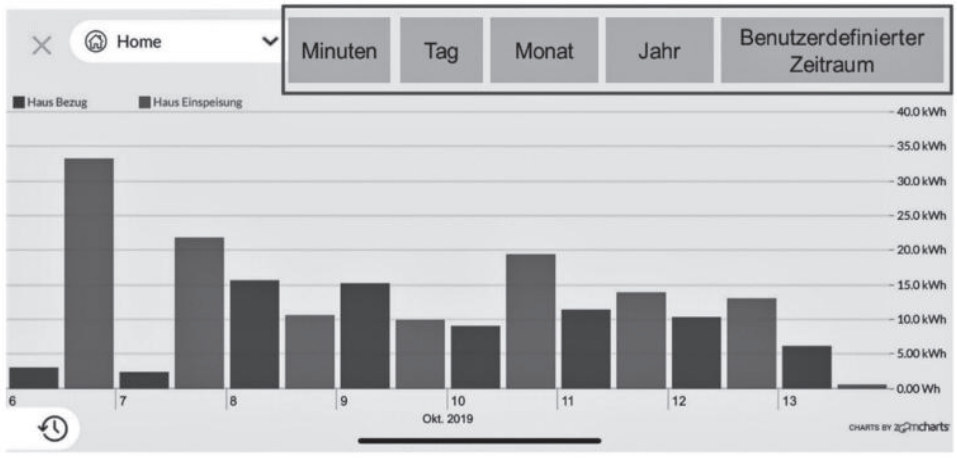


*Abb. 2: Vorschlag von Proband*innen zum Umschalten von verschiedenen Zeiträumen*

Ein weiteres Resultat ist, dass sich Proband*innen mehr als einen *Pfad zu einer bestimmten Funktion* wünschen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass laut dieser qualitativen Studie für SHEMS-User das vorrangige Motiv ist, die Energiedaten im eigenen Haushalt ablesen zu können. Wie detailliert die Energiedaten sein sollen, hängt jedoch davon ab, wie sehr sich die Personen bereits mit dem Thema Energie beschäftigt haben. Eine Prognose-Funktion, das Anzeigen von benutzerdefinierten Zeiträumen sowie die bisherige Einsparung durch eine PV-Anlage sind weitere Detailinfos, die sich Proband*innen innerhalb von SHEMS wünschen würden. Zur Usabilitiy von SHEMS kann genannt werden, dass sich User eine einfach lesbare Startseite mit den wichtigsten Informationen zum Energieverbrauch wünschen. Je nach Interesse soll dann die Möglichkeit bestehen, auf Unterseiten detailliertere Informationen zu finden. Weiters sollte man in grafischen Ansichten einfach in der Lage sein, zwischen verschiedenen Zeiträumen (Tag, Monat, Jahr, Minuten) zu schalten. Ein Intro mit Erklärungen vor der ersten Nutzung der App ist ebenfalls empfehlenswert. Bei der grafischen Gestaltung muss darauf geachtet werden, dass sich die Texte durch ausreichend hohen Kontrast vom Hintergrund abheben. Klickfelder sollten ebenfalls kenntlich gemacht werden und bevorzugte Grafiken sind Säulen- oder Tortendiagramme.

Trotz der umfassenden Erkenntnisse sind auch einige Limitationen der vorliegenden Arbeit zu nennen. Da es sich hierbei um eine qualitative Studie mit 13 TeilnehmerInnen handelt, sind die Ergebnisse nicht repräsentativ für alle Smart Home Nutzer*innen. Dennoch kann man bereits erste Tendenzen erkennen, wie SHEMS im Allgemeinen bei Nutzer*innen ankommen und welche Nutzungsprobleme auftreten könnten, wobei bereits 10 Proband*innen generell bei Usability-Tests meist ausreichen, um 82-95 % der Nutzungsprobleme zu erkennen (Faulkner 2003). Weiters muss auch betont werden, dass die gewünschten Funktionen teilweise Einzelnennungen von Probanden sind und daher noch näher analysiert werden muss, welche Inhalte für die Mehrheit der Nutzer interessant sein könnten. Dies könnte man zum Beispiel im Rahmen von weiteren quantitativen Befragungen näher untersuchen.

6. DANKSAGUNG

Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen der FTI-Initiative „Vorzeigeregion Energie“ durchgeführt.

LITERATUR

Bergstrom J. R., Schall A. J. (2014) Eye tracking in user experience design (1. Aufl.). Waltham, Massachusetts; USA: Morgan Kaufmann.

Bojko A. (2013) Eye tracking the user experience: A practical guide to research. Brooklyn; USA: Rosenfeld Media.

Chynał P., Szymański J. M., Sobecki J. (2012) Using eyetracking in a mobile ap-plications usability testing. In: Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems (178-186). Berlin, Heidelberg; Deutschland: Springer.

Ellabban O., Haitham A.-R. (2016) Smart grid customers' acceptance and engagement: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 65, 1285-1298.

Faulkner L. (2003): Beyond the five-user assumption: Benefits of increased sample sizes in usability testing. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 35 (3), 379-383.

Han J., Choi C. S., Park W. K., Lee I. (2011) Green home energy management system through comparison of energy usage between the same kinds of home appliances. In: 2011 IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE). Singapur.

Jacobsen J., Meyer L. (2017) Praxisbuch Usability und UX: Was jeder wissen sollte, der Websites und Apps entwickelt (1. Aufl.). Bonn; Deutschland: Rheinwerk.

Joulie.at (2020) Homepage. Abgerufen am 19. Mai 2020 von https://joulie.at/

Keßler E., Rabsch S., Mandić M. (2015) Erfolgreiche Websites: SEO, SEM, Online-Marketing, Usability (3., aktualisierte und erw. Aufl.). Bonn; Deutschland: Rheinwerk.

Liu Y., Qiu B., Fan X., Zhu H., Han B. (2016) Review of smart home energy management systems. Energy Procedia, 104, 504-508.

Park E. S., Hwang B., Ko K., Kim D. (2017) Consumer acceptance analysis of the home energy management system. Sustainability, 9(12), 2351.

Renshaw J. A., Finlay J. E., Ward R. D., Tyfa D. (2003) Designing for visual influence: an eye tracking study of the usability of graphical management information. In: Proceedings of the IFIP Conference On Human-Computer Interaction, London.

Sarodnick F., Brau H. (2011) Methoden der Usability Evaluation: Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung (2., überarb. und aktualisierte Aufl.). Bern; Schweiz: Huber.

Son Y. S., Pulkkinen T., Moon K. D., Kim C. (2010) Home energy management system based on power line communication. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 56(3), 1380-1386.

Straub A., Volmer E. (2018) User's Perspective on Home Energy Management Systems. Environments, 5(12), 126.

Wäger M. (2016): Grafik und Gestaltung – das umfassende Handbuch (3., durchgesehene Auflage). Bonn; Deutschland: Rheinwerk.

Zhou B., Li W., Chan K. W., Cao Y., Kuang Y., Liu X., Wang X. (2016) Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 30-40.

Kontaktdaten:
Thomas Kremsner
Campus 1
7000 Eisenstadt
Email: thomas.kremsner@forschung-burgenland.at

Finanzielle Auswirkungen eines Elektrofahrzeugs auf Haushalte mit PV-Anlage

M. Sieberer, H. Strobel
FH Technikum Wien, Wien, Österreich

ABSTRACT: With the popularity of Electric Vehicles (EV) steadily increasing, the question of financial viability of the investment into an EV becomes more and more important (Statistik Austria 2019).
Already existing simulation tools provide simplified calculations and results for mobility costs to users. Important factors such as household electricity consumption and production by a photovoltaic system (PV), driving behavior as well as electricity and fuel tariffs are only vaguely considered or not at all.

To present a more accurate comparison between EVs and fossil fueled vehicles, a new simulation tool was developed that includes all factors mentioned above. Additionally, the impact of using the EV battery as storage for excess PV energy with the use of bidirectional charging was examined.

The simulation is a time-discrete one-year calculation of the household's electricity and mobility costs as well as the system's PV utilization rate. Those numbers are then extrapolated to a period of twelve years.

In this paper, an Austrian household featuring a mid-class and a compact car was examined. The results show that, over a period of twelve years, EVs are generally more expensive than fossil fueled vehicles. Especially the up-front investment of an EV is one of the core issues. Though the operational costs of EVs are noticeably lower than those of fossil fueled vehicles. The integration of bidirectional charging results in only minor savings for the user. The integration of an EV brings a notable improvement of the system's PV utilization rate, with bidirectional charging bringing even further improvements.

1. EINLEITUNG

Mit einem wachsenden Marktanteil von Elektrofahrzeugen am österreichischen Automobilmarkt, stellt sich immer wieder die Frage nach der Wirtschaftlichkeit einer solchen Investition (Statistik Austria 2019). Obwohl Elektrofahrzeuge in der Regel höhere Investitionskosten aufweisen als nutzungsäquivalente, fossil betriebene Fahrzeuge, können sich diese aufgrund geringerer Service- und Treibstoffkosten im Laufe der Lebensdauer wirtschaftlich amortisieren (Dost et al. 2016).

Um die Wirtschaftlichkeit einer solchen Investition zu überprüfen, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit folgender wissenschaftlicher Fragestellung:

Welche Auswirkungen auf die Strom- und Mobilitätskosten ergeben sich für private Endnutzerinnen und Endnutzer eines Elektrofahrzeugs im Vergleich zu einem fossil betriebenen Fahrzeug unter Berücksichtigung des Haushaltsstromverbrauchs und des von einer vorhandenen Photovoltaik-Anlage erzeugten Stroms und welchen Einfluss darauf hat die Nutzung der Fahrzeugbatterie als Zwischenspeicher mittels bidirektionalen Ladens?

Zur Beantwortung der Fragestellung wurde ein Simulationstool entwickelt, das eine realitätsnahe Bestimmung der Strom- und Mobilitätskosten des untersuchten Haushalts ermöglicht. Dies war notwendig, da bei bestehenden Tools wichtige Parameter, wie Stromerzeugung und -verbrauch des Haushalts und das Mobilitätsprofil der nutzenden Person nur mit unzureichender Genauigkeit berücksichtigt werden.

2. METHODIK

Das zur Klärung der wissenschaftlichen Fragestellung entwickelte Simulationstool wurde als frei zugängliche Website programmiert und wird nachfolgend beschrieben.

2.1 INPUT-PARAMETER

Die für das Simulationsmodell relevanten Input-Parameter sind zum einen Daten über Stromerzeugung und -verbrauch des Haushalts (siehe 2.1.1), die jeweiligen zu vergleichenden Fahrzeugmodelle (siehe 2.1.2), das Mobilitätsprofil der nutzenden Person (siehe 2.1.3), und die jeweiligen Strom- und Treibstofftarife inklusive Preissteigerungsraten (siehe 2.1.4).

Beim Elektrofahrzeug wird zusätzlich der Mindestladestand der Fahrzeugbatterie berücksichtigt. Dieser ist notwendig, um sicherzustellen, dass die Fahrzeugbatterie durch bidirektionales Laden nicht vollständig entladen wird und somit die nutzende Person keine Mobilitätseinschränkung erfährt. Der Mindestladestand wurde für alle weiteren Betrachtungen auf 60 % festgelegt.

2.1.1 Haushalt mit PV-Anlage

Für den Haushalt wurde ein Jahresverbrauchsprofil eines durchschnittlichen österreichischen Haushalts mit einem Jahresstromverbrauch von 3.550 kWh/a gewählt (Statistik Austria 2016). Die PV-Anlage mit 5 kWp liefert laut dem Jahreserzeugungsprofil 5.429 kWh/a. Für beide Stromprofile wurden Smart-Meter-Daten in Form von Viertelstunden-Werten verwendet.

2.1.2 Fahrzeugmodelle

Zum Vergleich von Elektro- und fossil betriebenem Fahrzeug wurde jeweils ein vom ADAC spezifizierter Kleinwagen und Mittelklassewagen ausgewählt. Damit soll eine nutzungsäquivalente Vergleichsbasis geschaffen werden. Sämtliche Fahrzeugdaten, wie sie im Simulationsmodell verwendet wurden, sind in Tab. 1 ersichtlich. Die Kosten für die Wartung der Batterie des Elektrofahrzeugs sind bereits in den Wartungskosten enthalten (ADAC 2019).

Tab. 1: Gewählte Fahrzeugmodelle

	Investition	Wartung	Verbrauch	Batteriekapazität
Kleinwagen	(€)	(€/a)	(kWh/100 km)	(kWh)
Renault Zoe LIFE	30.390	504	17,2	41,0
Renault Clio Life	12.790	660	41,2	-
Mittelklassewagen				
Hyundai IONIQ Elektro Hyundai i30	35.690 21.990	588 624	13,8 37,8	38,3 -

2.1.3 Mobilitätsprofile

Um ein möglichst allgemeingültiges Ergebnis zu erzielen, wurden zunächst drei verschiedene Mobilitätsprofile erstellt, die in Tab. 2 ersichtlich sind.

Das Mobilitätsprofil beinhaltet Uhrzeit, Dauer und Distanz einer Fahrt pro Wochentag. So werden Fahrzeugabwesenheiten einer typischen Woche festgelegt, die bei dem Simulationsmodell als wiederholend angenommen werden.

Tab. 2: Mobilitätsprofile mit Zeitraum der Fahrzeugabwesenheit und der täglich zurückgelegten Strecke

Mobilitätsprofil	Mo.-Fr.	Sa.
Vielfahrer	06:30-18:00 Uhr, 120 km	09:00-10:30 Uhr, 15 km
Wenigfahrer	07:30-17:00 Uhr, 40 km	09:00-10:30 Uhr, 5 km
Zweitauto	13:30-14:00 Uhr, 15 km	-

2.1.4 Festgelegte Tarife

Für eine detaillierte Ermittlung der Strom- und Mobilitätskosten mithilfe des Simulationstools wurden Tarife und Preissteigerungen für den Strompreis, den Spritpreis, die PV-Stromgestehungskosten und die PVEinspeisevergütung nach ausgiebiger Literaturrecherche ermittelt und festgelegt. Die so festgelegten Tarife und Preissteigerungen sind in Tab. 3 ersichtlich. Die jährliche Preissteigerung entspricht jeweils der mittleren Preissteigerung der letzten 15 Jahre.

Tab. 3: Festgelegte Tarife und Preissteigerungen

	Tarif	Preissteigerung	Quelle
	(€/kWh)	(%/a)	
Strompreis	0,2062	2,853	(Statistik Austria 2020)
Benzinpreis	0,12	2,847	(Statistik Austria 2020)
PV-Stromgestehungskosten	0,075	-	(PV Austria 2020)
Einspeisevergütung	0,06	-	(PV Austria 2020)

2.2 SIMULATIONSMODELL

Bei der Simulation handelt es sich um eine zeitdiskrete Berechnung aller Output-Werte in 15-Minuten-Abständen für 1 Jahr. Das bedeutet, dass alle Output-Werte entsprechend der Input-Parameter alle 15 Minuten berechnet werden. Die Ergebnisse aus dieser Jahressimulation werden dann für den Betrachtungszeitraum von 12 Jahren, unter Berücksichtigung der Preissteigerungsraten der Tarife, hochgerechnet.

Zur gesamtheitlichen Berechnung der Strom- und Mobilitätskosten wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das aus den Komponenten Haushalt, PV-Anlage, Fahrzeug und öffentlichem Stromnetz besteht. Je nach Parametrierung des Simulationsmodells ergeben sich drei Bewirtschaftungsstrategien (B), die in Abb. 1 dargestellt sind.

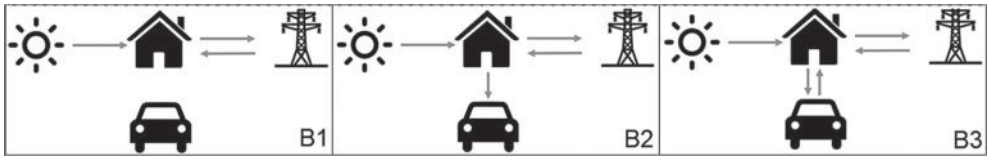


Abb. 1: Schematische Darstellung der drei Bewirtschaftungsstrategien mit B1: fossil betriebenes Fahrzeug, B2: Elektrofahrzeug, B3: Elektrofahrzeug mit bidirektionalem Laden

Bei B1 findet keine Interaktion zwischen dem Haushalt mit PV-Anlage und dem fossil betriebenen Fahrzeug statt. Strom wird je nach PV-Ertrag zur Versorgung des Haushalts genutzt, in das Netz eingespeist oder aus dem Netz bezogen.

Bei B2 kann bei PV-Überschuss auch das Elektrofahrzeug geladen werden, falls sich dieses laut Mobilitätsprofil zuhause befindet. Bei geringem PV-Ertrag und geringem Ladestand wird die Fahrzeugbatterie über Netzbezug bis zum definierten Mindestladestand aufgeladen, um die gewünschte Fahrzeugreichweite zu gewährleisten.

Bei B3 kann Strom aus der Fahrzeugbatterie zur Versorgung des Haushalts bei unzureichender Versorgung durch die PV-Anlage entnommen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass sich das Fahrzeug zuhause befindet und der Ladestand oberhalb des Mindestladestands ist.

2.3 KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPIS)

Die wichtigsten Schlüsselwerte (KPIs), welche auch zur späteren Gegenüberstellung der verschiedenen Bewirtschaftungsstrategien herangezogen werden, sind zum einen die Strom- und Mobilitätskosten nach 12 Jahren und zum anderen der PV-Direktnutzungsgrad gesamt, sowie aufgeschlüsselt in Anteil Haus und Anteil Elektrofahrzeug.

3. FALLANALYSE UND ERGEBNISSE

3.1 SZENARIEN

Mithilfe der zuvor festgelegten Mobilitätsprofile und Fahrzeugtypen wurden insgesamt sechs Szenarien definiert. Um eine gute Vergleichsbasis zu schaffen, wurde für alle Szenarien der gleiche Haushalt, die gleiche PV-Anlage und der idente Mindestladestand gewählt. Die Szenarien sind: 1a - Kleinwagen als Vielfahrer, 1b - Kleinwagen als Wenigfahrer, 1c - Kleinwagen als Zweitauto, 2a – Mittelklasse als Vielfahrer, 2b - Mittelklasse als Wenigfahrer und 2c - Mittelklasse als Zweitauto.

3.2 ERGEBNISSE

Die Simulationsergebnisse für die Strom- und Mobilitätskosten nach 12 Jahren sind für alle sechs Szenarien in Abb. 2 zu sehen. Die Kosten wurden jeweils für alle drei Bewirtschaftungsstrategien ermittelt.

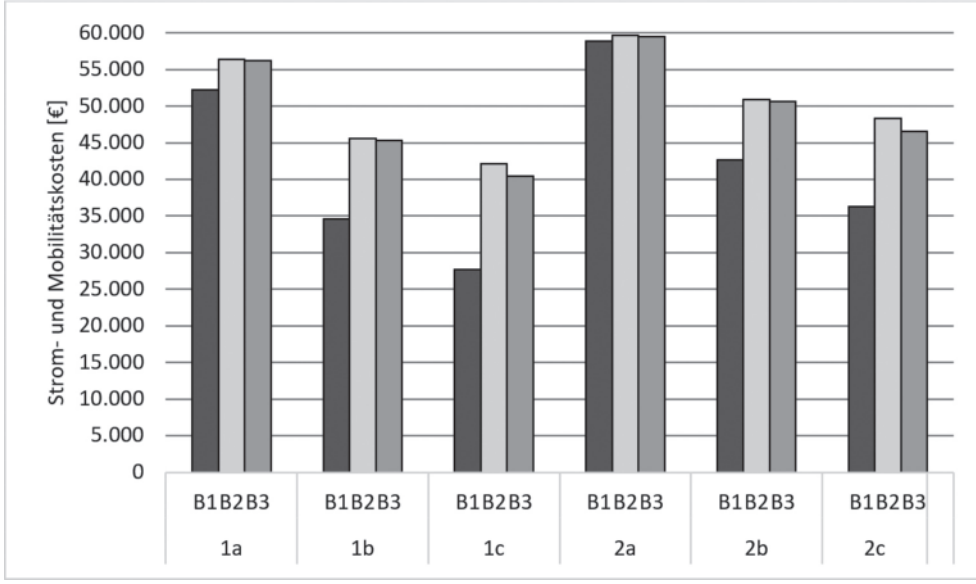


Abb. 2: Gegenüberstellung der Strom- und Mobilitätskosten in Euro je Szenario und Bewirtschaftungsstrategie mit B1: fossil betriebenes Fahrzeug, B2: Elektrofahrzeug, B3: Elektrofahrzeug mit bidirektionalem Laden, 1: Kleinwagen, 2: Mittelklasse, a: Vielfahrer, b: Wenigfahrer, c: Zweitauto

Wie in Abb. 2 gesehen werden kann, ist die Elektrofahrzeugnutzung in allen Szenarien teurer, jedoch ist der finanzielle Mehraufwand bei den Vielfahrer-Mobilitätsprofilen am geringsten. Die Nutzung des Elektrofahrzeugs als Zwischenspeicher mittels bidirektionalem Laden führt nur zu marginalen Einsparungen.

Es können nun folgende Aussagen bezüglich der verschiedenen Mobilitätsprofile, Fahrzeugtypen und Preisklassen getroffen werden:

Je größer die mit dem Fahrzeug gefahrene Distanz ist, desto höher sind die Strom- und Mobilitätskosten. Dies kann damit begründet werden, dass die Treibstoff- bzw. Stromkosten für das Fahrzeug direkt proportional zur gefahrenen Strecke sind.

Je größer die mit dem Fahrzeug gefahrene Distanz ist, desto geringer fällt der finanzielle Mehraufwand für ein Elektrofahrzeug aus. Der Grund hierfür ist der höhere Wirkungsgrad von Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren (EPA 2020). Daraus folgen niedrigere spezifische Energiekosten pro Kilometer beim Elektrofahrzeug, wodurch der finanzielle Mehraufwand mit steigender gefahrener Distanz sinkt. Dies und die geringeren Wartungskosten für Elektrofahrzeuge (siehe Tab. 1), resultieren in niedrigeren Betriebskosten im Vergleich zu fossil betriebenen Fahrzeugen.

Je länger die Dauer der Abwesenheit ist, desto stärker reduziert sich der Vorteil des bidirektionalen Ladens, da das Fahrzeug nur dann als Zwischenspeicher genutzt werden kann, wenn dieses zuhause steht.

Aufgrund der geringeren Betriebskosten von Elektrofahrzeugen ist bei ähnlich großen Anfangsinvestitionskosten beider Fahrzeugtypen eine Amortisation innerhalb des Betrachtungszeitraumes möglich. Die finanzielle Hürde stellen daher die hohen Anfangsinvestitionskosten für ein Elektrofahrzeug im Vergleich zu einem nutzungsäquivalenten fossil betriebenen Fahrzeug dar.

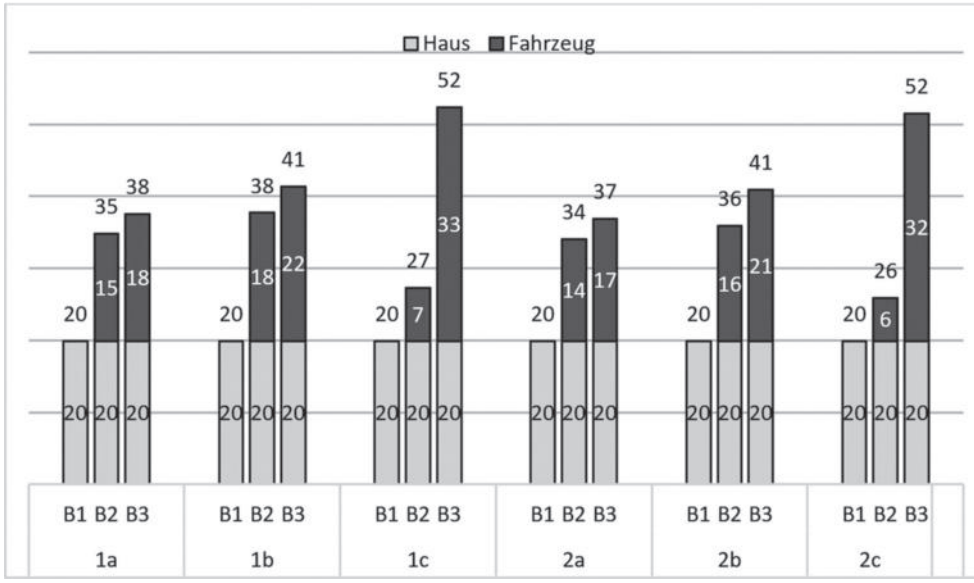


Abb. 3: Gegenüberstellung der PV-Direktnutzungsanteile in % je Szenario und Bewirtschaftungsstrategie mit B1: fossil betriebenes Fahrzeug, B2: Elektrofahrzeug, B3: Elektrofahrzeug mit bidirektionalem Laden, 1: Kleinwagen, 2: Mittelklasse, a: Vielfahrer, b: Wenigfahrer, c: Zweitauto

Aus der Betrachtung der PV-Direktnutzungsanteile (siehe Abb. 3) kann gesagt werden, dass dieser durch ein Elektrofahrzeug erhöht und durch bidirektionales Laden maximiert werden kann. Dies kann damit begründet werden, dass der PV-Überschussstrom bei einem Haushalt mit Elektrofahrzeug nicht zwangsweise in das Netz eingespeist werden muss, sondern in der Fahrzeugbatterie gespeichert werden kann. So kann der PV-Überschussstrom im Fall von B2 im Fahrzeug und in B3 sowohl im Fahrzeug als auch zur Deckung des Hausverbrauchs genutzt werden.

Die Szenarien 1c und 2c zeigen die Auswirkung der Zwischenspeicherung am deutlichsten. In B2 erreicht die Fahrzeugbatterie aufgrund der geringen Fahrzeugnutzung oft den Maximalladestand, was dazu führt, dass der PV-Überschussstrom ins Netz eingespeist werden muss. Bei B3 hingegen wird die Batterie regelmäßig durch den Hausverbrauch entladen, wodurch ein deutlich höherer Direktnutzungsgrad erreicht wird.

4. RESÜMEE

Aus den Untersuchungen kann gefolgert werden, dass sich die Investition in ein Elektrofahrzeug unter den gegebenen Umständen in keinem der Szenarien finanziell rentiert. Dies ist vor allem auf die höheren Investitionskosten der Elektrofahrzeuge zurückzuführen, da ein positiver Trend bezüglich der Betriebskosten von Elektrofahrzeugen gegenüber fossil betriebenen Fahrzeugen beobachtet werden konnte. Zudem kann der PV-Direktnutzungsgrad durch ein Elektrofahrzeug erhöht werden. Die Zwischenspeicherung von PV-Strom führt zu einer marginalen Verringerung der Strom- und Mobilitätskosten, als auch zu einer teils deutlichen Steigerung des PV-Direktnutzungsgrades.

5. LITERATUR

ADAC (2019) ADAC Autokosten Herbst/Winter 2019/2020. https://www.adac.de/_mmm/pdf/autokostenuebersicht_47085.pdf; 27.4.2020

Dost P., Spichartz P., Sourkounis C. (2016) Cost efficiency of electric vehicles and extended range electric vehicles for various user groups. IEEE

U.S.E.P.A. (2020) All-Electric Vehicles. http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml; 30.8.2020

PV Austria (2020) PHOTOVOLTAIC AUSTRIA | STROM VERKAUFEN. https://www.pvaustria.at/strom-verkaufen/; 30.4.2020

Statistik Austria (2019) Kraftfahrzeuge - Bestand. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html; 5.6.2020

Statistik Austria (2020) Preise, Steuern. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/preise_steuern/index.html; 30.4.2020

Statistik Austria (2016) Strom- und Gastagebuecher 2008/2012/2016. Statistik Austria, 32

Kontaktdaten:
Markus Sieberer, Hansi Strobel
FH Technikum Wien
Giefinggasse 6
1210 Wien, Österreich
E-Mail: ee18b086@technikum-wien.at, ee18b026@technikum-wien.at
Simulationstool: www.evsim.de.cool

A typology of end users' willingness to share energy data

C. Pfeiffer
Forschung Burgenland, Eisenstadt, Austria
S. Hatzl, E. Fleiß
University of Graz, Graz, Austria
C. Maier, T. P. Kremsner
Forschung Burgenland, Eisenstadt, Austria

ABSTRACT: The transition from a fuel-based, unidirectional to a renewable, de-centralized energy system requires the widespread adoption of new technological innovations. The project GEL-OpenDataPlatform (ODP) aims at implementing an open data platform for the energy sector to provide an easy access and overview of relevant data and interdependencies of a current and future integrated energy system. Hence, both personal and consumption data from end users are required to achieve a high-quality implementation. Considering all data protection regulations, these data must be provided on a voluntary basis. This voluntariness is questionable, as several studies have shown that individuals are concerned - amongst others - about data security and privacy. Moreover, individuals lack trust in actors, such as energy supply companies, when it comes to the adoption of smart technologies. As perceived concerns often prevail, or benefits for individuals are not apparent, their acceptance of new concepts is low. Previous studies underline the need for strong data protection practices, but also point out that the protection of privacy for end users is negotiable and that more efforts are needed to understand the willingness to share data. In order to foster a target group specific participation in the ODP, this paper identifies segments of end users based on data from a survey conducted in a climate and energy model region in Northern Burgenland. Results of a fuzzy analysis clustering indicate end user segments that can be labeled as Indecisives, Rejecting, and Open Minded. Whilst the biggest segment, the Indecisives, has an indifferent attitude towards the provision of energy data, the Rejecting show a very low willingness to share their energy data on an ODP. The Open Minded represent a relatively large cluster of 28 % in total. Although this segment (like others) expresses quite strong privacy concerns, it exhibits the highest level of willingness to share household energy data. Respondents in this segment have a higher level of education and predominantly live alone in their household. Furthermore, the results indicate a high sensitivity of willingness to share energy data depending on privacy concerns.

1. INTRODUCTION

The transition from a fuel-based, unidirectional to a renewable, de-centralized energy system requires the widespread adoption of new technological innovations. Energy data generated by smart devices and distributed in a smart grid can be used to improve decision-making process on energy related topics, bring about energy efficiency and grid optimization, which in turn reduces the environmental impact (Visser 2015). Moreover, energy data bear economic value as an important resource for the co-creation of energy services in data-driven business models (Camarinha Matos 2016, Visser 2015). Collaborative networks based on sharing platforms are needed in which energy data as resources are readily exchanged and shared in order to gain mutual benefits from the creation of value-added services (Grönroos 2008, Richter & Slowinski 2019). Novel technologies, which can foster end users' pro-environmental behavior, may require information exchange and data transfer among different stakeholders and, hence, face a lack of acceptance from end users (Fogg 2002).

The paper at hand presents results of the project GEL - OpenDataPlatform (ODP), which aims at contributing to these recent developments by implementing a web-based platform to provide consum-

ers an easy access, an overview and a better understanding of relevant energy data as well as to support behavior change and positively influence attitudes of consumers towards energy efficiency (Hamari et al. 2014).

Therefore, it is essential to understand the platform to be developed as a means of sharing and exchanging data, whereby personal and consumption data from end users are required. Considering all data protection regulations, these data must be provided on a voluntary basis. This voluntariness is questionable, as several studies have shown that individuals are concerned - amongst others - about data security and privacy (Chen et al. 2017). Previous studies underline the need for strong data protection practices, but also point out that the protection of privacy for end users is negotiable and that more efforts are needed to understand the willingness to share data (Silva et al. 2012). Thus, a recent report on energy data in the UK mentions: "*Consumers' appetite to share data is an underexplored element of the current privacy debate, it may be that consumers are willing to share more data so long as they have sufficient control and receive a fair share of the benefits*" (Energy Systems Catapult 2018, p. 47). Segmentation based on consumer perceptions of the impact of data sharing is a starting point for this (Milne et al. 2017). Consequently, the paper at hand explores which end user segments can be distinguished based on their willingness to share energy data.

2. THEORETICAL BACKGROUND

Digital technologies like cloud computing, platforms and smart devices/IoT (Cao et al. 2016, Rehman & Batool 2015) enable the possibility for data sharing in a broad community between individuals in a convenient way (Huang et al. 2015). Data shared by consumers is on the one hand a monetary asset with which a company can generate income (Zhao & Xue 2013). On the other hand, data sharing platforms serve as peer-to-peer networks enabling the exchange of data and are "[…] *business models which follow various value propositions*" and therefore increase the willingness to share data (Richter & Slowinski 2019).

Several studies investigating data sharing show different factors that are essential for consumers' willingness to share. Milne et al. (2017) distinguished four end user segments with respect to their willingness to share data, based on their perception of different types of risk (i.e., physical, monetary, social, and psychological risk), sensitivity and willingness to share personal data with marketers. Perceived benefits, like receiving monetary incentives due to sharing data, increase the intention to share personal data and, additionally, decrease internet privacy concerns (IPC), which negatively affect the willingness to share data online (Anic et al. 2018). Tschersich et al. (2016) examined perceived benefits and willingness to share data with regard to the benefits for oneself, others and companies. Their descriptive results show that the willingness to share data for one's own benefit is highest. With respect to gender, women are less willing to share data. The findings of Lee et al. (2019), who state that women who are 40 and younger have higher IPC than men of the same age, may be an explanation for this. Consumers, who are generally more willing to share personal information, have fewer IPC (Taddicken 2014). Amongst others, Lee et al. (2019) show that age and the level of education positively correlate with IPC. Older people have higher IPC; however, they are less likely to use the internet at all. Particularly younger people with high education have noticeable high IPC.

Beside privacy concerns and trust the factors related to the theory of planned behaviour TPB (Ajzen 1991) can play an important role in explaining willingness to share data. The theory assumes that behavior, which is dependent on the intention, is determined by attitudes, social norms and perceived behavioral control. Regarding attitude, Kranz et al. (2010) found that consumers have a higher intention to use smart meters voluntarily if their attitude towards them is positive. In addition, consumers with a positive attitude perceived their own subjective control about smart meters higher. If consumers evaluate personal information as relevant for their own socialization, they are more willing to share such information online (Hargittai & Marwick 2016). This explains why consumers are often willing to provide very personal data on social media platforms, even if they have privacy concerns. Additionally, Taddicken (2014) states that the higher the social relevance in consumers' perception, the more likely they are to ignore their own privacy concerns. The lack of control over online-shared information influences the sharing behavior of consumers negatively.

Individuals see a company or a platform owner in the responsibility to provide user-friendly regulations that help to maintain shared data (Hargittai & Marwick 2016). Moreover, perceived control is a very important factor that influences their attitude towards the smart meter technology and indirectly the intention to use smart meters in their households (Kranz et al. 2010).

To date, research results on the willingness to share specific energy data are rare. Energy data that can be traced to the household or an individual is personal data and is consequently subject of the General Data Protection Regulation. Therefore, households must give an active consent to share data (e.g., smart meter data "opt-in"). This consent or willingness to share data depends on the trust and benefit of households (Visser 2015, Deloitte 2017). Only one study could be found that asked households directly about their willingness to share energy data. The report on consumer views on sharing half-hourly settlement data from the UK government regulator Ofgem (2018) showed that energy consumption data are perceived to be least sensitive in comparison to other personal data. In addition, the study shows that almost half of consumers are willing to share their energy consumption data when this is connected to personal benefits (i.e., financial savings, improved energy efficiency) (Ofgem 2018), which partly supports the above-mentioned findings of data sharing in general.

In summary, it is assumed that the willingness to share energy data is determined by one's own benefit, the benefit for others, attitudes, social norms, control perception and privacy concerns. These factors, along with socio-demographic aspects, form the starting point for identifying user segments that are finally willing to share their energy data on the ODP.

3. METHODS

To identify different user segments based on their willingness to share energy data, a postal survey was conducted in December 2019 and January 2020 in a climate and energy model region in Northern Burgenland. Eight municipalities comprise this energy model region with a total of 8 351 households (Statistics Austria 2019). Sampling was designed by drawing one person (above 16) from each household by the "Last-Birthday Method" (Salmon & Nichols 1983). The final sample consists of n=548 respondents, thus the response rate was 6.56 %. A sample error of 3.40 % is to be expected.

However, to ensure fully representative statements, weighting was done by means of the standard integrated EU-SILC design (Osier et al. 2006) stated in equation (1).

$$1/C \leq \frac{\left(q_{ijk}/\bar{q}_{.j.}\right)\left(w_{ijk}/\bar{w}_{.j.}\right)}{d_{ijk}/\bar{d}_{.j.}} \leq C \qquad (1)$$

C is a constant trimming value (which is set to C=4.50) to recode extreme weights to more acceptable values, q is the non-response correction, w is the calibration in terms of age, gender, and level of education, and d corresponds to the design weights, each for observation i=1,…,n_j, from municipality j=1,…,8 and household size k=1,…,4 as design characteristic.

At the very beginning of the survey, a brief description of an online energy platform was provided. The specific term "ODP" was consciously omitted in order to avoid confusion. Respondents received information that such an online energy platform provides private households the possibility to share energy data anonymously on a voluntary basis. To clarify the term "energy data", some examples were provided (e.g. electricity consumption of a washing machine or a stove). Possible advantages of an online energy platform were described, such as the possibility to receive tailored information to save energy, or to compare own electricity consumption with other households.

Tab. 1: Constructs to elicit willingness to share energy data

Constructs[1]	Items	Alpha
Personal advantage	In general, I would be willing to share energy data on an OEP[2] if I can profit from it. I would be willing to share energy data on an OEP if it provides useful services for me. If I see a benefit for myself, I would in general be willing to share energy data on an OEP.	0.95
Advantage for others	In general, I would be willing to share energy data on an OEP if other people could profit from it. I would be willing to share energy data on an OEP if it provides other people with useful services. If I see a benefit for other people, I would in general be willing to share energy data on an OEP.	0.96
Privacy concern	I am concerned about submitting information on the Internet because of what others might do with it. I am concerned that web sites require too much personal information for registration. I am concerned that someone may use my ID and password illegally. In general, I am concerned about my privacy when I use the Internet.	0.89
Attitude	Sharing energy data on an OEP would be… Very unpleasant … very pleasant Very bad … very good Very worthless … very valuable Very harmful … very beneficial	0.95
Subjective norm	People who are important to me think I should contribute to an OEP by sharing energy data. People who are important to me would share their energy data. People who can influence me think I should share my energy data.	0.89
Perceived behavioral control	It makes a difference whether I share my energy data on an OEP. Sharing energy-data on an OEP is entirely in my control. I am confident in my ability to share energy data on an OEP.	0.76

1 N ranges between 429 and 548; Alpha = Cronbach Alpha values for mean scales

2 Note: The abbreviation OEP is used according to the questionnaire: online energy platform.

The survey included different constructs that are commonly used in previous studies addressing individuals' willingness to share energy data in general. All items were adapted to the context of sharing energy data on an online energy platform. For all statements, a five-point scale was used, whereby higher values indicate stronger agreement (see Tab. 1). Items used for all constructs were aggregated, and consequently mean scales were computed. *Personal advantage* (α=0.95) captures respondents' level of willingness in case they assume a general advantage or useful services whilst *advantage for others* (α=0.96) addresses their willingness to share data, if they anticipate said advantages or services for others. Both constructs were borrowed from Tschersich et al. (2016).

The questionnaire also included items to measure *information privacy concern* (α=0.89), i.e. if respondents are in general concerned about data security, information sharing and privacy when using the internet. Therefore, four items were lent from Lee et al. (2019). Moreover, constructs from the TPB, lent from Cho et al. (2010), were adapted to the context of data sharing. These include respondents' general *attitude* (α=0.95) towards data sharing, *subjective norm* (α=0.89), which captures important referents' opinions towards data

sharing, and *perceived behavioral control* (α=0.76), i.e. if people think they are able to share energy data if they want to. Furthermore, the way in which social media are used was investigated (i.e. mainly active, partly/partly, mainly passive, not at all).

The questionnaire concluded with several sociodemographic characteristics, i.e. gender, age, highest educational level and household size.

To identify end user segments, a fuzzy analysis clustering (Kaufman & Rousseeuw 2005) was used by minimizing the objective function stated in formula (2).

$$\sum_{v=1}^{k} \frac{\sum_{i,j-1}^{n} u_{iv}^{r} u_{jv}^{r} d(i,j)}{2 \sum_{j-1}^{n} u_{jv}^{r}} \tag{2}$$

The number of clusters is chosen with k, n is the number of observations, u_{iv}, denotes the membership of observation i in cluster v (with u_{jv} and j, respectively), r is the membership exponent (which is set to r=1.10), $d(i,j)$ the dissimilarity between the observations i and j. calculated by the squared Euclidean distance.

4. RESULTS

4.1 SAMPLE DESCRIPTION AND CONSTRUCTS

Respondents are on average 56.04 years old (sd=15.11). 57.84 % (n=310) were male, and 42.16 % (n=247) female. With respect to the highest level of education, 57.89 % state to have no high school diploma, whilst 26.90 % have one, and 15.20 % hold a university degree. Respondents predominantly live in a two-person household (50.19 %). 14.34 % state to live alone. 16.04 % live in a three-person household, whilst households with more than four persons are also quite frequently present (19.43 %).

The highest mean value (3.84) is observed for privacy concerns, indicating that respondents are rather concerned about sharing information on the internet, or providing personal information, e.g. for registration purposes. Privacy issues in general, and potential misuse of password or ID are also part of this rather broad privacy concern. However, respondents are neutral towards willingness to share energy data, if they anticipate a personal advantage (mean=3.04) in terms of general profit/benefit or useful services. A similar result can be observed if respondents assume that their sharing will be useful for others (mean=2.90).

All three constructs lend from the TPB exhibit comparatively lower mean values, although the differences are not substantial. Whilst respondents perceive to have – at least to some extent – behavioral control (mean=3.19), they tend to show a rather negative average attitude towards sharing energy data on an online energy platform (mean=2.79); this result is similar for subjective norm, which means that respondents are more likely directed in a negative direction with respect to sharing energy data (mean=2.51).

A weak negative relationship is identified between respondents' privacy concerns and their personal advantages-driven willingness (r=0.12). There is no further correlation of privacy concern with any other construct. However, the constructs respondents' willingness to share energy data driven by personal advantages, their assumption that their sharing will be useful for others, their general attitude towards sharing energy data on an online energy platform, their subjective norm, and their perceived behavioral control indicate strong positive bivariate correlations (r>0.05; see Tab. 2).

Tab. 2: Descriptive statistics and correlations

	Constructs[1]	mean	sd[2]	2	3	4	5	6
1	Personal advantage	3.04	1.29	0.85**	-0.12*	0.71**	0.69**	0.79**
2	Advantage for others	2.90	1.27		-0.08	0.70**	0.74**	0.80**
3	Privacy concern	3.84	1.09			-0.05	-0.01	-0.03
4	Attitude	2.79	1.39				0.59**	0.70**
5	Subjective norm	2.51	1.06					0.74**
6	Perceived behavioral control	3.19	1.14					

1 N ranges between 429 and 548,
2 standard deviation; + p <0.10, * p <0.05, ** p <0.01.
All scales range from 1 to 5; higher values indicate stronger agreement.

4.2 END USER SEGMENTS

Based on the six constructs of willingness to share energy data (see section 3), a fuzzy analysis clustering was performed that supports a three-cluster solution. To represent this cluster solution, a principal components analysis was carried out in advance. In accordance to correlation analyses, the first principal component comprises the constructs personal advantage, advantage for others, attitude, subjective norm and perceived behavioral control with loadings of $0.41<\gamma<0.47$. The second principal component is characterized only by the construct privacy concern ($\gamma=0.98$). In comparing the groups and their willingness level, there are quite big differences among the first principal component (see Fig. 1).

One segment is more toward the average scale values, comprising 42.77 % of the participants, whereas the remaining teenagers belong to two more extreme groups, one with a rather high willingness (28.30 %) and one with a very low willingness to share energy data (28.93 %). The group with the highest level of willingness was named the *Open Minded*, as they had most positive scores in all the constructs. The members of the *Indecisives* had the average level of willingness and the *Rejecting* formed the segment with the lowest willingness to share energy data.

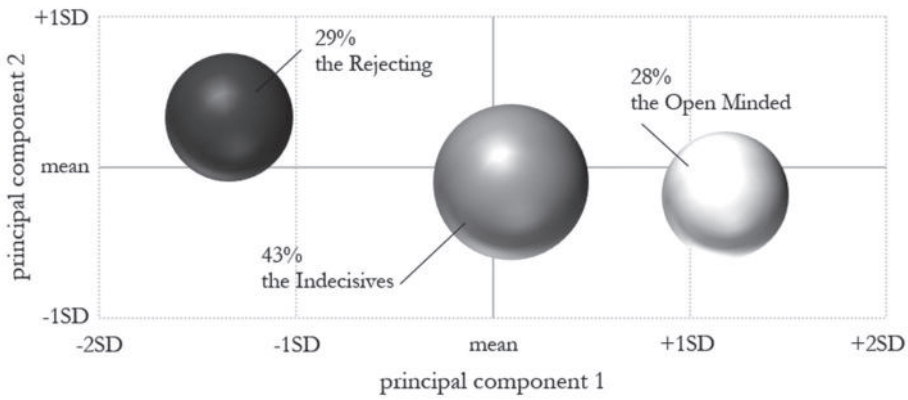


Fig. 1: Cluster proportions according to the constructs of willingness to share energy data

The biggest group, named the *Indecisives*, has an average age of 55.89 years (sd=13.09). Whilst age and level of education is distributed as expected, the Indecisives are characterized rather by households with 2 or more persons. Although their subjective norm is rather weak (mean=2.58), their willingness to share energy data is moderate if they anticipate both a personal advantage (mean=3.18), and the expectation that their sharing will be useful for others (mean=3.02). Their characteristics in terms of behavioral control (mean=3.36) and average attitude (mean=2.77) indicate no direction worth mentioning. However, the members of this group have rather high privacy concerns (mean=3.73).

The *Rejecting* represent a segment with an overproportionate number of females (47.79 %). With an average age of 60.69 years (sd=11.76), they are comparatively older and tend to have no high school diploma (80.00 %). The Rejecting are characterized by very low willingness to share energy data among all constructs. According to this, their privacy concerns are highest among all segments (mean=4.15). They more often do not use social media at all (39.84 %).

In the third segment, the *Open Minded*, the proportion of males (58.65 %) predominates. They have an average age of 58.42 years (sd=12.12). Respondents in this segment tend to have either a high school diploma (18.75 %) or university degree (7.81 %) and predominantly live alone in their household (37.12 %). Although this segment (like others) expresses quite strong privacy concerns (mean=3.64), it exhibits the highest level of willingness to share household energy data. The Open Minded show a very positive average attitude towards sharing energy data on an online energy platform (mean=4.34), perceive quite high behavioral control (mean=4.23) and are driven by personal advantages that they expect from sharing energy data (mean=4.22). In general, this segment is more likely to use social media actively (8.21 %).

Tab. 3: Profiling the user segments and dominating demographic characteristics

	the Indecisives	the Rejecting	the Open Minded
n (%)	204 (42.77 %)	138 (28.93 %)	135 (28.30 %)
Age	55.89 (13.09)	60.69 (11.76)	58.42 (12.12)
Personal advantage	3.18 (0.77)	1.62 (0.95)	4.22 (0.78)
Advantage for others	3.02 (0.78)	1.45 (0.67)	4.12 (0.86)
Privacy concern	3.73 (1.08)	4.15 (1.05)	3.64 (1.04)
Attitude	2.77 (0.91)	1.39 (0.73)	4.34 (0.78)
Subjective norm	2.58 (0.64)	1.43 (0.56)	3.43 (1.00)
Perceived behavioral control	3.36 (0.51)	1.86 (0.88)	4.23 (0.76)
Gender	balanced	female	male
Level of education	balanced	no diploma	at least diploma
Household size	at least 2	balanced	1
Use of social media	balanced	not at all	active

n=477; mean values, standard deviations in brackets.

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

This paper examined the willingness to share energy data in a climate and energy model region in Northern Burgenland that comprises eight municipalities. Further, a fuzzy analysis clustering showed that the respondents can be segmented into three different groups that differ in their willingness to share energy data: the Indecisives, the Rejecting, and the Open Minded.

The *Indecisives* have a neutral or even indifferent attitude towards the provision of energy data. In addition, the subjective norm, which is an important factor influencing the willingness to share energy data according to Hargittai & Marwick (2016), is rather weak in this segment. The *Rejecting* show a very low willingness to share energy data. They perceive neither a personal advantage, nor an advantage for other people by making their own energy data available. In this segment the considerable concerns about privacy are also reflected in the extremely low use of social media. This finding is in line with Tschersich et al. (2016), who found a lower willingness of women to share data, and Lee et al. (2019), who identified a connection between women and higher IPC. In slight contrast to the results of Lee et al., the average age in this segment is considerably higher. The *Open Minded* express quite strong privacy concerns but exhibit the highest level of willingness to share energy data. Due to the active use of social media in this segment, the results of Taddicken (2014) and Hargittai & Marwick (2016) are supported. In terms of household size, this segment represents the counterpart to the Indecisives, especially since it is characterized by one-person households with a higher level of education. People in this segment expect both own advantages and advantages for others from sharing energy data.

In respect to the ODP, the primary target group of the Open Minded represents a relatively large segment of 28 % in total. Their characteristics indicate that people living alone (can) devote their leisure time more intensively to the topic of energy and optimizing their own household. Expressed in absolute values, this means an impressive number of 2 363±81 households that are very receptive to voluntarily provide their own energy data to an ODP.

As the results indicate a high sensitivity of willingness to share energy data depending on privacy concerns, possible interactions between privacy concerns and other barriers to data provision remain unclear. Adequate procedures for raising the users' awareness and targeted communication must be found to clarify possible misconceptions or fears among end users. Furthermore, appropriate incentives or added values for the provision of data must be designed. This will enable further valuable data to be utilized for the deployment of an integrated and sustainable energy system.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

This project is supported with the funds from the Climate and Energy Fund and implemented in the framework of the RTI-initiative "Flagship region Energy".

7. REFERENCE

Ajzen I. (1991) The theory of planned behaviour. In: Organizational Behavior and Human Decision Processes 50, p.179-211.

Anic I.-D., Budak J., Rajh E., Recher V., Skare V. , Skrinjaric B. (2018) Extended model of online privacy concern: what drives consumers' decisions? In: Online Information Review.

Camarinha Matos, L. M. (2016) Collaborative smart grids – A survey on trends. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 65, p.283-294.

Cao Q. H., Khan I., Farahbakhsh R., Madhusudan G., Lee G. M., Crespi N. (2016) A trust model for data sharing in smart cities. In: 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), 1-7, IEEE.

Chen C.-f., Xu X., Arpan L. (2017) Between the technology acceptance model and sustainable energy technology acceptance model: Investigating smart meter acceptance in the United States. In: Energy Research & Social Science 25, p.93-104.

Cho H., Chen M., Chung S. (2010) Testing an Integrative Theoretical Model of Knowledge-Sharing Behavior in the Context of Wikipedia. In: Journal of the American Society for Information Science and Technology 61 (6), p.1198-1212.

Deloitte (2017) New Technologies Case Study: Data Sharing in Infrastructure – A final report for the National Infrastructure Commission. London: Deloitte. URL https://www.nic.org.uk/wp-content/uploads/Data-sharing-in-infrastructure.pdf, access on 11.09.2020.

Energy Systems Catapult (2018) Energy Data Review. Birmingham: Energy Systems Catapult. URL https://es.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2018/12/Energy_ Data_Review_Summary_Final.pdf, access on 11.09.2020

Fogg B. J. (2002) Persuasive Technology - Using Computers to Change What We Think and Do. In: Ubiquity 6137(5), p.89-120.

Grönroos C. (2008) Service logic revisited: who creates value? And who co-creates? In: European Business Review 20(4), p.298-314.

Hamari J., Koivisto J., Pakkanen T. (2014) Do Persuasive Technologies Persuade? - A Review of Empirical Studies. In: Proceedings of 9th International Conference, PERSUASIVE 2014, 21–23 May 2014.

Hargittai E., Marwick A. (2016) "What can I really do?" Explaining the privacy paradox with online apathy. In: International journal of communication 10, 21.

Huang X., Liu J. K., Tang S., Xiang Y. Liang K., Xu L., Zhou J. (2015) Cost-Effective Authentic and Anonymous Data Sharing with Forward Security. In: IEEE Transactions on Computers, 64/6.

Kaufman L., Rousseeuw P. J. (2005) Finding Groups in Data – An Introduction to Cluster Analysis. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons.

Kranz J., Gallenkamp J., Picot A. (2010) Power Control to the People? Private Consumers' Acceptance of Smart Meters. In: ECIS 2010 Proceedings, 96.

Lee H., Wong S. F., Oh J., Chang Y. (2019) Information privacy concerns and demographic characteristics: Data from a Korean media panel survey. In: Governmental Information Quarterly 36, p.294-303.

Milne G. R., Pettinico G., Haijat F. M., Markos E. (2017) Information Sensitivity Typology: Mapping the Degree and Type of Risk Consumers Perceive in Personal Data Sharing. In: The Journal of Consumer Affairs 51(1), p.133-161.

Ofgem (2018) Consumer views on sharing half-hourly settlement data. Research report. London: Ofgem. URL https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2018/07/ consumer_views_on_sharing_hhs_data_1.pdf, access on 11.09.2020.

Osier G., Museux J.-M., Seoane P., Verma V. (2006) Cross-sectional and longitudinal weighting for the EU-SILC rotational design. URL https://www.iser.essex.ac.uk/files/survey/ulsc/methodological-research/mols-2006/scientific-social-programme/papers/Osier.pdf, access on 02.09.2020.

Rehman M. H., Batool A. (2015) Pattern-based Data Sharing in Big Data Environments. In: Digital Technologies 1, p.39-42.

Richter H., Slowinski P. R. (2019) The Data Sharing Economy: On the Emergence of New Intermediaries. IIC 50, p.4-29.

Salmon C., Nichols J. S. (1983) The Next-Birthday Method of Respondent Selection. In: Public Opinion Quarterly 47, p.270-276.

Silva P. G. D, Karnouskos S., Ilic D. (2012) A survey towards understanding residential prosumers in smart grid neighbourhoods. In: Proceedings of 3rd IEEE PES ISGT Europe, 14–17 Oct. 2012.

Statistics Austria (2019) Register-based Labour Market Statistics 2017 – Households and Families, URL http://www.statistik.at/blickgem/, access on 21.11.2019.

Taddicken M. (2014) The 'Privacy Paradox' in the Social Web: The Impact of Privacy Concerns, Individual Characteristics, and the Perceived Social Relevance on Different Forms of Self-Disclosure. In: J. of Computer-Mediated Comm. 19 (2), p.48–273.

Tschersich M., Kiyomoto S., Pape S., Nakamura T., Bal G., Takasaki H., Rannenberg K. (2016) On Gender Specific Perception of Data Sharing in Japan. In: J.-H. Hoepmann & S. Katzenbeisser (Hrsg.), SEC 2016, IFIP AICT 471, p.150-160.

Visser J.V.G. (2015) Barriers in open energy data, An exploratory study into open energy data barriers and their mitigation strategies. Thesis. Delft University of Technology.

Zhao X., Xue L. (2013) Competitive target advertising and consumer data sharing. In: Journal of Management Information Systems 29(3), p.189-222.

Contact:
Christian Pfeiffer
Campus 1
7000 Eisenstadt
Email: christian.pfeiffer@forschung-burgenland.at

Session 4a

S3HubsinCE

Connected by Materials – Application examples in Architecture and Design

Kunze, Mauersberger, Pagel / Fraunhofer Institute IWU /DE

Connected by Materials – Application examples in Architecture and Design

H. Kunze, A. Mauersberger, K. Pagel
Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology (IWU), Chemnitz and Dresden, Germany

ABSTRACT: Thermal shape memory alloys (SMA) are materials which offer the special ability to "remember" their original shape. After a permanent plastic deformation followed by heating up above a critical temperature the material transforms back to its initial state. Due to their multifunctionality, SMAs also show a significant change in electrical resistance during deformation and can therefore also be used as sensors. SMAs possess to solve a large number of actuation tasks in an elegant, cost-efficient and weight-saving way. Due to intensive material research and an increasing quality of semi-finished SMA products at simultaneously decreasing costs numerous SMA applications entered the marked in recent years. In the field of architecture and design, further advantages of SMAs apply. For example, the possibility of textile processing of SMA wires enables a high degree of functional integration in soft structures. Furthermore, SMAs operate completely noiselessly, which is an essential distinguishing feature compared to conventional drive principles, especially when applied in closed rooms. Due to the activation with thermal energy, SMAs can also be used energy self-sufficiently, i.e. solely by using ambient heat. The paper will give an overview of potential SMA applications in the field of architecture and design. That covers shape changing surfaces to realize variable room acoustics. Adaptive textiles, Optical shading systems and SMA sensor applications.

1. INTRODUCTION

Functional materials, so-called smart materials, have the ability to adapt to external environmental conditions, i.e. they are able to change their properties through external physical stimuli so that they are optimized for their particular environment. Energy conversion processes accompany these processes. Thus, smart materials can for example, convert mechanical energy into electrical energy and vice versa. These properties enable intelligent materials to operate simultaneously as sensors and actuators. That possesses high functionality in simplified structures, already on the material level. Thus, a new and better quality can be achieved in product design (Drossel et al. 2015). The form stringently follows the function, the usability becomes intuitive and follows natural paragons.

As physical stimuli for example, electrical fields, magnetic fields, heat or light can be considered. The materials react by changing their geometry, their electrical resistance or their capacity. The variety of known smart materials is very large (see Fig. 1).

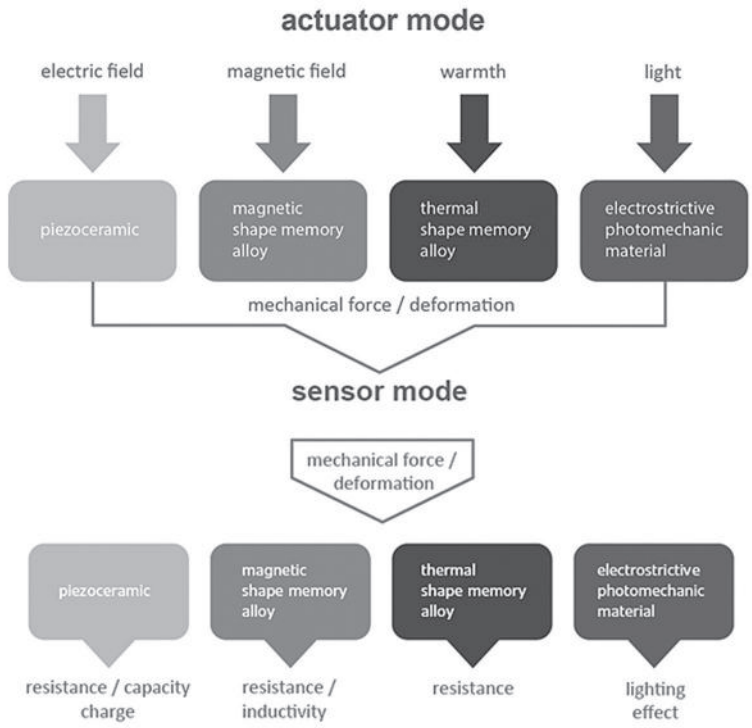


Fig. 1: Overview of Smart Materials (Drossel et al. 2017)

Thermal shape memory alloys (SMA) are a very important group of smart materials. They offer the special ability to remember their original shape. A reversible austenite-martensite phase transformation is required for the shape memory effect (see Fig. 2). During the phase transformation from martensite to austenite (heating up) the material is able to perform mechanical work and significantly changes its electrical resistance. The amount of work depends on the mechanical boundary conditions. The maximum recoverable strain these materials can hold without permanent damage is up to 8 %. In this case the work output is zero. In contrast blocking the actuator causes a very high force but no deflection. A well known thermal shape memory alloy is a binary alloy of Nickel and Titanium.

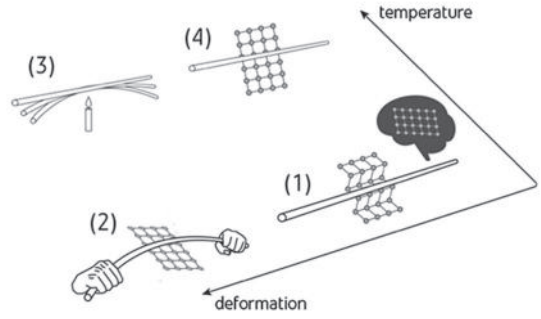


Fig. 2: Thermal shape memory effect (Drossel et al. 2017)

Due to intensive material research and an increasing quality of semi-finished SMA products at simultaneously decreasing costs numerous SMA applications entered the marked in recent years. A comprehensive overview of SMA applications is given in (Mohd Jani et al. 2014). Especially due to their energy self-sufficient operation, SMAs are also suitable for applications in architecture and building technologies. Some of these potential applications are briefly introduced and explained in the following.

2. OPTICAL SHADING SYSTEMS

Construction industry accounts for about half of the world´s total energy consumption (UNEP 2007). Global climate change can only be mitigated, particularly if buildings diminish energy usage and raw materials throughout their entire life cycle. Besides, the cooling energy demand for buildings has risen steadily in recent years (Fig. 3). International studies (Adnot & Waide 2003) assume that the demand is going to quadruple between 1990 and 2020. This trend results in immense ecological problems and increasing financial expenditure. Directives, such as the European Buildings Directive (Guideline 2010) call for an increased appliance of passive building cooling measures.

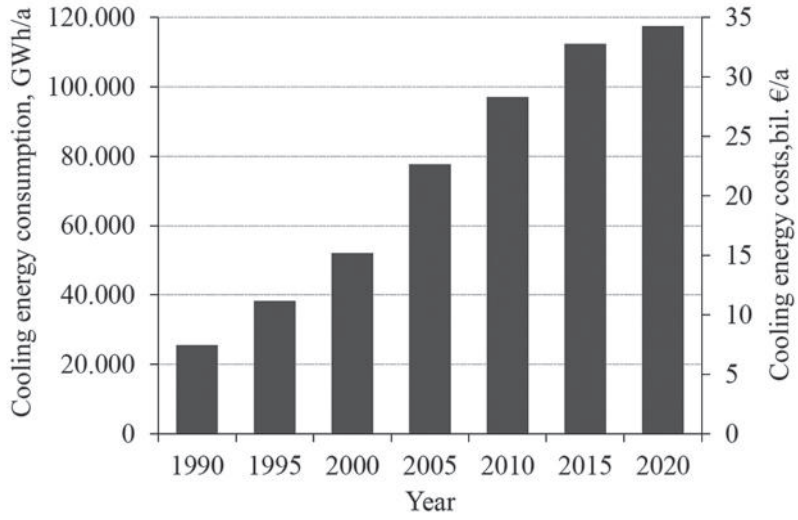


Fig. 3: Increase in cooling energy in the EU from 1990 to 2020 (Adnot & Waide 2010). The cost calculation of cooling energy was based on the electricity price of 29.8 cents/kWh (November 2017), according to the Federal Ministry of Education and Research of Germany.

The implementation of well-designed shading systems can efficiently reduce the need for cooling energy by up to 75 % (IEE 2020), since external ones nearly avoid indoor heating (Pinterić 2017). Furthermore, energy savings are particularly high when the shading system adapts to the climatic conditions.

2.1 SELF SUFFICIENT SHADING SYSTEMS

To overcome the problem of increased energy consumption for cooling purposes, a self-sufficient system for shading large glass façades, named Solar Curtain has been designed. Its temperature-reactive blossoms adapt the aesthetics of nature. When heated, the integrated shape memory alloys (SMA) remember a previously trained initial shape, open the blossoms and, thus, shading the façade. No external power supply is needed.

The SMA's activation temperature can be determined according to the requirements on site, allowing for example partial shading. When the incident heat decreases, the blossoms close, revealing the panorama. As the SMA combine actuating and sensory properties, the number of parts needed is reduced significantly compared to traditional systems. Thanks to the modular setup, Solar Curtain can be applied even on curved façades like airports or train stations.

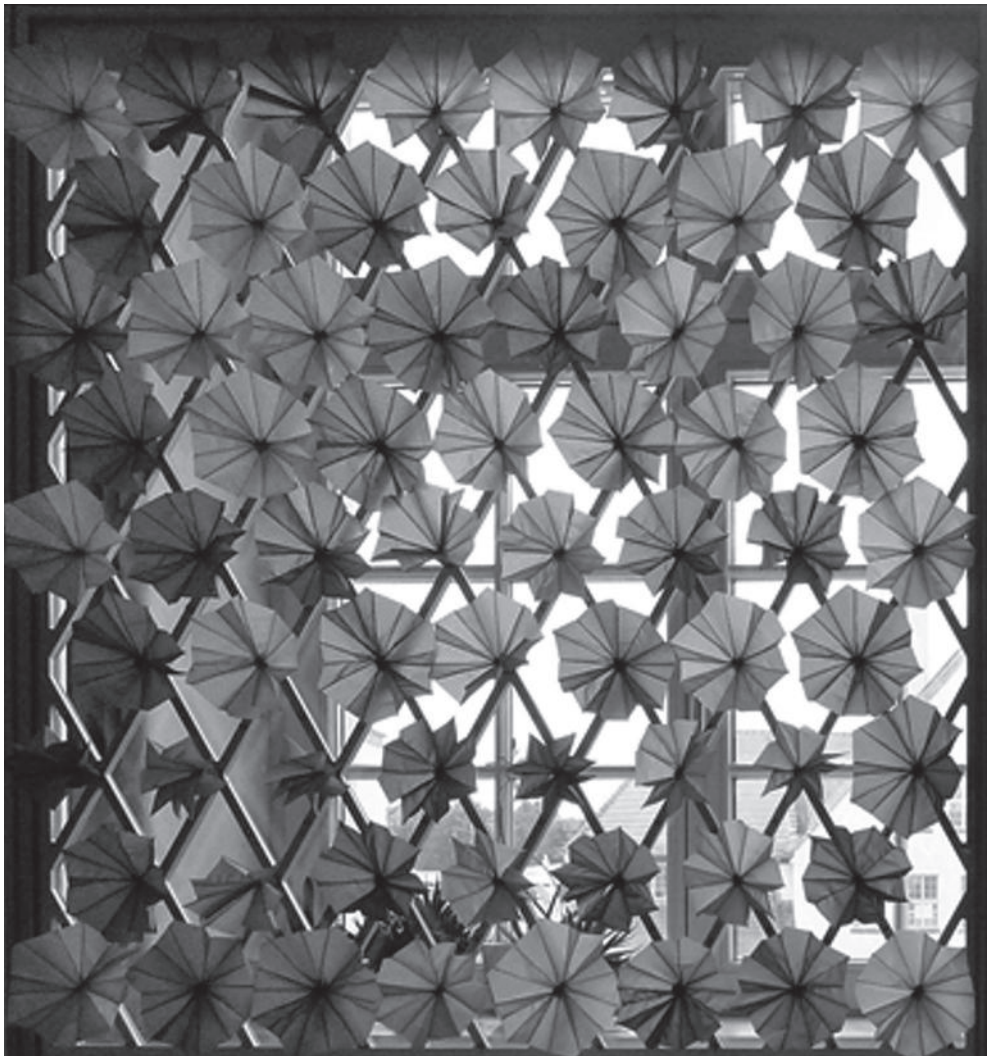


Fig. 4: Solar Curtain (Drossel et al. 2017)

2.2 EXTERNALLY ACTIVATED SHADING SYSTEMS

Another possibility to realize a shading system is the active approach where shading elements are moved by actuators - demand-oriented shading. Such system comprises of centrally-mounted moveable lamellas, which are horizontally installed. Due to this design, these feature one of the highest efficiency in terms of drive energy, solar shading as well as natural lighting. Conventionally these systems are driven by electromechanical motors. However such drives are subjected to certain drawbacks like big cross sections

and weight, high energy consumption and noise. The application of SMA can solve this problem. For this purpose a SMA system to move the lamellas of a shading system was developed (see Fig. 5). Therefore an SMA actuator is fixed to a pulley to rotate the lamella between 0° and 90°. It can be activated by the Joule effect when electrical current is forced through the SMA wire 1. In this scenario, a second SMA-based mechanism consisting of a push-push mechanism locks the angular position of the lamella every 30°. Thus, no supplementary energy is required to hold the position but just to activate the SMA wires. Both SMA-actuators, whose restoring components are torsional and compression springs, are merged into a single one. The system is currently under experimental investigation. The results will be presented in the near future.

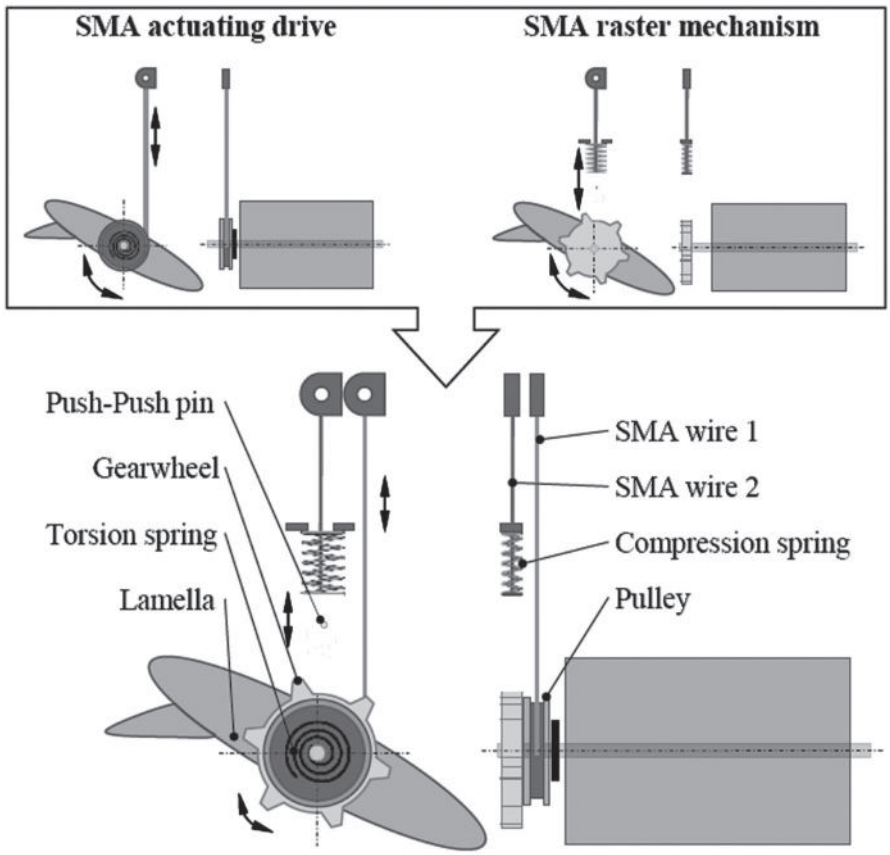


Fig. 5: SMA-based actuators to move one lamella (Navarro et al. 2017)

3. ADAPTIVE TEXTILES

Another possibility to use SMA wires in the architectural context is to implement them in textile surfaces. These can be used as textile sun protection that can make structural adjustments within the surface. In contrast to the previously mentioned shading systems flexible textiles can adapt to even complex building geometries and create dynamic transitions in its structure or functionality. The light and flexible structure

allows its application both in new buildings and in the energetic refurbishment of existing buildings, which accounts for a large part of the economic construction volume.

There are numerous possibilities how to implement the SMA wire into textile structures. Especially very thin wires can even be implemented by conventional textile manufacturing methods like stitching, weaving working and knitting. Following two approaches how to use SMAs in textile structures to realize changing surfaces are presented.

The first approach is the moving concept. Here two separate textile surfaces are moved relative to another (see Fig. 6). The large surface of the textile easily enables to implement comparatively long SMA wires to achieve a high stroke.

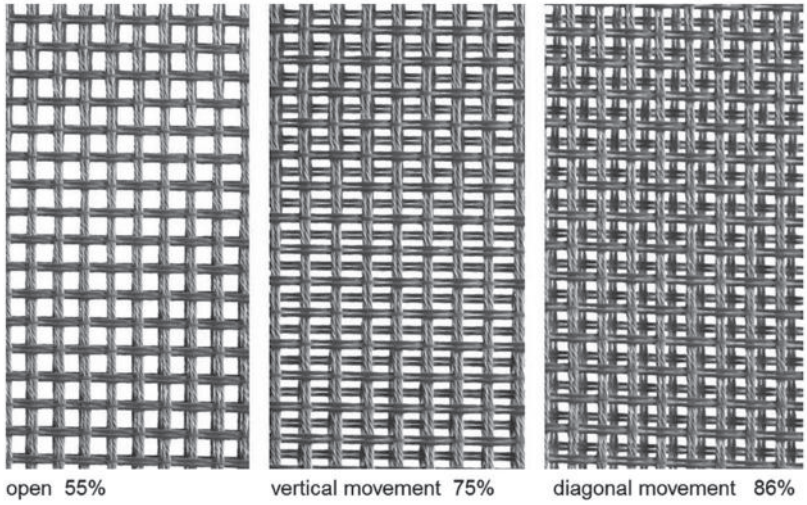


*Fig. 6***:** *SMA textile concept moving concept*

The second approach is the pulling concept. A continuous, stiffened textile band is attached to a rope net. The SMA wire integrated in the textile causes the surface to buckle and thus close. The force required to reset the wires when cooling is generated by the material tension in the textile. With this approach, shading levels of 10 % - 100 % are possible.

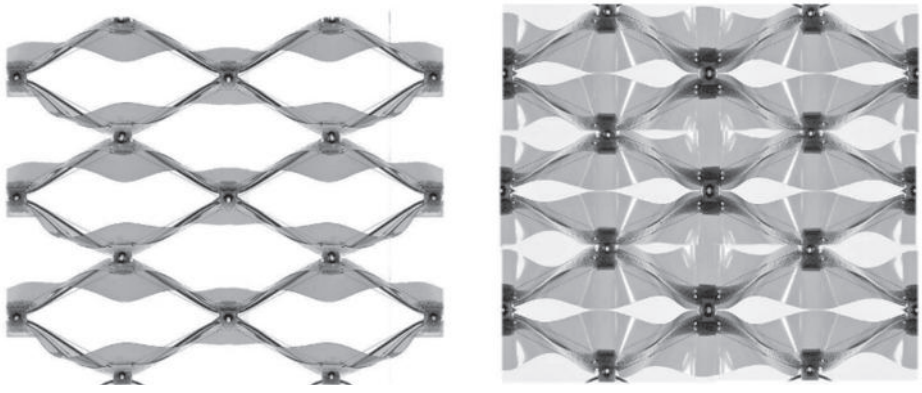


*Fig. 7***:** *SMA textile concept pulling concept*

4. SHAPE CHANGING SURFACES FOR VARIABLE ROOM ACOUSTICS - SOUNDADAPT

Musicians and music teachers usually do not want to deal with acoustic impacts from different practice or rehearsal rooms. Focusing on their main profession, performing resp. teaching music, they need clear feedback of their instrument play to know where to study more intensive or when to be satisfied. Room acoustics as quality criteria have been subject of research since many decades. Almost no room is acoustically perfect. For example, when classical music is being recorded, many musicians accept compromises because every studio sounds different. In addition, every special music ensemble needs its own personal room acoustics. Furthermore, nowadays, architectural structures are increasingly planned and built in such a way that they serve multiple purposes. Conversions of buildings that have been developed explicitly for a specific purpose, such as churches, are also not uncommon. This enables a more intelligent use of our resources, but can also pose significant challenges in terms of room acoustics (Knöfel et al. 2018).

The basic idea of the "SOUNDADAPT" system is to adapt the acoustics in the practice rooms to the individual needs of musicians. The goal is to use SMA to vary the reflection behavior of walls and ceilings: between sound-reflection and sound-absorption. The change between these two states is achieved via structure-integrated SMA actuators, which can be used to individually control and move different elements of the surface.

From the very beginning, the focus was not only on variable acoustics, but also on the development of a self-contained and high-quality design-constructive overall system. For this project, different disciplines came together: Materials Research & Design, Acoustics, Simulation & Auralization, Actuation, Stage Engineering and Electronic Control. Fig. 8 shows several concept studies of materials and forms that were carried out at the weißensee university of art and design berlin were developed in terms of design.

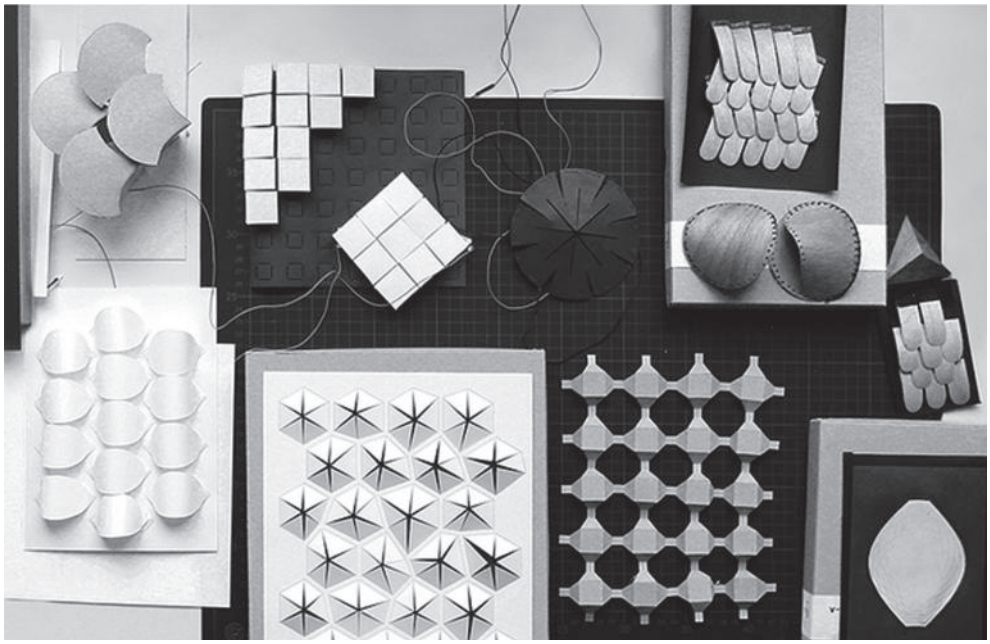


Fig. 8: Experimental design studies for the development of SMA controlled adaptive surface systems (SoundAdapt 2019).

Since the most diverse concepts are aesthetically and were acoustically evaluated, the choice finally came to a so-called rhombic structure, as shown in Fig. 9. The basic structure is formed by two rhombic half-shells,

which can be opened and closed as desired. When opened, as shown in Fig. 9, the inner surface of the diamond structure reflects the sound arriving at it. In the closed state, however, a cavity is created which can be used acoustically as a resonance system.



Fig. 9: Acoustically variable structure, composed of several foldable so-called rhombic snaps, which are each formed from two half shells. The arrow indicates the direction of movement of the half-shells (Behrens 2020).

Fig. 9 shows a prototype of 50 rhombus snaps, which was tested in the echo chamber. Small panels hanging from the ceiling and pointing in different directions provide an almost diffuse sound field inside the reverberation booth.

Between the two states "Rhomb structure open" and "rhombic structure closed", a difference of almost 0.50 is achieved in the absorption maximum, as already shown by the measurement results of the first prototype in Fig. 10. Further investigations with different slit geometries and damping fleeces are currently the subject of more detailed measurements.

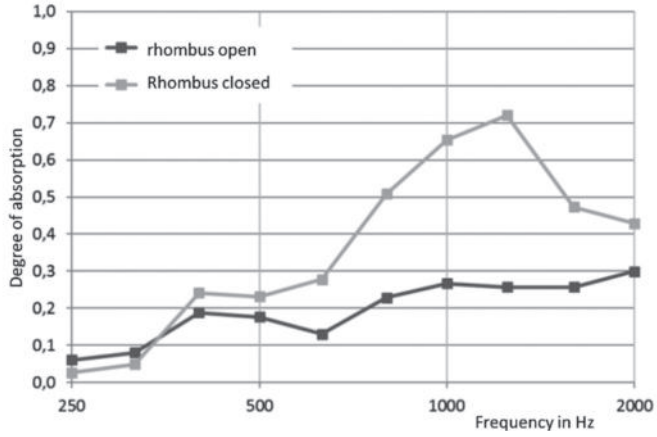


Fig. 10: Absorbance measurement in echo chamber, nominal resonance frequency 1 kHz (Behrens 2020).

5. STRAIN GAUGES FOR HIGHLY ELASTIC MATERIALS

The use of micro measurement technology in the monitoring of buildings, vehicles, ships hulls, dams or other components is current state of the art. The most widely used system is the stain gauge. It allows to be attached to different objects by a suitable adhesive, to measure the strain. The main purpose of the sensor is to indirectly determine stress and its variation with time. Change in stress is determined by multiplying the measured strain by the modulus of elasticity. Strain gauges operates on the principle of electrical resistance changes, caused by the object and thereby sensor deformation and converts force, pressure, tension, weight etc. into an electrical resistance change. Whenever an external force is applied to an object, it tends to change its shape and size, thus changing its resistance. Stress is the internal resistance of an object, while strain is the amount of deformation the object undergoes. However, the applicability of the strain gauges is limited, due to its limited fatigue resistance and low elasticity . Especially, for cyclic loading conditions with high strain amplitudes, there are no solutions on the market. This limit is particularly evident in the use of lightweight materials, such as reinforced plastics with fibreglass and carbon fiber or pure plastics. For that case, we developed a highly elastic strain gauge, based on shape-memory alloys (SMA) (Mäder et al. 2017). Build-up, mounting, contacting and operating principle of the new sensor is similar to usual strain gauges. An overview, comparing the sensor properties of the SMA strain sensor with standard strain gauges and Fiber-Bragg-Grating sensors is illustrated in Tab. 1. An outstanding advantage of the new sensor is that it can be integrated into fiber-reinforced plastics during production. Moreover, the development of a thin film process version is implemented in order to provide the sensor in different and really small sizes. The properties of SMA strain sensors simply allow for integrating it into polymers and composites with processes such as injection molding, lamination and infiltration (Senf et al. 2017). A further advantage lies in an increased sensitivity due to SMA material effects. Comparably small changes in strain and thereby force can be detected with less effort for amplifier equipment. On the one hand, all the mentioned features of the new strain sensor allow for substituting of conventional strain gauge-supported sensor systems to monitor structures and parts. On the other hand, the targeted purchase price is similar or below the common strain gauge and the new sensor technology comprises extended property limits, which opens up a wide range of further applications. Additionally, a longer lifespan, high durability and elastic characteristics reduce maintenance efforts in the sensor use.

5.1 AREAS OF APPLICATION

Based on the various technical features the SMA-based strain gauge can be applied in manifold domains and applications. The main task is to monitor material stress conditions preferably in lightweight materials. To achieve a high measuring range coverage, it is necessary to implement several SMA-strain gauges, depending on the surface size, near to a critical structure, as well as the accuracy level. One of the first studies and test use-cases examines the integration in a leg prosthesis. Prosthesis are made of various materials, including fibre-reinforced plastics. For this purpose, an example leg was equipped with the new sensor kit. The goal of this test environment is to collect data from the user behaviour. Depending on the target user, the system can collect data for the analysis of usage during the day. Loads, wear and tear are monitored and give, combined with a control system, information and feedback to the user, especially for conditions of high stresses and strains, e.g. during sport activities. This information can for instance be used to optimise style and technique of movements or to avoid critical loads to the structure. Another technical use case is the integration into components that are utilized in the automotive, aviation and energy sectors. The main function is to monitor the stress level in the material. As an example rotor blades for electrical windmills need to be checked and serviced in specific maintenance intervals. One advantage could be the extention of the lifespan due to an improved regulation of rotor blade loading. The longer lifespan of the SMA strain sensors reduces the amount of required maintenance work at height, because standard strain gauges needs to be overhauled regularly when used for rotor blade monitoring. Other critical components are relevant for the safety for the product and users, such as turbines or rotor blades in the aviation branch. A successful study of Fraunhofer IWU showed, that pressure vessels can be equipped with that new technology. SMA-

strain gauges were applied to a hydrogen tank made of fibre-reinforced plastic. The system tracked all strain gainfully up to bursting of the vessel. The cyclic strain and the maximum strain directly correlated to the pressure of the vessel during the tests. This study showed the fruitful feasibility of the sensor product and its high market potential. Herewith the SMA-stain gauge opens new possibilities for new materials and purposes. With a market volume of over 7.9 million sold metal strain gauges in 2016 (Research 2017) the sales opportunities are very high. Further studies and cooperation with industrial companies are planned to prove and improve the practicality of the sensor.

Tab. 1: Characteristics of SMA strain sensors compared to other strain sensors

criterion	shape-memory alloy sensor	standard strain gauge	Fibre-Bragg-Grating-Sensor
temperature range	-40 °C–120 °C (ε < 1 % for cyclic loading)	-70 °C – 200 °C	-50 °C – 130 °C
max. repeatable strain	8 %	5 %	5 %
fatigue resistance	10^6 at 0.8 %, 10^7 at 0.5 % strain	10^6 at 0.23 % strain	10^7 at 1 % strain
gauge factor	3-8	2	0.79
Temperature compensation	bridge circuit, regression, interpolation, high-pass filter, intrinsic heating	bridge circuit, regression, interpolation, high-pass filter	regression, interpolation, high-pass filter
sensor size + resistance	individual	individual + standard sizes	Minimum: 195 µm x 28 mm
isolation resistance	0–10 kV, 1–2 GΩ	0–10 kV, 1–2 GΩ	∞ (optical effect)
Manufacturing tolerance of sensor resistance	±0.17–0.42 %	±0.3 %	optical
cross sensitivity	geometry dependent	geometry dependent	0
zero drift	< 200 µm/m (0.5% + 10^6)	300 µm/m (0.2% + 10^6)	< 30 µm/m (1% + 10^7)
characteristic value U_A/U_B = 1/4 k ε	24 – 640 mV/V	4,6 – 100 mV/V	–
price	< 10 €	< 10 €	~100 €

REFERENCE

Adnot J., Waide P., (2003) Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC), Study for D.G. Transportation-Energy (DGTREN) of the EU-commission.

Drossel W.-G., Kunze H., Bucht A., Weisheit L., Pagel K. (2015) Smart3 – Smart Materials for Smart Applications. In: Procedia CIRP 36, p. 211–216. – ISSN 22128271.

Drossel W.-G., Meinel F., Bucht A., Kunze,H., (2017) Smart materials for smart production – a cross-disciplinary innovation network in the field of smart materials, Procedia Manufacturing, Volume 21, 2018, p. 197-204, https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.111.

Guideline (2010) Guideline 2010/31/EU of the European Parliament and Council on energy efficiency of buildings, 19th of May 2010.

IEE (2020), Transforming the market from "cooling" to "sustainable summer comfort, Coordination IZES gGmbH.

Knöfel B., Gnauck M., Kunze H., (2018) Variable Raumakustik in musikalischen Probenräumen? In: Fortschritte der Akustik / DAGA 2018, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Berlin, p. 1743 – 1746

Mäder T., Navarro y de Sosa, I., Senf, B., Wolf P., Hamm M., Zoch M. Drossel W.-G. (2017) Highly Elastic Strain Gauges Based on Shape Memory Alloys for Monitoring of Fibre Reinforced Plastics [online]. In: Herrmann A.S. (Hg.) 21st Symposium on Composites, p. 778-785. ISBN 978-3-0357-1198-1.

Mohd Jani, J., Leary M., Subic A., Gibson M. A. (2014) A review of shape memoryalloy research, applications and opportunities, Materials and Design, vol. 56, 1078–1113

Navarro de Sosa I., Ruff M., Kirmse S., Kahnt A., Drossel W.-G., (2018) Self-regulating Solar Shading System for the Building Envelope Based on Thermal Shape Memory Effect, Actuator Conference 2018.

Pinterić M., (2017) Building Physics, Springer International Publishing, ISBN: 978-3-319-57483-7.

Research Z. M. (2017) Global Strain Gauge Market Research Report 2017 [online]. Deerfield Beach, Florida.

Senf B., Mäder T., Navarro I., Bucht A., Knobloch M., Löpitz D., Drossel W.-G. (2017) Sensing and Actuating Functions by Shape Memory Alloy Wires Integrated into Fiber Reinforced Plastics [online]. Procedia CIRP, 66, 249-253. ISSN 22128271. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.291.

SoundAdapt (2019) SoundAdapt - Traum aller Musiker. In: merlin 3 | (2019) p. 13, https://www.smarthoch3.de/fileadmin/merlin_3/Merlin_3_2019_web.pdf.

UNEP (2007) Buildings and Climate Change: Status, Challenges, and Opportunities, United Nations Environmental, 2007.

Contact:
Dr.-Ing. Kenny Pagel
Nöthnitzer Strasse 44
01187 Dresden
Germany
Email: Kenny.pagel@iwu.fraunhofer.de

Session 5a

Green Energy Lab – Integrierte Energiesysteme

Heat water storage pooling for RES-integration

Puchegger, Gnam, Jasek / Forschung Burgenland / AT

Großflächige Skalierungsansätze von Musterlösungen in der Vorzeigeregion Green Energy Lab

Kurz, Supper / Forschungsinitiative Green Energy Lab / AT
Lettner / TU-Wien, Energy Economics Group / AT
Fink / AEE INTEC / AT
Reinfeld / Energie Burgenland AG / AT

Heat water storage pooling for RES-integration

M. Puchegger, L. Gnam, P. Jasek
Forschung Burgenland, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: A high penetration of renewable energy sources (RESs) in today's energy supply calls for a high demand in flexibilities. Due to their capacity, heat storages can provide such flexibility. Sensitive heat storages have already been used as flexibility for some time, using ripple control units to allow remote switching of customer-side heating devices and storage units at favourable times. Areal and larger storage units are mostly coupled with thermal (and electric) on-site production and thus operated and optimized separately driven only by the needs of the heating grid. The goal of the project, through which the high degree of innovation is defined, is to develop and test an integrated approach to optimize the interaction between existing heating devices/storages of all size and wind production within the wind region considering technical, economic and social aspects of the relevant stakeholders and to upgrade the central energy control unit at Energie Burgenland AG by the function of heat storage management.

Therefore, a concept for the optimized pooling of heat water storages will be developed. Furthermore, as a test operation, thermal storage units of at least 30 individual customers as well as the thermal storage units of one district heating and five residential compounds within a wind region will be connected to the control room of the wind farm operator to demonstrate and optimize the operation of pooled heat water storages. During the demonstration phase, the following aspects will be analysed for preparation of broad roll out of heat water storage pooling: minimizing costs for customers/suppliers due to optimized storage operation; grid operation optimization by vertical pooling of thermal storages; higher integration potential for RESs by shifting power-to-heat operation in times with high production; avoidance of curtailment of RES production; avoiding balancing/control energy. After finalization of this subproject, a proven concept for the broad roll out of heat water storage pooling will be available including technical, economic and social aspects for all involved stakeholders. Overall, there is a tremendous potential for heat water storage pooling, which can be estimated at approximately 10,000 electrically powered residential thermal storage units, several hundred units in residential compounds and 170 GWh (Statistik Austria 2018) annually in district heating just within the wind region of Nordburgenland. The project will yield a readily scalable approach for broad roll out of the integration of heat water storages in all areas and all sizes for the continuous optimization of the energy system toward a CO_2-neutral operation. By the broad implementation of this approach the demand for network extensions will shrink due to local optimization of energy flows. A contribution to the economic operation of wind farms even without, or at least with less state subsidies will be made.

1. EINLEITUNG

Eine hohe Durchdringung der heutigen Energieversorgung mit erneuerbaren Energieträgern erfordert eine hohe Nachfrage nach flexiblen Einsatzmöglichkeiten. Wärmespeicher können aufgrund ihrer Kapazität eine solche Flexibilität bieten. Sensible Wärmespeicher werden bereits seit einiger Zeit als Flexibilitäten eingesetzt, die mit Hilfe von Rundsteuergeräten die Fernschaltung von kundenseitigen Heizgeräten und Speichern zu günstigen Zeiten ermöglichen. Flächen- und größere Speicher sind meist an die thermische (und elektrische) Vor-Ort-Erzeugung gekoppelt und werden daher separat nur nach dem Bedarf des Wärmenetzes betrieben und optimiert.

Im Projekt „Heat water storage pooling" soll daher ein integrierter und ganzheitlicher Pooling-Ansatz für Wärmespeicher in verschiedenen Größen- und Anwendungsbereichen entwickelt und dessen Einsatz als

Flexibilität für die lokale Nutzung von Windenergie demonstriert bzw. in ein virtuelles Kraftwerk (VPP) integriert werden.

2. MARKTINTEGRATION ERNEUERBARE ENERGIEN

Bis vor etwa 30 Jahren waren österreichische Meteorologen der Meinung, dass es in unserem Land nicht genug Wind gäbe, um damit nennenswert Strom zu erzeugen. Einige private Pioniere errichteten jedoch eigenhändig die ersten Windkraftanlagen und führten in Eigenregie Windmessungen durch, die zeigten, dass sich sowohl die Hügel des Alpenvorlandes als auch die Ebenen Ostösterreichs perfekt für die Nutzung der Windenergie eignen. 1994 ging die erste Windkraftanlage in Österreich ans Netz. Doch erst 2002 regelte ein eigenes Ökostromgesetz die Stromerzeugung durch Windkraftanlagen und damit begann verstärkt der Ausbau der Windkraft. Mit diesem Ökostromgesetz wurde zum ersten Mal ein einheitliches Fördersystem für Strom aus erneuerbaren Energiequellen eingeführt. Das Ökostromgesetz sah eine unbefristete Abnahmeverpflichtung für Strom aus erneuerbaren Energiequellen für einen Zeitraum von 13 Jahren vor.

Die 1. Ausbaustufe mit einem durchschnittlichen Windenergieausbau in der Höhe von 200 MW pro Jahr dauerte bis 2006. Danach kam es aufgrund niedrigerer Einspeisetarife zwischenzeitlich zu einem Erliegen des Windkraftausbaus.

Erst mit der 2012 in Kraft getretenen Novellierung des Ökostromgesetzes, das auch heute noch in Österreich gültig ist, wurden wieder Rahmenbedingungen geschaffen, den weiteren Ausbau der Windenergie voranzutreiben. Dieses Bundesgesetz hat das Ziel, die Aufbringung von Ökostrom durch Anlagen in Österreich zu fördern und damit den Anteil der erneuerbaren Energien an der Gesamtenergiebilanz zu erhöhen. Das Fördervolumen wurde von 21 Mio. auf 50 Mio. Euro angehoben, wovon allein 11,5 Mio. auf die Windkraft entfallen. Das Ökostromgesetz 2012 sieht nach wie vor die Verpflichtung vor, Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu festen Einspeisetarifen abzunehmen. (Ökostromgesetz 2012)

In nur vier Jahren wurde, ob der nunmehr wieder höheren Förderungen, die Windkraftkapazität verdoppelt. Ende 2013 gab es in Österreich 872 Anlagen mit einer Leistung von über 1.684 Megawatt. Im Dezember 2014 wurde im Windpark Rohrau die 1.000ste Windkraftanlage Österreichs errichtet. Laut IG Windkraft sorgten zum Jahreswechsel 2016/2017 1.191 Windräder mit einer installierten Leistung 2.632 MW für ca. 8 % des heimischen Strombedarfs.

Am 29. Juni 2017 wurde die „kleine Ökostrom-Novelle“ verabschiedet, durch die mittels zusätzlicher Förderungen von 45 Millionen der Ausbau österreichischer Windkraftanlagen vorangetrieben werden konnte. Es wurden ca. 120 Anlagen mit einer Leistung von ca. 350 MW unter Vertrag genommen.

Aktuell befindet sich das “Erneuerbaren Ausbau Gesetz“ in der parlamentarischen Begutachtung (EAG 2020). Noch mehr als bisher sollen damit die Erneuerbaren Energien marktfähig und der Markt für erneuerbare Energien optimiert werden. Marktprämien und Investitionszuschüsse sowie Ausschreibungsmodelle – wo sinnvoll - spielen dabei eine Schlüsselrolle. Die Neugestaltung des Fördersystems soll die Marktintegration der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erleichtern. Gleichzeitig sollen ein rechtssicheres und planbares Investitionsklima gewährleistet und administrative Hemmnisse abgebaut werden. Der Übergang vom alten zum neuen Fördersystem soll von Transformationsprozessen mit praktischen Lösungen begleitet werden. Gegenüber dem Status quo wird die zukünftige Version der Wirtschaftsförderung, die als Marktprämien umgesetzt wird, in der Regel eine Laufzeit von 20 Jahren haben. (BMLRT 2018)

3. VORGEHENSWEISE

In diesem Projekt, welches mit der Forschungsinitiative „Green Energy Lab“ der „Vorzeigeregion Energie“ assoziiert ist, werden bestehende thermische Speicher mit vorhandenen elektrischen Wärmeerzeugern (Wärmepumpen oder Elektrodirektheizungen) durch eine Informations- und Kommunikationstechnische Anbindung (IKT-Anbindung) aufgerüstet, um die Optimierung des Energiesystems durch Kombination

zu einer großen virtuellen Speichereinheit zu unterstützen. Eine Nachrüstung mit Wärmerzeugern erfolgt innerhalb des Projekts nicht.

Nach Abschluss des Projekts wird ein reproduzierbares, skalierbares und validiertes System für die sektorübergreifende Speicherung von Strom in Wärmeanwendungen zur Verfügung stehen, einschließlich praktikabler Geschäftsmodelle, um Systemflexibilität bereitzustellen und den Anteil erneuerbarer Energie innerhalb des Energieversorgungssystems zu erhöhen. Dazu wird ein Konzept zur optimierten Zusammenführung von Warmwasserspeichern entwickelt.

Weiters werden im Rahmen eines Testbetriebes thermische Speicher von mindestens 30 Einzelkunden sowie die thermischen Speicher einer Fernwärmeanlage und von fünf Wohnanlagen innerhalb einer Windregion an die Leitwarte des Windparkbetreibers angeschlossen, um den Betrieb von gepoolten (zusammengefassten) Warmwasserspeichern zu demonstrieren und zu optimieren (vgl. Abb. 1).

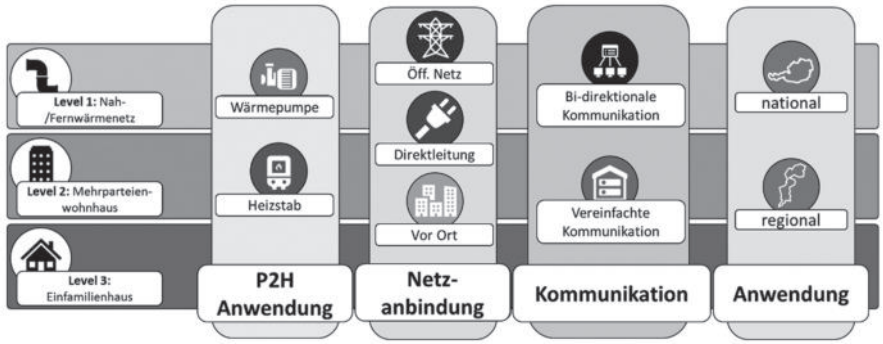


Abb. 1: Adressierte Speichersituationen innerhalb des Projekts, um nationale und regionale Vorteile für das Energiesystem zu erzielen

Während der Demonstrationsphase werden folgende Aspekte für die Vorbereitung einer breiten Einführung von Warmwasserspeicher-Pooling-Methoden analysiert:

- Minimierung der Kosten für KundInnen / LieferantInnen aufgrund des optimierten Speicherbetriebs,
- Netzbetriebsoptimierung durch vertikales Pooling von Wärmespeichern,
- höheres Integrationspotenzial für RESs durch Verlagerung des Power-to-Heat-Betriebs in Zeiten hoher Produktion,
- Vermeidung der Abschaltung von Windanlagen und
- Vermeidung von Regel- und Ausgleichsenergie.

Nach Abschluss des Projekts steht ein erprobtes Konzept für die breite Einführung eines vertikal integrierten Warmwasserspeicher-Poolings mit technischen, wirtschaftlichen und sozialen Aspekten für mehrere AkteurInnen zur Verfügung.

4. ABSCHÄTZUNG THEORETISCHES POTENTIAL

In diesem Kapitel soll das theoretische Potential eines Warmwasserspeicherpools für die Aufnahme von Windenergie abgeschätzt werden. Zudem soll auch das energiewirtschaftliche Potential in vereinfachter Form abgeschätzt werden, wobei diese Abschätzung ohne Berücksichtigung der Restriktionen erfolgt, die sich aus den Kosten für die IKT-Anbindung der Speichereinheiten ergeben. Für das Projekt „Heat water storage pooling" besteht die Mindestanforderung, folgende Speicher in den Warmwasserspeicherpool zu integrieren:

- 1 Wärmespeicher eines Nahwärmenetzes,
- 5 thermische Speicher in Heizzentralen des mehrgeschossigen Wohnbaus,
- 30 Kleinspeicher in Haushalten.

Die Potentialbetrachtung geht daher von dieser Anzahl an Speichern im Pool aus. Darüber hinaus soll eine Abschätzung für das Potential der Windregion im Burgenland durchgeführt werden. Der Warmwasserspeicherpool wird in dieser Betrachtung vom Windanlagenportfolio des Windkraftbetreibers gespeist, das sich 2019 in der Direktvermarktung befunden hatte und durch die OeMAG nicht mehr gefördert werden konnte. Die Darstellung der Potentialschätzung erfolgt analog zu den im Projekt adressierten Speicherebenen. Es wird bei allen Speichertypen angenommen, dass zu Beginn einer möglichen Beladung durch erneuerbare Energie die Speicher bis zur Entladegrenze entleert sind und maximal bis an die obere Temperaturgrenze beladen werden können, um die maximal mögliche Energie aufnehmen zu können. Beim Speicher im Wärmenetz erscheint dies durch eine entsprechende prognosegestützte Speicherbewirtschaftung als realistisch, bei den kleineren Speichern in Heizzentralen und Haushalten werden die Speicher hinsichtlich des Volumens für die Abschätzung an der unteren Dimensionierungsgrenze angenommen. Ziel des Projekts ist es im weiteren Verlauf, statistische Methoden zur Bewertung der Verfügbarkeit dieser kleinen Speicher zu entwickeln. Die Differenz zwischen Entladegrenze und der oberen Temperaturgrenze der Speicher wird über die Grädigkeit der Speicher (in allen Fällen 30 K) beschrieben. Insgesamt wurden für die Potentialabschätzung die folgenden Vereinfachungen getroffen:

- Die Speicher können ideal nach dem Anfall von Windenergie geregelt werden. Das bedeutet, dass eine Nachladung mittels konventionellem Strom nur dann erfolgt, wenn der Speicher sonst seine Minimaltemperatur unterschreiten würde.
- Es wird ideale Prognose (Wind, Strompreise) sowie ideales Monitoring (Kenntnis über die mittlere Speichertemperatur, Leistung) sowie Regelung (stufenlose Leistungsregelung in allen Speicherebenen) angenommen.
- Für die Speicher wird ein einfaches Einzonenmodell herangezogen, das über den Energieinhalt in Abhängigkeit von Minimal- und Maximaltemperatur beschrieben wird. Die Differenz zwischen minimaler und maximaler Temperatur in allen Speichern beträgt 30 K.
- Die Speicher im mehrgeschossigen Wohnbau sowie in den Einzelhaushalten werden als ein großer Gesamtspeicher betrachtet.
- Für den Speicher im Wärmenetz wird eine Wärmepumpe mit einem konstanten COP von 4 angenommen, für die Speicher in mehrgeschossigen Wohngebäuden wird von Wärmepumpen mit einem COP von 3 ausgegangen. Für die Einzelhaushalte werden direktelektrisch beladene Speicher vorausgesetzt (COP = 1).
- Die Speicher wurden verlustfrei berechnet.

Weiters wird angenommen, dass die Speicher bei gleichzeitigem Wärmebedarf nach folgender Reihenfolge, priorisiert mittels Windstrom aus der Leistungsregelung, beladen werden: (1) Wärmespeicher Nahwärmenetz, (2) thermische Speicher im mehrgeschossigen Wohnbau, (3) Kleinspeicher.

4.1 LEVEL 1: SPEICHER IN NAHWÄRMENETZEN

Für die Betrachtung der Speicher in Nahwärmenetzen wurde das Nahwärmenetz von Neusiedl am See herangezogen. Das Volumen des Pufferspeichers beträgt dort nach der derzeit laufenden Erweiterung 300 m³. Es wird von einer Grädigkeit im Speicher von 30 K ausgegangen. Die Beladung des Speichers erfolgt über eine Großwärmepumpenkaskade mit einer thermischen Leistung von 2 MW, die ausschließlich mit Windstrom betrieben wird. Es wird ein durchschnittlicher COP von 4 angenommen, als Wärmequelle dient Außenluft im Sommer bzw. Rauchgas aus dem Biomassekessel im Winter. Als Wärmeabnahme wird der thermische Lastgang des Wärmenetzes im Betrachtungszeitraum herangezogen. In besagtem Zeitraum (01.04.2018 - 31.03.2019) wurden 12.401 MWh an thermischer Energie ins Wärmenetz eingespeist.

4.2 LEVEL 2: WÄRMESPEICHER IM MEHRGESCHOSSIGEN WOHNBAU

Für die Speicher im mehrgeschossigen Wohnbau wurden fünf analog aufgebaute Wohnhausanlagen mit Eckdaten nach Tab. 1 betrachtet:

Tab. 1: Daten mehrgeschossiger Wohnbau

Wohn-einheiten je Gebäude	Heizwärme-bedarf	Warmwasser-bedarf	Speicher-volumen je Gebäude in l	Typ Wärme-erzeuger	Leistung Wärme-erzeuger
10	42 kW/(m²a)	50 l/P 2 Personen	1.200 l	Luftwärme-pumpe COP3	24 kW_{th} 8 kW_{el}

Der gesamte Wärmebedarf beträgt somit 229 MWh/a für die fünf im Projekt betrachteten Gebäude. Der Lastgang für Raumwärme wurde dabei anhand eines realen Wetterdatensatzes für 2018 zwischen der Heizgrenztemperatur und der minimalen Normaußentemperatur linearisiert. Für das Warmwasserzapfprofil wurde das Profil ASHRAE 90.2 für Zweipersonenhaushalte herangezogen (ASHRAE 2004).

4.3 LEVEL 3: KLEINSPEICHER IN HAUSHALTEN

Für Kleinspeicher in Haushalten wurden 30 analog aufgebaute Kundenanlagen herangezogen, deren Daten Tab. 2 entnommen werden können. Vereinfachend wird angenommen, dass es sich hierbei ausschließlich um elektrische Warmwasserboiler handelt, die mittels Widerstandsprinzip beladen werden und die nicht für Raumwärmeanwendungen genutzt werden. Der gesamte Warmwasserwärmebedarf für diese Haushalte beträgt 43,2 MWh, wobei dieser analog zu Kapitel 4.2 anhand des standardisierten Zapfprofils nach ASHRAE 90.2 festgelegt wurde.

Tab. 2: Daten Einfamilienhäuser

Anzahl Gebäude	Warmwasser-bedarf	Speichervolumen je HH	Typ Wärme-erzeuger	Leistung Wärme-erzeuger
30	50 l/P 2 Personen	200 l	Elektrodirekt	3 kW

4.4 HOCHRECHNUNG DER PROJEKTERGEBNISSE AUF DIE WINDREGION IM BURGENLAND

Zur Abschätzung des Potentials für die burgenländische Windregion, wurden die Speicherkapazitäten aus den Kapiteln 4.1 bis 4.4 mittels Umrechnungsfaktoren hochgerechnet und nochmals mit der verfügbaren Erzeugungsleistung verglichen. Die Faktoren ergeben sich aus der Anzahl vorhandener Anlagen (Gebäude bzw. Wohneinheiten) bzw. aus dem Fernwärmepotential nach Tab. 3.

Tab. 3: Hochrechnungsfaktoren

Anlagenart	Im Projekt vorhanden	In der Wind-region Bgld	Faktor
Kleinspeicher in Haushalten	30	10.000[1]	333
Wärmespeicher im mehrgeschossigen Wohnbau	5	700[2]	140
Nah- und Fernwärmepotential in GWh	12,4	170[3]	14

[1] Abgeleitet aus den Kundendaten der Energie Burgenland

[2] Abgeleitet aus Wohnungs- und Gebäudebestand, Statistik Austria

[3] Statistik Austria, 2018

4.5 THEORETISCHES VS. ENERGIEWIRTSCHAFTLICHES POTENTIAL

Das theoretische Potential unterscheidet sich vom energiewirtschaftlichen Potential dahingehend, dass beim theoretischen Potential sämtlich anfallende Windenergie unabhängig von der aktuellen Strommarktsituation prioritär im Warmwasserspeicherpool verwertet wird. Die Elektrizitätswirtschaft ist jedoch von tages-, wochen- und jahreszeitlichen Strompreisschwankungen geprägt. Für die Abschätzung des energiewirtschaftlichen Potentials wird daher je Speicherlevel ein Preiscap für den Strompreis eingeführt, ab dem eine Verwertung in der jeweiligen Power-to-Heat Anlage nicht mehr wirtschaftlich ist. Für die Wärmenetze dient hier der Biomassepreis als Referenzpreis, für die Anlagen in Haushalten und im mehrgeschossigen Wohnbau wurde angenommen, dass ausgehende von einem mittleren Strompreis im Betrachtungszeitraum von 49,15 €/MWh (EXAA 2020) dieser nicht um mehr als das 1,3-fache überschritten werden darf. Aufgrund unterschiedlicher Effizienzen und alternativen Wärmegestehungskosten ist dieser Preiscap für jedes Speicherlevel unterschiedlich (vgl. Tab. 4).

Tab. 4: Preiscap je Speicherlevel

Speicherlevel	Preiscap in €/MWh	Begründung
Kleinspeicher in Haushalten	63,89	1,3-facher Wert des mittleren Strompreises im Betrachtungszeitraum
Wärmespeicher im mehrgeschossigen Wohnbau	63,89	1,3-facher Wert des mittleren Strompreises im Betrachtungszeitraum
Nah- und Fernwärmenetz	96,00	Biomassepreis 24 €/MWh (klimaaktiv 2017) COP der Wärmepumpe von 4

4.6 RESULTATE

Die Ergebnisse der Betrachtungen zeigen, dass bereits mit den derzeit in Vermarktung befindlichen Windenergieanlagen ein großer Teil der betrachteten Anlagen in den drei Speicherleveln versorgt werden können. Konkrete Ergebnisse können Tab. 5 entnommen werden, wobei jeweils die thermischen Energiemengen angeführt sind.

Tab. 5: Ergebnisse der Potentialerhebung

Speicherlevel		Potential Projekt MWh	Potential Windregion MWh
Kleinspeicher in Haushalten	Wärmebedarf Theoretisches Potential Energiewirt. Potential	43 43 43	14.390 14.270 14.110
Wärmespeicher im mehrgeschossigen Wohnbau	Wärmebedarf Theoretisches Potential Energiewirt. Potential	229 225 213	32.130 28.170 26.660
Nah- und Fernwärmenetz	Wärmebedarf Theoretisches Potential Energiewirt. Potential	12.400 11.300 11.230	170.000 147.820 146.870

Ermittelt man den möglichen Deckungsgrad an Wärmeenergie in der Windregion, so ergibt sich unter den getroffenen Vereinfachungen ein Wert von rund 87 % des Wärmebedarfs, der mit den untersuchten Anlagen aus der zu vermarktenden Windleistung abgedeckt werden könnte. Dabei könnten rund 17 % des Windstroms, der derzeit über die Eigenvermarktung in den Markt integriert wird, in den Warmwasserspeicherpool integriert werden.

5. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts „Heat water storage pooling“ konnte eine Potentialabschätzung für die Aufnahme von Windenergie durch einen Pool von Warmwasserspeichern unterschiedlicher Größe und Anwendung für die Windregion im Burgenland durchgeführt werden. Der betrachtete Warmwasserspeicherpool im Projekt besteht aus

- 1 Wärmespeicher eines Nahwärmenetzes,
- 5 thermische Speicher in Heizzentralen des mehrgeschossigen Wohnbaus und
- 30 Kleinspeicher in Haushalten.

Um das Potential für die Region abschätzen zu können, wurden die genannten Speicherkapazitäten hochgerechnet. Unter Annahme gewisser Vereinfachungen ergibt sich das theoretische energiewirtschaftliche Potenzial, etwa 87 % des Wärmebedarfs der untersuchten Anlagen durch die zu vermarktende Windenergie mittels Power-to-heat Anlagen abdecken zu können. Rund 17 % des Windstroms, der derzeit über Selbstvermarktung in den Markt integriert ist, könnten dabei in den Warmwasserspeicherpool integrieren werden. Dieses Verhältnis zeigt, dass bei zunehmender Marktintegration von erneuerbaren Energien – gemeint sind sowohl Anlagen, die aufgrund der Betriebsdauer aus dem Förderregime gefallen sind, als auch von Anlagen in künftigen, marktorientierten Fördersystemen – andere Energiesektoren theoretisch in hohem Ausmaß mit diesen Energiemengen verknüpft werden können. Dies würde eine Fortsetzung des existierenden Megatrends der Elektrifizierung anderer Energiesektoren bedeuten. Andererseits sind auf dem Weg dorthin noch wesentliche Herausforderungen zu lösen, um das theoretisch vorhandene Potential auch in der Praxis umsetzen zu können. Allem voran sei hier eine standardisierte und kostengünstige Lösung zur Vernetzung dezentraler Flexibilitäten genannt. Ebenso sind Marktregeln bzw. regulatorische Rahmenbedingungen künftig so zu gestalten, dass diese Entwicklung unterstützt wird bzw. Fehlentwicklungen wie die Nutzung technisch ineffizienter Lösungen zu verhindern.

Zusammenfassend konnte in der vorliegenden Potentialbetrachtung gezeigt werden, dass der Pooling-Ansatz – wie im Vorfeld angenommen – ein zielführendes Konzept für den Einsatz als Flexibilität für die lokale Nutzung der Windenergie darstellt.

6. DANKSAGUNG

Das Projekt „Heat water storage pooling“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2018 durchgeführt.

REFERENCE

ANSI/ASHRAE (2004): Standard 90.2-2004 Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329, 2004.

BMLRT (2018) Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus [Online] Available at: https://www.bmlrt.gv.at/umwelt/energiewende/erneuerbare_energie/Erarbeitung-des-Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz-beschlossen.html

EAG (2020): Bundesgesetz über den Ausbau von Energie aus erneuerbaren Quellen (ErneuerbarenAusbau-Gesetz – EAG), Entwurf vom 16.09.2020

EXAA (2020) Historische Daten. Wien [Online] Available at: https://www.exaa.at/de/marktdaten/historische-daten

Klimaaktiv (2017) Investition in Biomassewärme für Dritte - mit Waldhackgut einkommen sichern, BMLFUW, Wien, 2017

Ökostromgesetz (2012) Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (Ökostromgesetz 2012 - ÖSG 2012). s.l.:BGBL I Nr. 75/2011 idF BGBL I Nr 97/2019.
Statistik Austria (2018) Energiebilanz Burgenland 1988 bis 2018 – Detailinformationen – Fernwärme, Statistik Austria, Österreich, Available at: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html

Kontaktdaten:
DI Markus Puchegger
Campus 1
7000 Eisenstadt
Email: markus.puchegger@Forschung-Burgenland.at

Großflächige Skalierungsansätze von Musterlösungen in der Vorzeigeregion Green Energy Lab

C. Kurz, S. Supper
Forschungsinitiative Green Energy Lab, Österreich
G. Lettner
TU-Wien, Energy Economics Group, Österreich
C. Fink
AEE INTEC, Österreich
R. Reinfeld
Energie Burgenland AG, Österreich

ABSTRACT: Die österreichische Vorzeigeregion Green Energy Lab (GEL) umfasst aktuell mehr als 15 Forschungs- und Entwicklungsprojekte (F&E-Projekte) und hat das Ziel, durch neuartige Systemintegrationen und einen starken Bezug zu den EndkundInnen einen wichtigen Beitrag für ein nachhaltiges und erneuerbares Energiesystem von morgen zu leisten. Dazu dienen dem GEL für Monitoring und Abschätzung der Wirkung der Ergebnisse aus den F&E-Projekten sogenannte Musterlösungen als Innovationseinheit. Zum einen wird durch Musterlösungen ein starker Marktfokus für die nachfolgende wirtschaftliche Nutzung der Innovationen erzielt. Zum anderen eignen sich Musterlösungen auch für einen großflächigen Skalierungsansatz, um den zu erwartenden Gesamteffekt der Vorzeigeregion zu analysieren. Hier werden Erfahrungen im Management von Musterlösungen und erste Ansätze für eine Wirkungsanalyse präsentiert.

1. INTRODUCTION

Das Green Energy Lab (GEL) ist eine österreichische Vorzeigeregion und umfasst per September 2020 15 Forschungs- und Entwicklungsprojekte (F&E-Projekte). In dieser Zahl sind die Projekte der 3. Ausschreibung Vorzeigeregion Energie nicht berücksichtigt, da diese zum Zeitpunkt der Drucklegung noch nicht bekannt waren. Das Ziel von GEL ist, durch neuartige Systemintegrationen und einen starken Bezug zu EndkundInnen einen signifikanten Beitrag für ein nachhaltiges und erneuerbares Energiesystem von morgen zu leisten. Mit einer Laufzeit bis Ende 2025 und einer stark steigenden Anzahl von Projekten ergeben sich interessante Managementaufgaben, wenn man den Fokus auf Synergien zwischen Projekten, das Wirkungsmonitoring und die Vermarktbarkeit von Ergebnissen legt.

Die üblicherweise bei individuellen F&E-Projekten zugrundeliegende Methodik des Projektmanagements wurde seit Jahrzehnten dahingehend optimiert, ein angestrebtes Projektziel möglichst effizient zu erreichen und am Weg dorthin transparent den Verbrauch von Ressourcen und Zeit offenzulegen. Die Managementaufgaben einer Vorzeigeregion wie dem GEL sind jedoch teilweise anders gewichtet als z.B. jene einer Förderinstitution. Das GEL umfasst eine Vielzahl von Projekten. GEL selbst wird dabei an aggregierten Indikatoren gemessen, die u.a. die im Projektverbund erzielte Einsparung an CO_2 oder den Anstieg des Anteils erneuerbarer Energie beinhalten. Dazu kommen Indikatoren zur Einbindung von EndkundInnen oder der Austausch von Daten innerhalb des Projektclusters.

Eine ursächliche Aufgabe von GEL ist daher die Darstellung der Wirkung, welche die gebündelten Maßnahmen innerhalb des Projektverbundes auf klimatische, energetische und auch wirtschaftliche Größen innerhalb der Region haben. Da sich GEL primär auf integrierte Energiesysteme konzentriert und nicht auf Einzeltechnologien, muss eine Methode entwickelt werden, welche die Auswirkungen der in Einzelprojekten erarbeiteten Ergebnisse im kollektiven Zusammenspiel analysiert und letztlich in Szenarien skaliert darstellen kann.

Dabei legt GEL beim Monitoring, der Wirkungsanalyse und im übergeordneten Projektmanagement, den Fokus nicht auf das Einzelprojekt, sondern auf die im Projekt entwickelten sogenannte Musterlösungen.

2. MUSTERLÖSUNGEN

Eine Musterlösung (ML) ist die Beschreibung einer Innovationsleistung hinsichtlich ihres technischen, ökonomischen und sozialen Neuheitsgrades, welche sich durch folgende Eigenschaften auszeichnen:

- Eigenständigkeit: selbständig darstellbares und verwertbares Produkt, Applikation oder Service.
- Verwertbarkeit: übertragbarer und skalierbarer Ansatz, der als „Blaupause" verwendet werden kann.
- Innovationsgehalt: ein innovatives Alleinstellungsmerkmal, das auch in der Integrationsleistung von bereits existierenden Einzeltechnologien bestehen kann.

ML werden in den F&E-Projekten entwickelt und einer Praxiserprobung, z.B. in Demonstrationsanlagen, unterzogen. Jene ML, die sich im Praxistest bewähren, werden für die breite Ausrollung am Markt vorbereitet.

Zusammengefasst stellen ML daher eigenständige, thematisch klar abgrenzbare, wirtschaftlich verwertbare Innovationsleistungen dar, die auch skalierbar und übertragbar sind. ML sind dabei losgelöst vom Projektbegriff zu sehen, da sowohl mehrere Projekte zu einer ML beitragen können als auch ein Projekt mehrere ML umfassen kann.

Als Beispiel für den letzteren Fall sei das Projekt „Blockchain Grid" genannt, welches drei ML beinhaltet. Zunächst wird eine Blockchaintechnologie entwickelt, die es erlaubt, mittels Smart Contracts eine Tradingfunktion für Strom innerhalb eines Pools an Prosumern abzuwickeln. Die zweite ML dieses Projektes ist die Integration eines Batteriespeichers in das Netzwerk und, damit verbunden, die Entwicklung geeigneter Betriebsstrategien. Und zuletzt, als dritte ML, die Verwendung der Blockchain, um ein Energiemanagement im Verteilnetz zu bewirken, das die vorhandenen Netzwerkressourcen bestmöglich ausnützt.

Wie aus dem obigen Beispiel ersichtlich ist, tragen die drei ML zu durchaus unterschiedlichen Fragestellungen bei, die man mit den Überschriften Digitalisierung, Integration von Batteriespeichern und Smart Grids betiteln könnte.

Die derzeit 15 Projekte im Projektcluster von GEL umfassen 25 ML aus einem breiten Themenspektrum. Aus thematischer wie auch geografischer Clusterung der ML ergeben sich unterschiedliche Blickwinkel auf die aktuelle Innovationslandschaft und Innovationsleistung von GEL. Diese unterschiedlichen Sichten auf die ML stellen eine wichtige Basis für das Setzen von strategischen Schwerpunkten, dem Erkennen von Synergiepotenzialen und den Abgleich mit aktuellen Forschungs- und gesellschaftspolitischen Schwerpunkten dar.

3. ENTWICKLUNG EINER MUSTERLÖSUNG BASIERTEN WIRKUNGSANALSYE

Um den großflächigen Effekt der ML auf die Vorzeigeregion zu zeigen, wird eine kombinierte quantitative und qualitative Wirkungsanalyse durchgeführt. Als Grundlage dient eine regionale Datenbasis, die je nach Datenverfügbarkeit für unterschiedliche Energieträger, Sektoren und Infrastrukturen aufgeschlüsselt ist. Somit werden unterschiedliche Datencluster für die differenzierte Bewertung der ML zur Verfügung gestellt.

In einem ersten Schritt werden die ML zur Analyse in ihre qualitativen und quantitativen Beiträge aufgeteilt, die sich in den folgenden vier Wirkungsparametern zum Ausdruck bringen lassen:

1. Anteil erneuerbarer Energie,
2. stündliche leistungsbezogene erneuerbare elektrische Energieversorgung,
3. Reduktion des CO_2-Austoßes und
4. Senkung des Energieverbrauches.

Quantitative Beiträge entwickeln eine technische oder betriebswirtschaftliche Implementierung oder Simulation in den zugehörigen F&E-Projekten mit direkt quantifizierbarem Einfluss auf die Wirkparameter. Qualitative Beiträge werden in Gesprächen und Workshops mit Expertinnen und Experten diskutiert, mit dem Ziel, als Ergebnis quantitative Kennzahlen auf bilanzieller Ebene zu erarbeiten. Basierend auf den Erkenntnissen aus den F&E-Projekten werden unter Zuhilfenahme der Datenbasis mögliche Skalierungs- und Roll-out-Szenarien entwickelt. Als Stützjahre dienen dabei die Jahre 2025 und 2030. Die regionalen und überregionalen Entwicklungen fließen aus den Länderprogrammen von Wien, Niederösterreich, Burgenland und der Steiermark bzw. aus europäischen Entwicklungsplänen z.B. Ten-Year Network Development Plan, TYNDP, der ENTSO-E (2020) ein.

Je nach zeitlicher Auflösung der ML-Beiträge werden diese z.B. in hochauflösende (15 min, 1 h) Simulations- und Optimierungsmodelle (z.B. EDisOn+ (Dallinger et al. 2018), HERO (Fleischhacker & Lettner 2018)) oder in bilanzielle (monatliche, jährliche) Wirkungsmodelle integriert.

Die Ergebnisse der Wirkungsanalyse zeigen, wie sich einzelne ML oder Kombinationen davon auf die Wirkungsparameter auswirken. Somit kann der Beitrag der ML zur Energiewende spezifiziert werden.

4. STATUS UND ERSTE ERGEBNISSE

Ein Beispiel eines verfügbaren Datensets, mit welchen eine Wirkungsanalyse bestimmter ML möglich ist, zeigt Abb. 1. Hier ist die Aufschlüsselung erneuerbarer Energien zusammen mit dem regionalen Elektrizitäts- und Wärmebedarf in der Modellregion dargestellt.

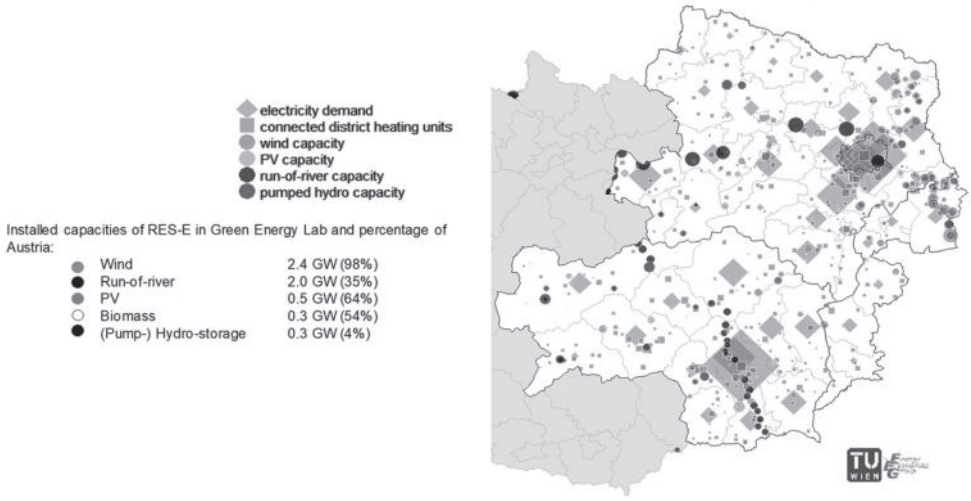


Abb. 1: Geografische Verteilung Erneuerbarer sowie des Strom- und Wärmebedarfes in der Modellregion (Darstellung TU Wien Energy Economics Group)

Anhand davon kann z.B. erhoben werden, wo und in welchem Ausmaß ML im Sektor Fernwärme auf andere Gebiete übertragen werden können. Daraus resultiert ein Skalenfaktor für Fernwärme-basierte ML, mit Hilfe dessen ihr Einfluss auf die Wirkungsparameter hochgerechnet werden kann.

Als konkretes Beispiel kann hier die ML „Hybrid DH Demo - Wind-to-Heat“ erwähnt werden. Der Datensatz erlaubt es, entfernungsabhängige Skalierungsanalysen zu machen, indem der Abstand von Windkraftanlagen zu Fern- und Nahwärmenetzen herangezogen wird. Abb. 2 zeigt mögliche Standorte von Nah- und Fernwärmenetzen, die eine maximale Entfernung von 10 km zu einen Windpark haben.

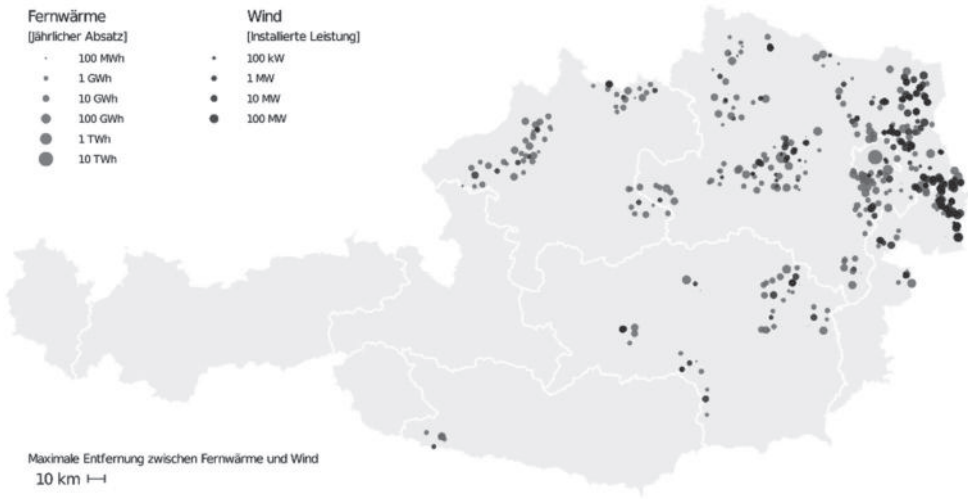


Abb. 2: Geografische Entfernungsanalyse von Windkraft und Nah-/Fernwärme Standorten in Österreich bis zu einer Entfernung von 10 km (Darstellung TU Wien, Energy Economics Group)

Derzeit wurden alle 25 ML nach ihrem Beitrag zur Wirkungsanalyse kategorisiert. Die Kategorien sind „quantitativer Beitrag", „qualitativer Beitrag" und „kein direkter Beitrag". Dies bedeutet jedoch nicht, dass die ML die als „kein Beitrag" kategorisiert werden, nicht ein wichtiger Baustein für die Energiewende sind. Ihr Beitrag ist nur für die Wirkungsanalyse nicht eindeutig messbar.

Als ein Beispiel sei das GEL-Projekt „Open Data Platform" genannt. Dabei wird der Stromverbrauch einzelner Prosumer hochauflösend gemessen und disaggregiert in einer Datenbank gespeichert. Es zeigt sich, dass durch die Optimierung des Haushaltsverbrauches der Anteil des selbstverbrauchten Photovoltaikstroms von ca. 30 % auf ca. 50 % steigt. Dies führt zu einem höheren Anteil der erneuerbaren Energienutzung vor Ort aufgrund der Flexibilitätsoptimierung. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird die mögliche Erhöhung des erneuerbaren Anteils im Stromsektor extrapoliert und liefert einen quantitativen Beitrag zur Wirkungsanalyse. Die neuen Verbrauchsprofile können z.B. in ein Strommarktmodell integriert werden, in dem die Berechnung der stündlichen Stromlieferung und die durchschnittlichen CO_2-Reduktionswerte simuliert werden können. Die Reduktion des Energieverbrauchs kann qualitativ beschrieben werden durch z.B. die Reduktion der Übertragungsverluste aufgrund des lokalen Verbrauchs und durch Veränderungen im Kundenverhalten.

Als Beispiel für eine ML mit derzeit qualitativem Wirkungsbeitrag seien die ML im GEL-Projekt „Blockchain Grid" genannt. Dabei handelt es sich um den Zusammenschluss von Prosumern und die Integration eines Batteriespeichers auf Basis einer Blockchaintechnologie. Der Wirkungsbeitrag der ML beruht auf den Annahmen, dass der lokale Energiehandel einen höheren Anteil der Versorgung mit erneuerbarer Energie und die Aktivierung der Flexibilität ermöglicht. Durch die Gemeinschaftsbatterie erhöht sich der Anteil des Eigenverbrauchs und der Versorgung mit erneuerbarer Energie im Vergleich zum stündlichen österreichischen bzw. europäischen Erzeugungsmix. Zusätzlich kann durch die Erhöhung der Aufnahmekapazität des lokalen Stromnetzes durch ein Netzmanagement ein höherer Anteil von Photovoltaikanlagen und Elektrofahrzeug-Ladestationen ermöglicht werden. Diese Annahmen bilden wiederum die Grundlage für die Erstellung von Ausrollungszenarien, die sich darauf begründen, dass Aufgrund der ML die Einspeisung von erneuerbarem Strom einen höheren Marktwert erreichen kann. Damit können Investitionen in erneuerbare Energieträger gefördert und somit die politischen Ziele des Erneuerbaren Ausbaus unterstützt werden.

Bei den ML im F&E-Projekt „Heat Water Storage Pooling“ haben vorläufige Berechnungen ergeben, dass ein theoretischer Anstieg von erneuerbarem Strom für den Wärmesektor von etwa 3 GWh im Burgenland möglich ist. Zusätzlich werden im Projekt Flexibilitäten von 630 kW_{el} durch Wärmepumpen und Elektroboilern im Stromsystem zur Verfügung gestellt. Dies führt zu einem Anstieg von erneuerbarer Wärme in Fernwärmenetzen von 85 % auf 91 % aufgrund der Substitution der Gasnachfrage. Darauf aufbauend wurde auch ein erstes Ausrollungsszenario für das Burgenland erarbeitet, das den Ausgangspunkt für die Ausrollung auf die gesamte GEL Region darstellt. Die Ergebnisse zeigen für das Burgenland ein Potential von rund 43 MW_{el} an Flexibilitäten durch elektrische Warmwasseranwendungen. Dadurch kann der Anteil der erneuerbaren Energieträger an den Fernwärmenetzen von 64 % auf 86 % erreicht werden. Gleichzeitig werden rund 120 MWh an „grauem Strom“ eingespart.

5. AUSBLICK

Wir arbeiten derzeit intensiv an einer digitalen, zielgruppenabhängigen Darstellung der ML in Form einer interaktiven Innovationslandkarte, welche 2021 auf der Webseite des GEL (www.greenenergylab.at) veröffentlicht wird. Dies hat zum Ziel, die Vernetzung unter den Stakeholdern zu verbessern und Entwicklungspotenziale aufzuzeigen. Neue ML fließen in weiterer Folge auch in die Wirkungsanalyse ein.

Die Arbeiten an einer Wirkungsanalyse werden vorangetrieben und um neue ML erweitert, sobald diese in ihren jeweiligen F&E-Projekten einen ausreichenden Reifegrad erreicht haben. Dadurch wird der Beitrag von GEL zu den Klimazielen der Region immer quantifizierbarer. Die differenzierte Gewichtung von bestimmten ML hinsichtlich ihres individuellen Impacts und auch Unterschiede in ihrem Marktlaunch erlauben es, unterschiedliche Szenarien zu erstellen und zu vergleichen, wodurch wertvoller Input für die Festlegung von Markt- und Förderrichtlinien gegeben werden kann.

6. LITERATUR

Dallinger B., Auer J., Lettner G. (2018) Impact of harmonised common balancing capacity procurement in selected Central European electricity balancing markets, Applied Energy, 222, 351-368.

ENTSO-E (2020) Scenario Report, https://www.entsos-tyndp2020-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP_2020_Joint_ScenarioReport_final.pdf

Fleischhacker A., Lettner G. (2018) Pareto Optimization of a Local Urban Energy System Considering Costs and Emissions. In: Neue Energie Für Unser Bewegtes Europa, 1 - 2.

Contact:
Christian Kurz
Green Energy Lab
QBC-4, Am Belvedere 4
1100 Wien
Email: christian.kurz@greenenergylab.at

Session 6a

Green Energy Lab – Wärmenetze

A simulation study on the integration of wind in a district heating system

Schindler, Gnam / Forschung Burgenland / AT
Nacht / 4ward Energy Research GmbH / AT

Effizienzsteigerung in Biomasseheizwerken mit Absorptionswärmepumpen

Jaunegg / Consulting – Engineering Ewald Jaunegg / AT

Flexibility as a main influencing parameter for a sustainable and renewable driven district heating sector

Kelz, Leusbrock, Binder, Schrammel / AEE INTEC / AT

A simulation study on the integration of wind in a district heating system

M. Schindler, L. Gnam
Forschung Burgenland GmbH, 7000 Eisenstadt, Österreich
T. Nacht
4ward Energy Research GmbH, 8020 Graz, Österreich

ABSTRACT: Wind energy plays a major role besides photovoltaics or hydropower as a key energy source for a successful transformation of the energy system into a sustainable system relying on renewable energy sources. Wind generation operates with levelized costs of electricity (LCOE) of around 39.9 to 82.3 €/MWh (Kost et al. 2018) which can be significantly above the average market price of 2019 of around 40.39 (EXAA Base) to 43.39 €/MWh (EXAA Peak) (EXAA 2020). Thus, the economic viability of operating wind power plants is currently strongly dependent on subsidies by OeMAG (the Austrian settlement agency for green electricity), which are limited in Austria for a period of 13 years (OeMAG 2020). While the funding will ensure that the most investment costs are met, it is preferable that the wind park stay in service after that as well. Hence, it is of utmost importance to evaluate new business models in order to sustain an economically justifiable operation of wind turbines which don't receive subsidies anymore and further foster the incentive to build new plants even without the existence of tariff subsidies. This is the case for several wind turbines located near the city of Neusiedl am See, Austria, where subsidies have run out, which has sparked the search for new business models for said wind turbines. Fortunately, the city of Neusiedl am See operates a local district heating network providing a perfect test bed for the investigation of new cross-sectoral approaches to directly use wind energy utilizing power-to-heat or power-to-gas applications. These sector coupling approaches are combined in a mathematical optimization model which will provide the necessary information to create a so-called "energy hub" (Gabrielli 2017). The energy hub enables the investigation of different business models and novel use cases based on the existing infrastructure. The target function of said optimization model is the minimization of the total net costs alike, considering different combinations of components. As hydrogen presents an interesting energy source for future energy systems also business models including an electrolyser are evaluated, e.g., with a focus on heat or hydrogen production. The presented simulation study shows that already available ready-to-use technologies, e.g., heat pumps and electrolysers, are efficient enough to extend an existing district heating network and aid in transforming it into a more sustainable and future-fit energy network. In addition, this work investigates how the excess wind energy can be used in an economically efficient way utilizing an electrolyser based on an estimated demand of hydrogen in the near future (e.g., hydrogen powered busses).

1. INTRODUCTION

Electricity from wind power plays a major role in transforming our current power grid into a more sustainable system. The economic viability of wind power plants in Austria is heavily dependent on subsidies from OeMAG, which are limited by law to 13 years (OeMAG 2020). To ensure the continued operation of these plants after the end of the subsidy period, new business models must be developed for these wind farms. This also incentivizes the construction of new wind farms even without subsidies. In the immediate vicinity of the city Neusiedl am See, in the federal state of Burgenland, Austria, there are several wind turbines for which the funding has already expired or will soon expire. In addition, wind power plants must be switched off in critical grid situations. In these situations, flexibilities such as heat storages can be used to increase the grid stability. Additionally, Neusiedl am See operates a district heating system creating an ideal test bed for

evaluating innovative sector coupling concepts and strategies as well as novel business models. Therefore, a new system is built which connects the electric grid and the district heating system. This system forms a so-called energy hub (Favre et al. 2005) consists of two air-to-water heat pumps, three thermal storages, two water-to-water heat pumps to supply the district heating network with heat. A biomass power plant (BMP), a gas burner (GB), and a flue gas condenser act as backup systems. In this paper, it is shown how existing technologies can be combined with heat pumps and BMPs to form an efficient energy hub based on a mixed integer linear program (MILP) (Gabrielli et al. 2017). Despite the production of district heating from the wind park's electrical energy, there is still excess energy, which has to be sold on the electricity market. The available surplus energy results from the fact that the wind farm has a peak power of **30** MW whereas the heat pumps reach only a peak consumption of **415** kW. Hence, there is an enormous potential of electricity for various use cases with more economic value as the wholesale market would provide. In this article we investigate one potential use case, i.e., the production of hydrogen, and evaluate if its potential is sufficient for operating a potential future hydrogen powered public transport system (e.g. with busses).

2. METHODS

In this section the equations for the MILP model (Theo et al. 2016) are presented. Special attention is given to the cost function, which acts as the objective function in the optimization. Furthermore, the implementation of the summer and winter mode switching is presented. At the end of the chapter the modeling of the electrolyser is discussed.

$$C = \sum_t \Big[\frac{p_f}{\eta_{BMP}} P_{th,BMP}(t) + p_{v,bmk}\sigma_{BMP}(t) + c_{start,BMP}\delta_{BMP}(t) + p_g P_{th,GB}(t) - p_{el}\varepsilon(t) - p_{h2}\dot{m}_{pem}(t) + (p_{el} + p_{el,spread}) \Big(P_{a1,el,grid}(t) + P_{a2,el,grid}(t) + P_{b1,el,grid}(t) + P_{b2,el,grid}(t) \Big) \Big]. \quad (1)$$

Here, p_f denotes the price for the biomass in ct/kWh, η_{BMP} denotes the efficiency of the BMP, $P_{th.BMP}$ the thermal power in kW produced by the BMP. The fixed costs of operating the BMP are modelled using $p_{v,bmk}$ in ct. σ_{bmk} *(t)* denotes a binary variable which is one if the BMP is on and zero if the BMP is off. On startup of the BMP ramping costs for the BMP occur which are modelled by $c_{start,bmk}$ in ct. The cost of the GB consists of the gas price p_g in ct and the quantity of gas $P_{th,GP}$ in kW consumed. The excess energy $\varepsilon(t)$ in kW in the energy hub is sold on the electricity market at price p_{el} in ct. Variables $P_{a1,el,g}(t)$, $P_{a2,el,g}(t)$, $P_{b1,el,g}(t)$, $P_{b2,el,g}(t)$ in denote the electric energy from the power grid consumed by the four heat pumps.

The heat pumps are modelled using the so-called coefficient of performance (COP) value.

$$Q_{th}(t) = COP(T) \cdot P_{el}(t) \quad (2)$$

In (2) the variable $Q_{th}(t)$ in kW denotes the thermal power which is produced by the heat pump at time t and $P_{el}(t)$ in kW stands for the electric power consumed by the heat pump. The *COP* is the factor that indicates how many units of thermal energy the heat pump can produce from one unit of electrical energy. The *COP* of the air-to-water heat pumps is a function of the temperature T. In a MILP problem, however, only linear constraints are allowed. Hence, it is necessary to linearize Equation (2) by approximating it with a piecewise linear function (Hart et al. 2017). The two air-to-water heat pumps have two different operation modes, one for summer and one for winter. The system behavior is quite different in these two modes, so it is important to model the mode switching. In summer mode the COP of the heat pumps is higher as in winter mode. This effect occurs because the internal plumbing of the heat pump is different in these two modes (Grassi 2018). In winter mode the hot water produced by the air to water heat pumps is stored in

a first thermal storage unit, in summer mode the produced hot water is stored in the second thermal storage unit because of the higher COP. These two modes are represented by the two binary variables $\sigma_{winter}(t)$, $\sigma_{summer}(t)$. Only one mode should be active at timestep t so for every time step the constraint,

$$\sigma_{winter}(t) + \sigma_{summer}(t) = 1, \tag{3}$$

is necessary. The binary variables $\sigma_{s,on}(t)$ and $\sigma_{s,off}(t)$ reflect the switching operations at time step t for switching on (1) and off (0), respectively. The helper variable $\sigma_{s,h}(t)$ approximates the derivative of $\sigma_{summer}(t)$, which is needed to calculate the switching points between the two modes. The variable $\sigma_{s,h}(t)$ can have three different states at time t: 1 when switching to summer mode in this time step, -1 when switching to winter mode in this time step, or 0 if there is no mode change. The constraints between these variables are modelled in equations (4-8).

$$\sigma_{s,h}(t) = \begin{cases} 0, & t = 1 \\ \sigma_{summer}(t) - \sigma(t-1)_{summer}, & t \neq 1 \end{cases} \tag{4}$$

$$0 \leq -\sigma_{s,h}(t) + 2 \cdot \sigma_{s,on}(t) \tag{5}$$

$$1 \geq -\sigma_{s,h}(t) + 2 \cdot \sigma_{s,on}(t) \tag{6}$$

$$0 \leq \sigma_{s,h}(t) + 2 \cdot \sigma_{s,off}(t) \tag{7}$$

$$1 \geq \sigma_{s,h}(t) + 2 \cdot \sigma_{s,off}(t) \tag{8}$$

The summer mode should only be active in summer in a continuous period. Therefore the switch-on and switch-off points are limited to one each (9-10).

$$1 = \Sigma_t^T \sigma_{s,on}(t) \tag{9}$$

$$1 = \Sigma_t^T \sigma_{s,off}(t) \tag{10}$$

A major part of this study is the electrolyser modelled with the linear equation,

$$\dot{m}_{pem}(t) = \eta_{pem} \cdot P_{el,pem}(t), \tag{11}$$

where $P_{el,pem}(t)$ in kW denotes electric power used for hydrogen production and $\dot{m}_{pem}(t)$ the mass of produced hydrogen per hour in kg/h. The degree of efficiency η_{pem} for this electrolyser is calculated based on the assumption that 72 % of the electric energy are converted into hydrogen, in the literature a total degree of efficiency of approximately 70 % is proposed (James et al., 2013).

$$\eta_{pem} = 19.19 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{J} \tag{12}$$

The minimum and maximum power is modelled using equations (13-14).

$$P_{el,pem}(t) \geq \sigma_{pem}(t) \cdot P_{el,pem,min} \tag{13}$$

$$P_{el,pem}(t) \leq P_{el,pem,max} \cdot \sigma_{pem}(t) \tag{14}$$

In equation (13) and (14) $\sigma_{pem}(t)$ is a binary variable denoting if the electrolyser is on (1) or off (0). The minimum power of the electrolyser is modelled with the variable $P_{el,pem,min}$, which is 5 % of the maximum

power, and the maximum power is modelled using the variable $P_{el,pem,max}$ which is in this case assumed with 17 MW.

3. EVALUATION

The presented mathematical model is implemented in the Python library Pyomo (Hart et al. 2017). The MILP model is solved using the Gurobi (2020) solver with following parameters. The MIP gap which is set to 0.03 describes the gap between lower and upper bound of the objective function. The solver terminates the optimization when this gap is lower the upper bound times the MIP gap (Gurobi, 2020). With MIP focus parameter the high level solution strategy of Gurobi is influenced (Gurobi, 2020). In this study the MIP focus is set to zero which is the default value. The energy produced by the wind park (Fig. 1), the district heating demand (Fig. 1) and the electricity price for the year 2018 (EXAA 2020) were used as input data for the optimization. The input data provides data for a whole year with a sampling period of one hour, which results in 8'760 data points.

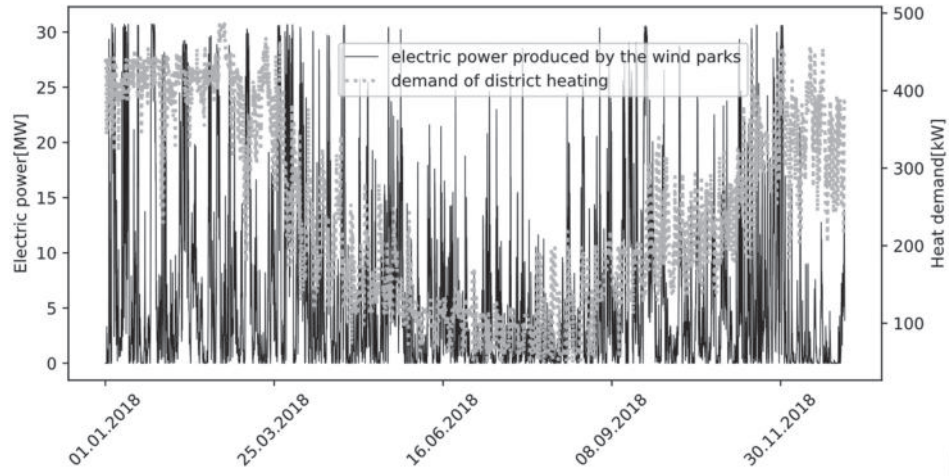


Fig. 1: Energy provided by the wind park and demand of district heating.

The values for the model parameters are chosen as presented in Tab 2. The values were chosen to reflect the cost structure of the real energy hub as good as possible in the model.

Tab. 2: Parameter settings for the model.

p_f	2.4 ct/kWh	p_g	4.0
η_{BMP}	0.85	p_{h2}	300 ct
$c_{start,BMP}$	2000 ct	$p_{el,spread}$	1.5 ct

4. RESULTS

Based on the MILP model it can be shown that the district heating network can be supplied by heat pumps. The electric excess energy that is still generated can then be sold on the electricity exchange or used for hydrogen production as shown in this article. Fig. 2 proves that the amount of produced hydrogen highly

depends on the hydrogen price. Above a hydrogen price of 500 ct/kg there is no more increase in production because of the maximum power consumption of the electrolyser. Consequently, the production costs decrease linearly when the hydrogen production is on maximum and the price of hydrogen increases. In order to evaluate the annual production of the electrolyser, the use of hydrogen as fuel for the public bus network in Burgenland is taken into account. For Example the fuel cell powered bus from SOLARIS (2020) can drive 11 km per kilogram hydrogen, so at the energy hub hydrogen for $8.8 \cdot 10^6$ km is produced. According to Postbus (2020) the yearly driven distance by all its busses in Burgenland is $3.4 \cdot 10^6$ km. Hence, in Neusiedl am See there is a potential to produce hydrogen for more than the complete road based public transport in Burgenland. The hydrogen production study presented in this article only shows that the wind farm provides enough excess energy to produce the specified amount of hydrogen. If one includes the investment costs and the running costs in such calculations, one finds that such plants cannot be operated economically at present. Hosseini and Wahid (2016) show that the price of electricity would have to drop by 75 % to make electrolysis competitive with hydrogen production from fossil fuels. This proves that without sufficient political support and suitable subsidies the goal of green hydrogen production is economically hardly to achieve. Especially, as pilot implementations are generally more cost intensive compared to fully developed off-the-shelf solutions.

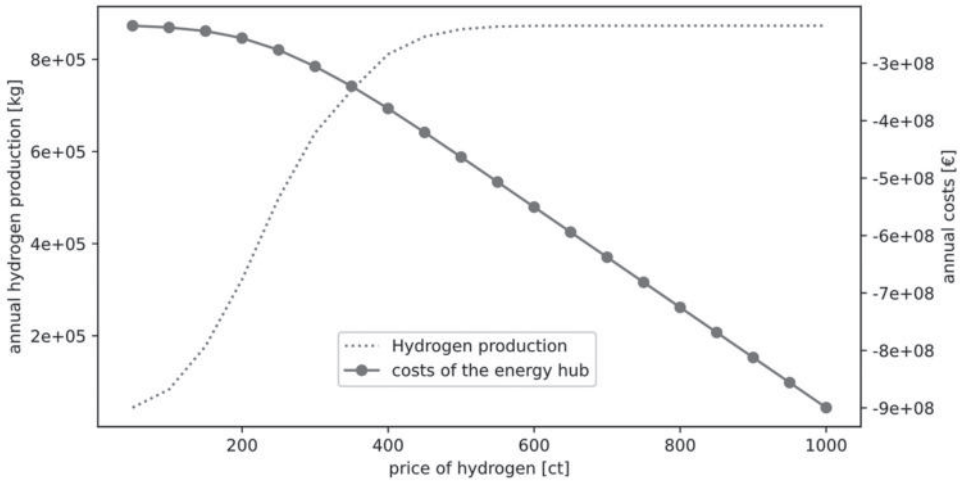


Fig. 2: Amount of hydrogen produced dependent on the selling price of hydrogen.

5. SUMMARY

In this article a MILP model for a hybrid district heating system was presented. This energy hub connects a wind farm with a district heating network. The result of the optimization shows that there is enough excess energy available for further business models in the energy hub, e.g., producing hydrogen as fuel for public transport. However, no investment costs and operational costs were considered in this study. At present, however, the generally accepted opinion is that the production of hydrogen from green electricity is not profitable due to these additional costs (El Emam 2020). This, however, proves the fact that there is an urgent need on the political side for funding and subsidizing green hydrogen solutions. To successfully transform the existing energy systems, it is of utmost importance to support the corresponding research efforts in order to establish these new technologies.

ACKNOWLEDGEMENT

The project “Hybrid DH Demo” is funded by the Austrian Climate and Energy Fund as part of the program “Smart Cities Demo”.

REFERENCE

EXAA (2020) Marktdaten, Energy Exchange Austria (EXAA), Accessed: 20.10.2020, https://www.exaa.at/de/marktdaten/historische-daten.

El Emam R. S., Özcan H. (2019) Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. Journal of Cleaner Production, vol 220, pp. 593-609.

Favre P. P., Geidl M., Glöckl B,. Kappel G. (2005) A Vision of Future Energy Networks, Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa.

Gabrielli P., Gazzani M., Martelli E., Mazzoti M. (2017) A MILP model for the design of multi-energy systems with long-term energy storage. Computer Aided Chemical Engineering, vol. 40, pp. 2437-2442.

Gurobi (2020) Gurobi Optimizer Reference Manual, Gurobi Optimization, LLC, Accessed: 20.10.2020, https://www.gurobi.com/documentation/9.0/refman/index.html.

Grassi W. (2018). Heat Pumps. Berlin, Germany: Springer Verlag.

Hart W. E., Laird C. D., Watson J.P., Woodruff D. L., Hackebeil G. A., Nicholson B. L., Siirola J.D. (2017) Pyomo Optimization Modelling in Python. Berlin, Germany: Springer Verlag.

Hosseini S. E.,Wahid M. A. (2016) Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 57, pp 850-866

James B., Whitney C., Moton J. (2013) PEM Electrolysis H2A Production Case Study Documentation: Strategic Analysis Inc.

Kost C., Shammugam S., Jülch V., Nguyen H.-T., Schlegl T. (2018) Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Freiburg, Frauenhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE.

OeMAG (2020) Abwicklungstelle für Ökostrom AG, Accessed: 20.10.2020, https://www.oem-ag.at/de/home/.

Postbus (2020) Postbus AG, Accessed: 20.10.2020, https://www.postbus.at/de/das-unternehmen/zahlen-daten-fakten.

SOLARIS (2020) Solaris Bus & Coach sp. z o.o., Accessed: 20.10.2020, https://www.solarisbus.com/.

Theo W. L., Lim J. S., Alwi S. R. W., Rozali N. E. M., Ho W. S., Abdul-Manan Z. (2016) An MILP Model for Cost-Optimal Planning of an On-Grid Hybrid Power System for an Eco-Industrial Park, Energy, vol. 116, p.1423-1441.

Contact Information:
Markus Schindler
Campus 1
7000 Eisenstadt
Email: markus.schindler@forschung-burgenland.at

Effizienzsteigerung in Biomasseheizwerken mit Absorptionswärmepumpen

E. Jaunegg
Consulting - Engineering Ewald Jaunegg, Allerheiligen bei Wildon, Österreich

ABSTRACT: The consumption of wood chips in local biomass district heating systems is a crucial factor in terms of running a profitable business. A massive potential to reduce the biomass consumption is to recover the energy from the flue gas, which usually gets into the atmosphere at 160 to 200 °C. This can be done by implementing a flue gas recovery system which uses the return flow of the district heating system with around 50 °C to cool the flue gas and preheat the return flow of the biomass boilers.

A massive amount of energy can be recovered in addition by using a heat pump system to further cool down the flue gas. Especially hot water driven absorption heat pumps offer many advantages. Instead of a high consumption of electric energy in a heat pump with compressors the driving energy in an absorption heat pump is hot water produced by a biomass boiler on site. The increase in efficiency reduces the amount of woodchips needed, the CO_2 footprint of the heat generation and increases the profitability of the biomass district heating system.

The realisation of an absorption heat pump in a biomass district heating system requires special solutions for the hydraulic implementation and also new solutions for the control system. The behaviour of an absorption heat pump in a biomass district heating systems with its volatile profiles in terms of flow and temperatures over the year and during a day is not easy to predict. The modelling of the whole system with different load scenarios in a software tool can brighten the view on these complex interactions.

A new way of controlling the absorption heat pump is essential. It is not good enough to use the standard control systems, where a fixed temperature on the source or on the sink side is held. To reach the maximum heat recovery rate the temperature on the source side has to be as low as possible at all operating conditions. This can be achieved by additional sensors in the machine, which allow to run at the maximum allowed salt concentration in the rich LiBr solution.

The first biomass district heating plant with this new technology is starting its operation in the ski resort Wagrain in the Austrian county Salzburg in autumn 2020. Valid data will be available after the heating period 2020/2021.

1. EINLEITUNG

Seit den 1980er Jahren sind in Österreich zahlreiche Biomasseheizwerke errichtet worden. Etwa zur Jahrtausendwende setzte ein regelrechter Boom ein. Die Ressource Holz ist mittlerweile ein knappes Gut geworden, was eine effiziente Nutzung notwendig macht. Steigende Preise für Hackgut motivieren jeden Heizwerkbetreiber, die Effizienz seiner Anlagen zu erhöhen und bei der größten Kostenposition, dem Brennstoff, einzusparen.

Auch wenn in Österreich noch immer mehr Holz zuwächst als genutzt wird, so sprechen eine verstärkte ökologische Waldnutzung, zukünftige neue stoffliche Verwertungen (Ersatz für Kunststoffe) oder neue energetische Nutzungspfade (Holzgas als Erdgasersatz, flüssige Ersatztreibstoffe) für einen effizienten Umgang mit der Ressource Holz.

Eine Möglichkeit, die Ressourceneffizienz in einem Biomasseheizwerk zu erhöhen, besteht in der Verwendung von Rauchgaskondensationsanlagen, um den im Rauchgas enthaltenen Energieinhalt so weit wie möglich zu nutzen. In der Regel ist dies seit Ende der 1990er Jahre durch die Abkühlung des Rauchga-

ses mit dem Fernwärmenetz-Rücklauf unter Verwendung von Gas/Wasser-Wärmetauschern bewerkstelligt worden (Neuenschwander et al., 1998). Es wurden aber auch schon einzelne Projekte realisiert, bei denen zur stärkeren Abkühlung des Rauchgases Wärmepumpen eingesetzt wurden. Dabei wurden klassische Kompressionswärmepumpen aber auch Absorptionswärmepumpen verwendet.
In diesem Beitrag sollen vor allem die Vorzüge der Absorptionswärmepumpe aber auch die Herausforderungen, diese in ein Nahwärme Biomasseheizwerk zu integrieren, dargestellt werden.

2. EFFIZIENZPOTENTIALE AUS DEM RAUCHGAS

Bei der Verbrennung von Holz in einem Biomassekessel wird zum einen das als Brennstofffeuchte vorhandene Wasser verdampft und zum anderen der Wasserstoff aus der elementaren Zusammensetzung des Holzes mit Sauerstoff zu Wasser verbrannt. Das Rauchgas verlässt den Kessel in der Regel mit einer Temperatur von 160 °C bis 200 °C. Tiefere Temperaturen sind aufgrund der zu erwartenden Kesselkorrosion nicht gewünscht.

Mit diesem Rauchgas werden teils sehr hohe Energiemengen ungenutzt an die Umgebung abgeführt, insbesondere bei hohen Brennstofffeuchten. Zum einen ist das die sensible Wärme als Differenz zwischen Abgastemperatur und Umgebungstemperatur, aber der weitaus größte Teil besteht aus der latenten Wärme, welche aus der Kondensation des Wasserdampfes im Rauchgas gewonnen werden kann.

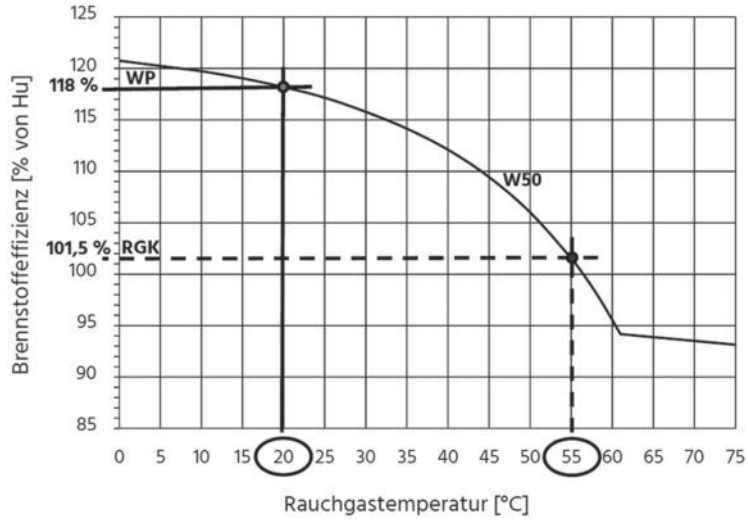


Abb. 1: Diagramm zur Ermittlung der Brennstoffeffizienz bei unterschiedlicher Abkühlung der Rauchgase durch Rauchgaskondensationsanlagen und Wärmepumpe

In Abb. 1 ist dargestellt, welche Brennstoffeffizienzen, bezogen auf den unteren Heizwert des eingesetzten Brennstoffes, bei entsprechender Abkühlung des Rauchgases möglich sind. In diesem Fall ist eine Kurve dargestellt, welche für einen Biomassebrennstoffeinsatz mit einem Wassergehalt von 50 % gilt. Folgende zusätzliche Parameter sind bei dieser Kurve berücksichtigt: Heizwert des Hackgutes (Mischsortiment aus Weich- und Hartholz), 180 °C Kesselabgastemperatur, Seehöhe von 500 m ü. A., 6 % Rest-O_2-Gehalt im trockenen Abgas.

Die gestrichelten Linien stellen die Abkühlung auf 55 °C mit Hilfe des kalten Netzrücklaufes dar, einer sogenannten passiven Rauchgaskondensation. Damit ist eine Brennstoffeffizienz von etwas über 100 % erreichbar. Bei Einsatz einer aktiven Rauchgaskondensation mit Wärmepumpe mit ca. 15 °C Kaltwasservor-

lauftemperatur ist eine Abkühlung des Rauchgases auf ca. 20 °C mit einer resultierenden Brennstoffeffizienz von 118 % möglich; hier im Bild mit durchgezogenen Linien dargestellt.

3. INTEGRATION IN BIOMASSEHEIZWERKE

Es hat sich gezeigt, dass bei der hydraulischen Verschaltung von Rauchgaskondensationsanlagen und Wärmepumpen in einem Biomasseheizwerk ein paar wichtige Regeln zu beachten sind. Siehe dazu auch das Schema in Abb. 2.

- Im Rauchgasstrom ist als erstes ein Economiser (ECO) zu installieren, damit die sensible Wärme auf einem höheren Temperaturniveau auf das Wärmeträgermedium übertragen werden kann. Diese Wärme muss dann unbedingt nach der hydraulischen Einbindung der Wärmepumpe in das System gebracht werden. Dies reduziert die Wärmemenge, welche über die Wärmepumpe abgearbeitet werden muss und damit die Wärmepumpengröße und die Kosten. Zusätzlich wird damit die Temperatur im Rücklauf auf der Senkenseite der Wärmepumpe niedriger gehalten, was sich insbesondere bei der Kompressionswärmepumpe positiv auf den COP auswirkt.
- Eine passive Rauchgaskondensation (RGK) nach dem ECO, welche direkt den kalten Netzrücklauf zur Kondensation der Rauchgase nutzt, ist insbesondere bei einer Kompressionswärmepumpe wichtig. Die hier gewonnen Energie benötigt keine Antriebsenergie (bis auf die sehr geringe Pumpenleistung zur Überwindung der hydraulischen Widerstände) und reduziert wiederum die Größe der Wärmepumpe.
- Bei der Absorptionswärmepumpe verhält es sich anders. Hier ist es wichtig, die Rücklauftemperatur der Senke niedrig zu halten, weil dann auch tiefere Kaltwassertemperaturen und größere Energierückgewinnungsraten aus dem Rauchgas möglich sind. Deshalb soll ohne passive RGK die gesamte Nutzwärme als aktive Kondensation der Wärmepumpe zugeführt werden. Zusätzlich vereinfacht es die Anlagentechnik, wenn nur ein Kondensator zu integrieren ist. Die höhere Quellenergiemenge macht die Absorptionswärmepumpe etwas größer, dies wirkt sich aber nur in geringem Maße auf die Kosten der Absorptionswärmepumpe aus.

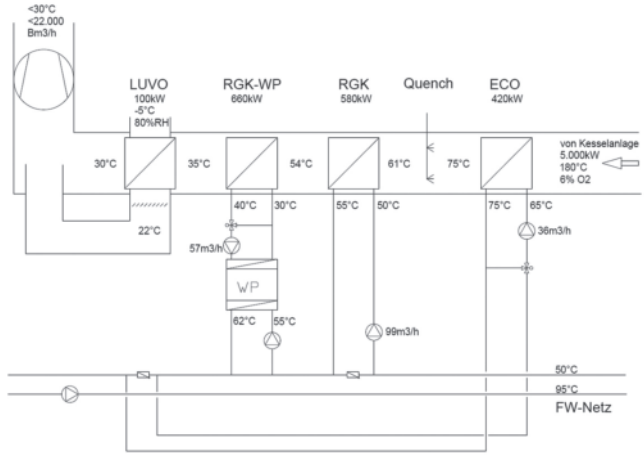


Abb. 2: Schema einer Integration von Rauchgaskondensationsanlage und Wärmepumpe in einem Biomasseheizwerk

4. VORTEILE EINER ABSORPTIONSWÄRMEPUMPE

Die Bereitstellung der Kaltwassertemperatur zur Abkühlung der Rauchgase und in Folge das Anheben der Quellenergie auf ein nutzbares Temperaturniveau erfordert den Einsatz einer Wärmepumpe. Dies kann durch eine klassische Kompressionswärmepumpe erfolgen, mit dem Nachteil, dass dafür hochwertige und teure elektrische Energie eingesetzt werden muss. Dieser Nachteil wiegt umso mehr, je tiefer die Kaltwassertemperatur und damit der Nutzen aus dem Rauchgas sein sollen.

Bei Einsatz einer Absorptionswärmepumpe erfolgt der Antrieb thermisch, im Falle eines Biomasseheizwerkes idealerweise durch einen Heißwasser-Biomassekessel. Somit kann die Antriebsenergie direkt vor Ort günstig erzeugt werden. Die sowieso von einem Kessel zu erzeugende Energie muss nur über die Absorptionswärmepumpe umgeleitet werden, wodurch der Brennstoffeinsatz sinkt, weil bis zu 30 % der erzeugten Wärmemenge aus dem Rauchgas kommt. Auch gibt es keinen Nachteil bei tieferen Temperaturen, da sich der COP kaum verschlechtert. Zudem ist der COP bei der Absorptionswärmepumpe nicht so relevant wie bei einer Kompressionswärmepumpe. Drei wesentliche Vorteile bietet die Integration einer Absorptionswärmepumpe:

- Der Ressourceneinsatz in Form von Hackschnitzel im Biomasseheizwerk sinkt.
- Die CO_2 Emissionen werden massiv reduziert, indem Hackgut anstelle von Strom eingesetzt wird. Dies ist insbesondere in der kalten Jahreszeit mit höheren fossilen Anteilen im Strommix relevant.
- Durch die Effizienzsteigerung verbessert sich die Wirtschaftlichkeit der Biomasseheizanlage. Dazu tragen insbesondere reduzierter Biomasseeisatz und im Vergleich zur Kompressionswärmepumpe wesentlich geringerer Stromverbrauch bei.

5. ANFORDERUNGEN AN EINE ABSORPTIONSWÄRMEPUMPE IN BIOMASSE-NAHWÄRMEANLAGEN

Der Einsatz von Absorptionswärmepumpen in Biomasseheizwerke ist nicht sehr verbreitet. Die wenigen Anlagen, welche z.B. in Österreich in Großanlagen eingesetzt werden, fahren mit einer vom Hersteller vorgegeben Standardregelung. Diese besteht üblicherweise aus der Regelung einer eingestellten Vorlauftemperatur auf der Wärmeabgabeseite. Dies ist bei kaum schwankenden Betriebsbedingungen in einer Bandlast-Konfiguration durchaus machbar. In Kälteanwendungen zur Klimatisierung ist es die Kaltwasservorlauftemperatur, welche auf einen fixen vorgegeben Wert geregelt wird.

Biomasse-Nahwärmeanlagen haben allerdingt stark schwankende Betriebszustände. Der Leistungsregelbereich beträgt oft 10 – 100 % und dies in relativ kurzen Abständen über den Tag verteilt. Die Volumenströme auf der Wärmeabgabeseite schwanken durch die Koppelung mit dem Netzbetrieb stark. Auch die Temperaturen (Kesselabgas, Netz Vor- und Rücklauf) sind schwankenden Betriebsbedingungen unterworfen. Hier sind neue Ansätze für eine Regelung erforderlich, um einerseits den Umständen entsprechend stabile Regelungen und vor allem aber in jedem Betriebszustand die größtmögliche Effizienz zu erreichen. Die größtmögliche Effizienz wird dabei dadurch erreicht, dass die Kaltwasservorlauftemperatur immer möglichst tief ist, um das Maximum aus dem Rauchgas zu holen. Das heißt, die Kaltwasservorlauftemperatur ändert sich laufend mit den vorhandenen Betriebsbedingungen.

5.1 EINE NEUE ART DER REGELUNG

Eine möglichst tiefe Kaltwasservorlauftemperatur zu fahren bedeutet konkret, dass die Salzkonzentration der LiBr-Wasser-Lösung auf der salzreichen Seite der Absorptionsmaschine immer am Maximum von etwa 63 % betrieben werden muss, um die maximale Kältemittelaufnahmefähigkeit (Kältemittel ist Wasser) zu haben. Vor allem im Teillastbereich sind dadurch bedeutend tiefere Temperaturen möglich als bei Nennlast. Siehe dazu auch das TTX-Diagramm in Abb. 3. Die gestrichelte Linie rechts auf der 63 % Salzkonzentrationslinie entspricht dem Weg der salzreichen Lösung vom Austreiber in den Absorber.

Die von der Firma StepsAhead entwickelte Regelung basiert im Wesentlichen darauf, dass die Salzkonzentration auf der salzreichen Seite kontinuierlich gemessen bzw. errechnet wird. Bei sinkender Salzkonzentration wird die Beheizung erhöht, bei steigender Salzkonzentration wird die Beheizung reduziert. Für die Realisierung dieser Regelung werden zusätzliche Sensoren im Dampfraum von Austreiber/Kondensator bzw. im Verdampfer und/oder seinem Ausgleichsgefäß eingebaut. Der dazu notwendige Regelalgorithmus wird außerhalb der Absorptionsmaschine umgesetzt.

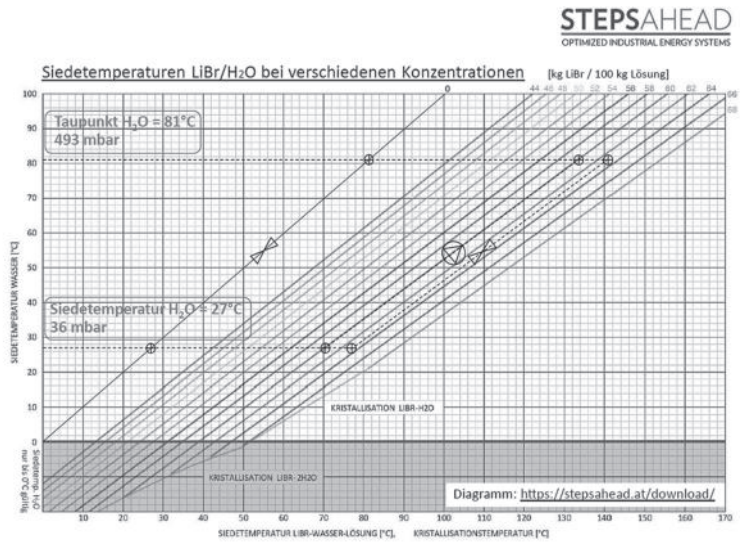


Abb. 3: Darstellung des Absorptionswärmepumpenprozesses im TTX-Diagramm (Temperatur LiBr-Wasser-Lösung. – Temperatur Wasser – Salzkonzentration); (StepsAhead 2020)

5.2 DIMENSIONIERUNG UND SIMULATION

Für die Dimensionierung der Wärmepumpenanlage ist es wichtig die vorhandenen Betriebsdaten zu analysieren. Dabei spielen folgende Faktoren eine wesentliche Rolle:

- Art des Brennstoffes, vor allem Wassergehalt
- Netztemperaturen (Vor- und Rücklauf)
- Lastprofil über das Jahr: Hier zeigt sich häufig, dass vor allem die Schwachlastzeiten für einen großen Teil des jährlichen Wärmebedarfs bei Nahwärmeanlagen verantwortlich sind.
- Die Energiebilanz aus Rauchgaskondensation, Antriebsenergie Absorptionswärmepumpe und Nachheizung mit Biomassekessel muss das Erreichen der Zieltemperatur im Netzvorlauf zulassen. Wenn die Wärmemenge auf niedrigem Temperaturniveau aus der Wärmepumpe zu hoch ist, kann die gewünschte Netzvorlauftemperatur eventuell nicht erreicht werden.

Vor allem bei komplexeren Anlagen mit mehr als einem Kessel ist eine Simulation der Anlage sinnvoll, um die Effizienz der Anlage bei verschiedenen Lastzuständen darstellen zu können. In Abb. 4 ist beispielhaft eine Modellierung einer Anlage durch die Fa. StepsAhead mit dem Simulationstool Ebsilon dargestellt.

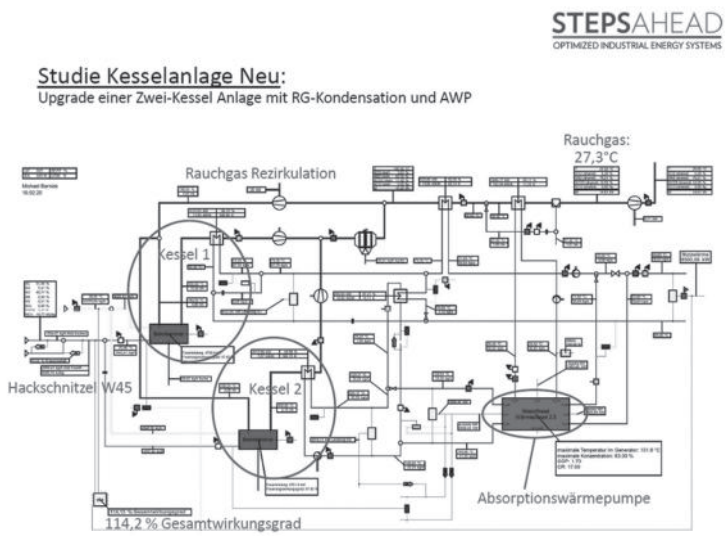


Abb. 4: Modellierung einer 2-Kesselanlage mit Rauchgaskondensation und Absorptionswärme-pumpe; (StepsAhead 2020)

6. PROJEKTREALISIERUNG IN WAGRAIN

Als erstes Projekt dieser Art wird beim Biomasseheizwerk des Skiortes Wagrain im österreichischen Bundesland Salzburg eine Absorptionswärmepumpe mit einer Abgabeleistung von 2 MW nachgerüstet.

Ausschlaggebend war hier eine erforderliche Leistungserhöhung aufgrund von Neukundenanschlüssen. Zu den beiden bestehenden Biomassekesseln sollte ein dritter hinzugefügt werden. Nach anfänglichen Alternativszenarien mittels Kompressionswärmepumpen wurde die Option einer Absorptionswärmepumpe genauer geprüft. Eine Modellierung der Anlage durch die Fa. StepsAhead hat schließlich gezeigt, dass dies sehr gut möglich ist. So sind bei allen Lastzuständen sehr gute Brennstoffeffizienzwerte zu erwarten. Im Jahresschnitt wird mit einer durchschnittlichen Brennstoffeffizienz von 115 % gerechnet, bei Einsatz von vorwiegend feuchtem Waldrestholz mit 40 bis 50 % Wassergehalt. Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgt im Herbst 2020.



Abb. 5: Absorptionswärmepumpe für das Projekt Wagrain; Quelle: StepsAhead GmbH

In Abb. 5 ist die Absorptionswärmepumpe für das Projekt Wagrain vor der Auslieferung aus dem Herstellerwerk zu sehen.

7. AUSBLICK

Nach Projektrealisierung werden die modellierten Daten überprüft werden. Aussagekräftige Daten werden nach der Heizsaison 2020/2021 zur Verfügung stehen.

Bei Vorliegen von erfolgreichen Ergebnissen ist damit zu rechnen, dass viele weitere Projekte mit dieser in der Nahwärmetechnik neuartigen Technologie ausgerüstet und damit einen nennenswerten Beitrag zur Energieeffizienz im Bereich der erneuerbaren Energieerzeugung aus Biomasse beitragen werden.

LITERATUR

Neuenschwander, P.; Good, J. & Nussbaumer, T. (1998): Grundlagen der Abgaskondensation bei Holzfeuerungen, Ingenieurbüro Verenum, Bundesamt für Energie, Zürich

StepsAhead Energiesysteme GmbH (2020): Webinar-Vortrag „Absorptionswärmepumpen: Technologie und Einsatzmöglichkeiten“ am 28.05.2020 von H. Blazek im Rahmen einer klimaaktiv QB-Weiterbildung in Kooperation mit Green Energy Lab

Kontaktdaten:
Ewald Jaunegg
Allerheiligen 256
A-8412 Allerheiligen bei Wildon
Email: office@ewaldjaunegg.com

Flexibility as a main influencing parameter for a sustainable and renewable driven district heating sector

J. Kelz, I. Leusbrock, J. Binder, H. Schrammel
AEE - Institute for Sustainable Technologies, Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf, Austria

ABSTRACT: For an effective implementation of highly flexible, sustainable and renewable driven district heating (DH) systems a combination of research and demonstration was chosen to implement a broad share of flexibility measures with an increased share of renewables. The research needs addressed based on several demonstration cases, which provide the background for developing, implementing and optimising both, innovative system as well as technical solutions. The expected results will lead to more efficient and effective demonstrators due to close cooperation between district heating operators, technology and know-how providers as well as research institutions during the whole innovation and implementation process. The demonstrators will be used to showcase, validate and optimise the developed measures. The outcomes and experiences from implementation and operation will be used to derive best-practice solutions, develop promising concepts and pathways and show quantitatively technical, economic and ecological benefits and impacts for the district heating sector.

1. INTRODUCTION AND BACKGROUND

District heating (DH) systems plays a major role to cover the energy demand in different sectors (e.g. spatial heating, warm water supply, cooling, thermal processes in industry, etc.) in Austria as well as all over Europe (Fleiter et al. 2016). For example, in 2016 roughly 25 % of the space heating requirement (87 TWh) was covered by grid-connected district heating solutions (BMWFW 2017) in Austria. The achievement of mid- and long-term international and national climate goals such as the Paris Climate Agreement is a major challenge, in which consequently flexible and sustainable DH systems play a central role (Connolly et al. 2014).

The current heat supply and the supply quality as well as robustness of DH systems is guaranteed by the versatility and ease-of-use of fossil fuels. In order to decarbonise the energy supply as a whole, an in-depth integration of renewables is mandatory. This poses major challenges for today's energy systems. In a future sustainable and mainly renewable driven district heating sector (decarbonised DH system), the current standards must be maintained in an affordable way, but in an even more complex system (storage, renewables, volatility, prosumers, etc.) without fossil fuels. This can only be achieved by increased flexibility of the overall system and a smart interaction of all its technical (e.g. supply units, storage, control, etc.) and non-technical (e.g. business models, user integration approaches, etc.) components.

In general, DH systems enable the intelligent integration and combination of renewable energies, waste heat, storage systems, heat consumers and the coupling with different sectors and infrastructure (e.g. electricity, gas, waste water, etc.). Especially in urban areas, thermal networks will become even more important, as they can be used to collect, store and transport industrial waste heat or renewable energy and thus actively balance both temporal and spatial demand-supply mismatch. A major requirement nevertheless is to provide an affordable, secure and (resilient) energy supply suitable for current and future boundary conditions while being technically, economically and ecologically sustainable. To fulfil this demand of requirements, a high degree of flexibility from future systems including smart operation and control in combination with a reduction of environmental impacts, security of supply and affordable energy costs for end customers is necessary.

Therefore, a research project (Thermal demand and supply as flexible elements of future sustainable energy systems - ThermaFLEX)) was launched focussing on increasing energy flexibility in the district heat-

ing sector. A trans-disciplinary team of in total 27 project partners, consisting of DH network operators, technology and know-how providers as well as research institutes, under the leadership of AEE –Institute for Sustainable Technologies is planning, implementing and evaluating specific flexibility measures using different demonstrators to showcase, validate and optimise the developed measures. The project with a duration of in total 4 years lasts from November 2018 to October 2022.

2. METHODOLOGY

2.1 OVERVIEW

The applied methodology (depicted in Fig. 1) within the research project is to increase the flexibility of the entire system through technical components (e.g. biomass, solar thermal, heat pumps, etc.), systemic approaches (e.g. sector coupling, smart control, low-exergy grids, etc.) as well as non-technical measures (e.g. user and stakeholder integration, business model innovation, etc.). This quite unique approach should allow to feed-in more renewables into the district heating sector and offers decarbonised heating service to customers as well as form highly flexible, sustainable and renewable driven DH heating systems.

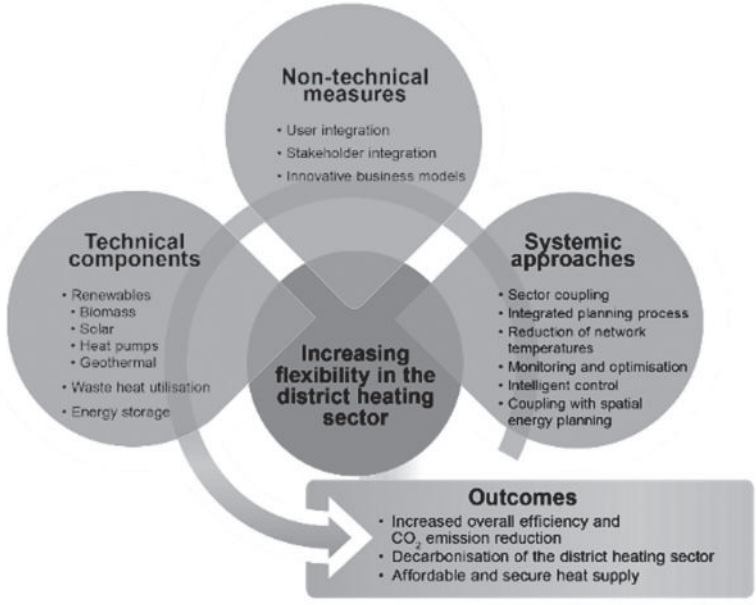


Fig. 1: Methodology applied within the research project

2.2 CHALLENGES AND GOALS

The major challenges as well as research needs will be addressed on base of several demonstration cases, so called demonstrators (see section 2.3) focussing on the following technical, economic and scientific goals:

- Development of a comprehensive overview of flexibility options and evaluate flexibility potential in urban DH systems
- Development of innovative single-technology concepts with system-wide implications and/or interventions as well as development of system-wide measures for increased flexibility
- Support the demonstrators with scientific/technical/organisational know-how during the implementation and operation phase

- Development of monitoring concepts that allow technical and scientific evaluation of the measures and evaluation of the monitoring data for further optimisation and system evaluation
- Derive Best Practices from the problem definition phase, concept development, the implementation and monitoring operation phase for later replication and roll-out projects in Austria, European Union and worldwide
- Show pathways for enhanced user and stakeholder integration in DH sector
- Evaluation of the overall potential of the proposed and demonstrated flexibility measures and determination of their environmental, ecological and economic impact

2.3 DEMONSTRATORS TO SHOWCASE FLEXIBILTY

The applied methodology within the research project leads to scientific, technical and organisational support for the demonstrators throughout the whole innovation and implementation process. The entire process covers the idea & concept development via planning and implementation to commissioning, start-up & operation as well as monitoring with evaluation and optimisation steps.

On the other hand, the involved demonstrators provide the basis for developing, implementing and optimising innovative concepts and technical solutions in the real environment of the respective DH system. Results and experiences gained from the demonstrator sites derives in best practices, highlight promising concepts and pathways and show quantitatively technical, economic and ecological benefits and impacts of the demonstrators (see Fig. 2).

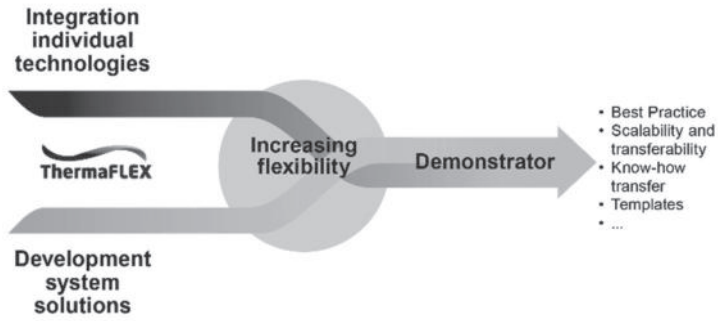


Fig. 2: Link between demonstrator and research project to showcase flexibility

The involved demonstrators differ largely in scale and complexity. Therefore, it is expected that the results will generate highly efficient and effective demonstrators and consequently lead to sustainable roll-out projects and best-practice measures with high scalability potential and transferability. The derived outcomes deliver a substantial contribution to form a sustainable and renewable driven district heating sector. In the following the demonstrators are described briefly:

Demonstrator - Virtual heating plant Gleisdorf: Key element of the future concept of the existing DH system for the city of Gleisdorf is the implementation of a virtual heating plant approach for an intelligent and predictive control, based on a fully digitised system. The approach consists of technical measures such as storage solutions, sector coupling with wastewater treatment plant, low-temperature heat supply, advanced monitoring and control, central and decentral renewable heat supply under one umbrella.

Demonstrator – 100 % renewable district heating Leibnitz: Demonstration of a smart, renewable energy and waste-heat based municipal DH system as result of a merge of three currently independent DH systems. The measures covering distributed energy conversion facilities, multi-stage industrial waste heat extraction, cascade heat supply, bidirectional heat transport, data integration, thermal storage and smart control.

Demonstrator - High-temperature heat pump Spittelau: In this demonstration project the approach of so-called sector coupling, i.e. the merging of various previously separate infrastructures, is followed. The

waste heat from the flue gas condensation (use of latent energy from flue gas) of the waste incineration plant located in Vienna - Spittelau, will be used as energy source for a high temperature heat pump implementation. Taking into account the findings from the evaluation of different operating strategies, a direct feed into the primary district heating network of the City of Vienna shall be realised.

Demonstrator - Heat recovery from waste water: Concepts for the realisation of a demonstration plant for the utilisation of waste heat from sewage in the Liesing district of Vienna to feed heat continuously into the secondary district heating network shall be developed and demonstrated. The technical concept based on the use of sewage from the main sewer (heat source) represents a new and innovative form of heat recovery for low-temperature systems and urban development areas.

Demonstrator Big Solar Salzburg: A proof of feasibility as well as demonstration of a large solar-thermal system in combination with seasonal storage for the DH system of Salzburg will be developed within this demonstrator. The essential elements of the concept (a central solar collector field in connection with a large pit thermal energy storage in direct coupling with a large heat pump) targeting in the decarbonisation of the energy supply mix and the decrease of dependency on energy imports.

Demonstrator Eco-energy park Salzburg-Süd: The overall aim is to demonstrate a large-scale absorption heat pump implementation for increased waste heat recovery in the DH system of the city of Salzburg. A conceptual design of a so-called eco-energy park as well as the implementation of currently unusable low-temperature waste heat from an industrial site in the South of Salzburg will be demonstrated.

Starting point and rate of progress for the implementation of the developed flexibility measures of the linked demonstration cases are quite varying. Within some demonstrators first implementations of the developed flexibility measures have been started within 2019 and 2020 (e.g. Leibnitz, Gleisdorf, Eco-Energy park). Within other demonstrators the final concepts (including start-up and operation plan, monitoring concepts, etc.) for the implementations will be available and implementations will start within 2021.

3. RESULTS SO FAR AND DISCUSSION

3.1 FLEXIBILITY AS A MAIN INFLUENCING PARAMETER

To evaluate the flexibility potential and identify main influencing parameters as well as relevant boundary conditions an evaluation of the flexibility potential as well as the creation of an overview of flexibility options in urban DH systems was investigated as a first step. The methods applied based on literature studies, questionnaires, workshops and meetings. The main results were i) a definition of flexibility within the project context, ii) evaluation methods and key performance indicators (KPIs) to evaluate flexibility qualitatively and quantitatively as well as iii) a systematic categorisation of measures, concepts and technologies which were identified to increase flexibility of DH systems.

3.1.1 Flexibility definition in the district heating sector

For a common understanding of flexibility, a project derived term was developed as a uniform definition of flexibility in the energy system does not exist (Paiho et al. 2018) as well as available definitions (e.g. Lund et al. 2015, Sneum et al. 2017, Spiller et al. 2015, Vandermeulen et al. 2018, etc.) does not fit in the content of the addressed research needs respectively. The definition of flexibility in the DH sector in the framework of the research questions within the research project was defined as "Flexibility of the overall system is the ability of a system to keep balance between supply and demand of heat (and cold) at each point of time."

Based on this more general definition of flexibility, finally various types of flexibility were specified to cover different perspectives, namely flexibility of the overall system, flexibility of the supply side, flexibility of the distribution infrastructure, flexibility of the demand side as well as flexibility in planning and design.

Combined with the goals and challenges of the DH operators as well as energy service companies to transform existing DH system towards to a 100 % renewable energy system, it builds the basis for the proposed flexibility indicators and the developed flexibility concepts.

3.1.2 Key performance indicators for flexibility and evaluation criteria

Considering the only limited literature on evaluation criteria and KPIs in this content and the overall complexity of the investigated DH systems (e.g. Clauß et al. 2017, Vandermeulen et al. 2018, etc.), the approach applied was to define a pool of various indicators, to evaluate flexibility measures.

One approach from a technological point of view, is the evaluation based on the five degrees of freedom, namely temperature, heat load (power), heat (energy), time and location. This KPIs are able to define flexibility mainly qualitatively and gives a first indication, which impact various concepts may have on flexibility.

To measure flexibility quantitively, KPIs within the following categories were identified and developed:

- Category - minimisation of short &. long-term fluctuation of the load profile KPIs – load factor, peak/low load hours or number of load peaks/valleys, ramp rate, volatility ratio
- Category - increase in energy efficiency KPIs - simultaneity factor, capacity factor, heat losses
- Category - reduction of blackouts and shortages KPIs - duration and frequency of shortages, restricted user comfort, customer flexibility

To additionally quantify the flexibility, a set of well-established standard KPIs like share of renewable energy, CO_2 savings (based on primary energy use), energy savings, storage losses, cost savings, etc. can be used for interpretation and evaluation of flexibility (e.g. evaluation before and after the implementation of a flexibility measure). To evaluate the flexibility measures for the overall DH system a combination of qualitative, quantitative and standard KPIs will lead to an overall evaluation criteria.

3.1.3 Proposed concepts and technical solutions to increase flexibility

Based on pre-concepts within the developed flexibility concepts a broad range of system solutions and individual technologies were identified to increase flexibility and decarbonise DH systems.

The developed individual technologies (single - technology concepts) for increased flexibility and decarbonisation of DH systems covers the integration of i) compression and absorption heat pumps for better low -exergy/waste heat utilisation, ii) of compact and decentral sorption storage and iii) of alternative heat supply concepts for buildings.

Besides of individual technology solutions also system solutions were investigated and suitable concepts were identified. The developed system solutions focussed on the integration of multiple previously separated DH systems in one main DH system as well as the integration of different infrastructures as heat/energy consumer, supplier and producer in DH systems. Moreover, the development of i) smart control strategies and unit commitment procedures, ii) large-scale solar thermal supply systems with combined seasonal storage, iii) a Virtual Heating Plant approach and iv) low-temperature system solutions in combination with urban redevelopment was included.

Within the developments, simulations and evaluations of different flexibility options for DH systems with different boundary and operation conditions were included. Finally, the most suitable concepts (individual technologies as well as system solutions) for a later implementation within a linked demonstrator were selected and a specific development for the respective demonstrator case was realised.

In parallel, relevant user groups and strategic stakeholders were identified. For the stakeholder analysis a three-step approach was performed aiming in a detailed stakeholder matrix. In order to inform end customers (e.g. private households, trade and industry, etc.) transparently and comprehensively about the innovative solutions within the DH system and ultimately to win new customers, suitable tools and concepts for user integration were established.

4. SUMMARY AND OUTLOOK

It is obvious that flexibility is one of the main influencing parameters for a sustainable and renewable driven district heating (DH) sector as well as to enable the transformation towards a 100 % renewable energy supply. A major requirement for current and future DH systems is to provide an affordable, secure and (resilient) energy supply while being technically, economically and ecologically sustainable. To fulfil this demand a high degree of flexibility in future DH systems is necessary. Within the research project ThermaFLEX (Thermal demand and supply as flexible elements of future sustainable energy systems) an effective implementation of highly flexible, sustainable and renewable driven DH systems will be realised using different so-called demonstrators.

Due to a lack of information as well as missing definitions dealing with this topic in the DH sector a common definition of flexibility was developed. Besides of this, suitable flexibility indicators, so called key performance indicators (KPIs) for flexibility and evaluation criteria were identified as a first step. Furthermore, a comprehensive overview of flexibility solutions on component (individual technologies) and system level (system solutions) for increased flexibility and decarbonisation of DH systems were compiled. After evaluation of their suitability in the context of so-called demonstrators, specific flexibility solutions for the implementation in the real environment of the respective DH system of the demonstrators (different sizes of DH networks in Austria) were developed.

After the support of implementation and operation a detailed monitoring for evaluation and analysis of the flexibility potentials of the different measures is planned. Results and experiences gained from the demonstrator will derive in best practices, highlight promising concepts and pathways and show quantitatively technical, economic and ecological benefits and impacts of the demonstrators.

ACKNOWLEDGEMENT

The research project ThermaFLEX (FFG No.: 868852) is funded by the Austrian Climate and Energy Fund in the framework of the research initiative “Green Energy Lab” as part of the Austrian innovation campaign “ Vorzeigeregion Energie”.

REFERENCE

BMWFW (2017), Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten; Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft; Wien, Österreich

Clauß J., Finck C., Voglerfinck P., Beagon P. (2017) Control strategies for building energy systems to unlock demand side flexibility – A review Norwegian University of Science and Technology , Trondheim , Norway Eindhoven University of Technology , Eindhoven , Netherlands Neogrid Technologies ApS / Aalborg,” 15th Int. Conf. Int. Build. Perform., pp. 611–620.

Connolly D., Lund H., Mathiesen B.V., Werner S., Möller B., Persson U., Boermans T., Trier D., Østergaard P.A., Nielsen S., (2014), Heat Roadmap Europe: Combining DH with heat savings to decarbonise the EU energy system. In: Energy Policy, Volume 65, Pages 475–489

Fleiter T., Steinbach J., Ragwitz M. (2016), Mapping and analyses for the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel development (fossil/renewables) – Executive Summary. Brussels: European Commission, DG Energy, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI)

Sneum D.M., Blumberga D., Katz J., Olsen O.J. (2017) Framework conditions for flexibility in the individual heating-electricity interface,” [Online]. Available: http://www.nordicenergy.org/publications/framework-conditions-forflexibility-in-the-individual-heating-electricity-interface/ .

Lund P. D., Lindgren J., Mikkola J., Salpakari J. (2015) Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 45, pp. 785–807, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.057.

Paiho S., Saastamoinen H., Mäki E., Similä L., Pasonen R., Ikäheimo J., Rämä M., Tuovinen M., Horsmanheimo S., (2018) Increasing flexibility of Finnish energy systems—A review of potential technologies and means, Sustain. Cities Soc., vol. 43, no. February, pp. 509–523, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.09.015.

Spiller M., Vreeburg J. H. G., Leusbrock I., Zeeman G. (2015) Flexible design in water and wastewater engineering - Definitions, literature and decision guide," J. Environ. Manage., vol. 149, pp. 271–281, doi: 10.1016/j.jenvman.2014.09.031.

Vandermeulen A. B., van der Heijde B., Helsen L., (2018) Controlling district heating and cooling networks to unlock flexibility: A review," Energy, vol. 151, pp. 103–115, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.034.

Contact:
Joachim Kelz
Feldgasse 19
8200 Gleisdorf
Email: j.kelz@aee.at
https://www.aee-intec.at/
https://thermaflex.greenenergylab.at/

Session 7a

Wärme-, Kälte- und Anergienetze

Reduzierte Temperaturen in Wärmenetzen: Bewertung der energie-ökonomischen Effekte

Geyer / AIT Austrian Institute of Technology GmbH / AT
Krail / FH Burgenland / AT

Reduzierte Temperaturen in Wärmenetzen: Bewertung der energie-ökonomischen Effekte

R. Geyer
AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Vienna, Austria
J. Krail
Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT: District heating (DH) is predestined for a decarbonized heat supply and can thus contribute to achieve climate and energy goals. Particularly in urban areas, DH offers potential for saving resources. Despite the constant expansion, the economic efficiency of DH in some cases has been significantly reduced in recent years.

For efficiency, economy and integration of alternative heat sources in DH, low system temperatures are a key. Reduced supply and return temperatures are expected to increase both capacity and efficiency and subsequently have positive economic effects. However, existing DH networks (DHN) are dominated by high temperature systems and the advantages of low temperature systems are not or insufficiently known. This contribution provides an approach to fill this gap.

The innovative approach of the thesis is to develop key figures for different technologies using energy-economic assessments to show effects and advantages of reduced system temperatures in an evidence-based way. The proven advantages should increase the motivation and conviction in low-temperature systems, both for suppliers and customers.

A total of 14 technologies are investigated. The selection of the technologies is structured in such a way that a broad spectrum is available for further analyses and utilizations. For each technology a reference case and an assessment case with reduced system temperatures are calculated. The resulting changes in capacity and/or efficiency are analyzed and the levelized cost of energy (LCOE) determined for both variants. The difference between higher LCOE in the reference case and lower LCOE in the assessment case is called opportunity costs.

In the energy-economic assessments carried out, the opportunity costs from the reference case and assessment case are placed in relation to the temperature reduction. This results in the opportunity energy generation costs, which in this thesis are referred to as $LCOE_{Opportunity}$ in €/(MWh·°C). The quantitative assessment of the benefits of lost alternatives is shown for each technology investigated. This approach helps to evaluate both single plants as well as entire systems and to show achievable potentials and monetary savings. The technology based key figures are the main results of this contribution.

1. EINLEITUNG

Um klimapolitische Ziele erreichen und eine sichere Energieversorgung auch in Zukunft gewährleisten zu können, werden intelligente Technologien und neue Lösungen für energieeffiziente und klimaverträgliche Lebens- und Arbeitsweisen benötigt. Potenziale zur Schonung von Ressourcen, insbesondere im urbanen Raum, bieten Fernwärmesysteme (Mathiesen et al. 2018). Fernwärme zählt als saubere, komfortable und umweltfreundliche Form der Energiebereitstellung für Heizung und Warmwasser. Ein weiterer Ausbau ist daher aus klima- und energiepolitischer Sicht sinnvoll, insbesondere in Hinblick auf Primärenergie-Einsparung. (Schmidt et al. 2015, Gössl et al. 2014).

1.1 AUSGANGSLAGE UND ROLLE VON FERNWÄRME

Laut Schätzungen existierten 2013 weltweit ca. 80.000 Fernwärmesysteme, davon ca. 6.000 in Europa (Werner 2017). Auch in Österreich sind Fern- bzw. Nahwärmenetze ein wichtiger Bestandteil des Energiesystems. Schätzungsweise bestehen derzeit etwa 2.400 Wärmenetze in Österreich (Schmidt et al. 2018).

Die Fernwärmeerzeugung belief sich 2018 auf 23,1 TWh und der Endenergieverbrauch auf 19,7 TWh. Die Transportverluste berechnen sich zu 3,4 TWh bzw. zu knapp 15 %. Thermische Energie wird in den statistisch erfassten Nutzenergiekategorien „Raumheizung, Klimaanlagen, Warmwasser" mit 82,4 TWh, „Dampferzeugung" mit 27,7 TWh und „Industrieöfen" mit 46,8 TWh nachgefragt. Fernwärme deckt mit 16,5 TWh 20 % des Bedarfs der Kategorie „Raumheizung, Klimaanlagen, Warmwasser". Bei der „Dampferzeugung" liegt der Anteil mit 0,8 TWh bei 3 % und bei Industrieöfen mit 2,4 TWh bei 5 %. Der Erneuerbaren Anteil an der Fernwärme liegt bei 48,4 % gemäß EU-Richtlinie. An der Erzeugung hatten KWK-Anlagen mit 13,7 TWh einen Anteil von 60 %. Davon stammen 6,1 TWh bzw. 44 % aus erneuerbaren Energieträgern. (STATISTIK AUSTRIA 2020)

In Österreich wird mehr als ein Viertel aller Wohnungen durch Fernwärme versorgt, mit steigender Tendenz (FGW 2020). Dennoch stehen viele Betreiber vor ungewissen Zukunftsperspektiven und wirtschaftlichen Schwierigkeiten. Ursache sind unsichere Entwicklungen der Energiepreise, sinkende Wärmenachfragedichten aufgrund von Sanierungsmaßnahmen bzw. hoher Neubaustandards und ansteigende Konkurrenz durch dezentrale individuelle Wärmeversorgungslösungen, v.a. Luftwärmepumpen (vgl. Biermayr et al. 2020).

1.2 NIEDRIGE TEMPERATUREN: WEG ZUR DEKARBONISERUNG

Zur Dekarbonisierung gilt es verstärkt alternative Wärmequellen in Wärmenetze einzubinden. Hierfür kommen insbesondere erneuerbare Energien wie Solarthermie, Geothermie sowie Umgebungs- und Abwärme aus Gewerbe- und Industriebetrieben in Frage (siehe auch #mission2030 (BMNT & BMVIT 2018)).

Dabei gelten niedrige Vor- und Rücklauftemperaturen als wichtigste "enabler" für die Integration alternativer Wärmequellen, deren Potenziale erst bei geringen Temperaturniveaus entfaltet werden können (Schmidt et al. 2015, Totschnig et al. 2018).Weitere Vorteile reduzierter Temperaturen sind Kapazitäts- und Wirkungsgradsteigerungen sowie geringere Wärmeverteilverluste und Pumpstromkosten. Ebenso können bei Neubau und Sanierung kostengünstigere Rohrleitungssysteme gewählt werden.

Da Systemtemperaturen eine zentrale Rolle bei der Effizienz von Erzeugung und Verteilung in Wärmenetzen spielen, werden auch wirtschaftliche Potenziale erwartet. Daher widmet sich diese Arbeit mit der systematischen Erforschung und Bewertung von Effekten reduzierter Vor- und Rücklauftemperaturen in Wärmenetzen.

2. METHODIK

Ziel der Arbeit ist eine systematische, wissenschaftlich fundierte Untersuchung von Effekten reduzierter Systemtemperaturen in Wärmenetzen. Durch das Bewerten und Aufzeigen von Vorteilen soll so die Motivation und Überzeugung in Niedertemperatur Versorgungssysteme gesteigert werden. Daher stehen folgende Fragestellungen im Zentrum dieser Arbeit:

1. Welche energietechnischen Effekte haben reduzierte Systemtemperaturen in Wärmenetzen auf ausgewählte Technologien?
2. Welche ökonomischen Vorteile ergeben sich durch reduzierte Systemtemperaturen?
3. Lassen sich die Ergebnisse in Form einer Kennzahl darstellen und verallgemeinern?

2.1 INNOVATIONSGEHALT

Der innovative Ansatz der Arbeit liegt darin, dass mithilfe von energie-ökonomischen Bewertungen Kennzahlen entwickelt wurden, mit der Effekte von reduzierten Systemtemperaturen in das Zentrum der Untersuchungen gesetzt werden können. Der verfolgte Ansatz hilft dabei, einzelne Anlagen bzw. ganze Systeme bewerten zu können sowie erzielbare Potenziale und monetäre Einsparungseffekte aufzuzeigen. Das verfolgte Konzept ist in Abb. 1 skizziert.

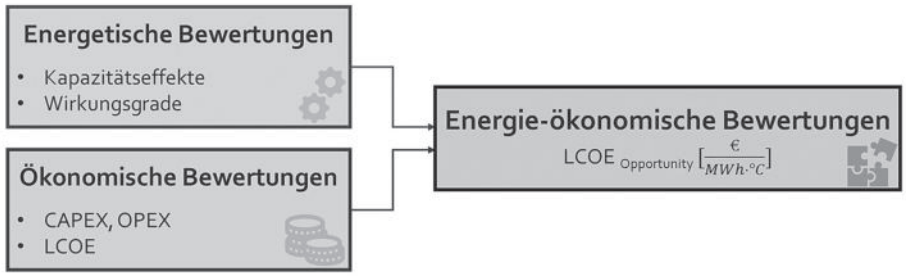


Abb. 1: Verfolgter Ansatz zur Entwicklung der technologiespezifischen Kennzahl LCOE Opportunity zur energie-ökonomischen Bewertung der Effekte reduzierter Systemtemperaturen in Wärmenetzen

2.2 UNTERSUCHUNGSRAHMEN UND METHODENDARSTELLUNG

Für jede Technologie wurden zu Beginn energietechnische Bewertungen durchgeführt. Dabei wurde untersucht, welche Kapazitäts- bzw. Wirkungsgradänderungen sich durch reduzierte Vor- bzw. Rücklauftemperaturen ergeben. Des Weiteren wurden für die einzelnen Technologien Kostendaten recherchiert und wirtschaftliche Bewertungen anhand des Konzepts der Energiegestehungskosten (LCOE) durchgeführt. Dies wurde jeweils für einen Referenzfall (kann als Status quo bezeichnet werden) und für einen Bewertungsfall mit reduzierten Temperaturen durchgeführt. Durch die Kapazitäts- bzw. Wirkungsgradsteigerungen sinken im Bewertungsfall die Energiegestehungskosten. Die Differenz zwischen höheren Energiegestehungskosten im Referenzfall und niedrigeren Energiegestehungskosten im Bewertungsfall wird als Opportunitätskosten bezeichnet.

Opportunitätskosten stellen entgangene Erträge oder Nutzen im Vergleich zu einer nicht realisierten Handlungsalternative dar. Die nicht realisierte Handlungsalternative entspricht dem Bewertungsfall bei reduzierten Temperaturen. Das bedeutet durch den Verzicht auf die Möglichkeit Temperaturen im System zu reduzieren, ergeben sich im Referenzfall Kosten durch entgangene Gewinne infolge geringerer Kapazitäten bzw. Wirkungsgrade.

In den durchgeführten energie-ökonomischen Bewertungen werden die Opportunitätskosten aus Referenzfall und Bewertungsfall in Relation zur Temperaturreduktion gestellt. Daraus ergeben sich die Opportunitäts-Energiegestehungskosten welche in dieser Arbeit als $LCOE_{Opportunity}$ in €/(MWh·°C) definiert wurde. Die quantitative Bewertung des Nutzens entgangener Alternativen wird für jede untersuchte Technologie ausgewiesen. Dadurch, dass es sich um spezifische Kennzahlen handelt, können diese für verschiedene Betrachtungslevels (Technologien) und Skalierungen (kleine bis große Systeme) herangezogen werden. Dies gilt als Schlüsselergebnis der Arbeit.

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der energie-ökonomischen Bewertungen sind anhand von zwei Kennzahlen in Tab. 1 zusammengefasst. Diese Technologie abhängigen Kennzahlen stellen die zentralen Resultate dieser Arbeit dar. Die Kennzahl $LCOE_{Opportunity}$ beschreibt die Opportunitätskosten der Energiegestehungskosten in €/(MWh·°C). Mit der Kennzahl wird ausgedrückt, wie sich die Energiegestehungskosten durch Reduktion der Temperaturniveaus verringern lassen. Je höher der Wert, desto höher ist die Abhängigkeit von der Temperatur und der somit erzielbare monetäre Effekt. Die Steigerung der Kapazität beschreibt, den Gradienten zur Kapazitätssteigerung in %/°C bei reduzierten Temperaturen bzw. erhöhten Temperaturspreizungen.

Die Struktur in Tab. 1 ist aufgebaut nach Erzeugungstechnologien gefolgt von Wärmenetz und Speichertechnologien. Die Erzeugungstechnologien sind nach $LCOE_{Opportunity}$, bis auf Solarthermie, absteigend sortiert. Die höchsten Opportunitätskosten $LCOE_{Opportunity}$ mit 0,67 €/(MWh·°C) weisen der Flachkollektor mit Einfachverglasung und Geothermie (reine Heizzwecke) auf. Die beiden anderen Kollektortypen haben eine geringere Temperaturabhängigkeit wodurch auch $LCOE_{Opportunity}$ geringere Werte aufweist.

Eine hohe Temperaturabhängigkeit weist auch die Technologie Wärmepumpe mit $LCOE_{Opportunity}$ von 0,60 €/(MWh·°C) auf. Die Effekte beziehen sich hier auf höhere erzielbare COPs und damit reduzierte Stromaufnahme (≙ Antriebsenergie). Mit $LCOE_{Opportunity}$ von 0,58 €/(MWh·°C) besitzt Abwärme eine ähnliche Größenordnung wie Wärmepumpen. Bei der KWK-Technologie beziehen sich die Vorteile ebenso auf den Strom. Durch reduzierte Vorlauftemperaturen sind geringere Abdampfdrücke in den Turbinenkondensatoren möglich, wodurch die Stromausbeute gesteigert wird. Zu erkennen ist, dass eine Veränderung der Vorlauftemperatur auf die Entnahme-Kondensationsturbine weniger Einfluss im Vergleich zur Gegendruckturbine hat. Dies ist auf den höheren Freiheitsgrad der Entnahme-Kondensationsturbine zurückzuführen.

Damit Rauchgaskondensation möglich ist, sind vor allem niedrige Rücklauftemperaturen entscheidend. Obwohl sich durch Rauchgaskondensation bei Biomasseanlagen hohe Leistungs- und Wirkungsgradsteigerungen erzielen lassen, fallen bei dieser Technologie die $LCOE_{Opportunity}$ mit 0,036 €/(MWh·°C) im Vergleich am geringsten aus. Dies ist dem geschuldet, dass die Einspareffekte in Relation zu einer hohen Temperaturspreizung von 150 °C gestellt werden. Die berechnete Wirkungsgradsteigerung von 27,7 Prozentpunkten zeigt auf, welches Potenzial zur besseren Ressourcen Ausnutzung diese Technologie hat.

Bei reduzierten Rücklauftemperaturen und gleichbleibenden Vorlauftemperaturen erhöhen sich die Übertragungskapazitäten in Wärmenetzen. Durch die gesteigerte Übertragungskapazität berechnet sich $LCOE_{Opportunity}$ zu 0,62 €/(MWh·°C). Alternativ dazu könnte die Kapazität beibehalten und stattdessen der Massenstrom gesenkt werden. In diesem Fall ergeben sich $LCOE_{Opportunity}$ von 0,15 €/(MWh·°C). Hier liegen die Vorteile, in Bezug auf die Opportunitätskosten $LCOE_{Opportunity}$, klar bei der Steigerung der Kapazität im Vergleich zur Alternative mit gesenktem Massenstrom. Bedingung hierbei ist, dass entsprechender Wärmebedarf gegeben ist.

Die Bewertung der Wärmespeicher bezieht sich auf saisonale Speicherung mit einer Zyklen Anzahl von eins pro Jahr. Durch geringe Zyklenzahlen ergeben sich auch hohe Opportunitätskosten von 5,44 €/(MWh·°C). Unter der Annahme, dass der Behälter Speicher (TTES) als herkömmlicher (Puffer-)Speicher mit einer Zyklen Anzahl von 100 pro Jahr betrieben wird, so wirken sich diese proportional auf die Opportunitätskosten aus, wodurch $LCOE_{Opportunity}$ zu 0,0544 €/(MWh·°C) resultiert. Dies unterstreicht die Bedeutung hoher Zyklen Anzahl bei Speichern zur Kostendegression.

Tab. 1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der energie-ökonomischen Bewertung der untersuchten Technologien für $LCOE_{Opportunity}$ (€/(MWh·°C)) und potenzielle Steigerung der Kapazität (%/°C)

Technologie	$LCOE_{Opportunity}$ €/(MWh·°C)	Steigerung Kapazität %/°C
Flachkollektor Einfachverglasung	0,67	2,0
Flachkollektor Doppelverglasung	0,54	1,6
Vakuumröhrenkollektor mit Spiegelflächen	0,23	0,4
Geothermie	0,67	2,5
Wärmepumpe[1]	0,60	2,3
Abwärme	0,58	2,5
KWK-Gegendruckturbine[2]	0,40	0,6
KWK-Entnahme-Kondensationsturbine[2]	0,15	0,3
Rauchgaskondensation (Biomasseanlage)	0,036	0,22
Wärmenetz[3]	0,62	2,9
Behälter Speicher (TTES)[4]	5,44	2,5
Erdbecken Speicher (PTES)[5]	2,33	2,5
Erdsonden Speicher (BTES)[5]	2,25	2,5
Aquifer Speicher (ATES)[5]	2,96	5,0

1 bezogen auf die reduzierte Antriebsleistung (≙ geringere Stromaufnahme)
2 bezogen auf die gesteigerte Stromerzeugung (P_{el})
3 bezogen auf gesteigerte Übertragungskapazität. Würde die Übertragungskapazität als konstant angenommen und der Massenstrom reduziert werden, so würde LCOE Opportunity 0,15 €/(MWh·°C) betragen.
4 bezogen auf saisonale Speicherung mit einem Zyklus pro Jahr (eine volle Be- und Entladung). Angenommen es handelt sich um einen Speicher mit 100 Zyklen pro Jahr, so würde LCOE Opportunity zu 0,0544 €/(MWh·°C) resultieren.
5 bezogen auf saisonale Speicherung mit einem Zyklus pro Jahr.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Niedrige Systemtemperaturen gelten als wesentliche Voraussetzung für eine massive Integration von alternativen Energiequellen in Wärmenetzen und somit zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung. Allerdings werden bestehende Versorgungsnetze durch Hochtemperatursysteme dominiert bzw. sind die Vorteile von Niedertemperatursystemen nicht oder unzureichend bekannt. Diese Arbeit liefert einen Beitrag um diese Lücke zu füllen.

Der innovative Ansatz der Arbeit liegt darin, dass mithilfe von energie-ökonomischen Bewertungen Kennzahlen entwickelt wurden, mit denen Effekte von reduzierten Systemtemperaturen auf Technologie-Ebene bewertet werden können. Der verfolgte Ansatz hilft dabei, einzelne Anlagen bzw. ganze Systeme bewerten zu können sowie erzielbare Potenziale und monetäre Einsparungseffekte evidenzbasiert aufzuzeigen.

Insgesamt wurden Untersuchungen zu neun Erzeugungstechnologien, zum Wärmenetz selbst sowie vier Speichertypen durchgeführt. Die Auswahl der Technologien wurde so erstellt, dass ein breites Spektrum für weiterführende Untersuchungen und Verwertungen zur Verfügung steht. Daher wurden zum einen bestehende und weit verbreitete Erzeugungstechnologien wie KWK-Anlagen aber auch neue und vielversprechende wie Wärmepumpen untersucht.

Bei den möglichen aufkommenden Erzeugungsformen Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpe und Abwärme ist eine hohe Sensitivität der Opportunitäts-Energiegestehungskosten ($LCOE_{Opportunity}$) in Abhängigkeit der Temperaturniveaus festzustellen. Zukünftige Wärmenetze werden durch diversifizierte, alternative Wärmequellen dominiert sein. Dabei werden die Systemtemperaturen einen deutlich höheren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben im Vergleich zum bestehenden Erzeugungsmix, der durch KWK-Anlagen und Heizkessel dominiert ist. Daher müssen jetzt schon Maßnahmen zur Senkung der Systemtemperaturen ergriffen werden um Wärmenetze erfolgreich transformieren zu können.

LITERATUR

Biermayr P., Dißauer C., Eberl M., Enigl M., Fechner H., Fürnsinn B., . . . Wopienka E. (2020). Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2019: Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).

BMNT & BMVIT. (2018). #mission2030 - Die österreichische Klima- und Energiestrategie. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus & Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

FGW (2020). Gas und Fernwärme in Österreich - Zahlenspiegel 2020. Wien: FGW – Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmungen.

Gössl M., Krutzler T., Schieder W., Schindler I., Storch A., Wiesenberger H., . . . Tichler, R. (2014). Beitrag von Fernwärme, -kälte und Erdgas zu energie- und umweltpolitischen Zielen. Wien: Umweltbundesamt GmbH im Auftrag des Fachverbands der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmungen (FGW).

Mathiesen B., Petersen M., Nielsen K., Madsen O., Moos T., Senger J., . . . Jørgensen, J. (2018). Fernwärme und -kälte: Energieeffizienz für städtische Gegenden (Weißbuch). Copenhagen: State of Green.

Schmidt R.-R., Basciotti D., Geyer R., Leoni P., Robbi S., Litzellachner A., . . . Moser M. (2018). heat_

portfolio. Technische Grundlagen zur signifikanten Integration dezentral vorliegender alternativer Wärmequellen in Wärmenetze. Wien: AIT Austrian Institute of Technology GmbH. Von https://www.energieforschung.at/projekte/296/technische-grundlagen-zur-signifikanten-integration-dezentral-vorliegender-alternativer-waermequellen-in-waermenetze abgerufen

Schmidt R.-R., Tichler R., Amann C., Schindler I. (2015). F&E-Fahrplan Fernwärme und Fernkälte: Innovationen aus Österreich. Wien: Klima- und Energiefonds.

STATISTIK AUSTRIA (29. 05 2020). Energiebilanzen - Gesamtenergiebilanz Österreich 1970 bis 2018 (Detailinformation). Abgerufen am 29. Mai 2020 von https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html

Totschnig G., Büchele R., Fritz S., Kranzl L., Nagler J., Ponweiser K., . . . Müller A. (2018). P2H-Pot: Potentiale, Wirtschaftlichkeit und Systemlösungen für Power-to-Heat. Wien: TU-Wien (Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe).

Werner S. (2017). International review of district heating and cooling. In Energy 137 (2017) (S. 617-631). https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045: ELSEVIER.

Kontaktdaten:
Roman Geyer
Giefinggasse 6
1210 Vienna
Email: roman.geyer@ait.ac.at

Session 8a

Smart Control and Electronic Conversion Technologies

Einsatz von Energiespeichersystemen in Österreich im Jahr 2030

Leonhartsberger / Fachhochschule Technikum Wien / AT
Wychera / Energy Changes Projektentwicklung GmbH / AT
Buschmann, Skudelny / Klima- und Energiefonds / AT

Betrachtung der sommerlichen Überwärmung eines Bürogebäudes mittels dynamischer Gebäudesimulation unter Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien

Leindecker / FH OÖ Studienbetriebs GmbH / AT
Kugfarth / FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH / AT

Electrofuels – Synergie zur Reduktion des Saisonspeicherbedarfs

Wind / Wind – Ingenieurbüro für Physik / AT
Eder / Strateco OG / AT
Bußwald / akaryon GmbH / AT

Einsatz von Energiespeichersystemen in Österreich im Jahr 2030

K. Leonhartsberger
Fachhochschule Technikum Wien, Wien, Österreich
R. Wychera
Energy Changes Projektentwicklung GmbH, Tulln, Österreich
H. Buschmann, I. Skudelny
Klima- und Energiefonds, Wien, Österreich

ABSTRACT: In the course of the energy transition, storage technologies in the fields of electricity, heat, gas and transport are more and more coming to the fore of public discussions. In order to document the status quo of different storage technologies and applications, to identify the possibilities of their integration into the energy system and to provide potential market participants with profound information, the Climate and Energy Fund launched the "Storage Initiative" (Speicherinitiative) in 2015. Together with about 150 experts, almost 100 concrete recommendations for research and implementation activities were developed and summarized in the "Final Report of the Storage Initiative - Initial Phase" (Klima- und Energiefonds 2016). Based on these recommendations for action, the second phase of the Storage Initiative was launched in autumn 2019 with the aim of developing a common vision for the use of energy storage systems in Austria for the year 2030 in a co-creative process, based on the recommendations already identified and taking into account current/changed developments (Klima- und Energiefonds 2020). This results in the following scientific question: How will storage systems be used in 2030 and which requirements will storage systems have to meet in 2030?

To answer these questions, a process was developed that primarily relies on qualitative methods such as discussions, Round Tables and Focus Labs, but also includes quantitative survey methods. The aim of the first Round Table discussion was to assess the relevance and currency of the recommendations for action developed in phase 1. The subsequent online consultation served to validate and deepen these findings and provide empirical evidence on this. Based on these results, a vision for the use of energy storage systems in Austria for the year 2030 was developed with national experts in Focus Lab 1 and subsequently evaluated in an international advisory group and in close cooperation with representatives of the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology.

The first results show that energy storage systems will be used differently by various user groups in the future: While in the user group of households the shared use of (central) electricity storage units in energy communities will increase strongly, heat storage units will continue to be used privately in households. However, in the future, these heat storage units will also have to be operated in a grid- and system-aiding manner, thus contributing to the overall energy system. In energy intensive industry electricity storage systems for load peak reduction and schedule optimization are becoming increasingly important. These storages can also be used for emergency power supply or to improve security of supply and power quality. In the future, more and more energy suppliers and network operators will recognize energy storage as a serious alternative to conventional measures of energy and congestion management and will rely on their own large-scale and also on existing private or commercial stationary and mobile small-scale storage facilities. With an increasing share of renewable energy sources in the overall energy mix, the importance of seasonal electricity and heat storage facilities is also growing. Regardless of the user group, the boundaries between the individual energy sources are increasingly blurring. Cross-national standards enable both cross-manufacturer and cross-sector interaction.

1. EINLEITUNG

Mit der Energiewende rücken Speichertechnologien im Bereich Strom, Wärme, Gas und Verkehr zunehmend ins Zentrum der öffentlichen Diskussion. Um den Status quo unterschiedlicher Speichertechnologien und -anwendungen zu dokumentieren, die Möglichkeiten einer nachhaltigen Integration ins Energiesystem zu identifizieren sowie potenziellen Marktteilnehmer*innen fundierte Informationen darüber bereitzustellen, startete der Klima- und Energiefonds 2015 die Speicherinitiative. Gemeinsam mit etwa 150 Expert*innen wurden knapp 100 konkrete Handlungsempfehlungen für Forschungs- und Umsetzungsaktivitäten erarbeitet und im „Abschlussbericht der Speicherinitiative Startphase" zusammengefasst (Klima- und Energiefonds 2016).

Basierend auf diesen Handlungsempfehlungen wurde im Herbst 2019 die 2. Phase der Speicherinitiative gestartet, mit dem Ziel basierend auf den bereits identifizierten Handlungsempfehlungen in einem co-kreativen Prozess und unter Berücksichtigung aktueller/geänderter Entwicklungen, ein gemeinsames Zielbild für den Einsatz von Energiespeichersystemen in Österreich für das Jahr 2030 zu entwickeln (Klima- und Energiefonds 2020). Darüber hinaus sollen sowohl zentrale Herausforderungen und entsprechende Lösungsansätze, als auch erforderliche Aktionen, Forschungsaktivitäten und Initiativen identifiziert werden, um die gesteckten Ziele 2030 zu erreichen. Daraus resultiert die folgende wissenschaftliche Fragestellung: Wie werden Speicher 2030 eingesetzt bzw. welche Anforderungen werden 2030 an Speichersysteme gestellt und welche Kriterien müssen diese Speicheranwendungen bzw. -technologien erfüllen?

2. METHODE

Um diese Fragen zu beantworten, wurde ein Prozess erarbeitet, der primär auf qualitative Methoden wie Round Tables und Focus Labs setzt, jedoch auch quantitative Erhebungsmethoden vorsieht. Der vollständige Prozess ist in Abb. 1 dargestellt.

Ziel des ersten Round-Table war dabei die Sichtung der Relevanz und Aktualität der in Phase 1 entwickelten Handlungsempfehlungen für die Speicherinitiative. Die anschließend durchgeführte Onlinekonsultation diente dazu diese Erkenntnisse zu validieren bzw. zu vertiefen und diese mit empirischen Erkenntnissen abzusichern. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde im Zuge eines ersten Focus Labs mit nationalen Expert*innen ein Zielbild für den Einsatz von Energiespeichersystemen in Österreich für das Jahr 2030 (siehe Abb. 2) entwickelt und in der Folge im Rahmen einer internationalen Resonanzgruppe und in enger Abstimmung mit Vertreter*innen des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) evaluiert.

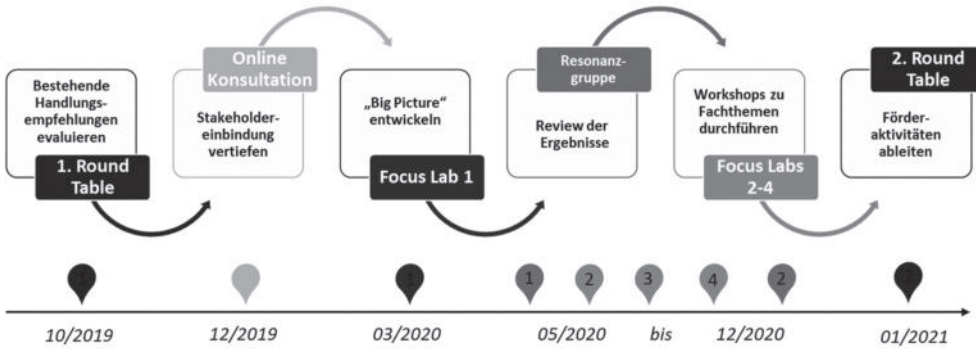


Abb. 1: Prozessablauf der 2. Phase der Speicherinitiative des Klima- und Energiefonds

Im Rahmen der weiteren Focus Labs werden mit nationalen Expert*innen die identifizierten Zielbilder auf deren Machbarkeit geprüft, mit dem Ziel mögliche Herausforderungen und Barrieren bei der Umsetzung

zu identifizieren und dafür Lösungsvorschläge zu erarbeiten. Um die gesteckten Ziele 2030 zu erreichen, werden darauf aufbauend abschließend die erforderlichen Maßnahmen und Forschungsaktivitäten identifiziert.

3. ERGEBNISSE

Wie in Abb. 2 ersichtlich, wurden die Zielbilder für den Einsatz von Energiespeichersystemen in Österreich für das Jahr 2030 in vier Bereiche bzw. Anwendergruppen unterteilt. Diese sind:

- Privatpersonen und Haushalte
- Unternehmen der Energiewirtschaft
- Industrie und Gewerbe
- neue Player

3.1 SPEICHER IN HAUSHALTEN

Gemeinschaftliche Nutzung von (zentralen) Stromspeicher in Energiegemeinschaften: Erneuerbare Energiegemeinschaften werden den Einsatz von Stromspeichersystemen verändern. Werden Stromspeicher heutzutage - trotz oftmals fehlender Wirtschaftlichkeit - primär dezentral in einzelnen Haushalten zur Erhöhung des eigenen Direktnutzungsanteils der Photovoltaik (PV) eingesetzt, wird es zukünftig vermehrt zentrale Gemeinschaftsspeicher geben, die gemeinschaftlich bewirtschaftet werden (Leonhartsberger et al. 2019). Diese werden entweder von den Beteiligten selbst finanziert oder von externen Betreiber*innen (z. B. von Netzbetreibern, Energieversorgern, …). Erfolgt die Finanzierung extern, kann der Energiegemeinschaft im Rahmen der Bewirtschaftungsstrategie des*der Betreiber*in ein Nutzungsrecht eingeräumt werden.

Gemeinschaftsspeicher werden eine Vielzahl an Aufgaben übernehmen, darunter auch netz- und systemdienliche Dienstleistungen. Bisherige Bewirtschaftungsformen wie z. B. die Erhöhung des eigenen PV Direktnutzungsanteils werden auch zukünftig einen Schwerpunkt darstellen, je nach Partizipationsmodell der Energiegemeinschaft jedoch primär im Sinne der Gemeinschaft. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Versorgung der Energiegemeinschaft im Falle einer überregionalen Störung (Black-Out-Fähigkeit) dar.

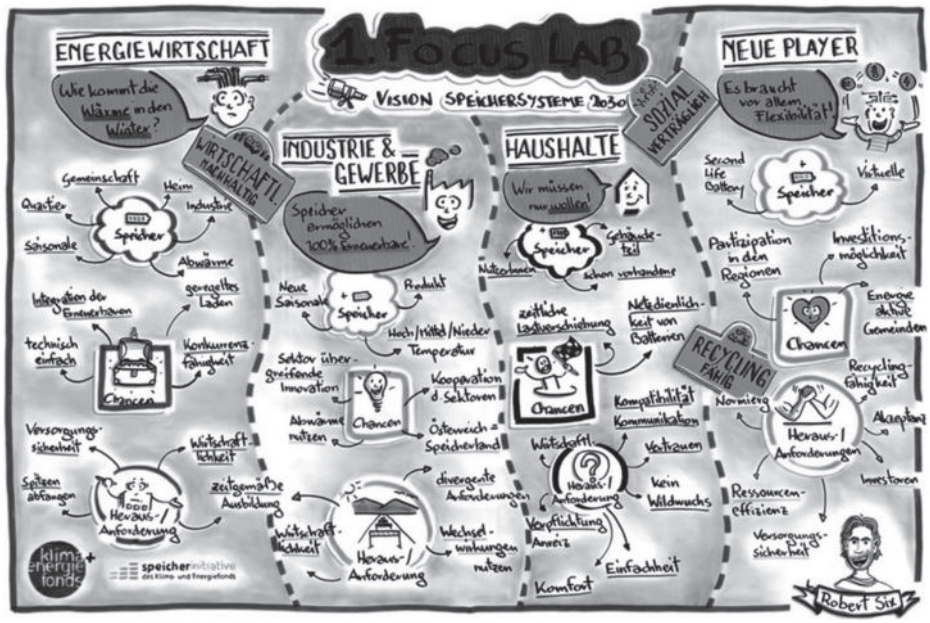


Abb. 2: Zielbild für den Einsatz von Energiespeichersystemen in Österreich für das Jahr 2030

Neben den fehlenden rechtlichen/regulatorischen Rahmenbedingungen stellt vor allem die Berücksichtigung gesellschaftlicher Themen ein wesentliches Erfolgskriterium dar. Es gilt Komplexität zu vermeiden. Bedien- und Nutzungskomfort müssen auf dem gewohnt hohen Level bleiben. Transparenz ist als vertrauensbildende Maßnahme unabdingbar. Auch der Fairnessgedanke bei Nutzung und Abrechnung (Angst vor Trittbrettfahrern; Sorge, dass jemand anders mehr profitiert, …) sowie die fehlende bzw. gefühlt fehlende Selbstbestimmung des/der Einzelnen sind unbedingt zu berücksichtigen (Hoffmann et al. 2018).

Netz- und systemdienliche Nutzung privater Strom- und Wärmespeicher: Private Strom- und Wärmespeicher werden zukünftig netz- und systemdienlich betrieben, ohne jedoch den Komfort bzw. die Wirtschaftlichkeit für den*die Besitzer*in zu reduzieren. Dazu wird die Strom- und Wärmeversorgung von Haushalten zukünftig koordiniert erfolgen (Sektorkopplung). Das bedeutet, dass elektrische Wärmeerzeuger nicht mehr nur auf den Wärmebedarf reagieren, sondern auch andere Parameter (z. B. lokale Energieerzeugung, Netzbelastung, Strompreis,…) berücksichtigen. Dies kann direkt oder indirekt (z. B. über Preissignale) erfolgen.

Speicher werden dabei dazu genutzt um Erzeugung und Last zu entkoppeln und damit – vor allem im Wärme-/Kältebereich - die spürbaren Auswirkungen auf die im Haushalt lebenden Personen (z. B. Veränderung der Raumtemperatur, Verfügbarkeit von Warmwasser, …) zu reduzieren. Neben klassischen Warmwasserspeichern bzw. Pufferspeichern z. B. in Kombination mit Wärmepumpen gewinnt dabei auch die Bauteilaktivierung immer mehr an Bedeutung. (Friembichler et al. 2016)

3.2 SPEICHER IN DER ENERGIEWIRTSCHAFT

Lokale Stromspeicher als netz- und systemdienliche Betriebsmittel für Netzbetreiber: Speziell in Anbetracht der zunehmenden Elektrifizierung von Gebäudeheizsystemen (Wärmepumpe) und des Individualverkehrs (Elektromobilität) (Statistik Austria 2019) sowie der immer größeren Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen besteht seitens der Netzbetreiber zunehmend Bedarf an lokalen Flexibilitätsoptionen (Fürstenwerth und Waldmann 2014). Stromspeicher – sowohl stationär als auch mobil - werden zukünftig Teil der lokalen Netzinfrastruktur sein und vor Ort (z. B. direkt bei einer Trafostation) zur Netzstabilisierung durch den Netzbetreiber genutzt. Dabei wird vor allem die Reduktion von Lastspitzen und damit die Vermeidung zusätzlicher Netzkapazitäten (Netzausbau) eine Rolle spielen.

Erfolgt die Finanzierung über das Netzbereitstellungsentgelt können diese Speicher auch von den Teilnehmer*innen (Haushalten, Betrieben, …) im jeweiligen Netzabschnitt genutzt werden z. B. zur Zwischenspeicherung von PV-Überschuss. Entsprechende Nutzungsvereinbarung zwischen dem Netzbetreiber und den Teilnehmer*innen regeln dabei die exakte Nutzung/Aufteilung des Speichers bzw. evtl. anfallende Kosten dafür. Energiegemeinschaften können dahingehend eine Schlüsselfunktion einnehmen und als zentraler Ansprechpartner für den Netzbetreiber fungieren.

Saisonale Stromspeicher: Langfristig besteht großer Bedarf an saisonalen Stromspeichern, vor allem wenn der Anteil erneuerbarer Energie in Richtung 100 % geht. Für die saisonale Stromspeicherung sind neben der Power-to-Gas-Technologie aus technischer Sicht auch andere Technologien wie z. B. Pumpspeicherkraftwerke, Wasserstoffspeicher oder Druckluftspeicher geeignet. Aufgrund der in Österreich verfügbaren Erdgasspeicher kann jedoch nur die Power-to-Gas-Technologie ausreichend Speicherkapazität für einen saisonalen Ausgleich zur Verfügung stellen. (Energiezukunft Österreichs 2020)

Aufgrund der Kosten (insbesondere der Skaleneffekte) ist zu erwarten, dass Power-to-Gas Anlagen in erster Linie an wenigen, strategisch ausgewählten Punkten - mit einer geeigneten Anbindung an Strom- und Erdgasnetz - durch Energieversorger errichtet und betrieben werden (Ausfelder und Dura 2019). Unklar ist aus heutiger Sicht noch das Marktpotenzial von kleineren P2G-Anlagen.

Direkte und indirekte Nutzung von Strom- und Wärmespeichern durch Energieversorger zur Optimierung des Gesamtsystems: Auch 2030 werden in Österreich Pumpspeicherkraftwerke für systemdienliche Anwendungen eingesetzt, anstelle fossiler Kraftwerke werden jedoch zunehmend Strom- und Wärmespeicher für systemdienliche Anwendungen eingesetzt. Dabei kommen sowohl eigenes errichtete große Strom- und Wärmespeicher, als auch vorhandene private oder gewerbliche Strom- und Wärmespeicher zum Einsatz.

Bei größeren, zentralen Stromspeichern werden vorrangig Batterien am Ende ihres ersten Lebenszyklus (z. B. aus der Elektromobilität) zum Einsatz kommen (Second Life Anwendung), da aufgrund der zentralen Nutzung und der Möglichkeit entsprechende Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, das durch Alterung erhöhte Fehler- bzw. Gefahrenpotenzial der Batterien minimiert werden kann. (Fischhaber et al 2016)

3.3 SPEICHER IN INDUSTRIE UND GEWERBE

Wärmespeicher zur Abwärmenutzung sowie für weitere Anwendungen: Bereits heute werden Wärmespeicher zur Abwärmenutzung (Temperaturbereich von 40 bis 130 °C) in Industrie- und Gewerbebetrieben eingesetzt. Zukünftig wird diese Anwendung auf verschiedenen Temperaturniveaus noch zunehmend an Bedeutung gewinnen. Besonders interessant scheint hier die Nutzung des Wärmespeichers in Verbindung mit einer KWK-Anlage (stromgeführter Betrieb) bzw. zusätzlich zur Abwärmenutzung für Power-to-Heat-Anwendungen (z. B. in Kombination mit Wärmepumpen).

Um auch die vorhandenen Potenziale im Bereich der Prozesswärme von 200 bis 1000 °C (Mittel- und Hochtemperatur) zu erschließen, bedarf es jedoch noch entsprechender Technologien, um Wärme verlustarm und über einen längeren Zeitraum auf einem hohen Temperaturniveau zu speichern.

Stromspeicher zur Lastspitzenreduktion: Unternehmen benötigen oftmals viel Energie in kurzer Zeit. Neben einer hohen Netzbelastung sind diese Leistungsspitzen auch abrechnungsrelevant und können zu höheren Netzentgelten führen. Bereits heute versuchen einige Unternehmen daher ihre Verbraucher so zu nutzen, dass Leistungsspitzen vermieden werden. Zukünftig können dazu auch Batteriespeicher eingesetzt werden, die darüber hinaus zur Notstromversorgung bzw. zur Verbesserung der Versorgungssicherheit und -qualität sowie für weitere Anwendungen (z. B. Fahrplantreue, optimierter Stromeinkauf / Arbitrage-Handel, …) eingesetzt werden können, wodurch unter anderem auch die Wirtschaftlichkeit von Speichersystemen verbessert werden kann. Das betriebliche Energiemanagement wird dabei jedoch nicht ausschließlich auf Stromspeicher aufbauen, sondern auch andere Flexibilitätsoptionen (z. B. verschiebbare Lasten, Wärmespeicher/Power-to-Heat) werden dabei eine Rolle spielen.

3.4 SPEICHER UND NEUE PLAYER

Elektroautos zur lokalen Netzstabilisierung: Als Alternative zu stationären Batteriespeichersystemen ist sowohl in Stadtquartieren als auch in ländlichen Siedlungen die Nutzung von Elektroautos zur Netzstabilisierung denkbar. Neben dem privaten Elektroauto sind hier vor allem Carsharing-Angebote sowie öffentliche Ladestationen zu nennen.

Speziell in ländlichen Regionen ist davon auszugehen, dass Carsharing-Angebote in Siedlungen zukünftig das Zweitauto ablösen werden. Die Nutzung selbst ist dabei meist nicht zeitkritisch, die Fahrten in der Regel kurz - sowohl hinsichtlich Entfernung als auch in Bezug auf die Dauer. Werden Elektroautos nicht genutzt, können diese dem Netzbetreiber zur Netzstabilisierung zur Verfügung gestellt werden. Im Vergleich zu privaten Elektroautos sind bei Carsharing-Angeboten jedoch auch eine gezielte Blockade einzelner Autos bzw. flexible Nutzungsentgelte - um in Absprache mit dem Netzbetreiber Zeitpunkt und Dauer der Nutzung zu beeinflussen - denkbar.

Hier bieten auch öffentliche Ladestationen Potenzial. Speziell im urbanen Raum ist das Parken bzw. Laden an öffentlichen Ladestationen zumeist kostenpflichtig. Ist der*die Besitzer*in damit einverstanden, dass das Elektroauto bei Bedarf nicht geladen bzw. bis zu einem definierten Ladestand entladen wird, können im Gegenzug die Park- und Ladegebühren teilweise oder vollständig entfallen.

Saisonale Wärmespeicher: Langfristig besteht großer Bedarf an saisonalen Wärmespeichern (Köfinger et al. 2017). Dabei werden weiterhin primär Erdbeckenspeicher, Erdsondenfelder und Grundwasserleitern – oftmals in Kombination mit Wärmepumpen – eingesetzt. Jedoch drängen zunehmend neue Produkte basierend auf alternativen Konzepten wie z. B. thermochemische Speicher oder Phasenwechsel-Speicher auf den Markt und punkten unter anderem mit geringeren saisonalen Speicherverlusten, höheren Temperaturen und mittel- bis langfristig sinkenden Kosten. Der Betrieb der Wärmespeicher kann sowohl klassisch durch einen Energieversorger oder einen Contractor, aber auch durch andere Zusammenschlüsse wie z. B. Energiegemeinschaften oder eine Biomassegenossenschaft erfolgen.

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass Energiespeicher im Jahr 2030 in den verschiedenen Anwendergruppen unterschiedlich eingesetzt werden. Während in der Anwendergruppe der Haushalte die gemeinschaftliche Nutzung von (zentralen) Stromspeichern in Energie-Gemeinschaften stark zunehmen wird, werden Wärmespeicher weiterhin dezentral in den Haushalten eingesetzt (Ausnahme: saisonale Wärmespeicher). Jedoch werden auch diese Wärmespeicher zukünftig netz- und systemdienlich betrieben werden müssen und somit einen Beitrag zum Gesamtsystem leisten.

Auch in der Industrie gewinnen - neben Wärmespeichern zur Abwärmenutzung - Stromspeicher zur Lastspitzenreduktion und zur Fahrplanoptimierung zunehmend an Bedeutung. Diese können auch zur Notstromversorgung bzw. zur Verbesserung der Versorgungssicherheit und –qualität eingesetzt werden. Weitere Anwendungsmöglichkeiten im Bereich des Energiemanagements können die Wirtschaftlichkeit dieser Speichersysteme verbessern.

In Zukunft werden auch immer mehr Energieversorger und Netzbetreiber Energiespeicher als ernsthafte Alternative zu konventionellen Maßnahmen des Energie- und Engpassmanagements erkennen und dabei sowohl auf eigene Großspeicher als auch auf vorhandene private oder gewerbliche stationäre und mobile Kleinspeicher zugreifen.

Unabhängig von der konkreten Anwendung werden im Bereich der Stromspeicher jedoch auch andere Flexibilitätsoptionen weiterhin eine Rolle spielen. Welche Flexibilitätsoption(en) letztendlich in welchem Ausmaß genutzt werden, darf auch zukünftig keine Frage der Technologie, sondern der wirtschaftlichen und energietechnischen Effizienz sein. Als möglicher Benchmark kann z. B. die Abregelung Erneuerbarer Erzeugungsanlagen in Deutschland herangezogen werden (Bundesnetzagentur 2018).

Herausforderungen und Barrieren wurden vor allem im rechtlich/regulatorischen Bereich, aber auch in den Bereichen Umwelt und Gesellschaft identifiziert. Vor allem die Berücksichtigung gesellschaftlicher Themen sowie die Verankerung der Nachhaltigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette stellen dahingehend wesentliche Erfolgskriterien dar.

LITERATUR

Ausfelder F., Dura H. (2019) 2. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen. verfügbar unter https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_DEC_P2X_Kopernikus_RZ_Webversion02-p-20005425.pdf

Bundesnetzagentur (2018) Leitfaden zum Einspeisemanagement - Version 3.0, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Leitfaden zum Einspeisemanagement - Version 3.0. Juni 2028, verfügbar unter www.bundesnetzagentur.de/einspeisemanagement

Energiezukunft Österreichs (2020) Gas kommt mit moderner Infrastruktur und hohem Potenzial. verfügbar unter https://www.initiative-gas.at/partner-von-wind-wasser-und-sonne/gas-kommt-mit-moderner-infrastruktur-und-hohem-potenzial

Fischhaber S., Regett A., Schuster S., Hesse H. (2016) Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen. verfügbar unter https://www.ffe.de/download/article/620/StudieSecondLifeKonzepte.pdf

Friembichler F., Handler S., Krec K., Kuster H. (2016) Thermische Bauteilaktivierung. – Planungsleitfaden Einfamilien- und Reihenhäuser. Berichte aus der Energie- und Umweltforschung9/2016, verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2016-9-energiespeicher-beton.pdf

Fürstenwerth D., Waldmann L. (2014) Stromspeicher in der Energiewende - Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. verfügbar unter https://speicherinitiative.at/assets/Uploads/19-AgoraEnergiewende-Speicherstudie-Langfassung.pdf

Hoffmann E., Mohaupt F., Ortmanns M. (2018) Akzeptanz von Speicherdienstleistungen und weiteren Energiedienstleistungen: Stand der Forschung aus sozialwissenschaftlicher Perspektive. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, verfügbar unter https://www.esquire-projekt.de/data/esquire/Datein/Arbeitspapier_Akzeptanz_von_Speicherdienstleistungen_und_weiteren_Energiedienstleistungen.pdf

Klima- und Energiefonds (2016) Abschlussbericht der Speicherinitiative Startphase. Wien, Juni 2016

Klima- und Energiefonds (2020) Speicherinitiative des Klima- und Energiefonds. verfügbar unter https://speicherinitiative.at

Köfinger M., Basciotti D., Lager D., Terreros O, Zauner C., Böhm H., Lindorfer J., Tichler R., Zauner A. (2017) SeasonalGridStorage - Innovative saisonale Wärmespeicher für urbane Wärmenetze. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 02/2017, verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe-2018-21-sgs.pdf

Leonhartsberger K., Koinegg J., Schwab T. (2019) Elektrische Energiespeicher: Neue Geschäftsmodelle als Schlüssel zu nachhaltigen Energiesystemen. Green Tech Radar, Juni 2019, verfügbar unter https://greenenergylab.at/wp-content/uploads/2020/02/rader_geschaeftsmodelle-mit-speichern_2019_screen.pdf

Statistik Austria (2019) Energieeinsatz der Haushalte. verfügbar unter https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energieeinsatz_der_haushalte/index.html

Kontaktdaten Autor(en):
Kurt Leonhartsberger
Fachhochschule Technikum Wien
Standort ENERGYbase, Giefinggasse 6, 1210 Wien
Email: kurt.leonhartsberger@technikum-wien.at

Betrachtung der sommerlichen Überwärmung eines Bürogebäudes mittels dynamischer Gebäudesimulation unter Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien

H.C. Leindecker
FH OÖ Studienbetriebs GmbH, Fakultät für Technik & Angewandte Naturwissenschaften, Wels
D. Kugfarth
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels

ABSTRACT: The global climate change causes extreme weather conditions, constantly rising outside temperatures, longer heat waves and an increasing number of tropical nights. Due to high internal heat loads and the partly high proportion of glazing, office buildings are way more affected by summertime overheating than residential buildings. According to leading climate research institutes, Austria is even more affected by the current climate change than the global average. That raises the question: How will office buildings perform regarding summertime overheating in 2050? As part of a master thesis, a contemporary office building, completed in 2018, was examined for summertime overheating by using dynamic building simulations. In these simulations future climate scenarios formulated by the World Climate Research Programme (WCRP) and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were taken into account. The master thesis is divided into two parts. Firstly, the building was modelled, simulated and calibrated under consideration of all thermally relevant parameters (Software: IDA ICE 4.8). The results indicated, that the simulated operative temperatures correspond to the measured values of the building control system. Secondly, based on extensive research various climate data sets representing the year 2050 were created and imported into the simulation. In addition to the overall consideration of higher outdoor temperatures, the influence of extended heat waves as well as an increasing number of tropical nights were especially investigated. To evaluate the effectiveness of passive measures against summertime overheating, an extensive parameter study was carried out. The results of the master thesis provided interesting findings for the long-term prevention of summertime overheating of office buildings. Furthermore, it demonstrated the high importance of external shading, the use of night ventilation and a sensible behavior of building users.

1. EINLEITUNG

Der weltweite Klimawandel stellt mit seinen immer extremeren Wetterlagen Architekt/-innen, Bauingenieur/-innen und Bauphysiker/-innen bereits jetzt vor ernstzunehmende Herausforderungen. Die insbesondere seit dem Jahr 1970 stetig steigenden Außentemperaturen, in Verbindung mit deutlich längeren Hitzeperioden sowie einer höheren Anzahl an Tropennächten, haben einen massiven Einfluss auf die Sommertauglichkeit von Wohn- und Dienstleistungsgebäuden. Die Republik Österreich - insbesondere der Alpenraum - sind vom aktuellen Klimawandel sogar stärker betroffen als der weltweite Durchschnitt. In einer Masterarbeit des Studienganges Öko-Energietechnik der FH OÖ (Campus Wels), welche in Kooperation mit dem Amt der Oö. Landesregierung erstellt wurde, lautete daher die grundlegende Fragestellung: Sind moderne Bürogebäude auch im Jahr 2050 noch sommertauglich?

In diesem Zusammenhang wurde ein Bürogebäude im oberösterreichischen Kirchdorf an der Krems, welches im Jahr 2018 fertiggestellt wurde, mittels dynamischer Gebäudesimulation in Bezug auf aktuelle und zukünftige sommerliche Überwärmung betrachtet. Die hohe Anzahl an umwelt- und raumspezifischen Messwerten, welche von der Gebäudeleittechnik (GLT) gesammelt wurden, bildeten die ideale Grundlage für dynamische Gebäudesimulationen sowie umfangreiche Parameterstudien.

Die Masterarbeit wurde in zwei Schwerpunkte unterteilt. Im ersten Teil wurde das Gebäude unter Berücksichtigung sämtlicher konstruktionstechnischer sowie thermisch relevanter Parameter so modelliert, dass die Simulationsergebnisse der Temperaturverläufe für ausgewählte kritische Räume mit den Messwerten der Gebäudeleittechnik (Zeitraum Sommer 2019) übereinstimmen. Dies erfolgte mit der Gebäudesimulationssoftware IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE 4.8), welche speziell für raumklimatische und energetische Frage- bzw. Problemstellungen entwickelt wurde.

Im zweiten Teil der Masterarbeit wurde eine Reihe zukünftiger Klimadatensätze, welche die Jahre 2020 bis 2050 repräsentieren, entwickelt und anschließend in die Simulation eingelesen. Hierbei wurden insbesondere die Auswirkungen steigender Außenlufttemperaturen, längerer Hitzeperioden sowie einer höheren Anzahl an Tropennächten analysiert. Die Entwicklung dieser Datensätze erfolgte auf Basis zukünftiger Klimaszenarien, welche unter anderem vom damaligen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), dem Amt der Oö. Landesregierung sowie der ZAMG formuliert wurden. Zusätzlich wurde die Meinung österreichischer Klimaforscher/-innen und Meteorlogen/-innen bei der Erstellung dieser Datensätze berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Masterarbeit lieferten der FH OÖ sowie dem Amt der Oö. Landesregierung wichtige Erkenntnisse für die langfristige Vermeidung sommerliche Überwärmung von Bürogebäuden und demonstrierten die Wichtigkeit von außenliegenden Verschattunten, funktionierender Nachtlüftungssystemen sowie einem umsichtigen Nutzerverhalten (Kugfarth 2020).

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 SOMMERLICHE ÜBERWÄRMUNG VON GEBÄUDEN

Der sommerlichen Überwärmung in Wohn- und Dienstleistungsgebäuden kommt in Zeiten des globalen Klimawandels und den damit verbundenen höheren Außenlufttemperaturen eine besondere Bedeutung zu. Die Intensität des Temperaturanstiegs in den Innenräumen eines Gebäudes hängt dabei von verschiedensten Parametern ab (siehe Tab. 1). Neben der Konstruktion des Gebäudes - speziell der thermischen Gebäudehülle, dem Anteil der Fensterflächen, der Verglasung und deren Verschattung - sind auch die Art der Lüftung sowie letztendlich das Nutzverhalten von entscheidender Bedeutung. Bürogebäude sind auf Grund der hohen inneren Wärmelasten in Form von Personen, Arbeitsgeräten und Beleuchtung besonders von sommerlicher Überwärmung betroffen. Diese können im Extremfall dazu führen, dass selbst in Wintermonaten aktiv gekühlt werden muss. Aus energetischen, wirtschaftlichen und vor allem ökologischen Gründen sollten in erster Linie passive Maßnahmen - Maßnahmen ohne zusätzlichen Energieaufwand - zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung getroffen werden. Sollten diese nicht ausreichen, muss das Gebäude aktiv gekühlt werden (Kugfarth 2020).

2.2. GESETZLICHE ANFORDERUNGEN AN GEBÄUDE IN ÖSTERREICH

Die gesetzlichen Anforderungen an Gebäude in Bezug auf die sommerliche Überwärmung werden grundsätzlich in den Bautechnikgesetzen- und Verordnungen der einzelnen Bundesländer geregelt. Die Landesgesetze verweisen dabei oftmals auf die OIB-Richtlinie 6 (Energieeinsparung und Wärmeschutz), wobei die neue Ausgabe von April 2019 zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht von allen Bundesländern übernommen wurde. Gem. Ausgabe März 2015 gilt die sommerliche Überwärmung in Nicht-Wohngebäuden als vermieden, wenn der außeninduzierte Kühlbedarf $KB^*_{max,RK}$ einen Wert von 1,0 kWh/(m³a) im Neubau bzw. 2,0 kWh/(m³a) im Falle einer größeren Renovierung nicht überschreitet (OIB 2015).

In der neuen OIB-Richtlinie 6 von April 2019 kann der Nachweis für die Vermeidung der sommerlichen Überwärmung auf zwei Arten erfolgen. Zum einen kann der Nachweis wie bereits zuvor über den außeninduzierte Kühlbedarf $KB^*_{RK,zul}$ erbracht werden, wobei die gleichen energetischen Anforderungen bzgl. Neubau und Renovierung gelten. Alternativ gilt die sommerliche Überwärmung als vermieden, wenn die operative Temperatur im Raum den Wert von $1/3*T_{NAT,13}+21{,}6$ °C nicht überschreitet. Die Berechnung des standortabhängigen Tagesmittelwertes $T_{NAT,13}$ erfolgt gem. ÖN B 8110-3 (OIB 2019).

Tab. 1: Einflussfaktoren auf sommerliche Überwärmung von Gebäuden (Kugfarth 2020)

Wetter & Klima	- Höhe und Verlauf der Außenlufttemperatur - Länge der sommerlichen Hitzeperioden - Anzahl der Tropennächte - Globalstrahlung (direkte und diffuse Strahlung) - Windgeschwindigkeit und Windrichtung
Baukonstruktion	- Orientierung des Gebäudes - Bauweise (thermische Speichermasse) - Anordnung und Geometrie der Räume - Qualität der thermischen Gebäudehülle (U-Werte) - Fläche, Orientierung und Neigung der transparenten Bauteile - Gesamtenergiedurchlassgrad der transparenten Bauteile - Art und Qualität des Sonnenschutzes
Haustechnik	- Art und Einregulierung der Wohnraumlüftung - Nachtlüftungskonzept (manuell oder automatisch) - Art und Qualität der aktiven und passiven Raumkühlung - Rohrleitungsführung für Heizung und Warmwasser
Innere Wärmelasten	- Anzahl und Aktivitätsgrad der anwesenden Personen - Energieeffizienz der elektronischen Geräte - Energieeffizienz der künstlichen Beleuchtung
Sonstiges	- Nutzerverhalten (!)

In den Gebäudedeklarationen der Klimaschutzinitiative „klimaaktiv“ sind die Anforderungen an Dienstleistungsgebäude in Bezug auf den Kühlbedarf und die Vermeidung sommerlicher Überwärmung etwas strenger ausgelegt. Hierbei darf der außeninduzierte Kühlbedarf KB* den Wert von 0,8kWh/m³a nicht überschreiten. Im Falle der sommerlichen Überwärmung sind neben dem normativen Nachweis (gem. ÖNORM B 8110-3) auch dynamische Gebäude- und CFD-Simulationen zugelassen. Diese werden auf Grund ihres Umfanges sowie der wesentlich genaueren Betrachtungsmöglichkeiten im Vergleich zum Nachweis gem. ÖNORM höher bepunktet (klimaaktiv 2019).

2.3. ZUKÜNFTIGE KLIMASZENARIEN UND PROGNOSEN

Der Klimawandel wurde für die Menschen in Österreich vor allem im letzten Jahrzehnt (2010 bis 2019) zunehmend spürbarer. In der 253-jährigen Geschichte der Temperaturaufzeichnung zählen die Sommermonate in den Jahren 2015, 2017, 2018 und 2019 zu den heißesten. Lediglich der Sommer 2003 war mit 2,8 °C über dem Mittel wärmer. Obwohl der Anstieg der Temperatur ein globales Phänomen ist, steigt diese regional betrachtet sehr unterschiedlich. Hiervon ist Österreich - insbesondere der Alpenraum - sogar stärker betroffen als der weltweite Durchschnitt (ZAMG 2020).

Klimaprojektionen beschreiben die Entwicklung des Klimawandels in naher und weiter Zukunft. Diese beruhen auf einer Vielzahl von sozioökonomischen, technologischen und umwelttechnischen Annahmen – genannt Szenarien – und sind daher mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Die globalen Klimamodelle werden von verschiedensten wissenschaftlichen Institutionen entwickelt, wobei der Rahmen durch das World Climate Research Programme (WCRP) vorgegeben und deren Ergebnisse durch das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in einem Sachstandsbericht zusammengefasst werden. Ausgehend von diesen Sachstandsberichten wurden in einem Gemeinschaftsprojekt von Bund, Länder, der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, der Technischen Universität Graz sowie der Universität Salzburg mögliche Klimaszenarien für die Republik Österreich und deren Bundesländer entwickelt. Tab. 2 zeigt beispielhaft den simulierten Anstieg der Mitteltemperatur gegenüber dem Betrachtungszeitraum 1971 bis 2000 für das Land Oberösterreich (vgl. ÖKS 2015).

Tab. 2: Entwicklung der Mitteltemperatur gegenüber dem Zeitraum von 1971 bis 2000 für OÖ (ÖKS 2015)

	1971-2000		2021-2050				2071-2100			
	Jahreswerte		RCP4.5 (Klimaschutz-Szenario)		RCP8.5 (business-as-usual)		RCP4.5 (Klimaschutz-Szenario)		RCP8.5 (business-as-usual)	
bis	8,1		+1,7		+1,9		+3,4		+5,0	
Mittel	**7,9**		**+1,3**		**+1,4**		**+2,3**		**+3,9**	
von	7,8		+0,8		+0,9		+1,7		+3,2	
	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer
bis	-0,1	16,9	+2,0	+1,7	+2,1	+2,0	+3,2	+2,8	+5,2	+5,5
Mittel	**-1,0**	**16,6**	**+1,4**	**+1,2**	**+1,5**	**+1,3**	**+2,4**	**+2,0**	**+4,4**	**+3,8**
von	-1,4	16,4	+0,8	+1,0	+0,7	+1,0	+2,0	+1,6	+3,6	+3,0

Winter: Dezember - Jänner - Februar / **Sommer:** Juni - Juli - August

3. BESCHREIBUNG DES GEBÄUDES

3.1 ALLGEMEINE BESCHREIBUNG

Das mittels dynamischer Gebäudesimulation betrachtete Bürogebäude befindet sich im Zentrum der Stadtgemeinde Kirchdorf an der Krems (OÖ) auf 450 m Seehöhe (siehe Abb. 1). Das im Jahr 2018 fertiggestellte Gebäude mit einer Bruttogrundfläche von 3.623 m² wurde in Massivbauweise (25 cm Stahlbeton mit 16 cm Fassadendämmplatte aus Mineralwolle, U-Wert = 0,192 W/(m²K)) errichtet. Die Innenwände wurden dagegen in Leichtbauweise ausgeführt (Metallständer, Gipskartonfeuerschutzplatten, Mineralfaser Steinwolle). Das Gebäude verfügt über eine komplexe Gebäudeleittechnik, welche sämtliche raumklimatischen, energetischen und wettertechnischen Daten erfasst, speichert und visualisiert. Die Vielzahl an Messwerten ermöglicht einen Abgleich mit dem Modell der dynamischen Gebäudesimulation und in weiterer Folge eine umfangreiche Parameterstudie sowie Untersuchungen der Auswirkung zukünftiger Klimaszenarien. Der außeninduzierte Kühlbedarf KB* des Gebäudes beträgt gem. Energieausweis 0,22 kWh/(m³a) und würde somit neben den gesetzlichen Anforderungen auch den entsprechenden Punkt im klimaaktiv-Kriterienkatalog erfüllen (Kugfarth 2020).



Abb. 1: Neues Amtsgebäude der BH Kirchdorf, Ansicht von Norden (Land Oö. 2020)

3.2 BESCHREIBUNG DER HAUSTECHNIK

Das neue Amtsgebäude verfügt neben einer besonderen Architektur, auch über ein innovatives Haustechnikkonzept. Die Gebäudeleitechnik misst die wichtigsten raumklimatischen Parameter und vergleicht diese während der Nachtstunden mit der Außenlufttemperatur. Beträgt die mittlere Innenraumtemperatur in einem Stockwerk mehr als 24 °C sowie die Differenz zur Außentemperatur mehr als 3 °C, werden automatisch die Nachtlüftungsklappen im jeweiligen Stockwerk geöffnet. Die warme Innenraumluft kann durch die Überströmelemente, welche sich über allen Bürotüren befinden, in den Gangbereich strömen anschließend das Gebäude über ein Dachfenster im 2. Obergeschoss verlassen.

Zusätzlich zur passiven Nachtlüftung verfügt das Gebäude über eine mechanische Raumlüftung mit Kühlfunktion (Verdunstungskühlung), welche allerdings nur als unterstützenden Komponente mit sehr geringem Kühlpotential anzusehen ist. Die manuell zu bedienenden außenliegenden Verschattungselemente sind ein Teil des „Low-Tech-Konzepts" des Gebäudes. Jede(r) Mitarbeiter/-in ist dabei selbst für die Verschattung seines Raumes verantwortlich, was speziell in der Gebäudesimulation eine besondere Herausforderung darstellte. Der Fc-Wert der hinterlüfteten Verschattung beträgt bei aktiviertem Zustand 0,22, der g-Wert der Fenster 0,4.

Die manuelle Verschattung in Kombination mit den vollautomatischen Nachlüftungsklappen sowie der Einsatz energieeffizienter Geräte und Beleuchtungsmittel sorgen auch im Falle eines ausgesprochen heißen Sommers für ein angenehmes Raumklima ohne sommerlicher Überwärmung. Am Dach des Gebäudes befindet sich eine Photovoltaikanlage mit 94,1 kWp, welche im Extremfall die benötigte Energie für eine aktive Gebäudekühlung zu einem großen Teil bereitstellen könnte (Kugfarth 2020).

4. DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE

4.1.MODELLIERUNG DES GEBÄUDES UND ABLGEICH MIT DEN MESSWERTEN

Im ersten Schritt war es notwendig, ein möglichst genaues Modell des Gebäudes zu erstellen. Dies erfolgte auf Basis der Pläne und Dokumente, welche vom Amt der Oö. Landesregierung sowie der Bezirkshauptmannschaft Kirchdorf zur Verfügung gestellt wurden. Die Schwierigkeit bestand vor allem darin, das Nachtlüftungskonzept sowie das Nutzerverhalten in Bezug auf die manuelle Verschattung möglichst realitätsnah nachzubilden. Abb. 2 zeigt das Ergebnis der Kalibrierung des Gebäudemodells (Sim.A1, grüner Linie) für den Raum OG2-09 (Doppelbüro, 2.OG, Südost-Orientierung). Die graue Linie repräsentiert die Messwerte der Gebäudeleittechnik, die hellblaue die gemessene Außenlufttemperatur. Hierbei ist zu erkennen, dass die simulierte und die tatsächliche Innenraumtemperatur in Bezug auf deren Verlauf und Temperaturspitzen gut übereinstimmen. An Wochenenden ist die Haustechnik und somit auch jede Art von Lüftung deaktiviert, was sich an den flacheren Abschnitten der beiden Graphen erkennen lässt. Ein Nachteil der dynamischen Gebäudesimulation ist, dass schlechtwetterbedingte Ausfälle der Nachtlüftung nicht berücksichtigt werden können. Daraus ergeben sich vereinzelte Abweichungen zwischen Realität und Simulation. Insgesamt beträgt die Abweichung der simulierten mittleren Innenraumlufttemperatur von der tatsächlich gemessenen 0,3 °C. Auf Grund der hohen Übereinstimmung, konnte nun mit dem Erstellen, Einlesen und Auswerten der Datensätze mit zukünftigen Klimaszenarien begonnen werden. Zusätzlich wurde eine Parameterstudie erstellt, welche verschiedenste Fragestelllungen bzgl. Änderungen der Verschattungssituation und der Lüftung betrachtete (Kugfarth 2020).

4.2.KONFIGURATION DER ZUKÜNFTIGEN KLIMADATENSÄTZE

Die Konfiguration der Klimadatensätze erfolgte in Zusammenarbeit mit Meteorologen des Landes Oberösterreich. Bei genauerer Betrachtung der verwendeten Messwerte zeigte sich, dass das Jahr 2019 mit 1,6 °C über dem vieljährigen Mittel zu den heißesten seit Beginn der Wetteraufzeichnung gehörte. Das Jahr 2019 repräsentiert demnach bereits jetzt die angenommene Klimaentwicklung gem. Szenario RCP 8.5 für das Jahr 2050 (siehe Tab. 2).

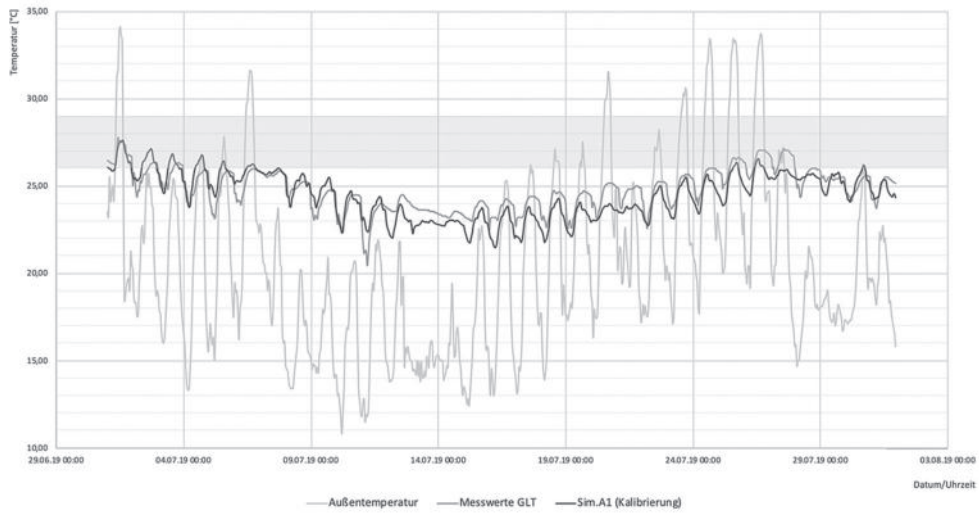


Abb. 2: Ergebnisse der Simulation A1 (Kalibrierung des Gebäudemodells)

Um ein noch extremeres Jahr zu simulieren, wurde die mittlere Außenlufttemperatur nochmals um bis zu 1,5 °C erhöht. In einer weiteren Simulation wurden zudem die Auswirkungen längerer Hitzeperioden von bis zu 21 Tagen betrachtet. Alle Klimadatensätze berücksichtigen die ÖKS-15 Szenarien für Oberösterreich und wurden in Anlehnung an diese erstellt (ÖKS 2015).

4.3. ERGEBNISSE DER DYNAMISCHEN GEBÄUDESIMULATION

Die Simulationsergebnisse mit erhöhten Außentemperaturen (von 0,5 bis 1,5 °C) zeigten einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen Außenluft- und Innenraumtemperatur. Auch bei höheren Außenlufttemperaturen (+1,5 °C im Mittel) bewegten sich die Temperaturen in den Büros zwischen 23 °C und 28 °C im Monat Juli. Deutlich problematischer wird der Temperaturverlauf bei längeren Hitzeperioden. Abb. 3 zeigt verschiedene Hitzewellen im Ausmaß von 6 bis 21 Tagen (gelbe bis rote Linie) sowie die tatsächliche Raumtemperatur (grüne Linie). Je länger die Dauer der Hitzeperiode und der damit verbundenen höheren Anzahl an Tropennächten, desto höher steigen auch die Innenraumtemperaturen. Die Hitzewellen, welche in Abb. 3 dargestellt sind, bewegen sich täglich im Bereich zwischen 20,0 °C und 33,4 °C. Dir Parameterstudien zeigten zudem die Notwendigkeit einer außenliegenden Verschattung (siehe Abb. 4, gelbe Linie) und einer funktionierenden Nachtlüftung (rote Linie), welche bereits zum aktuellen Zeitpunkt für die Vermeidung sommerlicher Überwärmung von essentieller Bedeutung sind. Zudem zeigt die Parameterstudie den Einfluss offener Türen bzw. einer Querlüftung (violette Linie) auf die Effektivität der Nachtlüftung. Im Vergleich zu den Überströmelementen (blaue Linie) unterstützen die offenen Türen die Nachtlüftung wesentlich effizienter (Kugfarth, 2020).

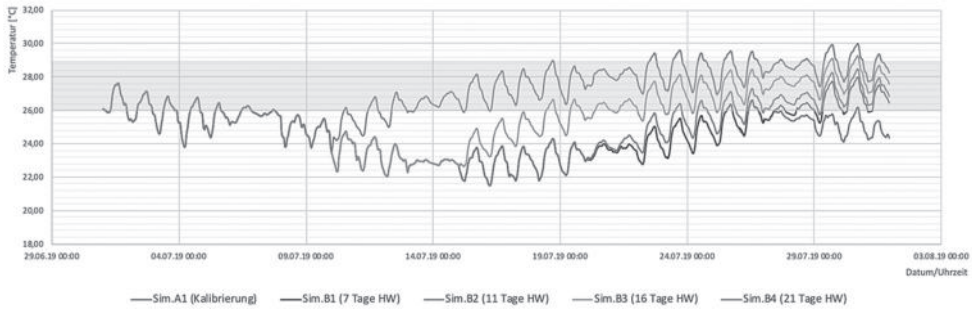


Abb. 3: Ergebnisse der Simulation B1 bis B4 (6 bis 21 Tage Hitzewelle im Juli 2019)

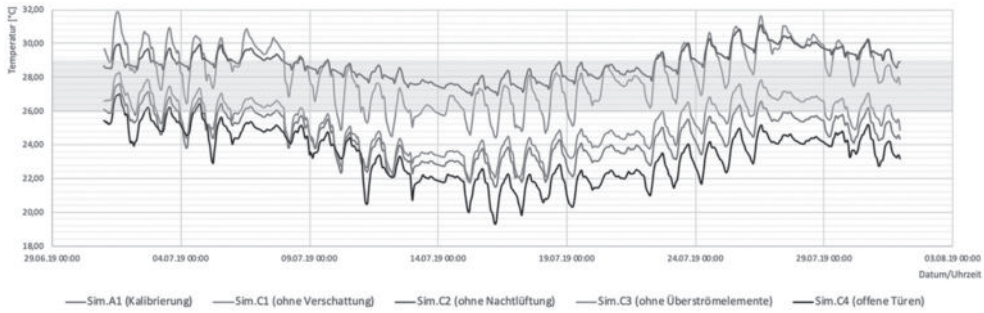


Abb. 4: Ergebnisse der Parameterstudie C1 bis C4 für den Zeitraum Juli 2019 (Raum OG2-09)

5. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Die Masterarbeit „Betrachtung der sommerlichen Überwärmung eines Bürogebäudes unter Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien" lieferte der FH OÖ und dem Amt der Oö. Landesregierung wichtige Erkenntnisse für die langfristige Vermeidung der sommerlichen Überwärmung von Bürogebäuden. In ausgesprochen umfangreichen und zeitintensiven Simulationen konnte die Notwendigkeit einer hinterlüfteten außenliegenden Verschattung, einem funktionierendem Nachtlüftungskonzept sowie der Sensibilisierung der Nutzer/-innen in Bezug auf die Vermeidung sommerlicher Überwärmung demonstriert werden. Die umfangreichen Recherchen und Auswertungen im Rahmen der Erstellung zukünftiger Klimadatensätze zeigten, dass die aktuellen RCP-Klimaszenarios (RCP 4.5 und RCP 8.5) für das Jahr 2050 in Bezug auf Außentemperaturen, Tropennächte und Hitzeperioden bereits im Jahr 2019 erreicht wurden. Dies unterstreicht neben der Notwendigkeit passiver Maßnahmen zur Gebäudekühlung auch die Wichtigkeit von Klimaschutzmaßnahmen in allen Bereichen unseres täglichen Lebens. Vor allem die höhere Anzahl an Tropennächte im urbanen Raum, welche die Nachtlüftung in ihrer Funktion stark einschränkt, haben einen massiven Einfluss auf die sommerliche Überwärmung. Längere Hitzeperioden verhindern zudem die natürliche Abkühlung der Gebäude und führen zu immer höheren Innenraumtemperaturen. Im Falle des simulierten Gebäudes kann mit den aktuellen passiven Maßnahmen zur Kühlung und bei Betrachtung des aktuellen (ländlichen) Standortes die sommerliche Überwärmung langfristig vermieden werden. Für die Jahre nach 2050 können auf Grund der ungewissen Klimaentwicklung, welche in jedem Fall als höchst bedenklich zu bewerten ist, noch keine Aussagen getroffen werden (Kugfarth 2020).

LITERATUR

klimaaktiv (2019) klimaaktiv Kriterienkatalog für Dienstleistungsgebäude, Neubau und Sanierung. 1. Auflage. Wien, April 2019. ISBN: 978-3-99091-001-6 (Broschüre)

Kugfarth D.R. (2020) Betrachtung der sommerlichen Überwärmung eines Bürogebäudes mittels dynamischer Gebäudesimulation unter Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien. Masterarbeit. Studiengang Öko-Energietechnik. FH OÖ Campus Wels.

Land Oö. (2020) Amt der Oö. Landesregierung. Zugriff am 1.7.2020, https://www.land-obereosterreich.gv.at

ÖKS (2015) Klimaszenarien für Österreich, Daten – Methoden – Klimaanalyse, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Technische Universität Graz, Universität Salzburg

OIB (2015) Österreichisches Institut für Bautechnik, Richtlinie 6 (Energieeinsparung und Wärmeschutz), Ausgabe März 2015, 330.6-009/15

OIB (2019) Österreichisches Institut für Bautechnik, Richtlinie 6 (Energieeinsparung und Wärmeschutz), Ausgabe April 2019, 330.6-026/19

ZAMG (2020) Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Zugriff am 23.7.2020, https://www.zamg.ac.at

Kontaktdaten Autor(en):
Prof. (FH) Arch. Dipl.-Ing. Dr. Herbert C. Leindecker
Stelzhamerstraße 23
4600 Wels
Email: herbert.leindecker@fh-wels.at

Electrofuels – Synergie zur Reduktion des Saisonspeicherbedarfs

G. Wind
Wind – Ingenieurbüro für Physik, Eisenstadt, Austria
M. Eder
Strateco OG, Graz, Austria
P. Bußwald
akaryon GmbH, Austria

ABSTRACT: Even in a topographically favored country like Austria, the storage capacity quickly hydro power reaches its potential limits. The total capacity of all currently developed storage lakes is about 3200 GWh, i.e. about 4 % of the future annual electricity demand. Therefore, further flexibility measures are needed. A flexible consumer such as the hydrogen electrolysis of PtF synthesis can greatly reduce the storage demand. For the production of electrofuels it is absolutely necessary to use renewable electricity for ecological reasons. To provide 13,000 GWh/a of electrofuels primarily for aviation, wind and solar energy should be expanded at a ratio of 1:1, so that at least 24,000 GWh/a of "surplus electricity" is available for the PtF. The following benefits are achieved through the flexible operation of this process:

- Production of renewable electrofuels for air traffic and that portion of heavy traffic that cannot be converted to battery operation.
- Reduction of the storage energy demand in Austria to about one third of the existing capacity of storage hydropower. The remaining existing storage capacity could be marketed further or even more within the European network.
- No further storage power plants required. This means that there is no need for further "concreting" of Alpine valleys, which is a great ecological benefit. Only an extension of pure storage power plants to pumped operation should be examined for necessity.
- Stabilization of the energy supply
- In exceptional cases, a small electrofuel bearing can be converted back into electricity in block-type thermal power stations during unusually long periods of darkness.

As the energy turnaround progresses, the use of renewable electrofuels will become indispensable to ensure security of supply and the ecologization of air and heavy traffic. The question will arise whether these are to be produced in Austria itself or imported from "desert states" (Arabia, North Africa). The advantage of a global radiation twice as high brings about 50 % lower electricity production costs there than in Central Europe.

If we do not produce your own electrofuels, we are foregoing the associated synergies. Storage capacities must be expanded and the associated ecological effects must be accepted. The lower energy production output causes more balancing energy in dark slack periods, which can be bridged by using fuels for the operation of CHPs. Also these fuels have to be renewable; so we have to increase the amount of imported Electrofuels. This balancing power has efficiency-related electricity generation costs of over 25 ct/kWh.

The challenge for the regulators of the energy industry will be to evaluate the ramified synergy effects fairly and to harmonize them in a corresponding model. As an approach, variable grid costs, which are in the care of the state, could be used.

1. EINLEITUNG

Die Produktion flüssiger Treibstoffe aus Strom (sog. Electrofuels) ist eine Technologie, um jene Verkehrsmittel mit Treibstoffen zu versorgen, die sich nicht in absehbarer Zeit auf Strombetrieb umrüsten lassen - allen voran der Flugverkehr mit 10.000 GWh/a Kerosin im Jahr 2018 (Statistik Austria 2020).

Der PowerToFuel-Prozess (PtF – zur Herstellung flüssiger Treibstoffe aus Strom) benötigt für die Wasserstoffelektrolyse elektrische Energie, welche in Sekunden mit dem volatilen Energieangebot eines vollständig erneuerbaren Energiesystems abgestimmt werden kann. Dieser flexible Verbraucher bringt einen Doppelnutzen: Produktion von klimaneutralen Treibstoffen und Reduktion des saisonalen Speicherbedarfs.

Während kurzfristige Abweichungen mittels Lastmanagement, Kurzfristspeicher (Akkus, Speicherwasserkraft) mit entsprechendem Betriebsmanagement ausgeglichen werden können, stellt der saisonale Speicherbedarf die weit größere Herausforderung dar, weil es hier um große Energiemengen geht, die derzeit nur mit Speicherwasserkraft, biogenen Brennstoffen, Electrofuels und chemische Rohstoffeerzeugung zu bewältigen ist. (Sterner & Stadler 2017)

Selbst in einem topografisch begünstigten Land wie Österreich stößt die Speicherkapazität von Speicherseen rasch an die Potenzialgrenzen. Die Gesamtkapazität aller derzeit ausgebauten Speicherseen beträgt ca. 3200 GWh oder 4 % des zukünftigen Jahresstrombedarfs (E-Control 2019). Um das zukünftige Energieszenario ökologisch verträglich zu gestalten, sollte ein weiterer Ausbau von Alpentälern vermieden werden. Wie kann die Produktion von Electrofuels den saisonalen Ausgleich von Produktion und Verbrauch in einem vollkommen erneuerbaren Strommix für Österreich beeinflussen?

2. GRUNDLAGEN

Die Ermittlung des Speicherbedarfs für den zukünftigen erneuerbaren Energiemix wurde mit dem Energiewenderechner RESYS (Energiewenderechner 2020) durchgeführt. In Zusammenschau mit etablierten Energiewendeszenarien von Veigl (2017), Streicher et al. (2010), Stanzer et al. (2010), Christian et al. (2011) wurde der zukünftige Energiebedarf und die Potenziale der erneuerbaren Quellen wie folgt zugrunde gelegt:

Tab. 1: Strombedarf und Energiemix des zugrunde gelegten erneuerbaren Energieszenarios für Österreich

	Strom GWh/a	Kommentar
Strombedarf	78.376	Ca. 20 % höher als 2017. Berücksichtigt Effizienzmaßnahmen, Bevölkerungswachstum, mehr Wärmepumpen und E-Mobilität
Stromproduktion:		
Wasserkraft	42.941	Geringfügiger Ausbau gegenüber 2017
Geothermie (Strom)	0,6	
Strom aus feste Biomasse	2.350	Stromproduktion in wärmegeführten BHKW's Biomasseinput: 9.400 GWh/a
Biogas:	3.922	Stromproduktion in wärmegeführten BHKW's Biogasinput: 10.600 GWh/a
Ausbau Windenergie und Photovoltaik im Verhältnis 1:1 (bezogen auf produzierte Energie)		

Durch Gegenüberstellen von Strombedarf und Produktion wird der Speicherbedarf bzw. die für Power To Fuel zur Verfügung stehende Energie wie folgt ermittelt:

1. Überschüsse werden zuerst in die Speicher geladen (Wirkungsgrad 72 %). Bei vollem Speicher wird der Überschuss für die Wasserstoffelektrolyse verwendet.
2. Bei zu geringer Energieproduktion werden die Speicher entladen.
3. Bemerkung: In Zukunft werden auch Batteriespeicher (E-Mobilität: ca. 40 GWh pro 1 Mio. Elektro-PKW am Netz, stationäre Speicher bei PV-Anlagen) zur Verfügung stehen, welche aufgrund ihrer Größe für den Ausgleich von Tagesschwankungen leisten können. Der höhere Wirkungsgrad von ca. 90 % wurde aber nicht in der Simulation separat berücksichtigt.
4. Zeitliche Verläufe von Verbrauch, Wasserkraft werden mit empirischen Zeitreihen, jene von Photovoltaik und Windenergie mittels dem Referenzwetterdatensatz von Amstetten simuliert (PVGIS 2019). Die Verläufe sind in Abb. 1 und Abb. 2 ersichtlich.
5. Idealisierend wird angenommen, dass die PtF-Anlage bei zu geringer Stromproduktion komplett abgeschaltet werden kann und somit keinen Verbrauch verursacht. Bei Überschuss wir bis zur Nennleistung der PtF-Anlage der Strom für die Electrofuel-Produktion verwertet. Übersteigt die Überschussleistung die PtF-Nennleistung nicht nutzbarer Überschuss.
6. Mit der Betrachtung der Wetterdaten eines einzigen Referenzortes wird ein räumlich ausgleichender Effekt aufgrund unterschiedlicher Witterungen nicht berücksichtigt. Es ist daher zu erwarten, dass der errechnetet Speicherbedarf eher größer als der reale ist.

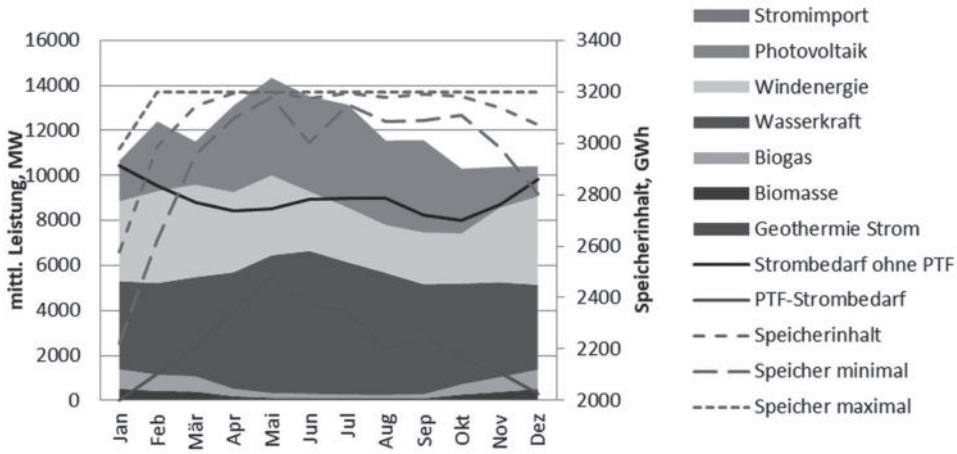


Abb. 1: Jahreszeitlicher Verlauf der Monatsmittelwerte von Energiebedarf und Produktion gemäß Energiemix von Tab. 1 mit je 27.500 GWh/a Wind und Photovoltaik. In diesem Szenario werden mit dem PtF-Strom 13.027 GWh/a Electrofuels erzeugt.

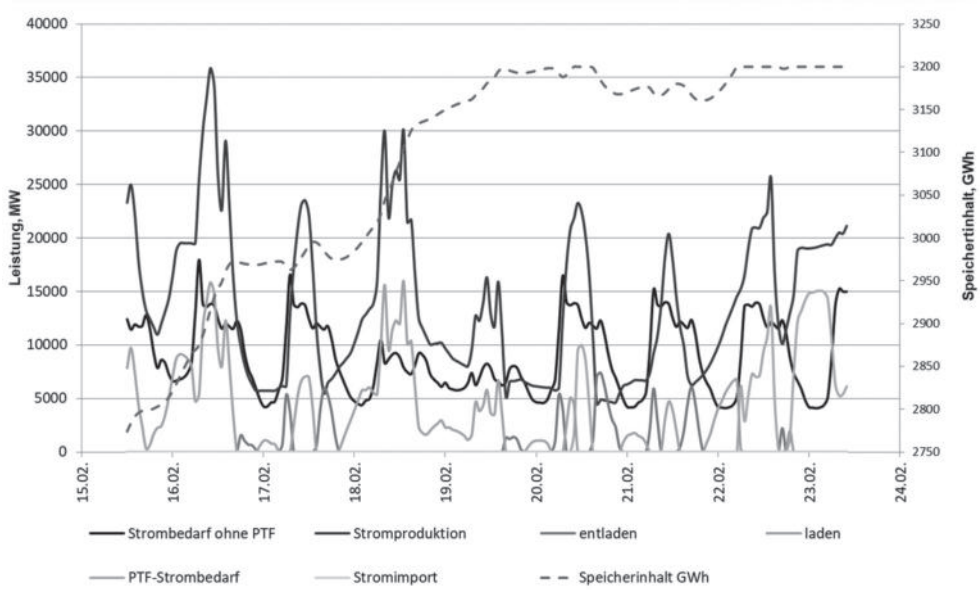


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf einer Woche, in der erstmals nach Jahreswechsel der Speicher voll ist und Strom für die PtF-Anlage zur Verfügung steht – gleicher Energiemix wie in Abb. 1.

3. POWER-TO-FUEL

Als Rohstoffe für die Herstellung von Electrofuels werden Wasser und CO_2 benötigt. Letztere kann z.B. aus Biogasreinigung, Verbrennungsprozessen, chemischen Prozesse oder mit geringerer Effizienz auch aus der Luft erhalten werden.

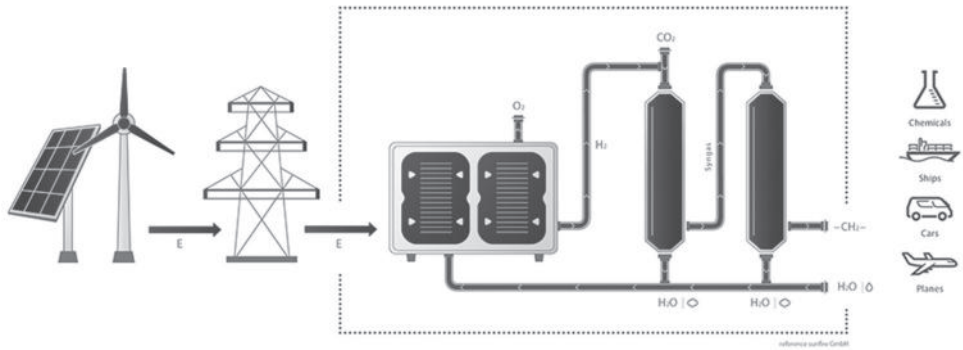


Abb. 3: Überschüssiger erneuerbarer Strom wird im ersten Schritt zur Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser hergestellt. Wasserstoff wird mit CO_2 in einem erweiterten Fischer-Tropsch-Prozess zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Letztere werden durch Destillation zu verschiedenen Kraftstoffen getrennt (Sunfire 2016)

Der erste Teilprozess ist die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser, welche den Großteil des Energiebedarfs aufnimmt und an Lastschwankungen angepasst werden kann.

Der zweite Teilprozess (Carbonisierung) wandelt Wasserstoff mit CO_2 je nach Druck, Temperatur und Katalysator zu einer Vielzahl brennbar Verbindungen um: Methanol, Benzin und Diesel (Fischer-Tropsch-Verfahren), Dimethylether (Designer-Treibstoff mit praktisch rußfreier Verbrennung). Dieser Teilprozess kann nicht so flexibel an das schwankende Angebot angepasst werden, sodass zwischen den beiden Teilprozessen ein Wasserstoffspeicher benötigt wird. Der Umwandlungswirkungsgrad vom Strom bis Treibstoff liegt bei 45 % bis 60 % (Sunfire 2016).

Im Detail gibt es mehrere ausgereifte Verfahren, die in Zukunft auf größere Einheiten angewandt werden können. Gemäß den Angaben des Deutschen Bundestag gab es im Jahr 2018 in Deutschland 31 Pilotprojekt von PowerToGas und PowerToFuel-Anlagen (WDDB 2018).

4. SPEICHERBEDARF - ERGEBNISSE

Für eine sichere Stromversorgung muss die Stromproduktion zu allen Zeitpunkten den Strombedarf und die Speicherverluste decken. Hierbei muss der Speicher groß genug sein, um über den gesamten Jahresverlauf Bedarf und Produktion ausgleichen zu können. Der kleinstmögliche Speicher, der diese Bedingung erfüllt wird als Speicherbedarf definiert. Der Speicherbedarf hängt von vielen Einflussfaktoren ab:

- Energiemix: Wasserkraft hat ihr Produktionsmaximum in Frühjahr bis Frühsommer und das Minimum im Winter. Photovoltaik hat noch extremere Unterschiede zwischen Winter und Sommer. Windenergie ist die einzige volatile Energieform, welche in Mitteleuropa im Winterhalbjahr mehr Energie liefert als im Sommer und kann den saisonalen Speicherbedarf verringern. Allerdings ist Windenergie über Wochen „launiger“ als die anderen Energieformen.
- Betriebsweise von Blockheizkraftwerken: Biogas und Biomasse können wärmegeführt flexibel betrieben werden; dann erfolgt die Stromproduktion in der Heizperiode, was mithilft die Winterschwäche von Wasserkraft und Photovoltaik auszugleichen.
- Einsatz weitere flexibler Stromverbraucher wie Wärmepumpenheizungen, PtF, zeitlich verschiebbare

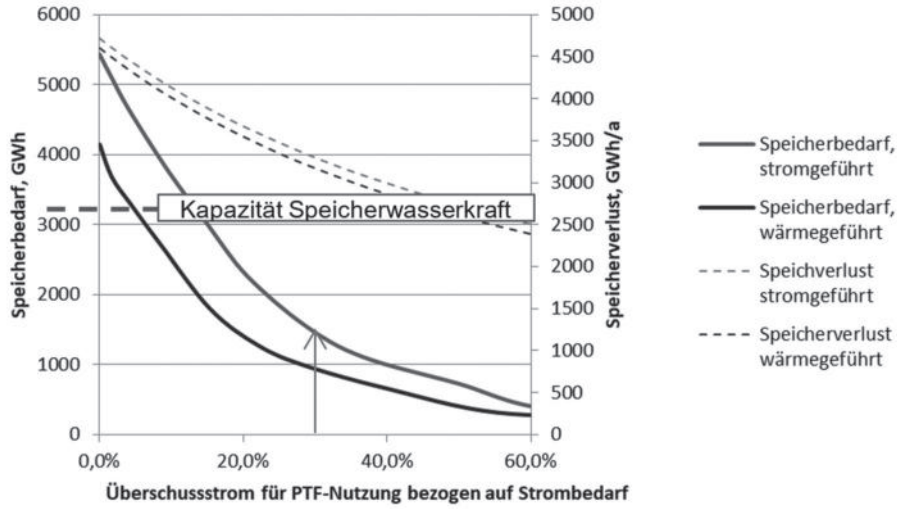


Abb. 4: Speicherbedarf und Speicherverluste in Anhängigkeit der Überschussproduktion. Die wärmegeführte Betriebsweise von Blockheizkraftwerken reduziert deutlich den Speicherbedarf. Es gilt: Stromproduktion = Strombedarf (78.376 GWh/a) + Überschuss + Speicherverlust.

Abb. 4 zeigt: je höher die Stromproduktion bei vorgegebenen Bedarf ausgebaut wird, umso kleiner wird der Speicherbedarfs. Hier wurde mit Produktionsverhältnis Wind:PV = 1:1 gerechnet. Wird die Produktion ohne Überschussproduktion mengenmäßig genau auf den Bedarf abgestimmt, dann übersteigt der Speicherbedarf bei weitem die derzeit vorhandene Speicherkapazität von 3.200 GWh. Für die Produktion von 13.000 GWh/a Electrofuels (Flugbedarf, …) ist eine zusätzlicher Überschuss von 29 % erforderlich - markiert durch den Pfeil in der Abb. 4. Hierbei wurde mit einem PtF-Wirkungsgrad von 60 % gerechnet. Eine flexible Nutzung des PtF-Prozesses reduziert den Speicherbedarf auf 976 GWh, bei stromgeführter bzw. 1563 GWh bei wärmegeführter Betriebsweise von Biomasse- und Biogas-BHKW's. Relativ zur vorhandenen Speicherkapazität ist das eine Reduktion auf 31 % bzw. 49 %.

Im Folgenden wird der Einfluss des Ausbauverhältnisse Wind zu Photovoltaik auf den Speicherbedarf untersucht:

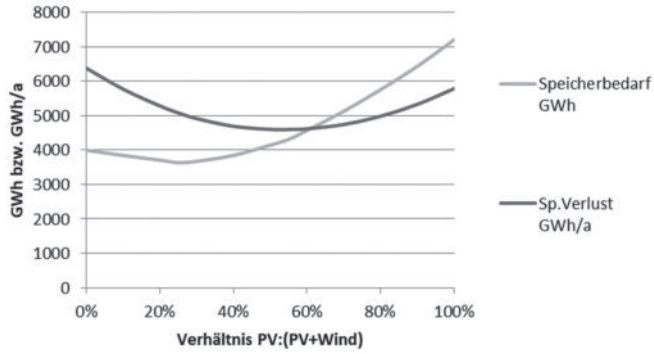


Abb. 5: Speicherbedarf abhängig vom Mix von Wind und Photovoltaik wenn kein Überschuss produziert wird.

Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass der minimale Speicherbedarf sich Energieverhältnis von Wind zu (PV+Wind) von 25 %-30 % ein flaches Minimum durchläuft, während die Speicherverluste bei 50 % bis 60 % minimal werden. Hier wurde angenommen, dass die Produktion mithilfe eines genügend großen Speichers ohne weitere Überschüsse deckt. In Abb. 6 wird das Verhalten bei steigender Produktion dargestellt, also wenn Überschüsse für PtF produziert werden: Mit größer werdendem Überschuss sinken Speicherbedarf und Speicherverluste, wobei der minimale Speicherbedarf sich mehr in Richtung PV:Wind = 1:1 verschiebt. Dieser Sachverhalt lässt sich so interpretieren, dass bei einem zu hohen PV-Anteil den saisonalen Speicherbedarf durchschlägt, während bei hohen Überschussproduktionsleistung und hohen Windanteilen die stärkeren mittelfristigen Schwanken (Dauer von einigen Wochen) der Windenergieproduktion mehr Speicher benötigen.

Für die Praxis folgt daraus, dass hinsichtlich Minimierung des Speicherbedarfs und der Speicherverluste ein Mix von Wind zu Photovoltaik im Verhältnis 1:1 bzw. eher etwas mehr Windenergie ideal ist.

Für die Dimensionierung der Leistung des Elektrolyseteils der PtF-Anlage ist die maximale Überschussleistung maßgelblich. Abb. 7 zeigt, dass eine Auslegung der Leistung auf 55 % über 90 % der auftretenden Überschussenergie für PtF verwendet wird. Auch hier liefert ein Energiemix von Wind:PV = 1:1 die besten Überschussnutzungsgrade von 96 %.

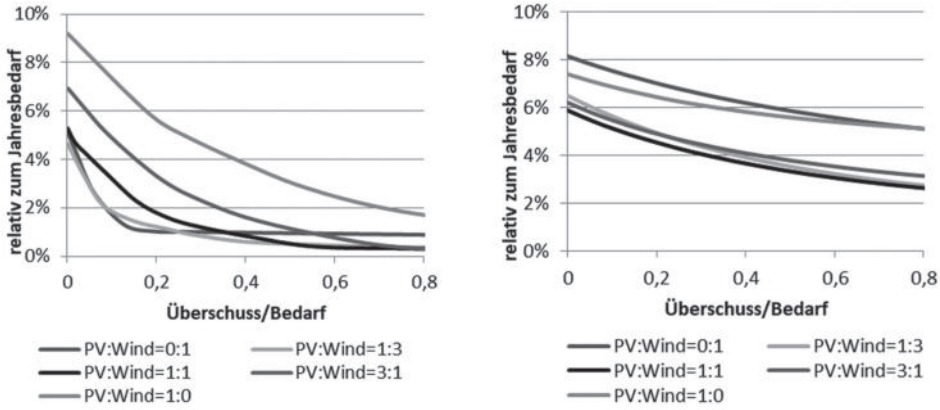


Abb. 6: Speicherbedarf (links) und Speicherverluste (rechts) abhängig vom produziertem Überschuss bei unterschiedlichen Verhältnissen von Wind : Photovoltaik. Der Speicherbedarf ist hier relativ zu Jahresstrombedarf angegeben. Die vorhandene Speicherkapazität von 3.200 GWh entspricht relativ 4 %.

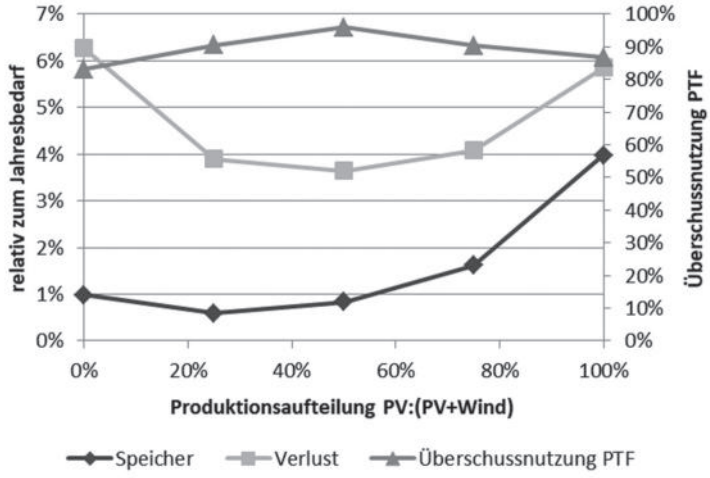


Abb. 7: Speicher(bedarf), Speicherverlust bei einem Strombedarf von 78.376 GWh/a, Produktion von 112.830 GWh/a, wobei Wind und PV 63.616 GWh/a beitragen. Die Leistung der PtF-Anlagen wird auf 55 % der maximalen auftretenden Überschussleistung ausgelegt. Der damit erzielbare Überschussnutzungsgrad ist auf der rechten Achse abzulesen.

5. ÖKOLOGIE UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

Der Flugverkehr wird wohl auch in Zukunft nicht leicht zu reduzieren sein. Aufgrund der viel zu geringen Energiedichte der Akkus ist in den nächsten 10 bis 20 Jahren ein elektrischer Antrieb nicht zu erwarten. Daher wird der Flugverkehr weiterhin auf Turbinentreibstoff angewiesen sein.

Mit Power To Fuel wird Strom mit max. 60 % energetischen Wirkungsgrad in Treibstoff umgewandelt. Der Rest fällt als Abwärme in einer Zeit des Energieüberschusses – das wird meist außerhalb der Heizperiode sein, sodass eine Wärmeverwertung schwierig zu finden ist. Aus ökologischen Gründen darf die Herstellung nur mit erneuerbaren Überschussstrom erfolgen. Daher muss Ökostrom zunächst den Fossilstrom ersetzten und danach noch weiter ausgebaut werden, um die nötigen Überschüsse produziert werden. In vielen Kalkulationen zu PtF (Agora 2018) wird davon ausgegangen, dass Überschuss-Ökostrom fast zum Nulltarif zur Verfügung steht. Wie gezeigt wurde, muss für zur Deckung des „Resttreibstoffbedarfs" die Stromproduktion mindestens 25 % bis 30 % über den sonstigen Jahresstrombedarf hinaus gesteigert werden. Die Errichtung dieser Überkapazität mit PV-Anlagen und Windparks kann auch nur dann erfolgen, wenn diese wirtschaftlich sind. Wenn keine „unfaire" Kostenumwälzung auf die sonstigen Stromverbraucher erfolgt, kann bzw. darf der Strom nicht zum Fast-Nulltarif für PtF-Anlagen bereitgestellt werden. Wie gezeigt wurde, leisten PtF-Anlagen einen unverzichtbaren Betrag einer Speicherbedarfsreduktion und somit auch zur ganzjährigen Stabilität der Stromversorgung. Ohne PtF-Anlagen müsste die Speicherwasserkraft in Österreich noch weiter ausgebaut werden, was schwerwiegende ökologische Verluste bedeuten würde.

Aufgrund dieses Synergieeffektes sollte die Flexibiltät von PtF mit einem vergünstigten Strompreis belohnt werden. Der könnte z.B. über eine variable Netzgebühr erzielt werden, die zu Zeiten des Überschusses auch negativ werden könnte, um den Effekt der Netzstabilisierung zu belohnen.

Was kostet Electrofuel? Die Electrofuel-Kosten setzen sich aus Anlagen- und Energiekosten zusammen. In einer Studie von Agora (2018) werden die Investitionskosten folgendermaßen geschätzt:

Tab. 2: Electrofuel-Kosten (Agora, 2018)

	Auslastung	Kosten 2020 ct/kWh_{PtF}	Kosten 2030 ct/kWh_{PtF}
Elektrolyse	2000 h/a	7,4	5,7
Carbonisierung	8000 h/a	3,6	2,8
Gesamt		11	8,5

Für die Energiekosten wird vom derzeitigen Einspeisetarif für PV und Wind als Gestehungskosten ausgegangen – Wind: 8,12 ct/kWh, PV; 7,67 ct/kWh. – Mittelwert: 7,9 ct/kWh.

Bei einem PtF-Wirkungsgrad von 50 % bis 60 % ergibt das Stromkosten von (13,2 bis 15,8) ct/kWh_{PtF}. Wenn man die Flexibilität zur Stabilisierung der Stromversorgung mit einer Reduktion des Energiepreises um 50 % belohnt wird, ergeben sich Energiekosten von (6,6 bis 7,9) ct/kWh_{PtF}.

Die Gestehungskosten für Electrofuels bewegen sich im Bereich von:

(17,6 bis 18,9) ct/kWh_{PtF} im Jahr 2020
(15,1 bis 16,4) ct/kWh_{PtF} im Jahr 2030

Welche Treibstoffkosten fallen bei Personenflügen an?

Der Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft berechnete 2010 einen durchschnittlichen Treibstoffbedarf für Personenflüge von 3,55 l Kerosin, d.s. sind 424 kWh/1000km (BLD 2019). Mit Electrofuels betragen die Treibstoffkosten für einen 1.000km Flug 80 € für das Jahr 2020 und 70 € für das Jahr 2030.

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Selbst in einem topografisch begünstigten Land wie Österreich stößt die Speicherkapazität von Speicherseen rasch an die Potenzialgrenzen. Die Gesamtkapazität aller derzeit ausgebauten Speicherseen beträgt ca. 3200 GWh, also ca. 4 % des zukünftigen Jahresstrombedarfs. Daher bedarf es weiterer Flexibilisierungsmaßnahmen. Ein flexibler Verbraucher wie die Wasserstoff-Elektrolyse der PtF-Synthese kann den Speicherbedarf stark reduzieren. Zur Produktion von Electrofuels muss aus ökologischen Gründen unbedingt erneuerbarer Strom verwertet werden. Für die Bereitstellung von 13.000 GWh/a Electrofuels in erster Linie für den Flugverkehr sollte Wind- und Sonnenenergie im Verhältnis 1:1 ausgebaut werden, sodass über den Bedarf hinaus mindestens 24.000 GWh/a „Überschussstrom" für den PtF-Prozess zur Verfügung stehen. Durch den flexiblen Betrieb dieses Prozesses wird folgender Nutzen erzielt:

- Bereitstellung erneuerbarer Electrofuels für den Flugverkehr und jenen Anteil des Schwerverkehrs, der nicht auf Akku-Betrieb umgerüstet werden kann.
- Reduktion des Speicherenergiebedarfs in Österreich auf etwa ein Drittel der vorhandenen Kapazität der Speicherwasserkraft. Die verbleibenden bereits vorhandene Speicherkapazität könnte weiterhin bzw. sogar verstärk im Europäischen Verbund vermarktet werden.
- Keine weiteren Speicherkraftwerke erforderlich. Somit ergibt sich als großer ökologischer Nutzen, dass eine weiteres „Zubetonieren" von Alpentälern nicht erforderlich ist. Lediglich eine Erweiterung reiner Speicherkraftwerke auf Pumpbetrieb sollte auf Notwendigkeit untersucht werden.
- Stabilisierung der Energieversorgung
- Ein kleines Electrofuel-Lager kann im Ausnahmefall bei außergewöhnlich langen Dunkelflauten in Blockheizkraftwerken rückverstromt werden.

Mit dem Fortschreiten der Energiewende werden die Absicherung der Versorgungssicherheit und die Ökologisierung des Flug- und Schwerverkehrs der Einsatz von erneuerbaren Electrofuels unumgänglich sein. Es wird sich die Frage stellen, ob diese in Österreich selbst produziert oder aus Wüstenstaaten (Arabien, Nordafrika) importiert werden sollen. Der Vorteil deiner doppelt so hohen Globalstrahlung bringt dort etwa 50 % niedrigere Stromgestehungskosten als in Mitteleuropa und bestehende Piplines eigenen sich für den kostengünstigen Transport.

Verzichtet man auf die Eigenproduktion von Elektrofuels, so verzichtet man auch auf die damit verbundenen Synergien. Speicherkapazitäten müssen ausgebaut und die damit verbundenen ökologischen Auswirkungen müssen akzeptiert werden. Die geringere Energieproduktionsleistung verursacht mehr Ausgleichsenergie in Dunkelflauten, zu deren Überbrückung Brennstoffe für den Betrieb von BHKW's benötigt werden. Wenn diese erneuerbar sein sollen, werden diese werden das importierte Electrofuels sein. Dieser Ausgleichsstrom hat wirkungsgradbedingt Stromgestehungskosten von über 25 Ct/kWh.

Um die Produktion von Electrofuels in Mitteleuropa zu attraktivieren, sollte der Strompreis für die PtF-Anlagen ca. 50 % unter den Gestehungskosten liegen, um den Standortvorteil von Wüstenländern auszugleichen. Diese 50 % Ermäßigung lässt sich als Abgeltung des Synergienutzens darstellen. Ob dies tatsächlich ausreicht, sollte in einer weiteren Untersuchung geklärt werden.

Die Herausforderung für die Regulatoren der Energiewirtschaft wird es sein, die verzweigten Synergieeffekte fair zu bewerten und in einem entsprechenden Modell zum Einklang zu bringen. Ein Ansatz könnte über variable Netzkosten erfolgen, welche in der Obhut des Staates liegen.

LITERATUR

Agora (2018) Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, 2018,
https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/
Die_Kosten_synthetischer_Brenn_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_Kosten_strombasierter_Brennstoffe_WEB.pdf – abgerufen am 9.10.2020

BLD (2019) BLD - Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, Klimaschutzreport 2019, https://www.bdl.aero/de/publikation/
klimaschutzreport/ - abgerufen am 9.10.2020

Christian Re., Feichtinger R., Christian Ru., Bolz R., Windsperger A., Hummel M., Weish P., Pfnier E. (2011) Zukunftsfähige Energieversorgung für Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2011

E-Control (2019) Stromstatistik, Homepag von E-Control, www.e-control.at/de/statistik/strom/betriebsstatistik, zuletzt abgerufen 3.11.2019

Energiewenderechner (2020) Infos zu RESYS-Tool, Energiewenderechner, Akaryon GmbH, 8665 Langenwang, abgerufen am: 9.10.2020 http://www.energiewenderechner.at/ - Infos zu RESYS-Tool

PVGIS (2019) https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html, abgerufen am 12.11.2019

Stanzer G., Novak S., Dumke H., Plha S., Schaffer H., Breinesberger J., Kirtz M., Biermayr P., Spanring C. (2010) REGIO ENERGY - Regionale Energieszenarien erneuerbare Energiepotenziale in den Jahren 2012/2020

Statistik Austria (2020) Energiebilanzen, Statistik Austria, abgerufen am: 9.10.2020 https://www.statistik.at/web_de/statistiken/index.html

Sterner M., Stadler, I., (2017) Energiespeicher-Bedarf, Technologien, Integration, Springer Berlin-Heidelberg, Berlin-Heidelberg

Streicher W.; Schnitzer H., Titz M., Tatzber F., Heimrath R., Wetz I., Hausberger S., Haas R., Kalt G., Damm A., Steininger K. W., Oblasser S. (2010) Energieautarkie für Österreich 2050. Endbericht, Österreichischer Klima- und Energiefonds, Wien,

Sunfire (2016) www.sunfire.de/de/anwendungen/kraftstoffe , 9.9.2016

Veigl A. (2017) Energie- und Klimazukunft Österreich: Szenario für 2030 und 2050, WWF, Wien,

WDDB (2018) Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag, E-Fuels WD 5-3000-008/18, 2018, www.bundestag.de/resource/blob/544092/dab1b2ac5f0264e4b35ea370d197922e/wd-5-008-18-pdf-data.pdf – abgerufen am 9.10.2020

Kontaktdaten:
Günter Wind
Mühlangergasse 10, 7000 Eisenstadt
Email: g.wind@ibwind.at

Session 2b

Dekarbonisierungslösungen für Quartiere

Co-benefits of nearly zero energy buildings

Höfler, Weiß / AEE INTEC / AT

Net Zero Carbon Built Environment. Ein systemischer Ansatz zur Unterstüt-zung von Entscheidungsprozessen in der Entwurfsphase von Gebäuden

Scherz, Passer, Kreiner / TU Graz / AT

Cost and Greenhouse Gas optimization of urban districts using parametric cal-culations

Venus, Leusbrock, Mauthner / AEE INTEC / AT

Co-benefits of nearly zero energy buildings

R. Höfler, T. Weiß
AEE INTEC, Gleisdorf, Austria

ABSTRACT: Cost optimal and nearly zero energy performance levels are principles initiated by the European Union (EU) directive on the energy performance of buildings, which was revised in 2010. These will be a major driver in the construction sector in the coming years, as all new buildings in the EU are expected to be nearly zero energy buildings (nZEB). In order to achieve these goals, specific incentives are put into the focus of the building owners. These include significant energy savings and an increase in the value of the building. But, specific additional incentives, so called co-benefits, are often forgotten. Especially for office buildings, it is important to understand that co-benefits also have important roles. These are mainly concerned with indoor comfort, improved air quality, health benefits, employee satisfaction and increased productivity. In addition, lower burdens due to energy price fluctuations are expected, which will have a positive effect on operation and maintenance costs. These benefits improve the quality of nZEBs and the well-being of the users and offer economic advantages in addition to reducing energy costs.

1. INTRODUCTION

Specific additional incentives for nZEBs, the "co-benefits" are often forgotten. Co-benefits are the added benefits that can be achieved above and beyond the direct benefits of energy savings, climate protection, and lower operational costs. They are also referred to as "multiple benefits" or "synergies." These relate primarily to occupants who are in the buildings every day. They have a financial impact on nZEB office buildings as well. Fig. 1 shows the relevance of different co-benefits and how they are structured in terms of relevance for business cases and difficulty of quantification.

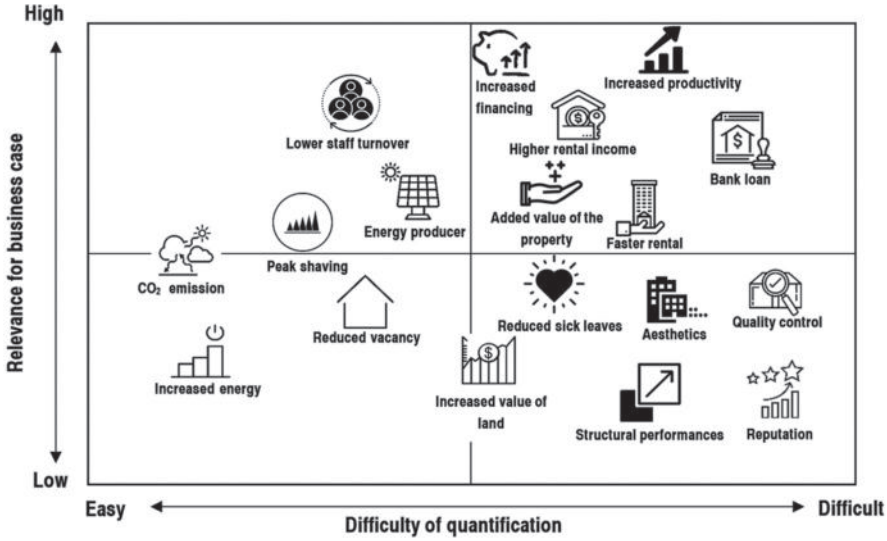


Fig. 1: Co-benefits structured in terms of relevance for the business case and difficulty of quantification.

The advantages of these co-benefits can be very complex because the research is in its early stages. It is often difficult to find statistically sound robust values that allow individual co-benefits to be quantified. However, some studies do serve as a basis for such quantifications. Recent papers address employee turnover and satisfaction (Miller et al. 2009), productivity (Hedge et al. 2014; Thatcher & Milner 2014), and absenteeism (Singh et al. 2010) provide estimations for the implementation of co-benefit evaluation.
Studies show that employees in nZEBs perceive positive effects from their working environment and productivity (Thatcher 2014; Singh et al. 2010). In one case, a 10,000 m² office building, a 0.3 % increase in productivity of was reported, equivalent to 8 €/(m²a). Another study has noted a decline in absentee-ism in nZEBs (Thatcher 2014).

In addition to well-being and productivity, higher revenues from rent or sales may be expected from nZEBs (Bleyl et al. 2017) reviewed previous studies and concluded that higher rent income might range roughly between 5 % and 20 %. Furthermore, higher market valuations may range from under 10 % up to 30 %.
In order to obtain a targeted overview of the users' understanding of co-benefits, a survey was launched as part of the 2020 EU Horizon project CoNZEBs (2017-2019). The focus was placed on indoor air quality, comfort, building location, and low energy costs (Zavrl et al. 2019).
Interests, target criteria, and co-benefits vary significantly depending on stakeholder perspectives. To achieve low heating costs, for example, the tenant is interested in low rental and operating costs and therefore a good energy standard. As a general rule, the building contractor aims to keep his construction costs low. For properties used by the owner, both cost components are essential – the initial investment and the operating costs. For public owners and users, the total life cycle costs and effects (e.g., CO_2 emissions) are of interest.

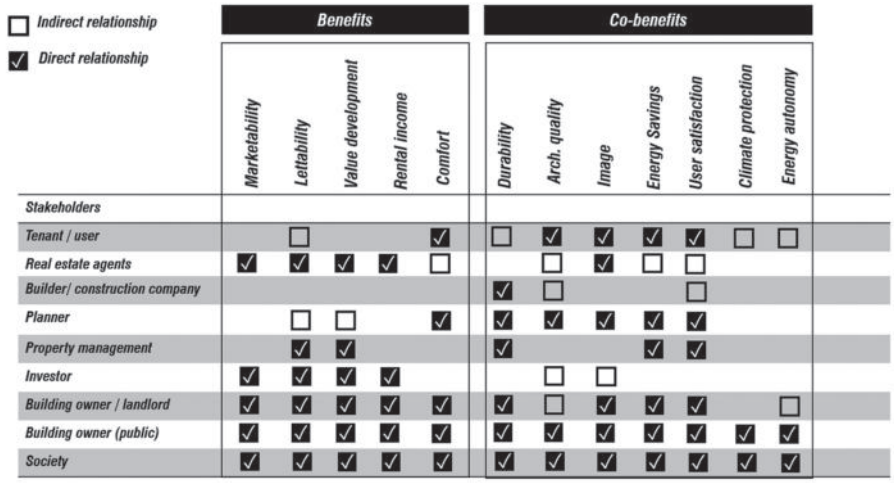


Fig. 2: Stakeholder related benefits and co-benefits of nZEBs.

To assess the direct monetary value of a building, there are various co-benefits for the individual stakeholders, which often cannot be assessed directly in monetary terms and therefore do not appear in the life cycle cost analysis. These concern marketability, rentability, value development, and comfort as well as image, climate protection or regional goals such as energy autonomy. As far as possible, these advantages and additional benefits should be taken into account by the various stakeholders in the relevant decision-making process. These additional criteria can often overlap with the main criteria. An example is the use of an air-source heat pump in a very noise-sensitive environment. It may perform relatively well in terms of energy and life cycle costs, but it can cause problems due to increased noise pollution on the property and adjacent land. For this reason, it is crucial to quantify the added value of nZEBs in monetary terms

by communicating and presenting business opportunities in a way that potential investors may weigh the pros and cons (Bleyl et al. 2017). Fig. 2 shows some stakeholder related benefits and co-benefits of nZEBs which can overlap.

2. METHODOLOGY

This chapter deals with the co-benefits associated with nZEBs and their (presently) underestimated positive effects on the payback time of nZEB investments and improved occupant satisfaction.

2.1 COST-BENEFIT ANALYSIS OF NZEBS FOR PROJECT DEVELOPERS

Using the calculation of Berggren, Wall, and Togerö (2017), effects of various co-benefits on the life cycle costs of nZEB were quantified. The following formula (1) explains the procedure of these calculations.
The value of reduced energy consumption and exported energy described in the first formula summarizes the reduced energy costs (REC). For this purpose, the profitability of the increased costs associated with increased energy efficiency and the environmental values of the building were evaluated. In addition, investment costs were compared with energy efficiency and other sustainable values. Maintenance and renewal costs are not included in this formula.

$$REC = \sum \frac{EI \cdot \alpha + EE \cdot \beta}{\left(1+\frac{r-i-\gamma}{1+i+\gamma}\right)^t} \quad (1)$$

Where:

EI	reduced imported energy
EE	increased exported energy
α	energy tariff of EI
β	energy tariff of EE
r	the nominal discount rate
i	the inflation rate
γ	increased in energy tariffs

2.2 SENSITIVITY ANALYSIS

Within CRAVEzero, a sensitivity analysis (SA) was performed for the investigated case studies, to identify which input parameters affect the LCC the most. This includes the implications of uncertainty related to assumptions on input parameters and boundary conditions. The same methodology has been adopted here to offer better insight into the co-benefit analysis developed within the CRAVEzero framework and to determine the impact of the co-benefits on the value of a nZEB.

The procedure for quantifying the co-benefits analysis was used to perform the SA of one office building, Aspern IQ in Vienna, Austria., Among the quantified parameters, not all of the baseline values from literature could be found. For this reason, only a minor fraction of the listed co-benefits could be investigated with the SA.

The SA workflow was designed as follows:

1. Input values and variation ranges must be selected. Since literature data on this subject is scarce/difficult to rely on, input parameters have been varied over a predefined range; in this case, +-10 %.
2. SA requires selecting an output in order to measure its value when the input varies. The tool calculates the savings generated by the positive action of the co-benefits on the business value. These savings are used to calculate the time needed to pay back the additional investment for the nZEB. The accumulated total savings after 30 years have been chosen as output for the SA.

3. The analysis was performed applying two methodologies. The first one consists of a differential sensitivity analysis. In the second step, the elementary effects (EE) method was implemented.

2.2.1 Differential sensitivity analysis (DSA)

This method belongs to the class of the One Factor At a Time (OAT) screening techniques. In differential analyses, all parameters are set equal to their baseline value. The impact on the LCC is then investigated one parameter at a time, keeping the other parameters fixed. The sensitivity index (s%) is calculated as follows:

$$s\% = \frac{\frac{\Delta O}{O_{un}}}{\frac{\Delta I}{I_{un}}} \quad (2)$$

Where:

ΔO the output variation
O_{un} the output baseline value
ΔI the input variation
I_{un} the input baseline value.

2.2.2 Elementary effects method (EE method)

The EE method proved to be a very good compromise between accuracy and efficiency (Campolongo, Cariboni, & Saltelli, 2007), since it ensures a decent exploration of the design space with a reduced number of simulations. SA can be carried out for different combinations of input values.

An elementary effect is defined as a change of the output caused by a change in a single input parameter while keeping all other model parameters fixed. As pointed out in Hedge et al. (2014), to obtain robust sensitivity measures, more elementary effects per parameter have to be computed, varying directions of change and base values. Nevertheless, only a reduced part of the possible elementary effects can be analysed; therefore, a Design of Experiment (DoE) has to be generated to carefully select the combinations. The mean elementary effect associated with a factor i is then given by the average of the single elementary effect (EE) associated with that factor:

$$\mu_i^* = EE_i = \frac{1}{r}\sum_{j=1}^{r}\left|EE_i^j\right| \quad (3)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{r-1} = \frac{1}{r}\sum_{j=1}^{r}\left(EE_i^j - \mu_i\right)^2 \quad (4)$$

Where

μ_i^* the absolute mean of the single elementary effects associated with factor i
σ_i^2 the variance of the elementary effects associated with factor i.

The main limitation is that, while the impact of a given variable is investigated, the other parameters remain unchanged. Even if the interactions of the parameters cannot be investigated from a global perspective, this characteristic can determine which parameter causes the greatest effect.

3. CASE STUDY

A case study from the Horizon 2020 project CRAVEzero was used for the co-benefit analyses, as detailed data on individual buildings could be obtained on the basis of industrial partners involved in the planning and/or the construction or operating phase of the buildings.

3.1 ASPERN IQ

Aspern IQ is located in Vienna's newly developed urban lakeside area "Aspern" - Austria's largest urban development project and also one of the largest in Europe. The building was designed in line with Plus

Energy standards. It was conceived as a flagship project to showcase the approach to creating a plus energy building which is adapted to locally available materials and offers the highest possible level of user comfort while meeting the demands of sustainability.

In the Aspern IQ reference building, to filter out the influences of the individual co-benefits, the economic and energetic building data were used to map the influences as accurately as possible. A parametric cost-benefit analysis (with changing individual parameters of the co-benefits) was performed to see how the added values affected the project. The assumed property value was determined using a comparative value method with comparable buildings in Austria.

Tab. 1: Data of the reference building

Financial		
Residential/non residential	Non-residential	
Saleable / rentable area	6,600.00	m²
Expected sales year of property	30	years
Assumed property value	3,914.00	€/m²
Rents for tenants	144.00	€/(m²a)
Expected yield	10	%
Rental or owner-occupation	Rental	
Estimated vacancy rates	6	%
Number of employees	250.00	employees
Energy		
Treated floor area	6,633.00	m²
Heating demand	50.00	kWh/(m²a)
Cooling demand	10.00	kWh/(m²a)
Electricity demand	40.00	kWh/(m²a)

Because this is a nZEB, there are economic aspects (e.g. additional costs and energy targets) which cannot be ignored under any circumstances. These aspects are shown in Tab. 2.

Tab. 2: Aspects based on high-quality nZEBs

Financial		
Additional nZEB costs	171.60	€/m²
Energy		
Heating demand	21.00	kWh/(m²a)
Cooling demand	2.00	kWh/(m²a)
Electricity demand	18.00	kWh/(m²a)
PV yield	14.55	kWh/(m²a)
PV yield: self-consumption	10.00	kWh/(m²a)

Based on this building data, the different co-benefits were considered in Aspern IQ. Calculation results with and without the consideration of co-benefits clearly show the influence of the individual parameters on the

overall cost curve over 30 years – especially the breakeven of the additional nZEB investments, as can be seen in Fig. 3. The following list shows the applied co-benefits.

- Yield reduction due to high quality nZEB
- Reduced vacancy
- Higher rent
- Faster rental of the building
- Reduced maintenance costs
- Amount of press
- Increased productivity
- Lower staff turnover
- Reduced sick leaves

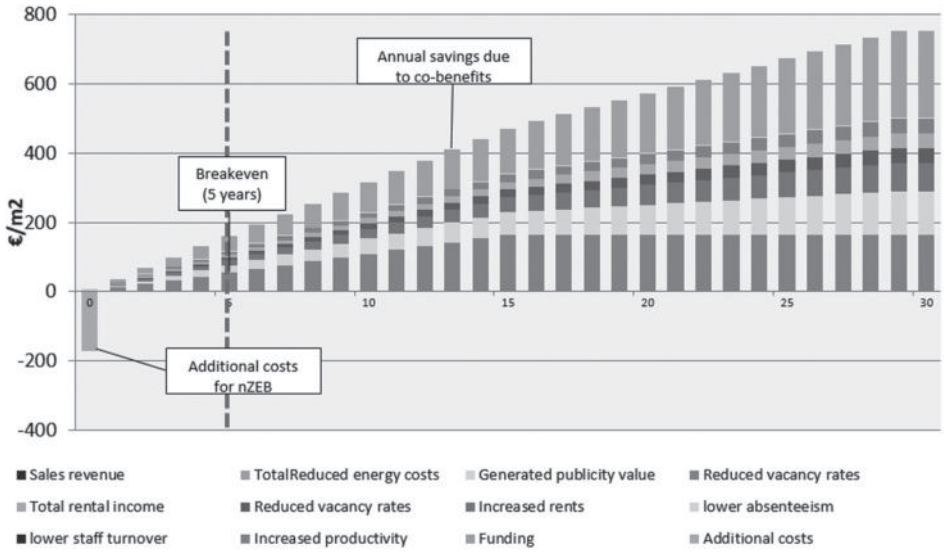


Fig. 3: Payback time and breakeven point under consideration of co-benefits over 30 years.

3.2 RESULTS

SA was performed first with the DSA method and then the EE method. For each, the two approaches for the baseline values previously illustrated, are displayed. Moreover, the discount rate has been inserted as a variable parameter to add the effect of its variation. DSA calculated the sensitivity index for three scenarios: discount rates 1, 2, and 3 %. In the EE method, the discount rate was added to the investigated parameters.

In the first approach, where real values for the baselines are adopted, the three most influencing co-benefits are "higher rent," "yield reduction due to a high quality nZEB," and "reduced vacancy". However, very different outcomes are obtained if the second approach is considered: the most influencing values by far are "yield reduction due to hq nZEB" and "increased productivity."



Fig. 4: Sensitivity index related to real values baseline – discount rates 1, 2 and 3 %.

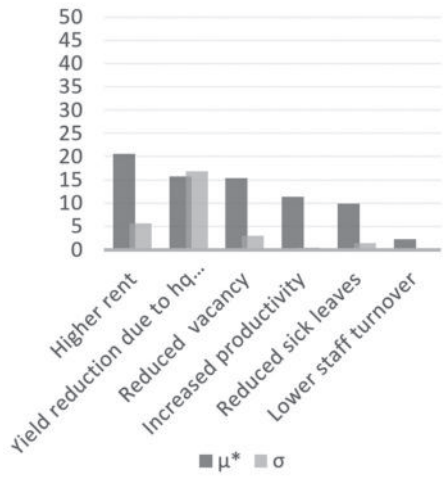


Fig. 5: μ and σ related to real values baseline.*

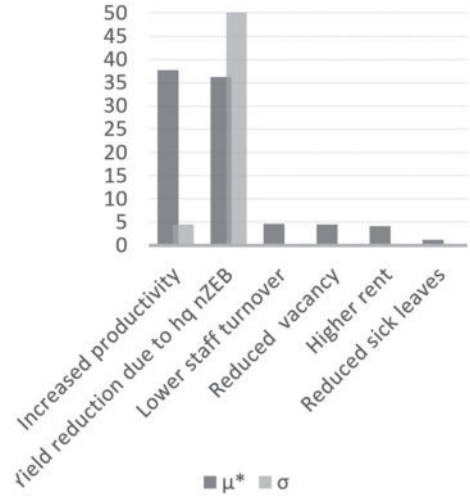


Fig. 6: μ and σ related to common baseline 1.*

In Berggren et al. (2017), increased productivity is indicated as the co-benefit with the largest relative impact. This statement is confirmed by results obtained in the second approach, which applies a fixed variation of 1 % equal to all co-benefits. A productivity increase of 1 % corresponds to 22 €/(m²a) of labour cost savings, assuming an average monthly salary per employee of 3,000 € and employer & social costs (excl. holiday allowance) equal to 60 %.

Nevertheless, the questions that should be further investigated are "How much can the productivity actually increase vary?" and "Is a productivity increase of 1 % plausible?" Bleyl et al. (2017) state that in some cases a rent increase related to a green building can range from below 4 % to 21 %. For this analysis, a 5 % rent increase has been conservatively selected for the approach using baseline values from the literature. Nevertheless, in this case, this co-benefit showed the highest sensitivity index and μ*.

4. CONCLUSION

The co-benefits have been analysed in particular with regard to their influence on the payback time and profit over a period of 30 years for the Aspern IQ case study. Increased productivity of the employees due to higher building quality and comfort (and possibly a higher rental income due to a better building standard) are the most important factors with regard to the payback time and profit. Even influences which are usually not considered and are harder to quantify (e.g., the productivity of employees, reduced sick leaves or vacancies) can significantly influence the economic success of a nZEB.

The case study shows that it may be hard to find it profitable to build a nZEB if one only account for improved energy performance or a single co-benefit. Profitability is significantly affected by more values than energy savings (that cannot balance the initial extra investment to reach the target nZEB if a short time perspective for evaluating profit is applied). However, the study shows that it may be very profitable to build nZEBs if one accounts for several green values.

LITERATURE

Berggren B., Wallb M., Togerö Å. (2017) Profitable Net ZEBs – How to break the traditional LCC analysis. WEENTECH Proceedings in Energy, 5(December 2017), p. 9–16.

Bleyl J., Bareit M., Casas M., Coolen J., Bruyn B. D., Hulshoff A., Robertson M. (2017) Building deep energy retrofit: Using dynamic cash flow analysis and multiple benefits to convince investors. Paper presented at the eceee 2017 Summer Study on Energy Efficiency: Consumption, Efficiency, and Limits, Hyères.

Campolongo, F., Cariboni, J., Saltelli, A. (2007) An effective screening design for sensitivity analysis of large models. Environmental Modelling & Software 22 (10), p. 1509–1518.

Hedge A., Miller L., Dorsey J. A. (2014) Occupant comfort and health in green and conventional university buildings. Work, 49 (3), p. 363–372.

Miller N. G., Pogue D., Gough Q. D., Davis S. M. (2009) Green Buildings and Productivity. Sustainable Real Estate, (1), p. 65–89.

Singh A., Syal M., Grady S. C., Korkmaz S. (2010) Effects of green buildings on employee health and productivity. American Journal of Public Health, 100 (9), p. 1665–1668.

Thatcher A., Milner K. (2014) Changes in productivity , psychological wellbeing and physical wellbeing from working in a ' green ' building. 49, p. 381–393.

Zavrl M. Š., Jaćimović M., Erhorn-Kluttig H., Erhorn H., Illner M., Thomsen K. E., Fasano G. (2019) End-users' opinion on living in multi-family nearly zero-energy buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 609 (7).

Contact:
Regina Höfler
Feldgasse 19
8200 Gleisdorf
Email: r.hoefler@aee.at

Net Zero Carbon Built Environment

Ein systemischer Ansatz zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen in der Entwurfsphase von Gebäuden

M. Scherz, A. Passer, H. Kreiner
Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen - Technische Universität Graz, Österreich

ABSTRACT: By limiting global warming to 2 °C, the climate goals set by the United Nations in 2015 (Agenda 2030) will clearly be missed. The shrinking of our GHG budget has shown that the implementation of a weak sustainability concept - i.e. equal consideration of all sustainability dimensions (environmental, economic and social) - is not sufficient to meet the requirements of the Sustainable Development Goals (SDGs). Based on the concept of strong sustainability focusing on the environmental dimension of sustainability this article highlights the challenges in the achievement of a Net Zero Carbon Built Environment by the implementation of a systemic design model in the early design stage of buildings. The visualisation of individual planning practices and their systemic behaviour in relation to other planning practices respectively to the SDGs support planners to manage the complexity and to reduce the additional effort within the implementation of sustainability aspects in the early design stage of buildings. Next to the visualisation of the environmental impacts of planning practices, effects on other SDGs can be highlighted. Furthermore, the planner is supported in the decision-aiding processes in the early design stage. With the application of the systemic design model and the implementation of identified planning practices the contribution to the fulfilment of Agenda 2030 increases.

1. EINLEITUNG

Das nachhaltige Entwicklungsziel (engl. Sustainable Development Goal – SDG) 11 *„Nachhaltige Städte und Gemeinden"* und damit die Planung von Gebäuden im weiteren Sinne steht in direktem Kontakt mit den Grundlagen des menschlichen Lebens. Es befasst sich mit entscheidenden Aspekten des täglichen Lebens, darunter Wohnen, Mobilität, Grundversorgung und Lebensqualität, die teilweise auch von anderen SDGs abgedeckt werden. Infolge der fortschreitenden Urbanisierung sieht sich SDG 11 einem der Megatrends des 21. Jahrhunderts gegenüber. Bis 2050 werden Prognosen zufolge bis zu 70 % der Weltbevölkerung in Städten leben (Bauer 2014, United Nations 2018). Diese allgemein anerkannte Beobachtung ist jedoch von besonderer Bedeutung, da sie nicht nur auf die Verbesserung der gegenwärtigen städtischen Infrastruktur und des Lebens in den Städten abzielt, sondern auch auf die Gestaltung nachhaltiger Städte und Gemeinden, die jetzt und in Zukunft gebaut werden.

Im SDG 11 geht es unter anderem um den Zugang zu leistbarem Wohnraum, Verkehr und Grünflächen, partizipative Raumgestaltung und integrative territoriale Gerechtigkeit. Die zunehmende Urbanisierung führt daher nicht nur zu weiteren Bautätigkeiten, sondern erfordert auch ganz besondere Anstrengungen im Sinne eines Beitrags zu (widerstandsfähigeren) Städten mit hoher Ressourcen- und Energieeffizienz, zur Erreichung der Klimaziele (Austrian Panel on Climate Change (APCC), 2018; Masson-Delmotte et al. 2018) und zur integrativen Gestaltung der sozialen Nachhaltigkeitsdimension (Belina et al. 2018).

Städte weltweit verbrauchen derzeit etwa 70 % aller Ressourcen und verursachen mehr als 60 % aller Treibhausgas (THG)-Emissionen. Daher ist die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und die Verringerung der globalen THG-Emissionen entscheidende Faktoren für die Erreichung der Ziele der Agenda 2030. Die durchschnittlichen THG-Emissionen in Österreich sind zwischen 2010 und 2018 im Vergleich zu den durchschnittlichen Emissionen zwischen 1990 und 1999 gestiegen. In Bezug auf den Klimazielpfad der EU

28 liegt Österreich (im Vergleich zu den anderen EU-Mitgliedsstaaten) im letzten Drittel (Kirchengast & Schleicher 2019). Ein genauerer Blick auf die globale Ebene zeigt die sektorenübergreifende Relevanz des Bausektors und insbesondere von Gebäuden. Rund 39 % (siehe Abb. 1) der energie- und prozessbedingten THG-Emissionen aus dem Jahr 2017 entfallen auf den Bausektor (Global Alliance for Buildings & Construction 2020).

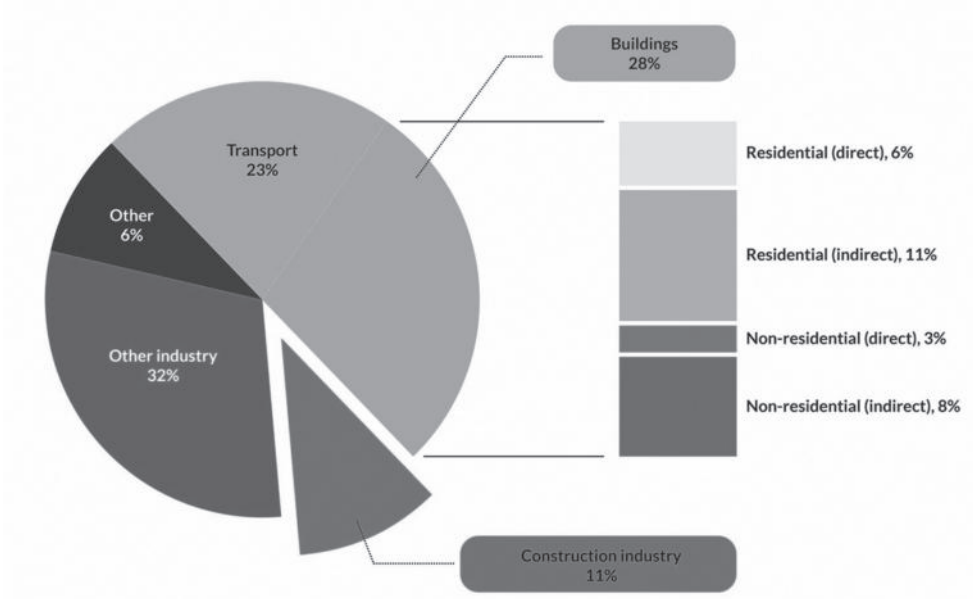


Abb. 1: Globale Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren aus dem Jahr 2017 (i. A. a. Global Alliance for Buildings & Construction 2020)

Die aktuellen Forschungsergebnisse der Konferenz Sustainable Built Environment (SBE19 Graz) haben gezeigt, dass die notwendige Organisation und Unterstützung für eine nachhaltige Stadtentwicklung, lokale Entscheidungsträger und Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette im Bauwesen komplexe Herausforderungen darstellen oder darstellen werden (Passer et al. 2019). In diesem Zusammenhang wird auf den dringenden Bedarf an prozessbasierter Entscheidungsunterstützung (engl. decision-aiding) hingewiesen, die die in Städten und Gemeinden auftretenden dynamischen Faktoren (z.B. unterschiedliche Stakeholder-Interessen, eine Vielzahl von Einflussaspekten und deren systemisches Verhalten) beherrschbar macht und den lokalen Entscheidungsträgern Handlungsempfehlungen für die Realisierung nachhaltiger Städte und Gemeinden bietet.

2. METHODIK

Es wird veranschaulicht, wie Planungspraktiken in der Entwurfsphase von Gebäuden für die Erreichung der SDGs mit Hilfe des in diesem Artikel beschriebenen systemischen Entwurfsmodells identifiziert werden können. Dazu konzentrieren wir uns in Abschnitt 2.1 auf die frühe Entwurfsphase von Gebäuden im Zusammenhang mit den SDGs und analysieren in Abschnitt 2.2 die Ziele der SDGs und ihre Indikatoren. In Abschnitt 2.3 werden die Synergien und Trade-offs ausgewählter Planungspraktiken durch die Anwendung der verwendeten Kausalschleifenuntersuchung.

2.1 FRÜHE ENTWURFSPHASE VON GEBÄUDEN IM ZUSAMMENHANG MIT DEN SDGS

In der frühen Entwurfsphase von Gebäuden müssen grundlegende Entscheidungen (z.B. Materialwahl, Raumanordnung, Grünflächen, Regenwassernutzung, Wahl der Energieträger, Kompaktheit des Gebäudes) für die spätere Gebäudequalität getroffen werden. Neben SDG 11 beeinflussen die Bauindustrie und damit die Entwurfsphase von Gebäuden auch andere SDGs wie *„Bezahlbare und saubere Energie"* (SDG 7) im Hinblick auf die verwendeten Energieträger und den Energieverbrauch in der Nutzungsphase von Gebäuden, *„Nachhaltiger Konsum und Produktion"* (SDG 12) im Hinblick auf die verwendeten Baumaterialien und ihre Lebensdauer im Sinne der Kreislaufwirtschaft, *„Maßnahmen zum Klimaschutz"* (SDG 13) im Hinblick auf die über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden emittierten THG-Emissionen (graue THG-Emissionen und betriebliche THG-Emissionen) und die *„Leben am Land"* (SDG 15) im Hinblick auf die zusätzliche Landnutzung für neue Gebäude.

2.2 KRITIK ZU DEN UN SDG-INDIKATOREN ZUR ERREICHUNG EINER DEKARBONISERTEN BAUWIRTSCHAFT

Im Rahmen des SDG-Targets 11.6 *„Bis 2030 die von den Städten ausgehende Umweltbelastung pro Kopf senken, unter anderem mit besonderer Aufmerksamkeit auf der Luftqualität und der kommunalen und sonstigen Abfallbehandlung"* wird die emissionsbezogene Umweltverschmutzung durch die Reduzierung von Feinstaub (Indikator 11.6.2) adressiert. Dies ist zu restriktiv, da die Anteile der emissionsbedingten Umweltbelastungen aus dem Bausektor nicht ausreichend berücksichtigt werden. Aufgrund der langen Lebensdauer von Gebäuden werden die heute angewandten (Planungs-)Praktiken auch im Jahr 2050 und darüber hinaus noch Auswirkungen haben.

Die planungs- und baubegleitende Berücksichtigung von THG-Emissionen während des gesamten Lebenszyklus von Gebäuden ist auf dem Weg zu einer dekarbonisierten Bauwirtschaft von entscheidender Bedeutung. Neben der ganzheitlichen Betrachtung der THG-Emissionen muss zudem zwischen grauen und betrieblichen THG-Emissionen von Gebäuden unterschieden werden. Da die THG-Emissionen in SDG 11 bisher von keinem Indikator erfasst werden, wäre hier die Einführung eines zusätzlichen Indikators zur ganzheitlichen Erfassung der *THG-Emissionen von Gebäuden* dringend erforderlich.

2.3 KAUSALSCHLEIFENUNTERSUCHUNGEN ZUR VISUALISIERUNG VON SYNERGIEN UND ZIELKONFLIKTEN DER PLANUNGSPRAXIS

Um die Wechselwirkungen zwischen den Planungspraktiken identifizieren zu können, sind zwei Teilschritte notwendig. Der erste Schritt besteht darin, die Auswirkungen (Synergien und Zielkonflikte) aller gewählten Planungspraktiken auf die SDG-Indikatoren und damit auf die SDG-Targets bzw. SDGs zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen des UniNEtZ-Projekts (Allerberger et al. 2020) relevante Stakeholder befragt und die Wechselwirkungen in gemeinsamen Workshops identifiziert. Für die Identifizierung der Interaktionen wurde die Know-why-Methode (Neumann, 2013) angewandt. Diese Methode erfordert Antworten auf die vier Know-why-Fragen, die für jede Interaktion separat beantwortet werden müssen. Die vier Fragen lauten wie folgt:

- Was führt direkt zu mehr von einem Faktor?
- Was führt direkt zu weniger von einem Faktor?
- Was führt in der Zukunft direkt zu mehr eines Faktors?
- Was führt in der Zukunft direkt zu einem weniger eines Faktors?

Im zweiten Schritt müssen die Wechselwirkungen zwischen den SDG-Targets bzw. den SDGs bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden bestehende Studien (LeBlanc 2015; Collste et al. 2017; Koch & Krellenberg 2018; Körfgen et al. 2019; Miola et al. 2019; Scherer et al. 2018; Wieser et al. 2019) verwendet, analysiert und zusammengefasst.

3. SYSTEMISCHES ENTWURFSMODELL

Die Modellierungsstrategie, welche für die Entwicklung des systemischen Entwurfsmodells angewandt wurde, basiert auf den drei Nachhaltigkeitsstrategien (Konsistenz, Effizienz und Suffizienz), die gleichermaßen zur Erreichung des übergeordneten Ziels (einer dekarbonisierten Bauwirtschaft) beitragen sollen. Für die Umsetzung jeder dieser Strategien gibt es verschiedene Möglichkeiten (Planungspraktiken) im Zuge der Entwurfsphase von Gebäuden, wobei eine Planungspraktik zu mehreren Nachhaltigkeitsstrategien positive bzw. negative Auswirkungen haben kann (siehe Abb. 2).

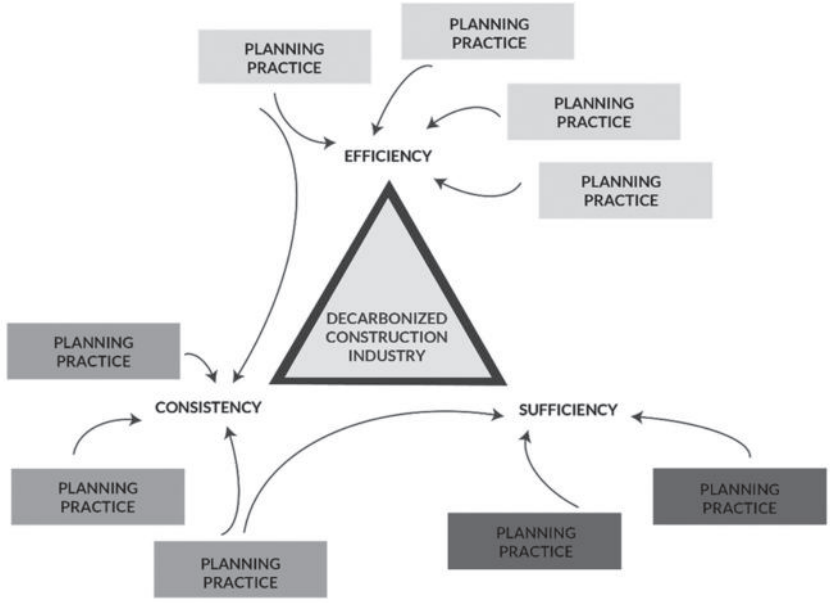


Abb. 2: Nachhaltigkeitsstrategien zur Erreichung einer dekarbonisierten Bauwirtschaft

Tab. 1 zeigt einen Auszug von - den Nachhaltigkeitsstrategien zugeordneten - Planungspraktiken.

Tab. 1: Exemplarische Auflistung von Planungspraktiken

Planungspraktik	Nachhaltigkeitsstrategie
Einsatz hocheffizienter Energietechnik	Effizienzstrategie
Optimieren des Energieverbrauchs	Effizienzstrategie
Nutzung erneuerbarer Energiequellen	Konsistenzstrategie
Verwendung von kohlenstoffarmen Materialien	Konsistenzstrategie
Weniger Wohnfläche	Suffizienzstrategie
Weniger heizen/kühlen	Suffizienzstrategie

3.1 INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN SDGS/SDG-TARGETS

Das systemische Entwurfsmodell berücksichtigt auch die Wechselwirkungen zwischen SDGs bzw. SDG-Targets. Nach Analyse und Zusammenstellung der relevanten Literatur wurden die bestehenden SDG-Modelle (Neumann, 2019; Neumann, 2018) ergänzt und dienten als Grundlage für das entwickelte systemische Entwurfsmodell. Abb. 3 zeigt einen Auszug des systemischen Entwurfsmodells.

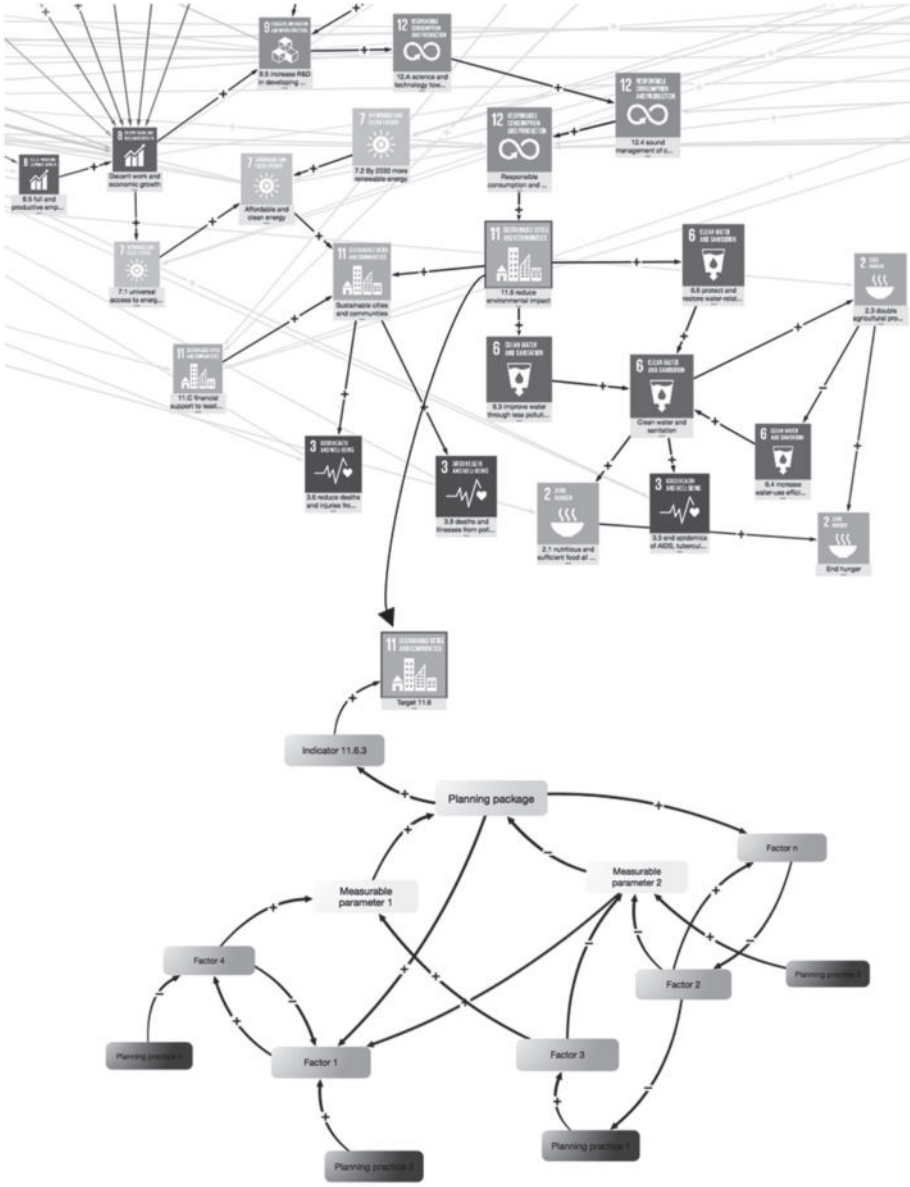


Abb. 3: Auszug aus dem systemischen Entwurfsmodell: Teil SDG (oberer Teil) und Teil Planungspraktiken (unterer Teil)

Das systemische Entwurfsmodell besteht aus einem SDG-Teil (siehe Abb. 3 - oberer Teil) und einem Teil für Planungspraktiken (siehe Abb. 3 - unterer Teil). Der SDG-Teil umfasst 215 Modellelemente und 469 Verbindungen. Der Modellteil der Planungspraktiken ist das Ergebnis eines bereits abgeschlossenen Forschungsprojekts, bei welchem das Modell mehr als 850 Modellelemente und mehr als 3190 Verbindungen umfasste. Detaillierte Erläuterungen zur methodischen Entwicklung des systemischen Entwurfsmodells und zur Bedeutung der einzelnen Modellelemente sind in Kreiner & Passer (2019) zu finden.

3.2 MODELLIERUNGSPRINZIPIEN

SDG 11 bzw. SDG-Target 11.6 dienen zur Veranschaulichung des methodischen Ansatzes und des entwickelten systemischen Entwurfsmodells. Die folgenden Modellierungsprinzipien wurden bei der Modellerstellung angewandt:

- Entwickelte Planungsbündel (Zusammenspiel von mehrerer Planungspraktiken) wirken entweder direkt auf einen Indikator oder - um die Modellebenen konsistent zu machen - auf Faktoren (Modellhilfselemente).
- Auf eine Planungspraktik kann nur eine messbare Variable (Messwert) wirken. Dieses Modellierungsprinzip ist für eine spätere Quantifizierung der Planungspraktiken notwendig.
- Faktoren (Modellhilfselemente) wirken direkt auf messbare Variablen (Messwerte) oder auf andere Faktoren (Modellhilfselemente).
- Die zur Umsetzung der Planungsbündel erforderlichen Planungspraktiken wirken sich direkt auf die messbare Variable (Messwert) oder auf einen Faktor (Modellhilfselemente) aus.

4. ERGEBNISSE

Um die Ergebnisse des systemischen Entwurfsmodells zu visualisieren, werden Tornado-Diagramme (siehe Abb. 4) und Erkenntnismatrizen (siehe Abb. 5) berechnet und dargestellt.

4.1 SYNERGIEN UND ZIELKONFLIKTE IN TORNADO-DIAGRAMMEN

Für alle Modellelemente können Tornado-Diagramme erstellt werden, die die positiven und negativen Auswirkungen von Planungspraktiken auf ein zentriertes/ausgewähltes Modellelement zeigen. Bei der Interpretation der Tornado-Diagramme ist es wichtig zu betonen, dass die (positiven oder negativen) Auswirkungen auf das zentrierte/ausgewählte Modellelement immer die direkten Auswirkungen darstellen. In Abb. 4 wurde eine ausgewählte Planungspraktik in das Zentrum des Modells gestellt. Die sprachliche Interpretation der türkisen Balken ist definiert als *„Mehr von dem zentrierten/ausgewählten Modellelement X führt direkt zu weniger von einem anderen Modellelement Y“*. Für die grünen Balken lautet die Definition: *„Mehr von dem zentrierten/ausgewählten Modellelement X führt direkt zu mehr von einem anderen Modellelement Y“*. Die Tornado-Diagramme können für drei Zeitspannen angezeigt werden (kurzfristig, mittelfristig und langfristig).

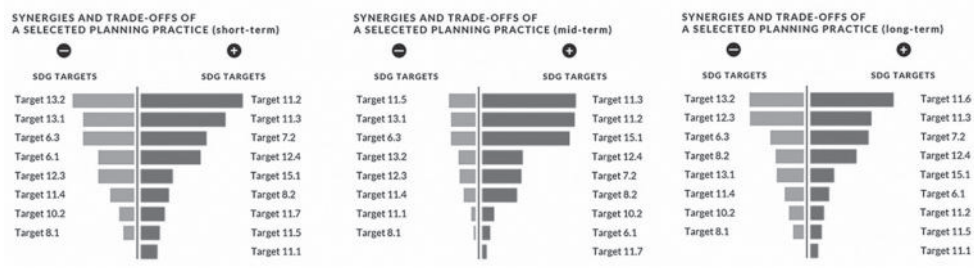


Abb. 4: Beispielhafte Darstellung der Synergien und Zielkonflikte einer Planungspraxis in Tornado-Diagrammen (kurz-, mittel- und langfristig)

4.2 EFFEKTE ÜBER DIE ZEIT IN ERKENNTNISMATRIZEN

Die Erkenntnismatrix enthält vier Ergebnisbereiche (blau, grün, rot und gelb). Innerhalb dieser Bereiche werden alle Modellelemente (Punkte) angezeigt, die auf ein zentriertes/ausgewähltes Modellelement X wirken. Aus der Gesamtsumme der direkten und indirekten Einflüsse, die sich aus der qualitativen Gewichtung der Wirkungsketten und zeitlichen Verzögerungen sowie aus den Auswirkungen von ausgleichenden und verstärkenden Schleifen ergeben, kann für jedes Modellelement der Einfluss anderer Modellelemente ausgegeben werden. Die horizontale x-Achse stellt die Summe aller Wirkungspfade dar. Die vertikale y-Achse zeigt Änderungen der Effekte aufgrund von Schleifen und Verzögerungen.

Die vier Ergebnisbereiche der Erkenntnismatrix können wie folgt interpretiert werden (siehe Abb. 5):

- schwarz: Modellelemente im schwarzen Bereich repräsentieren abnehmend negative Modellelemente. Das bedeutet, dass diese Modellelemente ihre negativen Auswirkungen im Laufe der Zeit verringern. Dies kann im Laufe der Zeit zu positiven Auswirkungen auf das zentrierte/ausgewählte Modellelement führen.
- dunkelgrau: Modellelemente im dunkelgrauen Bereich stellen zunehmend positive Modellelemente dar. Dies bedeutet, dass diese Modellelemente im Laufe der Zeit eine zunehmend positive Auswirkung auf das zentrierte/ausgewählte Modellelement haben werden. Diese Modellelemente können über die gesamte Zeitspanne keine negativen Auswirkungen entwickeln.
- hellgrau: Modellelemente im hellgrauen Bereich stellen zunehmend negative Modellelemente dar. Dies bedeutet, dass diese Modellelemente im Laufe der Zeit zunehmend negative Auswirkungen auf das zentrierte/ausgewählte Modellelement haben werden. Diese Modellelemente können über die gesamte Zeitspanne keine positiven Auswirkungen entwickeln.
- mittelgrau: Modell-Elemente im mittelgrauen Bereich sind abnehmend positive Modell-Elemente. Diese Modellelemente sind besonders kritisch zu betrachten, da sie anfangs positive Auswirkungen auf das zentrierte/ausgewählte Modellelement haben können, im Laufe der Zeit jedoch negative Auswirkungen auf das zentrierte/ausgewählte Modellelement entwickeln können.

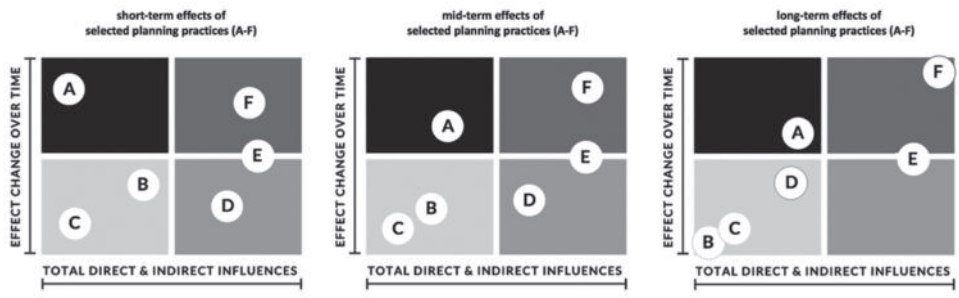


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung der kurz-, mittel- und langfristigen Auswirkungen ausgewählter Planungspraktiken in Erkenntnismatrizen

5. DISKUSSION UND AUSBLICK

Nachhaltiges Bauen bzw. die Anwendung der Prinzipien der nachhaltigen Entwicklung auf den Bausektor spielt aufgrund der enormen Material- und Energieströme und der damit verbundenen Umweltauswirkungen eine entscheidende Rolle. Ziel ist es, ein Gebäude bzw. eine Stadt ganzheitlich und unter Berücksichtigung ihres Lebenszyklus zu planen, zu bauen und zu betreiben, so dass es ein Gewinn für spätere Generationen und keine Erblast darstellt. Die jüngste Verlagerung hin zu mehr und mehr energieeffizienten Gebäuden bzw. Städten konzentriert sich zunehmend auf die Entwurfsphase neuer Gebäude im Zusammenhang mit der grauen Energie und den grauen Treibhausgasemissionen. Ein ganzheitlicher, integrativer

Ansatz auf Gebäude- bzw. Stadtebene erfordert die Zusammenführung der verschiedenen Anforderungen und Funktionalitäten der einzelnen Gebäudeelemente im Kontext eines größeren Ganzen. Um dies zu erreichen, sind spezifische Instrumente oder Strategien (Balouktsi 2018; Kreiner et al. 2018; Scherz et al. 2018) erforderlich, um diesen komplexen Herausforderungen gerecht zu werden. Der systemische Ansatz, der für die Entwicklung des systemischen Entwurfsmodells verwendet wird, wird auch zur Bewältigung der steigenden Komplexität unterstützen und den zusätzlichen Aufwand in der frühen Entwurfsphase reduzieren. Projektmanagern, Planern und Bauherren wird ein Startwerkzeug in die Hand gegeben, um Nachhaltigkeitsanforderungen bzw. Nachhaltigkeitsziele zu strukturieren, verständlich aufzubereiten und ein Monitoring aus einer ganzheitlichen Perspektive durchzuführen.

Aus heutiger Sicht scheint es, dass Österreich seine internationalen Klimaverpflichtungen und die europäischen Strategien (Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz und andere Makroziele) nur mit erheblichen Anstrengungen, d.h. mit wesentlich ehrgeizigeren, spezifischeren und belastbareren Maßnahmen, erfüllen kann. Dies bezieht sich vor allem auf den Übergang zu einem systemischen Ansatz in der Entwurfsphase von Gebäuden. Die derzeitige additive Umsetzung spezifischer Maßnahmen wird aufgrund des mangelnden systemischen Verständnisses der sich abzeichnenden Zielkonflikte nicht zur Erreichung der Ziele der Agenda 2030 führen. Die zunehmende Komplexität der Planungs- und Umsetzungsprozesse erfordert einen neuen, grundlegend anderen Ansatz für die Realisierung von nachhaltigeren Gebäuden oder Städten. Die Optimierung einzelner Teile (z.B. Gebäudeelemente) ist nicht die Summe der Optimierung des Ganzen (Gebäude).

Vor diesem Hintergrund ist eine Weiterentwicklung zu einer vernetzten, integrierten Nachhaltigkeitsbewertung im Bausektor unerlässlich, um die Entwicklung in Richtung einer dekarbonisierten Bauwirtschaft sicherzustellen.

LITERATUR

Allerberger F., Fehr F., Glatz I., Körfgen A.., Kromp-Kolb H., Lang R. & Stötter J. (2020) UniNEtZ – Universitäten und Nachhaltige Entwicklungsziele Perspektivenbericht.

Austrian Panel on Climate Change (APCC). (2018) Österreichischer Special Report Gesundheit, Demographie und Klimawandel (ASR18). Verlag der ÖAW.

Balouktsi, M. (2018) Principles and Tools for Designing Strategies for Sustainable Urban Development : A " Process-based " and " Action- oriented " Approach at Neighbourhood Level.

Bauer, Ch. (2014) Verdichtung in Städten - Theoretische Aspekte der urbanen Dichte und deren Umsetzung anhand eines Grazer Stadtquartiers. Masterarbeit. Graz University of Technology.

Belina, B., Naumann, M. & Strüver, A. (2018) Handbuch Kritische Stadtgeographie. Verlag Westfälisches Dampfboot.

Collste D., Pedercini M., Cornell S.E. (2017) Policy coherence to achieve the SDGs: using integrated simulation models to assess effective policies. Sustain. Sci. 12, p. 921–931. https://doi.org/10.1007/s11625-017-0457-x

Global Alliance for Buildings & Construction. (2020) GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction.

Kirchengast G., Schleicher S. (2019) Wo steht Österreich dzt. im Kontext der EU Länder?

Koch F., Krellenberg K. (2018) How to contextualize SDG 11? Looking at indicators for sustainable urban development in Germany. ISPRS Int. J. Geo-Information 7. https://doi.org/10.3390/ijgi7120464

Körfgen A., Glatz I., Maier S., Scherz M., Kreiner H., Passer A., Allerberger F., Kromp-Kolb H., Stötter, J. (2019). Austrian Universities and the Sustainable Development Goals. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 323, p. 12156. https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012156

Kreiner H., Passer A. (Eds.) (2019) Sustainable Design Process & Integrated Façades.

Kreiner H., Scherz M., Passer A. (2018) How to make decision-makers aware of sustainable construction?, in: Caspeele, R., Taerwe, L., Frangopol, D. (Eds.), Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering.

LeBlanc D. (2015) Towards Integration at Last? The Sustainable Development Goals as a Network of Targets.

Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews R., Chen Y., Zhou X., Gomis M., Lonnoy E., Maycock E., Tigno M., Waterfield T. (eds.) (2018) IPCC: Summary for Policymakers. Glob. Warm. 1.5°C. An IPCC Spec. Rep. impacts Glob. Warm. 1.5°C above pre-industrial levels Relat. Glob. Greenh. gas Emiss. pathways, Context Strength. Glob. response to Threat Clim. Chang. 1–21.

Miola A., Borchardt S., Neher F., Buscaglia D. (2019) Interlinkages and policy coherence for the Sustainable Development Goals implementation: An operational method to identify trade-offs and co-benefits in a systemic way. https://doi.org/10.2760/472928

Neumann K. (2019) Sustainable cities and communities – Best practices for structuring a SDG model. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 323, p. 12094. https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012094

Neumann K. (2013) "KNOW WHY" thinking as a new approach to systems thinking. Emerg. Complex. Organ. 15, p. 81–93.

Neumann K., Anderson C., Denich M. (2018) Participatory, explorative, qualitative modeling: application of the iMODELER software to assess trade-offs among the SDGs. Econ. Open-Access, Open-Assessment E-Journal 12, p. 1–19. https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2018-25

Passer A., Lützkendorf T., Habert G., Kromp-Kolb H., Monsberger M. (2019) SBE 19 Graz, Book of Abstracts.

Scherer L., Behrens P., de Koning A., Heijungs R., Sprecher B., Tukker A. (2018) Trade-offs between social and environmental Sustainable Development Goals. Environ. Sci. Policy 90, 65–72. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.002

Scherz M., Zunk B.M., Passer A., Kreiner H. (2018) Visualizing interdependencies among sustainability criteria to support multicriteria decision-making processes in building design. Procedia CIRP 69, p. 200–205. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.115

United Nations. (2018) World Urbanization Prospects 2018 [WWW Document]. URL https://population.un.org/wup/Maps/

Wieser A.A., Scherz M., Maier S., Passer A., Kreiner H. (2019) Implementation of Sustainable Development Goals in construction industry - a systemic consideration of synergies and trade-offs. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 323, p. 12177. https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012177

Kontaktdaten:
Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Marco Scherz, BSc
Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen, Technische Universität Grat
Waagner-Biro-Straße 100/XI
8020 Graz
Email: marco.scherz@tugraz.at

Cost and Greenhouse Gas optimization of urban districts using parametric calculations

D. Venus, I. Leusbrock, F. Mauthner
AEE - Institute for Sustainable Technologies, Gleisdorf, Austria

ABSTRACT: Buildings are a major source of greenhouse gas emissions. Reducing their energy use and associated greenhouse gas emissions is particularly challenging for the existing building stock. Within the IEA EBC Annex 75, cost-effective strategies are being developed to reduce greenhouse gas emissions and energy consumption of buildings in settlements and urban districts.

To derive these strategies, the research project includes calculations of generic and real districts to test different renovation scenarios and to investigate their impact on life cycle costs, primary energy demand and greenhouse gas emissions. This paper focuses on the investigation of a real district in Gleisdorf, Austria.

The investigated district is located in Gleisdorf near the railway station and consists of 26 buildings with a heterogeneous structure (regarding e.g. size of the buildings, use of the buildings, age of construction and heat consumption).

For the investigation, different renovation measures and scenarios were defined. Measures include the renovation of the building envelope (roof, façade and windows), two different ventilation scenarios (window ventilation and mechanical ventilation with heat recovery), new heating systems (decentralized natural gas heating, decentralized air source heat pumps and centralized district heating), measures for the use of solar energy (solar thermal and PV system) and in combination with the PV system also electric battery storage.

In the context of the present research, the brute force approach is applied to find optimal solutions in terms of the defined key performance indicators and includes all defined, and above mentioned renovation measures. So, in total, more than 19,500 scenarios were calculated and analyzed.

The results show a wide range between the minima and maxima of the three key performance indicators. This means that large savings can be made by choosing the right renovation measures. So, for instance, the saving potentials range between 55 % (for life cycle costs) and 95 % (for greenhouse gas emissions). The calculated saving potentials also point out the importance of the parametric calculations and the investigation of all possible renovation measures, because this is the only way to display the whole spectrum and to identify all possible reduction potentials.

1. INTRODUCTION

Buildings are a major source of greenhouse gas emissions. Reducing their energy use and associated greenhouse gas emissions is particularly challenging for the existing building stock. In contrast to the construction of new buildings, there are often architectural and technical hurdles for achieving low emissions and low energy use in existing buildings. In cities, this is a particular challenge. (International Energy Agency (IEA) 2020)

In the IEA EBC Annex 56, the focus was on the investigation of cost-effective renovation measures for single buildings. Within the IEA EBC Annex 75, cost-effective strategies are being developed to reduce greenhouse gas emissions and energy consumption of buildings in settlements and urban districts.

To derive these strategies, the research project includes calculations of generic and real districts to test different renovation scenarios and to investigate their impact on life cycle costs, primary energy demand and greenhouse gas emissions.

This paper focuses on the investigation of a real district in Gleisdorf, Austria.

2. METHODOLOGY

The methodology of the IEA EBC Annex 75 forms the basis for all investigations. The proposed methodology builds on the methodology previously developed for individual buildings in the IEA EBC Annex 56 extending it to the level of groups of buildings in settlements and districts.

The project focuses mainly on residential buildings, both single and multifamily houses, and buildings with similar characteristics, such as schools or simple office buildings without complex HVAC systems.

The assessments are carried out based on matching energy needs of buildings with energy supply. Energy needs of the buildings are calculated taking into account the energy performance of the building envelope, outdoor climate, target indoor temperature as well as internal heat gains. On the supply-side centralized and decentralized energy systems are taken into account.

Renovation scenarios include measures on the building envelope and on the HVAC system to improve the energy performance on the one hand and to increase the share of renewables on the other hand. As a comparison, a reference variant, also called anyway renovation, is defined at the beginning of the assessment. This reference case represents a scenario where only renovation measures are included, which are necessary to restore the building's functionality. This may include activities such as repainting a wall or repairing a roof to make it again water-proof. It is assumed that these anyway measures do not increase the building's energy performance, however, that they involve costs.

Fig. 1 shows the difference between the anyway renovation and the renovation to improve the energy efficiency of the building.

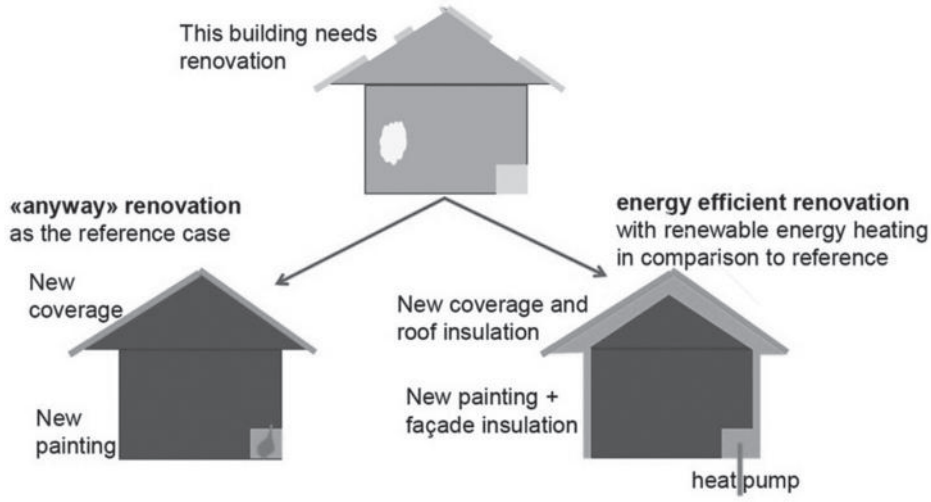


Fig. 1: comparison between the anyway renovation and an energy-efficient renovation (Ott et al. 2017)

The assessment of all scenarios is based on the three key performance indicators:

- Life Cycle Costs (LCC)
- Primary energy demand (PE)
- Greenhouse gas emissions (CO_2)

All results are related to the conditioned gross floor area and are presented as annual values.

The Life Cycle Cost analysis includes the initial investment costs, replacement costs, energy costs, including existing energy taxes and CO_2 taxes, maintenance and operational costs.

For the calculation of the real district in Gleisdorf, a parametric calculation was performed. This means that all possible combinations of individual measures were combined according to the "brute force approach". Here a series of calculations are run by a computer, systematically changing the value of parameters associated with one or more design variables. Brute force is based on trial and error where the computer's fast processing power is used to solve a problem, rather than to apply advanced algorithms. It offers the advantage that statistical evaluations can be made and distributions can be derived. The most significant benefit is that this concept can also be applied to more than two objectives or optimisation goals such as costs as well as CO_2 reductions. It, therefore, provides a sound basis for a multi-target decision-making framework, so that different actors can decide between optimal solutions for different objectives. This approach seeks to explore a set of optimal solutions rather than to find a single optimal solution (Chiandussi et al. 2012).

The energy performance calculation is done with the Passive House Project Planning Package (PHPP) (Passive House Institute 2015). For the life cycle cost calculation, the LCC tool "econ calc" (Ploss et al. 2017) is used. Both tools are combined and automated via VBA macros in MS Excel.

3. CASE STUDY AND RENOVATION SCENARIOS

The investigated district is located in Gleisdorf, Austria, near the railway station and consists of 26 buildings with a heterogeneous structure (regarding e.g. size of the buildings, use of the buildings, age of construction and heat consumption). Fig. 2 shows an aerial photo of the focus area.



Fig. 2: Case Study Gleisdorf – an area of 26 buildings located near the railway station (GIS-Steiermark 2020; edited by AEE INTEC)

In the context of the present research, the brute force approach is applied to find optimal solutions in terms of LCC, primary energy demand and greenhouse gas emissions and includes both renovations of the building envelopes as well as modernization of the building HVAC systems for the entire district.

The starting point for the calculation is the current status quo of the real district. To represent the status quo as accurately as possible, data from the municipality of Gleisdorf, data from the address, building and housing register (AGWR) of Statistics Austria (STATISTICS AUSTRIA 2020) and on-site inspections were used.

For the investigation, different measures and scenarios were defined. Measures include the renovation of the building envelope (roof, façade and windows), two different ventilation scenarios (window ventilation and mechanical ventilation with heat recovery), new heating systems (decentralized natural gas heating, decentralized air source heat pumps and centralized district heating), measures for the use of solar energy (solar thermal and PV system) and in combination with a PV system also electric battery storage.

Tab. 1: an overview of the number of renovation scenarios per building and in total

Building	Roof	Facade	Windows	Ventilation	Heating system	Solar thermal	PV	TOTAL
1	3	3	3	2	3	2	3	972
2	3	3	3	2	1	2	3	324
3	3	3	3	2	1	2	3	324
4	3	3	3	2	3	2	3	972
5	3	3	3	2	3	2	3	972
6	3	3	3	2	3	2	3	972
7	3	3	3	2	3	2	3	972
8	3	3	3	2	3	2	3	972
9	3	3	3	2	3	2	3	972
10	3	3	3	2	3	2	3	972
11	3	3	3	2	3	2	3	972
12	3	3	3	2	3	2	3	972
13	3	3	3	2	3	2	3	972
14	3	3	3	2	3	2	3	972
15	3	3	3	2	3	2	3	972
16	3	3	3	2	3	2	3	972
17	3	3	3	2	3	2	3	972
18	3	3	3	2	3	2	3	972
19	3	3	3	2	3	2	3	972
20	3	3	3	2	1	2	3	324
21	1	1	1	2	3	2	3	36
22	1	1	1	2	3	2	3	36
23	1	1	1	2	3	2	3	36
24	3	3	3	2	3	2	3	972
25	1	1	1	2	3	2	3	36
26	3	3	3	2	3	2	3	972
								19,584

In total 19,584 different technological parameter sets were defined and investigated for the whole district. In a further step also a sensitivity analysis is planned to test different economic parameters as well as different user behaviour (variation of room temperature, domestic hot water quantity, etc.).

4. RESULTS

Fig. 3 shows the results of all investigated scenarios regarding the three key performance indicators (greenhouse gas emissions on top, primary energy demand in the middle and the life cycle costs at the bottom).

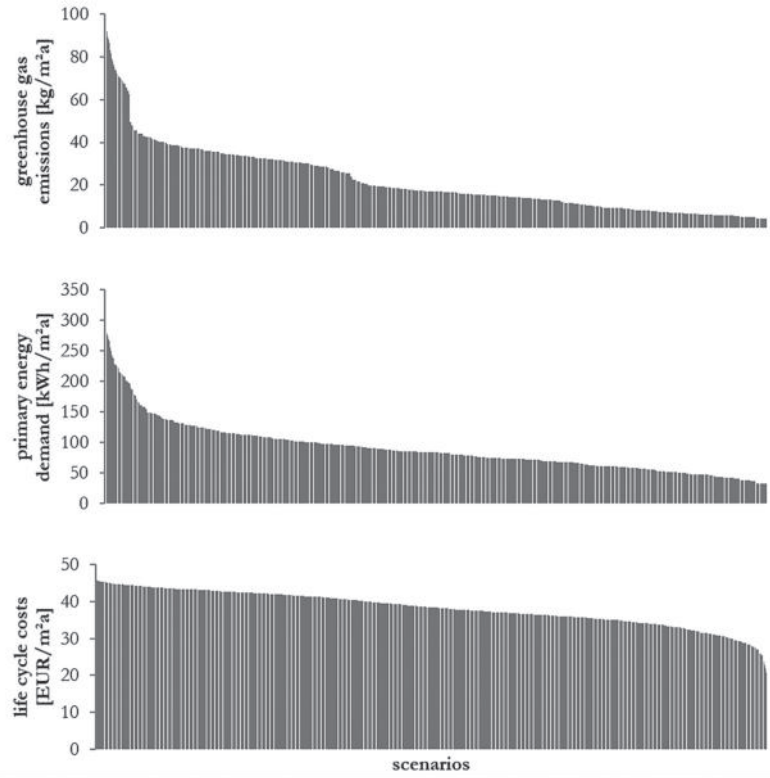


Fig. 3: results of all investigated scenarios – greenhouse gas emissions (top), primary energy demand (middle) and life cycle costs (bottom)

The analysis of the results shows a wide range between the minima and maxima, which means that large savings can be made by choosing the right renovation measures. The savings potential ranges from 55 % (for life cycle costs) to 95 % (for greenhouse gas emissions). Tab. 2 summarizes the key results of the 19,584 variants.

Tab. 2: summary of the calculation results of the investigated district in Gleisdorf, Austria

Indicator	Minimum value	Average value	Maximum value	Reduction potential	Reduction potential in %
Greenhouse gas emissions $kgCO_2/(m^2a)$	4.34	21.88	94.74	90.40	95
Primary energy demand kWh/(m²a)	32.28	89.85	294.58	262.29	89
Life cycle costs EUR/(m²a)	20.72	38.22	45.91	25.19	55

5. SUMMARY

The calculation results provide an in-depth and holistic understanding of the effects of planning-relevant parameters on the key performance indicators of building clusters and urban sites. For example, the combined investigation of both, measures of the building envelope as well as measures regarding renewable HVAC systems do not necessarily provide one single optimal solution but several optimal solutions with either a more pronounced focus on the building envelope or the building HVAC system exist (multiple Pareto-optimal solutions). The presented approach hence provides a profound basis for decision-makers for the integrated assessment, planning and realization of cost and greenhouse gas optimized urban sites and districts.

Furthermore, the calculated saving potentials point out the importance of the investigation of all possible renovation measures, because this is the only way to display the whole spectrum.

REFERENCE

Chiandussi G. Codegone M., Ferrero S., Varesio F. E. (2012) Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications, Computers and Mathematics with Applications. doi: 10.1016/j.camwa.2011.11.057.

Ott W., Bolliger R., Ritter V., Citherlet S., Lasvaux S., Favre D., … Ferrari S. (2017) Methodology for Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56). Energy in Buildings and Communities Programme. Available at: https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_56_Methodology_Cost-Effective_Energy_Carbon_Emissions_Optimization_Building_Renovation.pdf.

Passive House Institute (2015) Passive House Planning Package (PHPP), passivehouse.com.

Ploss, M., Erber S., Braun M., Frick D., Ruepp D., Schneider C., Hatt T. (2017) Wirtschaftlichkeitsrechner econ calc. Dornbirn: Energieinstitut Vorarlberg.

STATISTICS AUSTRIA (2020) Adress-GWR-Online. Available at: https://www.statistik.at/web_de/services/adress_gwr_online/index.html (Accessed: 16 March 2020).

Contact details:
David Venus
Feldgasse 19
8200 Gleisdorf
Email: d.venus@aee.at

Session 3b

Klimaerwärmung und Gebäude

Klimadaten für die Gebäudesimulation

Steiner, Heisinger / IBO / AT

Energieeffizienz und Baudenkmal – Potentiale aus Sicht der Denkmalpflege

Seuschek, Hoche-Donaubauer / Bundesdenkmalamt, Graz, Österreich / AT

Gebäudebegrünung – Anforderungen und Einflussfaktoren auf Gesundheit und Behaglichkeit „Indoor“ und „Downtown“

Vondrus /CV-Consulting e.U. / AT
Erker / Slavonia Baubedarf GmbH / AT

Klimadaten für die Gebäudesimulation

T. Steiner, F. Heisinger
IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Abteilung Bauphysik

ABSTRACT: Simulations realized with programs like Delphin, Wufi, TRNSYS, or IDA ICE require hourly values of meteorological data as input variables. The paper shows the construction of climate data for "mean years" (Krec 2020), which are used to calculate the expected heat demand. Furthermore, a method - based on the analysis of the climate indices summer days, heat days, heat wave days and tropical nights - is presented for the construction of a "hot year" (Steiner 2020) which can be used in particular for the assessment of the avoidance of summer overheating. Based on this "hot year", climate data sets - compatible with the climate scenarios (ÖKS15 2020) - are developed and their effects are analysed using the example of a thermal building simulation for representative test rooms in the building stock. In the light of future climate development and the effect of urban heat islands, the impacts of urban heat on private homes as well as the effect of different thermal refurbishment and shading options as heat protection measures are shown.

KURZFASSUNG: Wärme- und feuchtigkeitstechnischen Simulationen wie sie mit Programmen wie Delphin, Wufi, TRNSYS, oder IDA ICE durchgeführt werden benötigen Stundenwerte meteorologischer Daten als Eingabegrößen. Im Beitrag wird die Konstruktion von Klimadaten für „mittlere Jahre" (Krec 2020) gezeigt, die bei der Berechnung des zu erwartenden Heizwärmebedarfs zur Anwendung kommen. Darüber hinaus wird eine – auf der Analyse der Klimaindizes Sommertage, Hitzetage, Hitzewellentage und Tropennächte basierende – Methode für die Konstruktion eines „heißen Jahres" (Steiner 2020) vorgestellt welches insbesondere für die Beurteilung zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung verwendet werden kann. Ausgehend von diesem „heißen Jahr" werden – mit den Klimaszenarien (ÖKS15 2020) kompatible – Klimadatensätze entwickelt und deren Auswirkungen am Beispiel einer thermischen Gebäudesimulation für repräsentative Testräume im gründerzeitlichen Gebäudebestand analysiert. Vor dem Hintergrund künftiger Klimaentwicklung und dem Effekt städtischer Wärmeinseln wird die Auswirkung städtischer Hitze auf den privaten Wohnbereich sowie die Auswirkung verschiedener thermischer Sanierungs- und Verschattungsvarianten als Hitzeschutzmaßnahme aufgezeigt.

1. EINFLUSS UND AUSWAHL VON KLIMADATEN

Zur Unterstützung der Planung von Maßnahmen – wie beispielsweise zur Vermeidung städtischer Hitze im Gebäudebestand – ist es erforderlich, die Auswirkung geplanter Maßnahmen auf das Temperaturverhalten von Räumen mittels thermischer Gebäudesimulation so genau wie möglich zu erfassen. In der Regel beeinflussen die angenommenen außenklimatischen Bedingungen maßgeblich die Ergebnisse rechnerischer Simulationen. Aus diesem Grund und in Hinblick auf realitätsnahe Ergebnisse hat die Auswahl geeigneter Klimadatensätze mit besonderer Sorgfalt zu erfolgen.

1.1 METEOROLOGISCHE DATEN

Da wärme- und feuchtigkeitstechnischen Simulationen wie sie mit Programmen wie Delphin, Wufi, TRNSYS oder IDA ICE durchgeführt werden, Stundenwerte meteorologischer Daten als Eingabegrößen voraussetzen, aber für Abschätzungen wie im Energieausweis auch Monatsmittelwerte ausreichen, ist es zielführend Datensätze zu generieren, die für beide Berechnungsarten verwendbar sind. Diese Problematik wurde bereits im Jahr 1990 von Heindl et al. aufgegriffen und führte zur Entwicklung eines Programmsystems zur

Erzeugung sog. „Halbsynthetischer Klimadaten“. Die Forderung für solche Klimadatensätze besteht darin, dass die zu generierenden Jahresverläufe meteorologischer Größen die im langjährigen Schnitt am Gebäudestandort zu erwartenden außenklimatischen Verhältnisse repräsentieren.

1.2 „MITTLERES JAHR“

Als Datengrundlage der halbsynthetischen Klimadatensätze (HSKD) dienen langjährige Monatsmittelwerte oder -summen für die betrachteten meteorologischen Elemente (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Solarstrahlung, Windstärke, Windrichtung, Regen, Luftdruck). Diese Werte werden durch Mittelung über 30 Jahre gewonnen. Eine detaillierte Beschreibung der Auswahlkriterien zur Erzeugung von halbsynthetischen Klimadaten gibt (Heindl et al. 1990). Das Berechnungsergebnis spiegelt damit das im Mittel zu erwartende wärmetechnische Verhalten des untersuchten Gebäudes wieder. Für die Erzeugung halbsynthetischer Klimadatensätze sind vorerst alle Monatsmittelwerte für jede in den Datensatz aufzunehmende meteorologische Größe vorzuschreiben. Durch aneinanderreihen ausgesuchter Monate – aus dem Fundus gemessener Stundenwerte – bei denen die Monatsmittelwerte bzw. Monatssummen den vorgegebenen Werten möglichst nahe kommen wird ein Testreferenzjahr erzeugt und im Anschluss so modifiziert, dass es exakt den vorgegebenen Monatsmittelwerten entspricht.

1.3 EXTREME WETTERSITUATIONEN

Um das Verhalten von Baukonstruktionen, Räumen oder Gebäuden unter extremen Bedingungen zu untersuchen sind „mittlere Jahre“ in der Regel aber nicht geeignet, da sie extreme Wettersituationen – wenn überhaupt – nur zufällig enthalten. Extremjahre, wie sie für Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Konstruktionen oder für die Beurteilung zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung erforderlich sind, müssen am jeweiligen Gebäudestandort gesondert konstruiert werden. Das Berechnungsergebnis dient in diesen Fällen dem Beleg, dass im Gebäude auch während klimatischer Extremsituationen die Anforderungen an den Komfort eingehalten werden. Da sich die Darstellung extremer Klimasituationen mit der gleichzeitig erwünschten Wiedergabe der im langjährigen Schnitt zu erwartenden außenklimatischen Verhältnisse innerhalb nur eines Jahres nicht oder nur schwer abbilden lässt können jeweils Datensätze mit extremen winterlichen und/oder extremen sommerlichen Klimasituationen erstellt werden. (vgl. Krec 2017)

1.4 „HEISSES JAHR“

Während für die Erzeugung halbsynthetischer Klimadaten als Bezugsgrößen Monatsmittelwerte bzw. Monatssummen meteorologischer Klimagrößen – wie Temperatur oder Luftfeuchte – herangezogen werden bezieht sich die hier vorgestellte Methode für die Konstruktion eines „heißen Jahres“ auf Klimaparameter – also durch physikalische, bzw. mathematisch-statistische Transformation aus Klimagrößen hervorgehende Größen und deren statistische Verteilung.

Für die Erstellung eines „heißen Jahres“ – korrekt eines „durchschnittlich heißen Jahres“ – werden die gleitenden Mittelwerte der betrachteten Klimaparameter Sommer- und Hitzetage (Abb. 1), Hitzewellentage (Abb. 2) und Tropennächte (Abb. 3) sowie der gleitende Mittelwert der Jahresmitteltemperatur (Abb. 4) – jeweils über 15 Jahre (2004 – 2019) – vorgegeben. Da nicht erwartet werden kann, dass ein Datensatz genau diesen vorgegebenen Werten entspricht wird in Anlehnung an die EN ISO 15927-4 jener Datensatz ausgewählt, welcher der vorgegebenen Verteilung am ehesten entspricht. Die Vorgehensweise wird exemplarisch für den Standort Wien – Hohe Warte gezeigt. Mit 84 Sommertagen, 21 Hitzetagen, 6 Hitzewelletagen und 6 Tropennächten entsprechen die Klimadaten aus dem Jahr 2007 (in Abb. 6, ganz links dargestellt) nahezu exakt den geforderten Vorgaben aus dem gleitenden Mittelwert der letzten 15 Jahre (2004 – 2019).

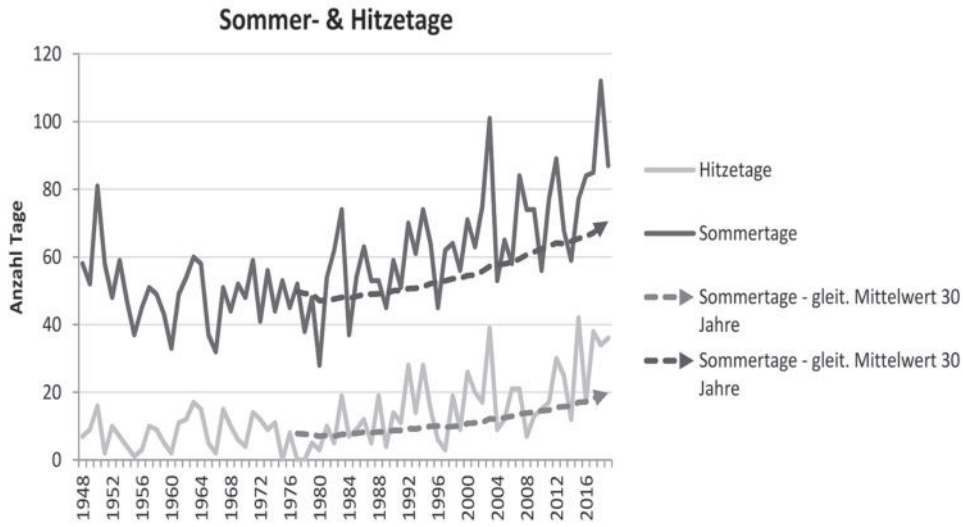


Abb. 1: Entwicklung Sommer- und Hitzetage, Wien – Hohe Warte

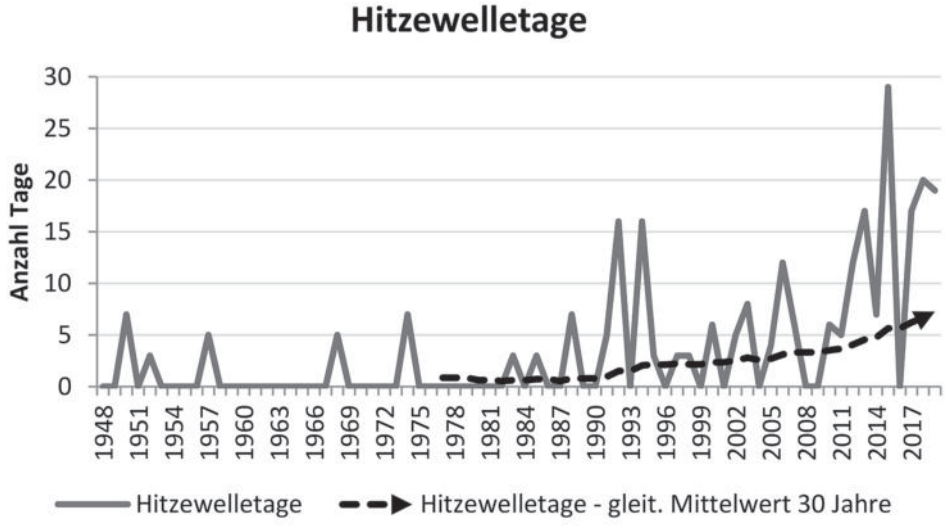


Abb. 2: Entwicklung Hitzewelletage, Wien – Hohe Warte

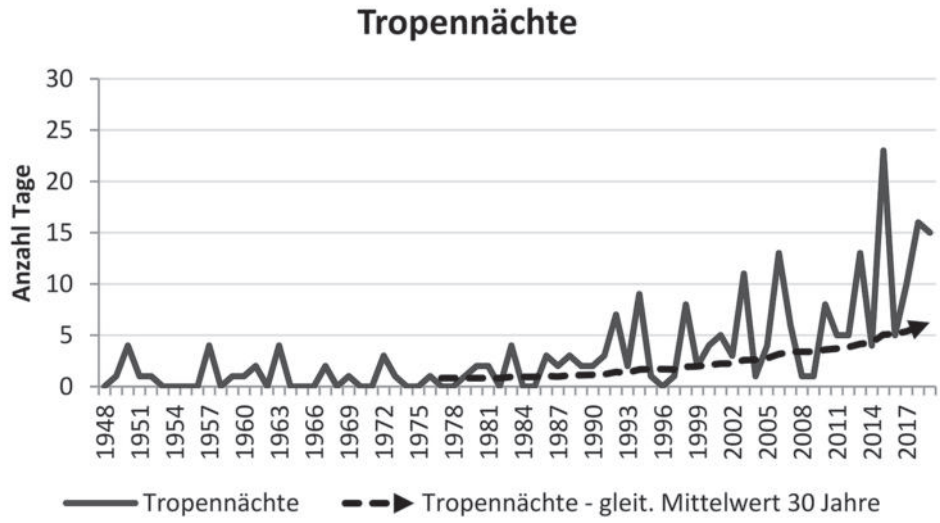


Abb. 3: Entwicklung Tropennächte, Wien – Hohe Warte

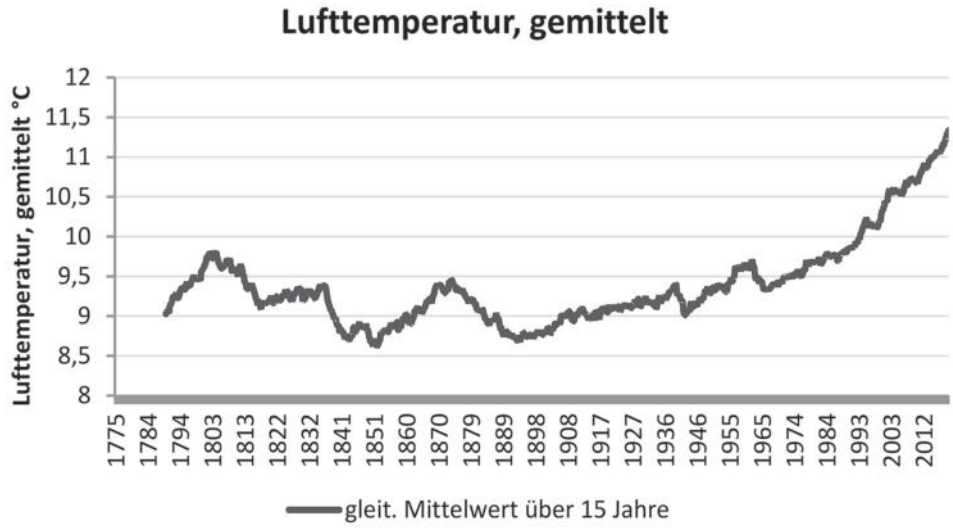


Abb. 4: Lufttemperatur gemittelt über 15 Jahre, Wien – Hohe Warte

2. KLIMASZENARIEN „+1,5 °C“ UND „+3,0 °C“

Anhand der durchgeführten Analyse der langjährigen Klimadaten für Wien Hohe Warte für die Klimaindizes Sommertage, Hitzetage, Hitzewelletage und Tropennächte konnte der Klimadatensatz aus dem Jahr 2007 als jener identifiziert werden, der den vorgegebenen Klimaindizes und der vorgegebenen Jahresmitteltemperatur am besten entspricht und damit den langjährigen Durchschnitt der letzten 15 Jahre repräsentiert. Durch Verschiebung der Temperaturkurve in 0,5 Grad Schritten werden nun – mit den Klimaszenarien (ÖKS15 2020) – kompatible Klimadatensätze für die künftigen Sommer in Wien entwickelt (Abb. 6).

Diese Verschiebung der gesamten Temperaturkurve (alle Stundenwerte) ist insofern zulässig da die Analyse der Klimadaten zeigt, dass sich nicht nur die Mittelwerte sondern auch die Maximaltemperaturen, hier in Abb. 5 für Juli gezeigt, nahezu parallel nach oben verschieben. Grundsätzlich ist zusätzlich zur Verschiebung des Mittelwerts eine Zunahme der Streuung zu erwarten, was zu einer weiteren Erhöhung bei den betrachteten Klimaindizes führt. Die Klimadatensätze in dieser Weise zu adaptieren erfordert jedoch eine aufwändige Manipulation der Klimadaten, auf die bei dieser Methode verzichtet wird.

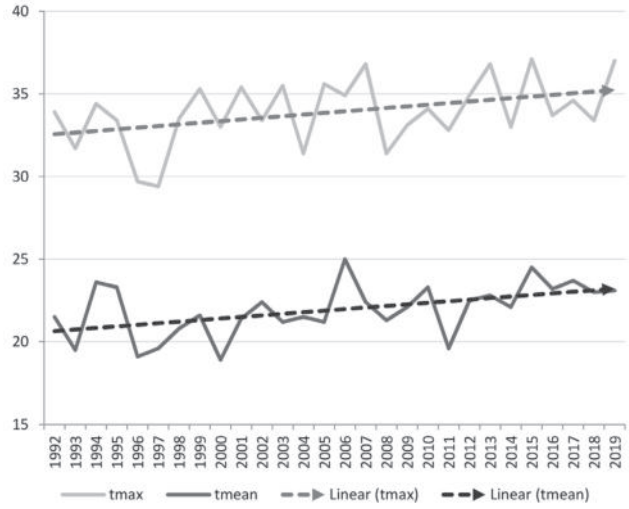


Abb. 5: Entwicklung von Mittelwert und Maximum für Lufttemperaturen im Juli in Wien – Hohe Warte

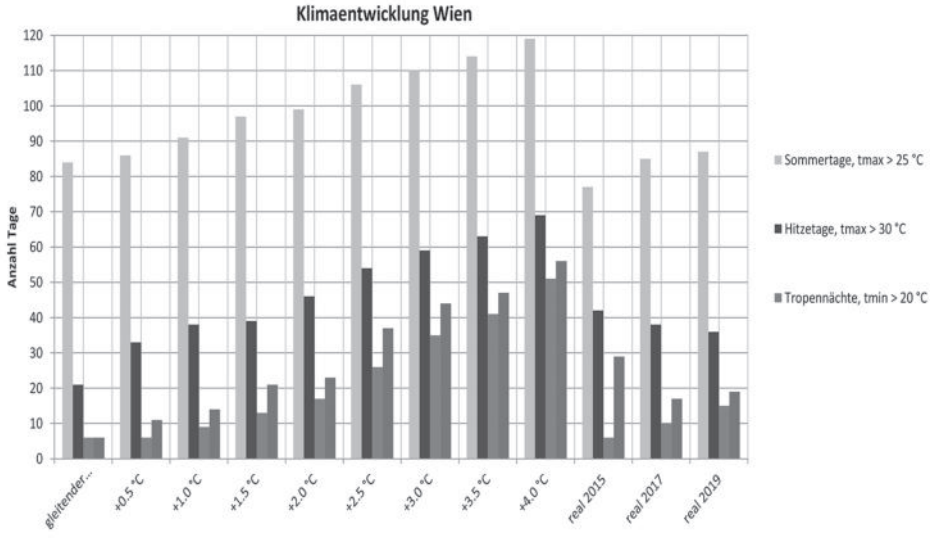


Abb. 6: Klimaszenarien Wien – Hohe Warte, Sommertage, Hitzetage, Tropennächte und Hitzewelletage

Während für Gesamtösterreich in der nahen Zukunft eine mittlere Zunahme von 11 Sommer- und 4,3 Hitzetagen prognostiziert wird (ÖKS15 2020) gelten für Wien, bedingt durch die geografische Lage und die Städtische Wärmeinsel weit kritischere Prognosen. Es ist für die kommenden Jahre mit einer Zunahme von 25 Sommer- und 12 Hitzetagen zu rechnen. Dies entspricht etwa dem Szenario „gleitender Mittelwert der letzten 15 Jahre + 1,5 °C" bzw. der realen Klimadaten aus dem Jahr 2019. Betrachtet man die Jahre 2015, 2017 und 2019 so zeigt sich, dass diese bei den Hitzetagen, den Tropennächten, wie auch den Hitzewelletagen in etwa dem in Abb. 6 gezeigten Szenario +1,5 °C entsprechen.

3. HITZE IM STÄDTISCHEN GEBÄUDEBESTAND

Am Beispiel einer thermischen Gebäudesimulation für repräsentative Testräume im gründerzeitlichen Gebäudebestand wird vor dem Hintergrund künftiger Klimaentwicklung und dem Effekt städtischer Wärmeinseln die Auswirkung von städtischer Hitze auf den privaten Wohnbereich aufgezeigt. Abb. 7 zeigt die Jahresverteilung der empfundenen Temperatur – in einem kleinen Zimmer mit 1 Fenster – einer thermisch gut sanierten Wohnung für die Klimaszenarien „heißes Jahr", „+1,5 °C" und „+3,0 °C". Trotz Nachtlüftung und hoher thermischer Qualität der Gebäudehülle steigt die Maximaltemperatur wie auch der Anteil der Hitze-Stunden im Wohnraum in den Szenarien deutlich.

Jahresverteilung Temperatur Anzahl Stunden	Empfundene Temperatur		
	2020	Szenario +1,5 °C	Szenario +3,0 °C
Maximum im Wohnraum.:	32.0	33.3	34.7
T [°C]	Std.[h]	Std.[h]	Std.[h]
25	157	155	177
26	164	133	132
27	111	152	118
28	41	109	134
29	25	63	136
>30	33	73	176
Stunden über 25 °C	374	530	696
Stunden über 27 °C	99	245	446
Stunden über 30 °C	33	73	176

Abb. 7: Anzahl Hitzestunden in einem kleinen Zimmer (1 Fenster) eines thermisch gut sanierten Bestandsgebäudes

4. HITZESCHUTZ DURCH THERMISCHE SANIERUNG UND VERSCHATTUNG

Nachfolgend wird die Auswirkung verschiedener thermischer Sanierungs- und Verschattungsvarianten als Hitzeschutzmaßnahme aufgezeigt. Die beliebteste Maßnahme bzw. Empfehlung »viel und regelmäßig trinken«, ist zwar eine notwendige, aber nicht immer ausreichende Maßnahme, um negativen Konsequenzen von Hitzewellen vorzubeugen. Ausflüge in den Park, oder zu kühlen Orten sind nicht allen Menschen möglich. Hitze führt daher für sehr viele Menschen zu einem Rückzug in die eigene Wohnung. Deshalb ist es besonders wichtig den privaten Wohnbereich auf Hitzewellen vorzubereiten um diese erfolgreich zu bewältigen. Insbesondere in kleinen Räumen und Wohnungen besteht ein hohes Risiko für sommerliche Überwärmung wie die Ergebnisse aus einer thermischen Gebäudesimulation für Wiener Gründerzeitgebäude in Abb. 8 zeigen. Ein kleines Zimmer – ident mit Raum in Abb. 7, aber thermisch nicht saniert – mit nur einem Fenster ohne Verschattung zeigt fast 900 h mit einer empfundenen Temperatur über 27 °C, und

das trotz Nachtlüftung (1). Größere Zimmer mit zwei Fenstern zeigen mit knapp über 600 Stunden ein günstigeres thermisches Verhalten im Sommer. Eine gute Lösung um die Belastung durch sommerliche Überwärmung für den privaten Wohnbereich zu reduzieren stellen eine außen liegende Verschattung dar wie beispielsweise ein Raffstore (2) oder eine Markisolette (3) wodurch der Wärmeeintrag der Sonne über die Fenster deutlich reduziert wird. Sollen bestehende Wohnräume auch bei zukünftigen Klimaentwicklungen noch vor Hitze schützen führt eine thermische Sanierung in Kombination mit außenliegender Verschattung zu den besten Resultaten (4). Die Anzahl der Stunden über 27 °C wird damit um 80 % reduziert. Abb. 9 zeigt den Tagesverlauf der empfundenen Temperatur, für das Zimmer mit zwei Fenstern, an einem heißen Sommertag in einer Hitzeperiode. Die Wärmedämmung egal ob außen an der Fassade, oder raumseitig aufgebracht, also in der eigenen Wohnung, führt zu einer deutlichen Reduktion der empfundenen Temperaturen im Raum.

Für die Auswahl und Bemessung der Dämmung gibt es umfangreiches Informations- und Beratungsangebot. Neben der Wirtschaftlichkeit kommt insbesondere im Wohnbereich, z.B. im Schlaf- oder Kinderzimmer der Materialwahl eine besondere Bedeutung zu. Während die Maßnahme im Sommer einen übermäßigen Wärmeeintrag in den Raum verhindert, reduziert die Wärmedämmung im Winter die Wärmeverluste und das Risiko von Schimmelbildung (z.B. hinter Betten und Möbeln die direkt an ungedämmten Feuermauern stehen). Es lohnt sich also mehrfach über thermische Sanierung und Sonnenschutz nachzudenken. Im Neubau wird in der Regel ein Nachweis zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung geführt (ÖNorm B 8110-3) über den dann auch die erforderlichen Maßnahmen zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung definiert werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Räume der Wohnung mit als „sehr gut sommertauglich" eingestuft sind um auch noch bei künftigen Klimaszenarien vor Hitze zu schützen.

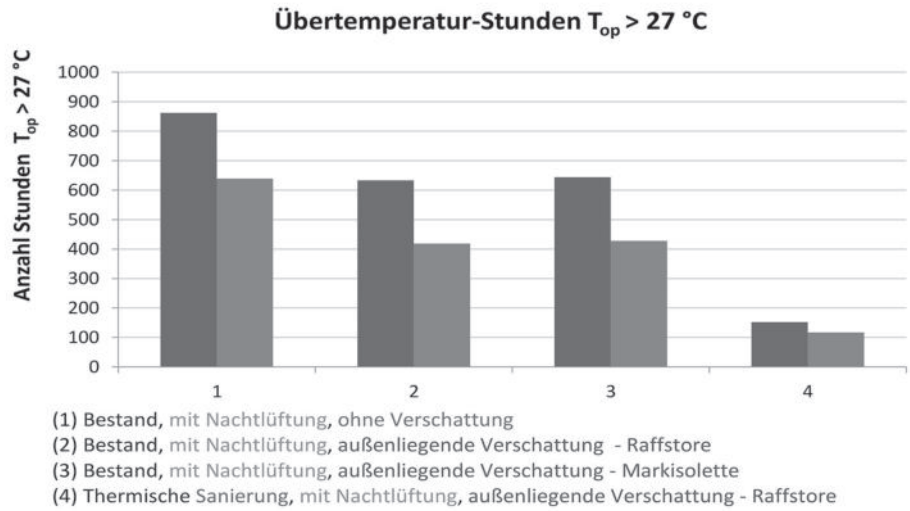


Abb. 8: Maßnahmen zur Reduktion von Hitze in Wohnräumen, Ergebnisse thermische Gebäudesimulation (dunkelgrau: kleines Zimmer mit einem Fenster; mittelgrau: Zimmer mit zwei Fenstern)

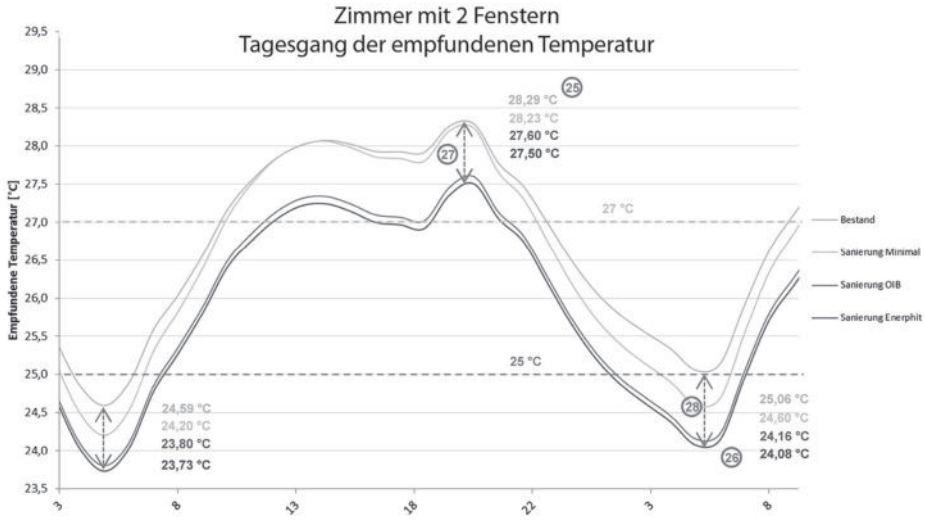


Abb. 9: Einfluss Dämmstandard auf empfundene Temperatur, Zimmer mit zwei Fenstern, Tagesgang der empfundenen Temperatur, heißer Sommertag

RESÜMEE

Die Wahl der Klimadaten beeinflusst maßgeblich das Simulationsergebnis. Sollen die Berechnungsergebnisse des Gebäude-, Anlagen- oder Bauteilverhaltens auch die vorherrschende Klimaentwicklung berücksichtigen so sind – je nach Fragestellung – geeignete Klimadatensätze zu verwenden. Im Beitrag wurde eine einfache Methode für die Konstruktion bzw. Auswahl eines Klimadatensatzes anhand von Klimaindizes (Sommertage, Hitzetage, ...) vorgestellt von dem ausgehend Datensätze für künftige Klimaszenarien entwickelt wurden. Beispielhaft konnte damit der Einfluss ausgewählter Hitzeschutzmaßnahmen auf den thermischen Komfort im Gebäudebestand unter zukünftigen Klimabedingungen gezeigt werden.

LITERATUR

EN ISO 15927-4 (2005) Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung und Darstellung von Klimadaten Teil 4: Stündliche Daten zur Abschätzung des Jahresenergiebedarfs für Heiz- und Kühlsysteme. 2005, ON: Wien.

Heindl W., T. Kornicki T. Sigmund A. (1990) Erstellung halbsynthetischer Klimadatensätze für meteorologische Messstationen., Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung (GZ. 70.630/18-25/88) und des Amtes der NÖ - Landesregierung (Zl. NC 23-1988/1989): Wien.

Krec K. (2017) Konstruktion von „kalten Jahren" für feuchtigkeitstechnische Berechnungen. Büro für Bauphysik, Schönberg am Kamp, 2017.

Krec K. (2020) Halbsynthetische Klimadaten (HSKD) für Gebäudestandorte in Österreich im Rahmen des Forschungsprojekts Gebäude maximaler Energieeffizienz mit integrierter erneuerbarer Energieerschließung. Büro für Bauphysik, Schönberg am Kamp, 2010.

ÖKS15 (2016) Endbericht ÖKS 15 – Klimaszenarien für Österreich - Daten - Methoden - Klimaanalyse, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: https://hdl.handle.net/20.500.11756/06edd0c9. abgerufen: October 22, 2020

ÖNorm B 8110-3 (2012) Wärmeschutz im Hochbau Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung. 2012, ON: Wien.

Steiner, T. (2020) Wiener Tropennächte, in Jahrbuch Kitting. 2020, IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH: Wien.

Energieeffizienz und Baudenkmal – Potentiale aus Sicht der Denkmalpflege

E. Seuschek
Bundesdenkmalamt, Graz, Österreich
B. Hoche-Donaubauer
Bundesdenkmalamt, Wien, Österreich

ABSTRACT: The European Union pursues the goal of creating a sustainable, competitive, save and decarbonised energy system to support climate protection. The respective legal foundation has been developed in recent years. Improvement in energy efficiency of buildings is one of the focus points in order to reach the defined targets. Carbon neutrality of the entire building stock shall be achieved by 2050 through optimisation of the thermal building wrap as well as conversion from fossil fuels to renewable energy sources. The Austrian National Energy and Climate Plan (NECP) defines the following objectives for the building sector: thermal energy refurbishment of the entire building stock as well as improvement in efficiency of heating system, increase of share in efficient renewable energy sources and the use of long-distance heating / cooling systems for heating, domestic hot water and cooling, including building component activation.

The Federal Monuments Authority Austria is the professional instance that protects, maintains and researches the cultural heritage of Austria. Any transformation of a heritage-protected building, which influences its substance, traditional appearance or artistic impression is subject to approval and requires the involvement of the Federal Monuments Authority. This also includes measures to increase energy efficiency of buildings. In order to preserve the formative characteristics of protected monuments it is indispensable to develop optimised and efficient concepts. Since universal solutions from new constructions and renovations only in very rare cases can be also applied to historic monuments it is necessary to expand the interdisciplinary cooperation and networking between experts of all fields (monuments preservation, planning, building physics, utilities management etc.) in the light of individual consideration of the existing building stock.

1. DENKMALSCHUTZ IN ÖSTERREICH

„Die Authentizität eines Baudenkmals hängt von der sachgerechten Überlieferung von Substanz und Oberfläche ab. Die Vielfalt an Materialien, Konstruktionen und Techniken macht ein Baudenkmal reich und erfordert gleichwohl einen sorgsamen Umgang“ (Bundesdenkmalamt 2015). Das Bundesdenkmalamt als Fachinstanz schützt, pflegt und erforscht einen wesentlichen Teil des kulturellen Erbes Österreichs, welches es als einmaliges und unwiederbringliches materielles Zeugnis unserer Geschichte und Kultur zu erhalten gilt. Unter den ungefähr 38.000 denkmalgeschützten Bau- und Bodendenkmalen befinden sich überschlägig 26.000 Gebäude im technischen Sinn (Bundesdenkmalamt 2020). Das bedeutet, dass es sich bei diesen thermisch konditionierten Baudenkmalen in etwa um 1,5 % des österreichischen Gebäudebestandes handelt (Fernsebner-Kokert & Kovar 2017). Jede Veränderung eines denkmalgeschützten Gebäudes, welche die Substanz, die überlieferte Erscheinung, oder die künstlerische Wirkung beeinflussen könnte – demnach auch eine Maßnahme zur energetischen Ertüchtigung – ist bewilligungspflichtig und erfordert die Einbindung des Bundesdenkmalamtes. Um die Erhaltung des prägenden Charakters und damit der Authentizität von denkmalgeschützten Bauten zu gewährleisten, ist eine denkmalfachliche Eingrenzung ihres Veränderungspotentials unverzichtbar. Die rechtliche Grundlage bildet das Denkmalschutzgesetz, das in seiner Erstfassung aus dem Jahr 1923 stammt. §1 konstituiert die Unterschutzstellung des Objektes auf Grund von geschichtlicher, kultureller und künstlerischer oder sonstiger kultureller Bedeutung, wenn seine Erhaltung dieser Bedeutung wegen im öffentlichen Interesse gelegen ist. Baugeschichte, Typologie, Ausführungsweise oder auch die Bedeutung der PlanerInnen

und ehemaligen BewohnerInnen können ein solches öffentliche Interesse begründen. §1 definiert auch die Unterscheidungen zwischen Einzeldenkmalen, Denkmalanlagen, Ensembles und Teilunterschutzstellungen. §5 regelt den Vollzug im Falle von Veränderungsmaßnahmen am geschützten Objekt. Nicht nur Umbauplanungen, Erweiterungen oder Abbrüche erfordern den darin festgelegten Verfahrensablauf. Statische Ertüchtigungen, Verbesserungen im Brandschutz, Restaurierungen oder eben auch thermische Sanierungen erfordern die eingehende Abwägung seitens der Behörde. Das abschließende Dokument dieses Verfahrens bildet der bewilligende, abweisende oder teilabweisende Bescheid, welcher Auflagen zur Ausführung enthalten bzw. die zusätzliche Vorlage von Detaillierungen einfordern kann (DMSG 2013). In diesem Kontext ist anzumerken, dass beim Bauen im Denkmal in Österreich sowohl der Baubescheid der Baubehörde als auch der Bescheid des Bundesdenkmalamtes erforderlich ist.

2. EUROPÄISCHE ZIELE: STEIGERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ

Die Europäische Union verfolgt das Ziel, ein „nachhaltiges, wettbewerbsfähiges, sicheres und dekarbonisiertes Energiesystem“ (EU 2018) zum Klimaschutz zu schaffen. Diesbezüglich wurden in den vergangenen Jahren entsprechende Rechtsgrundlagen erarbeitet. Ein Fokus zur Erreichung dieser Zielvorgaben liegt hierbei auf der Verbesserung der Energieeffizienz der Gebäude. Durch die Optimierung der thermischen Hülle sowie durch das Umstellen von fossilen auf erneuerbare Energieformen soll bis 2050 der gesamte Gebäudebestand nahezu klimaneutral sein (EU 2018). Für den Gebäudesektor in Österreich spiegeln sich im nationalen Energie- und Klimaplan (NEKP) folgende Zieldimensionen dazu wider: Zum einen die thermisch-energetische Sanierung des Gebäudebestandes sowie die Effizienzverbesserung bei Heizsystemen und zum anderen die Erhöhung des Anteils effizienter erneuerbarer Energieträger und die Nutzung von Fernwärme/-kälte für Heizung, Warmwasser und Kühlung, einschließlich Bauteilaktivierung.

3. THERMISCH-ENERGETISCHE OPTIMIERUNG AM BAUDENKMAL

Thermische Ertüchtigungen am Baudenkmal zur Verbesserung der Energieeffizienz „erfordern eine besonders eingehende Abwägung der Auswirkungen auf Substanz und Erscheinungsbild eines Baudenkmals“ (Bundesdenkmalamt 2015). Eine frühzeitige Einbindung des Bundesdenkmalamtes in den Planungsprozess ist deshalb wesentlich. Bestandsaufnahmen mit hohem Detaillierungsgrad bilden den Beginn eines jeglichen Planungsprozesses (Bundesdenkmalamt 2015). Aus denkmalfachlicher Perspektive ist „eine gesamtheitliche Betrachtung des Gebäudes, welche Bauwerkshülle, Gebäudetechnik und Nutzerverhalten gleichermaßen beachtet“ (Bundesdenkmalamt 2015) wesentlich. Ein erster Blick soll dabei immer den Möglichkeiten einer Reaktivierung von ursprünglichen Funktionskonzepten gelten. „Denkmalfachliches Ziel ist es, möglichst fehlertolerante, reversible Lösungen zu entwickeln, die stets auf einer Bestandsanalyse (Schadensanalyse) basieren. Sie sollen individuell auf das prognostizierte Nutzerverhalten zugeschnitten sein und aus denkmalfachlicher Sicht die Energieeffizienz […] in jenem Maße steigern, als dies ohne erhebliche nachteilige Veränderungen der überlieferten Substanz und Erscheinung möglich ist. Substanzielle Eingriffe sind dabei auf das notwendige Minimum zu beschränken“ (Bundesdenkmalamt 2015). Diese Vorgehensweise ist vor allem deshalb von besonderer Bedeutung, da sich für Denkmale in den seltensten Fällen allgemein gültige Lösungsansätze aus Neubau und Sanierung bewährt haben. Erfahrungswerte aus Beobachtungen österreichweiter Beispiele bilden daher die Grundlage zur Weiterentwicklung auf dem Gebiet der energetischen Gebäudeoptimierung im geschützten Bestand.

4. DENKMALSCHUTZ UND NACHHALTIGKEIT

Der Begriff Energieeffizienz bildet heute meist nur einen Anteil vom Gesamtenergieaufwand ab, nämlich jenen, der für den aktuellen Betrieb des Gebäudes notwendig ist. Standardisierte Kennzahlen lassen sich nicht auf ein denkmalgeschütztes Objekt umlegen (Bundesdenkmalamt 2015).

Ein wichtiger Aspekt, der bei der Beurteilung von historischer Bausubstanz und daher auch im Denkmalbestand oftmals vernachlässigt wird, ist die sogenannte „Graue Energie" des Bestandes. „Im Laufe des Lebenszyklus eines Gebäudes wird für viele verschiedene Vorgänge in der Herstellung, Nutzung und Adaptierung immer wieder Energie eingesetzt (*z. B. Materialgewinnung, Transport, Erschließung, Errichtung, Betrieb, Reparatur, Modernisierung*). Historisch waren allen diesen Maßnahmen bestimmte Grenzen gesetzt, die auch einen ökonomischen Einsatz von Energie zur Folge hatten (*Verfügbarkeit, Erreichbarkeit, Arbeitskraft*). Baudenkmale erfüllen aufgrund der kleinräumigen lokalen Entstehungszusammenhänge daher aus heutiger Sicht die Kriterien der Nachhaltigkeit oft in besonderem Maße (*z. B. durch regionale Baumaterialien, minimale Transportwege, solide Bau- und Haustechnik, einfache Wartbarkeit, geringe Folgekosten etc.*)." (Bundesdenkmalamt 2015).

5. DENKMALSCHUTZ UND KLIMASCHUTZ

Betrachtet man nun die Ziele des Klimaschutzes und des Denkmalschutzes ist ihr gemeinsamer Nenner, dass sich beide durch „einen bewahrenden, konservierenden, schützenden Charakter" (Servicestelle: Kommunaler Klimaschutz 2011) auszeichnen. Beide Schutzziele, sowohl Klima- als auch Denkmalschutz, streben die Bewahrung nicht erneuerbarer Ressourcen an. Um nun im Zuge von energetischen Ertüchtigungen optimierte sparsame Konzepte zu entwickeln und gleichzeitig die Bedeutung des baukulturellen Erbes für Österreich zu bewahren, ist es erforderlich, unter analytischer und individueller Betrachtung des Denkmalbestandes, die interdisziplinäre Zusammenarbeit und die Vernetzung zwischen FachexpertInnen aller Disziplinen (Denkmalschutz, Planung, Bauphysik, Haustechnik etc.) auszubauen. Die Erhebung der oft unbekannten, sehr heterogenen Materialien und Konstruktionen im Denkmal bildet die Grundvoraussetzung, um im Kollektiv nachhaltige Lösungen zu konzipieren. Zur Erarbeitung objektspezifischer Lösungsansätze, die sich vorrangig durch das Ziel der Erhaltung des Denkmalbestandes in Substanz und Erscheinung auszeichnen, benötigt es ExpertInnen, die neben ihren Fachkenntnissen auch über umfassende Erfahrungen im historischen Bauwesen verfügen.

6. DENKMALFACHLICHE PARAMETER AM BEISPIEL VON SOLARANLAGEN (PHOTOVOLTAIK UND SOLARTHERMIE)

„Bauliche Maßnahmen sind grundsätzlich denkmalfachlich nur dann vertretbar, wenn dadurch keine wesentlichen Veränderungen der historischen Substanz, des künstlerisch-architektonischen Ausdrucks und des überlieferten Erscheinungsbildes entstehen. Dies umfasst neben der Bauform und dem äußeren Erscheinungsbild auch die gesamten baulichen Strukturen und Raumbildungen einschließlich der handwerklichen und künstlerischen Bauausstattung" (Bundesdenkmalamt 2015). „Die Anbringung von Sonnenkollektoren (Solarthermie, Photovoltaik) ist am Baudenkmal in denkmalfachlicher Hinsicht nur unter sehr großen Einschränkungen ausführbar. Es können gegebenenfalls Kleinanlagen auf Freiflächen und Nebengebäuden erwogen werden, sofern sie sich bestmöglich architektonisch integrieren und sich aus der Situierung keine negativen Auswirkungen auf die Erscheinung des Baudenkmals ergeben" (Bundesdenkmalamt 2015).

6.1 BEDEUTUNG DES DACHES

Über Jahrhunderte gepflegte Dächer sind Zeitfenster in die Vergangenheit, ähnlich den archäologischen Schichten; diese Elemente erzählen die Geschichte aus allen Bauphasen des Bauwerks. „Die Dachdeckung bildet einen wesentlichen Bestandteil der Außenerscheinung eines Baudenkmals und das Dach kann gewissermaßen als ›fünfte‹ Fassade des Baudenkmals gelten. Regional verfügbare Materialien bzw. die Möglichkeiten der Materialbeschaffung wie auch Wartungs-, Klima- und Gefahrenaspekte (z. B. Brandgefahr) bestimmten die Dachform, die Dachneigung und das Deckungsmaterial (z. B. Holz, Ziegel, Stein, Kupfer; später Eisenblech, Beton, Asbestzement, beim Flachdach auch Bitumen). Die Wirkung des Erscheinungsbildes beschränkt sich dabei bisweilen nicht nur auf das Objekt selbst, sondern kann auch eine Rolle innerhalb der Dachlandschaft eines Ensembles spielen" (Bundesdenkmalamt 2015).

Aufgabe der Fachbehörde ist es, zu verhindern, dass die Installation von Solaranlagen auf historischen Dächern und Dachlandschaften diese nachhaltig verändern oder stören (aufgrund ihrer Größe oder dem Format, der stark spiegelnden Oberfläche, der mit der Dachdeckung in Kontrast stehenden Materialität). Aber auch Möglichkeiten aufzuzeigen, wo eine Montage einer Solaranlage für das Denkmal verträglich ist. Dabei ist zu beachten, dass Solaranlagen aufgrund ihres starken Kontrasts zu einer homogenen Dachlandschaft eines historischen Umfeldes nicht wie ein Fremdkörper wahrgenommen werden (Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (2012). Daher ist bei der Standortwahl einer Solaranlage mit großer Sorgfalt vorzugehen.

Einblicke in Methodik der Denkmalpflege und auch deren Entscheidungswege werden in den Publikationen des Bundesdenkmalamtes u. a. der Richtlinie Energieeffizienz am Baudenkmal (derzeit in Überarbeitung) und den Standards der Baudenkmalpflege geboten. Diese Publikationen sollen als Hilfestellung in der Praxis der Baudenkmalpflege dienen und transparent die Entscheidungsparameter darlegen.

6.2 ABWÄGUNGSPROZESS

In den Standards der Baudenkmalpflege des Bundesdenkmalamtes finden sich zur Beurteilung derzeit folgende Vorgaben: „Anlagen auf Dächern sind nur in besonderen Einzelfällen denkmalfachlich vertretbar". Voraussetzung hierfür ist eine eindeutige Unterordnung ihrer Größe und darüber hinaus die bestmögliche architektonische Integration in die Dachfläche (Bundesdenkmalamt 2011). Maßgebend ist ebenso, dass diese sowohl vom öffentlichen und halböffentlichen Raum „sowie von wesentlich zur historischen Struktur des Baudenkmals gehörenden Räumen und Standorten" (Bundesdenkmalamt 2015) nicht störend sind. Solaranlagen „auf Dächern, die eine besondere architektonische Wirkung und Bedeutung haben (z. B. repräsentative, freistehende Bauten) bzw. Teil einer historischen Dachlandschaft sind, [sind] denkmalfachlich nicht vertretbar" (Bundesdenkmalamt 2015).

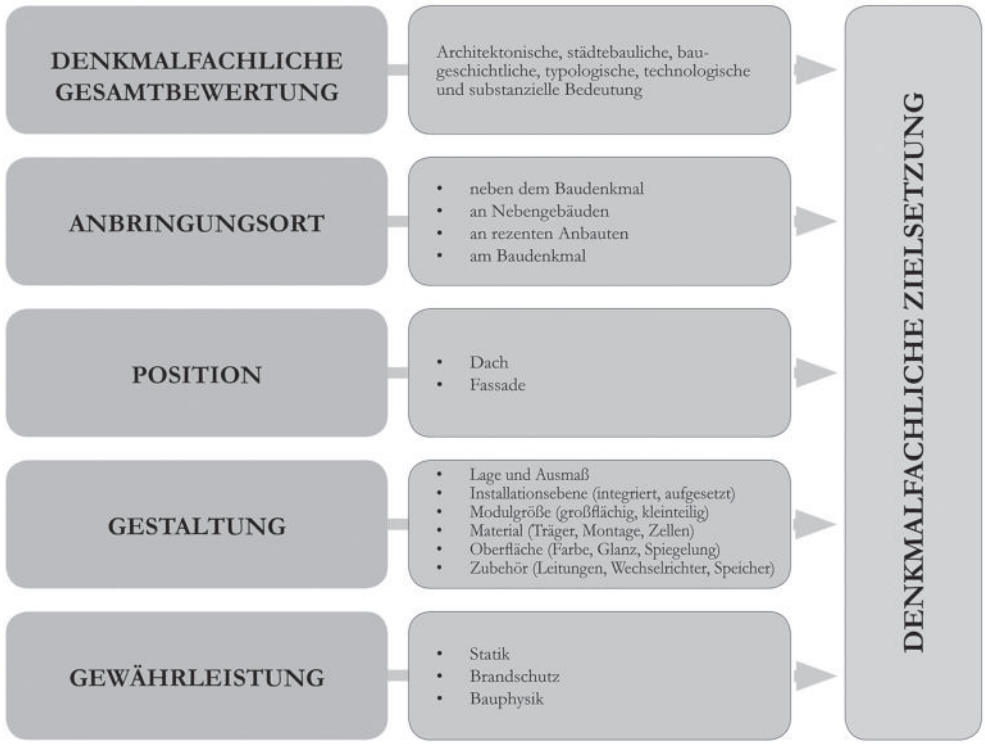


Abb. 1: Denkmalfachliche Zielsetzung am Beispiel Solaranlagen

In die Beurteilung bzgl. einer geplanten Montage einer Solaranlage fließen dementsprechend folgende Parameter ein:

- Denkmalfachliche Gesamtbewertung
- Anbringungsort
- Position
- Gestaltung
- Gewährleistung

Entscheidend sind immer die Umstände des jeweiligen Einzelfalls. Sollte nach eingehender Abwägung der Fachinstanz eine Anbringung einer Solaranlage möglich erscheinen, ist stets auf eine architektonisch hohe Gestaltungsqualität zu achten. (Abb. 1).

7. AUSBLICK

2019 befassten sich 10 % aller genehmigten Veränderungen an Österreichs Denkmalbestand mit Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Darunter befanden sich auch Entscheidungen in Bezug auf die Anbringung von Solaranlagen. Künftig ist – angesichts der energiepolitischen Zielsetzungen – ein vermehrter Bedarf an energetischen Ertüchtigungen zu erwarten, was für den Denkmalschutz durchaus eine Herausforderung darstellt. Hierbei gilt es, unser historisches Erbe als wertvolle und nicht erneuerbare Ressource für die kommenden Generationen zu bewahren.

LITERATUR

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (2012) Solarenergie und Denkmalpflege. München, Deutschland.

Bundesdenkmalamt (2011) Richtlinie Energieeffizienz. Bundesdenkmalamt Wien; Österreich (derzeit in Überarbeitung).

Bundesdenkmalamt (2015) Standards der Baudenkmalpflege. Bundesdenkmalamt (BDA), Wien, Österreich, 2. korrigierte Auflage,

Bundesdenkmalamt (09/2020) Denkmaldatenbank. Wien, Österreich.

DMSG (2013) Bundesgesetz betreffend den Schutz von Denkmalen wegen ihrer geschichtlichen, künstlerischen oder sonstigen kulturellen Bedeutung (Denkmalschutzgesetz - DMSG), BGBl. Nr. 533/1923 in der Fassung BGBl. I Nr. 92/2013

Fernsebner-Kokert B. & Kovar A. (2017) Bessere rechtliche Rahmenbedingungen für Baudenkmäler. Kovar & Partners GmbH, Wien, Österreich.

Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich (NEKP), Periode 2021-2030 vom 18. Dezember 2019

EU (2018) Richtlinie (EU) 2018/844 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz

„Servicestelle: Kommunaler Klimaschutz" beim Deutschen Institut für Urbanistik gGmbH (2011) Klimaschutz & Denkmalschutz. Köln, Deutschland.

Kontaktdaten:
Dipl. Ing. Elisabeth Seuschek
Schubertstraße 73
8010 Graz
Email: elisabeth.seuschek@bda.gv.at

Gebäudebegrünung – Anforderungen und Einflussfaktoren auf Gesundheit und Behaglichkeit „Indoor“ und „Downtown“

Ch. Vondrus
CV-Consulting e.U., Klosterneuburg, Österreich
St. Erker
Slavonia Baubedarf GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: Green walls face a long tradition in European cities. Originally intended for weather protection of the façade, deign of the courtyard and the drainage of the basement.
Today green walls and roofs help us to keep the city temperature cooler and the quality of living higher. There is a range of technical solutions with different qualities available. Urban farming project are prosperous and welcome by the public all over the world. Positive effects of green roofs and walls are scientifically proven and often supported by the local government. These effects are:

- City heat reduction by evaporation and shadowing
- Reduces energy for heating and cooling
- Reduces stormwater effects
- Filters pollutants and heavy metals out of rainwater
- Creation or natural habitat
- Filters pollutants and carbon dioxide out of the air
- Better sound protection
- Fosters natural habitat creation

To ensure functionality and positive effects of greening systems, they should have following features:

- Compliance with local requirements (fire, construction)
- Root membranes without ecotoxicological biocides.
- Easy to install and maintain
- Pre-cultivated und prefabricated elements for fast installation and greening on facades.
- Long lasting and suitable substrate (mineral based) for perfect water and fertilizer provision.
- Right Plants fitting to place and exposition
- Automatic fertilization and irrigation / automatic humidity monitoring
- Low weight systems for wall installation (below 50 kg/m²)

EINLEITUNG

Im Gegensatz zu Dachbegrünungen, haben Fassadenbegrünungen in den europäischen Städten eine lange aber bisher untergeordnete Tradition. Ursprünglich dienten dieses dem Schutz der Fassaden, der Gestaltung von Innenhöfen, und zur Entwässerung von Kellermauerwerk und Grundmauern.

Heute sollen Begrünungen den Auswirkungen der Klimaerwärmung entgegenwirken und ein behagliches „Stadtklima“ ermöglichen. Das heißt Schutz gegen sommerliche Überhitzung, Verminderung der Schadstoffexposition, Verbesserung der Akustik und Fassadenflächen architektonisch aufwerten - zur Schaffung eines psychologisch und physiologisch angenehmen Lebensraumes.

Gleichzeitig bietet die Gebäudebegrünungen im urbanen Umfeld Raum für eine hohe Biodiversität – welche in landwirtschaftlich genutzten Flächen oft nicht mehr besteht. Spitzenreiter ist hier die Stadt Paris

mit der in 2019 eröffneten größten „Urban Farm“ und dem Ziel von 200 entsprechenden Betrieben auf den Dächern Paris`. (Harrap, 2019)

Gebäudebegrünung ist in Österreich auch politisch gewünscht, durch OIB Richtlinien klar gefordert und durch Städte gefördert. Dabei soll auch auf Wartung und Pflege der Begrünung geachtet werden, um deren Funktionalität langfristig sicher zu stellen. (z.B. Förderungen-Wien (2020)

Auf folgende Quellen sei besonders hingewiesen:

- Reinwald et al. (2018) - Green up your City - Grundlagenstudie zur Fassaden- & Dachbegrünung im geförderten Wohnbau in Wien, Forschungsprojekt
- Leitfaden Fassadenbegrünung (2020) MA22 Wien
- Pfoser (2016) - Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung. Dissertation

1. WIRKUNG UND ZIELSETZUNG VON DACH- UND FASSADENBEGRÜNUNGEN

- Klimaverbesserung durch Verschattung und Verdunstung
- Verbesserung der Luftqualität
- Lärmschutz und Akustik Verbesserung
- Regenwasser Rückhalt
- Biodiversität im urbanen Raum
- Psychologische und physiologische Aufwertung des Lebensraumes Stadt
- Entlastung der Kanalsysteme
- Rechenbare Ausgleichsflächen für Rodungen und Versiegelungen



Abb. 1: Living Panels: NatureBase (Anschober et al. 2020)

2. VARIANTEN DER GEBÄUDEBEGRÜNUNG

- Bodengebundene Lösungen im gewachsenen Untergrund oder in Trögen mit Klettergerüsten bzw. Kletterhilfen
- Pflanzen in Töpfen, Rinnen (Edelstahl), Taschen (Fliese) oder Trögen (Beton)
- Fassadengebundene Systeme, vollflächige, ev. vorkultiviert, (sofort grün)
- Mit bzw. ohne automatische Bewässerung und Düngung

3. ANFORDERUNGEN AN BEGRÜNUGNSSYSTEME

- Technische Ausführungen und Brandschutz laut lokaler Normen u. Gesetze (ÖNorm B1300; ÖNorm B1300)
- Pflanzenauswahl (abhängig von Standort, Exposition, Planung) ist die Grundlage für die Haltbarkeit und den Pflegeaufwand (Häufigkeit Pflanzenaustausch?)
- Auswahl des Substrates: Wasser- u Nährstoff Speicherung / mineralisches oder organisches Substrat (Haltbarkeit und Dichte der Begrünung)
- Dauer der Begrünung: Bodengebundene Lösungen mit Klettergerüst nach einigen Jahren / vorkultivierte Lösungen „sofort grün“
- Bewässerung / Düngung: Automatisierung sichert Bestand, Winter Entwässerung gegen Frostschäden
- Pflege / Wartung: Austausch von Einzelpflanzen sehr zeitintensiv (Miete des öffentlichen Gutes für Gerüste oder Steiger und Zwischenlagerung!), hohe Schmutzentwicklung / Austausch von vorbegrünten Elementen, Kosten u. Zeit sparend
- Ökologischer Fußabdruck für Material, Pflege, Wartung, Rückbau (bisher kaum bewertet) - Biozid freie Lösungen für Wurzelschutzfolien für Fassade und Dach

4. ERKENNTNISSE ÜBER DIE WIRKUNG VON GEBÄUDEBEGRÜNUNGEN

4.1 BEISPIEL „LIVINGPANELS“

Die Highlights der fassadengebundenen Lösung „Living PANELS“ sind in Abb. 2 ersichtlich

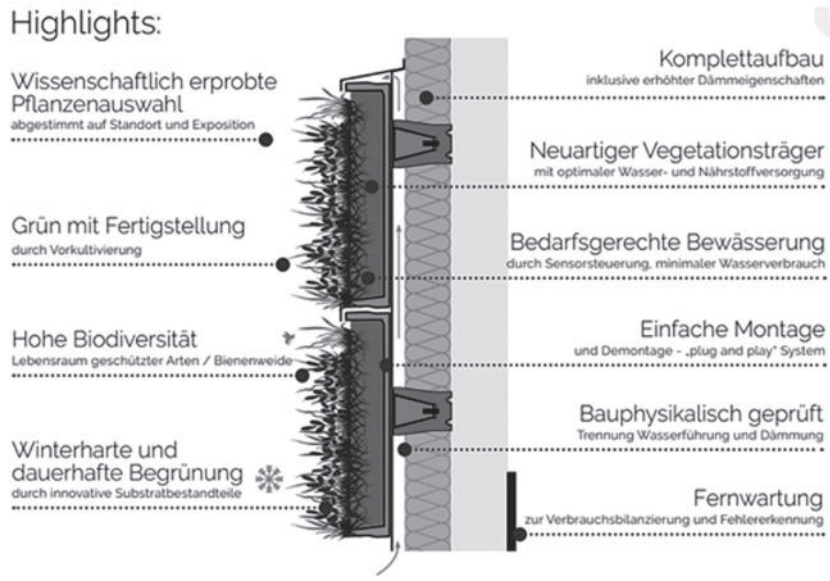


Abb. 2: Fassadengebundenen Lösung „LivingPANELS (Anschober et al. 2020)

4.2 PFLANZEN UND SUBSTRAT

- Organische Substrate, „Pflanzenerde, Verrottung, verliert müssen rasch die Speicherfähigkeit, häufiges Nachpflanzen erforderlich, müsste alle 2 – 3 Jahre ersetzt werden (meist nicht durchgeführt)
- Mineralische Substrate, optimal zur Feuchte u. Nährstoffspeicherung, genug Luftraum
- Steinwolle, Wasser schafft Abflusskanäle (Dünger rinnen ab, daneben trocken)
- GEWICHT, Leichteste fassadengebunden unter 50 kg / m² (LivingPANELS)
- Anzahl der Pflanzen / 1 m², 36 Stück optimal / 70 – 80 zu viele (kein Wurzelraum, teuer, hoher Ausfall)
- Pflanzenart abhängig von Standort und Exposition

4.3 PFLEGE

- 2 x pro Jahr, Pflegeschnitt und falls erforderlich Ausdünnen oder Ersatz
- Im Herbst: automatische Entwässerung aktivieren / Frostschutz (falls vorhanden)
- Im Frühjahr: automatische Entwässerung deaktivieren (falls vorhanden)
- Pflanzen in Rinnen oder Trögen werden samt Substrat getauscht (aufwendig, Schmutz, längerer Steiger-Einsatz). Setzlinge aus horizontaler Pflanzenaufzucht sind „verwöhnt"- dadurch entsteht an der Fassade ein höherer Ausfall)
- Lösungen in vertikalen Substratpads (vorkultiviert - Pflanzen an vertikale Position schon gewöhnt), geringerer Ausfall, nur einzelne Pads werden getauscht (wiederverwendbar), schneller, billiger, sauber

4.4 AUSWIRKUNG AUF RAUM UND AUSSENTEMPERATUR

- bleibt im Innern um bis ca. 8 °C kühler
- heizt das Stadtklima mit bis zu 218 W/m² weniger Energie auf
- Außenoberflächen um über 30 °C kühler
- reduziert die Temperatur des ausströmenden Luftkörpers um 10 %

5. GEBÄUDEBEGRÜNUNG UND SCHADSTOFFE

Gebäudebegrünungen können neben der Produktion von Sauerstoff auch Schadstoffe aufnehmen bzw. neutralisieren: CO_2, VOCs, Stickoxide, Feinstaub und Ultra Feinstaub.

Abhängig von den eingesetzten Materialien können aber auch Schadstoffe an die Umwelt abgegeben werden. Dies geschieht häufig beim Einsatz von mit Bioziden ausgestatteten Wurzelschutzfolien (Herbizid Mecroprop / MCPP). Diese waschen sich im Laufe der Zeit aus, was einerseits die eine Gefahr der Perforation der Dachdichtebene durch Wurzeln zur Folge hat und andererseits Biozide an das Grundwasser und Oberflächenwässer abgeleitet werden. Diese gefährdet die Umwelt und Kläranlagen. Deshalb werden in der Schweiz und in Deutschland bereits Biozid freie Gebäudehüllen und Abdichtungen gefordert. (Umtec 2017; KURAS 2020; Landessamt für Gesundheit und Soziales 2013).

Auch die BIG Bundes Immobilien Gebäude Verwaltung in Österreich schreibt im Rahmen des Holistic Building Programm Biozid freie Lösungen aus – für Fassaden, Putze, Dachbegrünung.

Als Beispiel sei das Produkt ISOFLAMM® EXSTRONG wf 5. der Fa. Slavonia genannt. Aus hochwertigem APP-Polymerbitumencompound bestehend und mit einer speziellen doppelten Armierung ausgestattet, kommt dies ohne chemischen Wurzelschutz aus und ist extrem formstabil (keine Leckagen durch Schrumpfung!)

Erst dadurch können Lösungen zur Regenwasser Retention und zur Regenwasser Nutzung für die Bewässerung von Grünflächen „Schadstofffrei" gelingen. Dadurch entstehen neue Biotope und gesunde Wasser Retentionsflächen

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Gebäudebegrünungen stellen eine praktikable Lösung dar, um den Lebensraum Stadt lebenswerter zu machen – für Mensch und Natur. Verschiedene technische Lösungen sind verfügbar. Planung, Ausschreibung und Ausführung müssen in Zusammenarbeit mit Experten erfolgen, um eine gute Qualität und eine lange Funktionalität der Gebäudebegrünung sicher zu stellen.

Durch die Wasserretentionswirkung der begrünten Flächen werden die Auswirkungen von Starkregenereignissen reduziert und das Kanalsystem entlastet

Aufgrund zusätzlicher Kosten für Errichtung und Erhaltung wird dies von öffentlichen und privaten Bauherren nur selten umgesetzt, Förderungen und gesetzliche Regelungen können die Akzeptanz positiv beeinflussen.

LITERATUR

Anschober J., Frühwirt G., Scharf B. (2020) Infofolder Living PANELS/NatureBASE, Green4City, https://www.naturebase.at/assets/infofolder_living_panels_092020_web.pdf

EN 13501-1. Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten“ Austrian Standards

ÖNorm B1300 Objektsicherheitsprüfungen für Wohngebäude - Regel-mäßige Prüfroutinen im Rahmen von Sichtkontrollen und zerstörungs-freien Begutachtungen, Austrian Standards

Förderungen-Wien (2020) Homepage der Stadt Wien, https://www.wien.gv.at/amtshelfer/umwelt/umweltschutz/naturschutz/fassadenbegruenung.html

https://www.wien.gv.at/umweltschutz/oekobusiness/check.html

https://www.wien.gv.at/umweltschutz/naturschutz/gruenoase/

Reinwald, F.; Weichselbaumer, R.; Liebl, U.; Brandenburg, C.; Damyanovic,BOKU (2018) Green up your City - Grundlagenstudie zur Fassaden- & Dachbegrünung im geförderten Wohnbau in Wien, Forschungsprojekt, Universität für Bodenkultur, Institut für Landschaftsplanung, Wien https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&menue_id_in=300&id_in=12195

Harrap, C. (2020) World’s largest urban farm to open – on a Paris rooftop, The Guardian, 13.08.2019 https://www.theguardian.com/cities/2019/aug/13/worlds-largest-urban-farm-to-open-on-a-paris-rooftop

Leitfaden Fassadenbegrünung (2020) MA22- Wiener Umweltschutzabteilung – Bereich räumliche Entwicklung, ÖkokaufWien – Arbeitsgruppe 25 Grün- und Freiräume (Hrsg) https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/fassadenbegruenung-leitfaden.pdf

Pfoser, N. (2016): Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Deutschland

Umtec (2017) Information über chemische Durchwurzelungs-schutzmittel in Bitumen-bahnen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien,HSR Hochschule für Technik Rapperswil Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik, - Stand 2017 https://www.umtec.ch/uploads/tx_hsrpm/171220_BAFU-Information_Mecoprop_in_Bitumen-Dachbahnen_BAFU_final.pdf

KURAS (2020) Austrag und Rückhalt von Mecoprop durch Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung, Kuras – Konzepte für urbane Regenwasserbewirtschaftung und Abwassersysteme, Stadt Entwicklung Berlin, abgerufen am 2.11.2010 https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/oekologisches_bauen/download/modellvorhaben/kuras_dach-biozid_mecoprop.pdf

Landessamt für Gesundheit und Soziales (2013) Handlungsempfehlungen zur Vermeidung der Umweltbelastung durch die Freisetzung des Herbizids Mecoprop aus wurzelfesten Bitumenbahnen, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt und das Landesamt für Gesundheit und Soziales, https://www.stadtentwicklung.berlin.de/bauen/oekologisches_bauen/download/broschueren/handlungsempfehlungen.pdf

Kontaktdaten Autor(en):
Mag. Ing. Christian Vondrus, CV-Consulting e. U.
Hauptstraße 49 G
3400 Klosterneuburg
Email: office@gesundbauen.at

Stefan Erker,
Slavonia Baubedarf GmbH
Hauffgasse 3 – 5
1110 Wien: office@slavonia.com

DI Johannes Anschober
Landschaftsarchitekt/Projektmanager
Green4Cities GmbH
Plenergasse 1/5
1180 Vienna
johannes.anschober@green4cities.com

Session 4b

Wärmepumpe/Kältetechnik

Aktuelle und zukünftige Entwicklungen von Kältemitteln für Raum- und Gewerbekühlung

Erös / Österreichische Gesellschaft der Kältetechnik (ÖGKT) / AT

Marktentwicklung und Trends der Wärmepumpe

Freimüller, Kopatsch, Kaineder / Wärmepumpe Austria / AT

Aktuelle und zukünftige Entwicklungen von Kältemitteln für Raum- und Gewerbekühlung

H. Erös
Österreichische Gesellschaft der Kältetechnik (ÖGKT), Wien, Österreich

ABSTRACT: A survey by Haas & Halper (2020) shows that at least 12 different refrigerant types are currently being sold by refrigerant wholesalers. This is reflected in a high degree of uncertainty among many refrigeration companies, system operators and planners when choosing the right refrigerant. The number of available refrigerants seems almost unmanageable.

Drivers for the use of refrigerants are legal framework conditions. The European regulation on fluorinated greenhouse gases and the Kigali Amendment to the Montreal Protocol are two examples. Both are united by the goal of reducing the marketing of refrigerants with high GWP (Global Warming Potential).

The market can be roughly divided into refrigerating (35 %) and air-conditioning (65 %). On the one hand, the refrigeration sector consists of 73 % commercial refrigeration. On the other hand, the sector of room cooling including heat pumps is considered. The further subdivision is 45 % to air/air units, 4 % to "heat only heat pumps", 36 % to mobile units (UNEP 2020). Whereby the share of households with space cooling will increase exorbitantly by 2050 (Motherway 2018).

An EU Commission report now concludes that it seems technically possible to ban F-gases today in new split air conditioners with a cooling capacity below 7 kW and to use the refrigerant R-290 (propane) instead. For split air conditioners with a capacity of more than 7 kW it still seems necessary to use F-gases at this stage. Due to the GWP, the refrigerant R-32 should be preferred to R-410A. (EU-Komission 2020a)

In the survey by Haas & Halper (2020) of refrigeration companies, operators and refrigerant wholesalers already mentioned, it was found that the proportion of natural refrigerants such as R-744 (carbon dioxide) is increasing. Transcritical R-744 installations, for example, were used at an early stage in Europe, which is why the number of installed systems is very high, with simultaneous growth rates of 81 % between 2018 and May 2020.

1. EINLEITUNG

Eine Umfrage von Haas & Halper (2020) zeigt, dass derzeit mindestens 12 verschiedene Kältemitteltypen in Verkehr gebracht werden. Das spiegelt sich bei vielen Kältefachfirmen, Anlagenbetreibern und Planern in einer hohen Unsicherheit bei der Wahl des richtigen Kältemittels wider. Es scheint die Anzahl an verfügbaren Kältemitteln schier unüberschaubar.

Nachstehend sollen rechtliche Rahmenbedingungen, der aktuelle Stand eingesetzter Kältemitteltypen und eine Abschätzung der künftig verwendeten Kältemitteltypen aufgezeigt werden.

2. RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Wesentliche Treiber für die Verwendung von Kältemitteln sind rechtliche Rahmenbedingungen. Zwei Beispiele dafür sollen folgend beschrieben werden.

2.1 DIE EU-F-GASE-VERORDNUNG

Ziel der EU-F-Gase-Verordnung (2014) ist es die Menge an fluorierten Treibhausgasen bis 2030 schrittweise auf 32 % des Standes von 2014 zu senken. Das erfolgt über vorgeschriebene wiederkehrende Überprüfung auf Dichtheit, Verbote für Installation von Neuanlagen, Verbot von Kältemitteln und einer gleich-

zeitigen Produktionsverknappung, Personenqualifikation und Zertifizierung sowie Anlagenkennzeichnung. Ausschlaggebende Größe dafür ist immer das GWP eines Kältemittels. Dieses „Global Warming Potential" bzw. „Treibhauspotential" gibt an, um wieviel ein Kältemittel mehr zum Treibhauspotential beiträgt als CO_2".

Das Phase-Down-Szenario ist in nachstehender Abb. 1 dargestellt.



Abb. 1: Phase-Down-Szenario gemäß EU-F-Gase-Verordnung (2014)

So ist die schrittweise Reduktion der Mengen CO_2, die innerhalb der EU in Verkehr gebracht werden dürfen ersichtlich. Nächster großer Schritt ist die Reduktion um 55 % auf 45 % des Basiswerts von 2015. 2030 dürfen nur mehr 21 % des Wertes von 2015 in Verkehr gebracht werden.

Um diese Zahlen und die Auswirkung auf die Verwendung von Kältemittel etwas zu veranschaulichen empfiehlt es sich den rechnerisch Durchschnitts-GWP der 2015 in Verkehr gebrachten Kältemittel als Basis für den Verlauf im Phase-Down-Szenario zu wählen (Abb. 2).

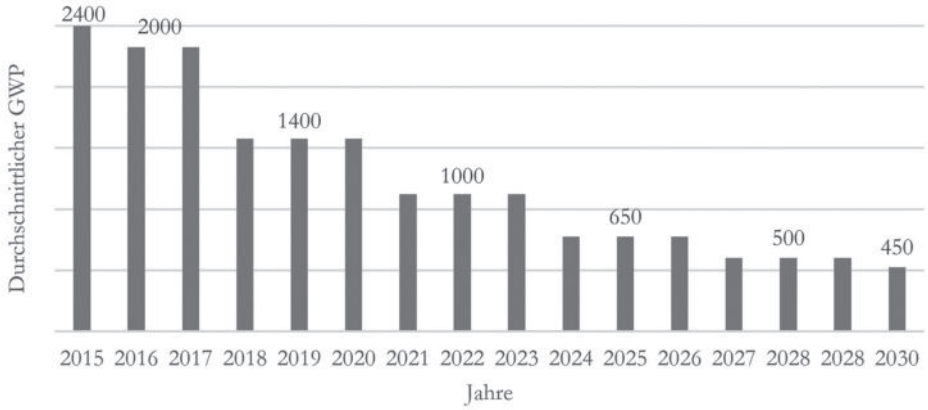


Abb. 2: Phase-Down-Szenario gemäß EU-F-Gase-Verordnung (2014) mit rechnerisch durchschnitts GWPs

So erkennt man, dass eine langfristige Verwendung von Kältemittel mit einem GWP über 650 langfristig nicht wahrscheinlich ist.

Der Ordnung halber soll erwähnt werden, dass die derzeitige EU-F-Gase-Verordnung 2022 revidiert wird. Die EU-Kommission führt dazu öffentliche Konsultationen durch (EU-Kommission 2020b).

2.2 DAS KIGALI AMENDMENT ZUM MONTREAL PROTOKOLL

Um aufzuzeigen, dass die Reduktion von Treibhausgasen nicht nur ein europäisches Anliegen ist, sei nachstehend kurz das Kigali Amendment zum Montreal Protokoll vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein weltweites Abkommen von 197 Ländern mit dem Ziel der Reduzierung von Treibhausgasen wie Fluorkohlenwasserstoffe (FKWs) in der Herstellung sowie im Verbrauch wie in Tab. 1 dargestellt. (UNEP 2016)

Lt. UNTC (2020) haben im Oktober 2020 bereits 106 Länder das Kigali Amendment zum Montreal Protokoll ratifiziert.

Eine grundlegende Unterscheidung im Zeitplan ergibt sich lt. UNEP (2016) für:

- Artikel-5-Vertragsstaaten (Entwicklungsländer)
- Nicht-Artikel-5 Vertragsstaaten (Industriestaaten)

Tab. 1: Zeitplan für den Phase-Down von Fluorkohlenwasserstoffen (FKWs) lt. Kigali Amendment (UNEP 2016)

	Artikel-5-Vertragsstaaten (Entwicklungsländer)		Nicht-Artikel-5-Vertragsstaaten (Industrieländer)
	Gruppe 1	Gruppe 2	
Durchschnittliche FKW-Verbrauchswerte für	2020-2022	2024-2026	2011-2013
HFCKW-Basisverbrauchs	+ 65 %	+ 65 %	+ 15 %
Freeze	2024	2028	
Schritt 1	2029 – 10 %	2032 – 10 %	2019 – 10 %
Schritt 2	2035 – 30 %	2037 – 20 %	2024 – 40 %
Schritt 3	2040 – 50 %	2042 – 30 %	2029 – 70 %
Schritt 4			2034 – 80 %
	2045 – 80 %	2047 – 85 %	2036 – 85 %

1 Technologieüberprüfung im Jahr 2022 und alle fünf Jahre

So zeigt sich, dass sowohl Industrieländer wie Nicht-Industrieländer einem Phase-Down unterliegen, welcher dem, der EU-F-Gase-Verordnung ähnelt. Unterschiedlich ist der Zeitplan und die Zielwerte, aber das Ziel der Reduktion des in Verkehr bringen von Kältemitteln mit hohen GWP eint beide Verordnungen. Somit werden auch global gesehen Kältemittel mit einem hohen GWP vom Markt verschwinden.

3. ABSCHÄTZUNG INSTALLIERTER KÄLTEANLAGEN

Eine Möglichkeit der Unterscheidung von unterschiedlichen Anlagentypen zeigt Abb. 3 auf der nächsten Seite. Darin wird die Verteilung zwischen Kälteanlagen und Anlagen für Raumkühlung inkl. Wärmepumpen unterschieden.

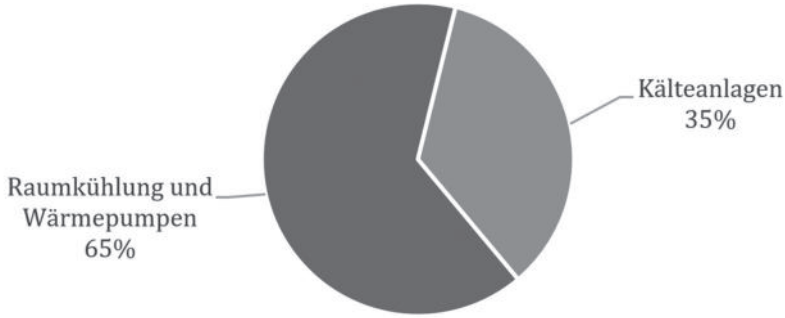


Abb. 3: Aufteilung zwischen Kälteanlagen und Raumkühlung (UNEP 2020)

Betrachtet man die einzelnen Segmente etwas detaillierter so unterteilen sich Kälteanlagen gemäß Abb. 4.

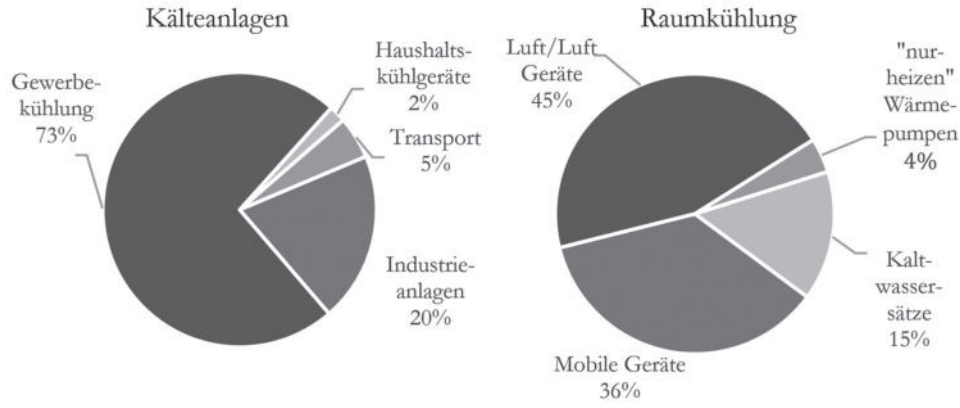


Abb. 4: Aufteilung des Sektors Kälteanlagen und Raumkühlung (UNEP, 2020)

Man erkennt, dass 73 % der Anlagen im Bereich von Gewerbekühlung fallen. Industrieanlagen sind etwa 20 %. Schlusslicht bildet die Transportkälte mit 5 % und Haushaltskühlgeräte mit 2 %. Besondere Beachtung sollte man auch dem Bereich der Raumkühlung und Wärmepumpen schenken. Darin ersichtlich ist ein sehr großer Anteil an Luft/Luft-Geräten mit 45 %. Mobile Geräte sind mit 36 % vertreten. Kaltwassersätze weisen lediglich einen Anteil von 15 % auf.

Vor diesem Hintergrund soll nun die Entwicklung der Anzahl an Haushalten mit einer Raumkühlung in Abb. 5 gezeigt werden. Abb. 5 zeigt, dass ein exorbitanter Anstieg an verbauten Raumkühlungen bevorsteht. Deswegen gebührt gerade dem Sektor der Raumkühlung besonderer Fokus bei der Betrachtung der eingesetzten Kältemittel.

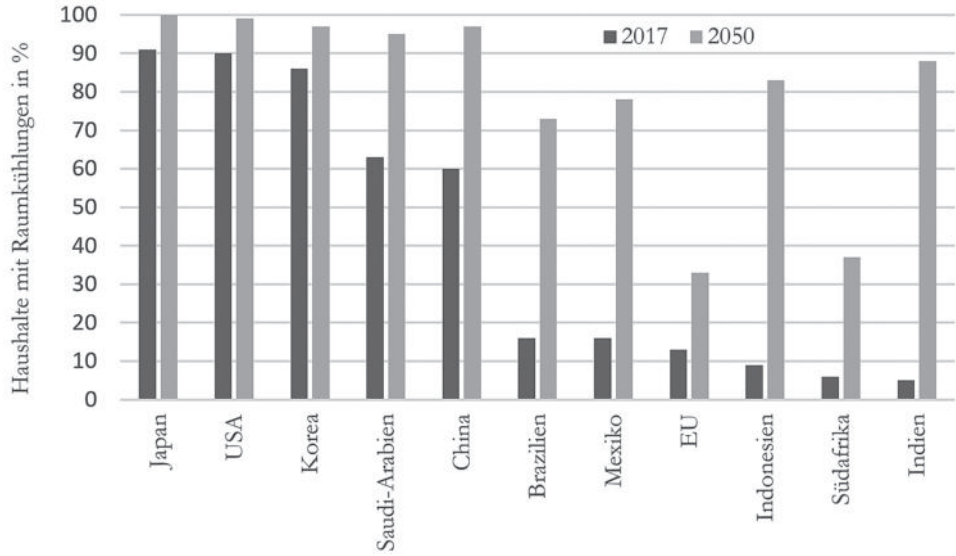


Abb. 5: Haushalte mit Raumkühlungen (Motherway 2018)

4. EINSCHÄTZUNG DER VERWENDETEN KÄLTEMITTEL FÜR RAUMKÜHLUNG

Die Europäische Kommission hat sich selbst in der EU-F-Gase-Verordnung (2014) auferlegt, dass die EU prüfen muss ob es „kostenwirksame, technisch realisierbare, energieeffiziente und zuverlässige Alternativen gibt, mit denen fluorierte Treibhausgase in neuen kleinen Mono-Splitklimageräten ersetzt werden"

In eben diesem Bericht kommt nun die EU-Kommission (2020) zum Schluss, dass es technisch möglich scheint, F-Gase heute in neuen Split-Klimaanlage mit einer Kälteleistung unter 7 kW zu verbieten und an deren Stelle das Kältemittel R-290 (Propan) zu verwenden. Dies muss nationalen Gesetze entsprechen. Wobei eben diese nationalen Gesetze, anscheinend bisher eine groß angelegte Einführung solcher Geräte in der EU verhindert hat. Weiters vertritt die EU-Kommission die Meinung, dass R-290-Einheiten gute Energieeffizienz bieten und diese Geräte nur geringfügig teurer wären, wenn diese in Massenproduktion hergestellt und in großem Maßstab vermarktet würden.

Für Split-Klimaanlagen mit einer Leistung über 7 kW erscheint es der EU-Kommission (2020) zum jetzigen Zeitpunkt noch notwendig, F-Gase zu verwenden. Auf Grund des GWPs ist dafür das Kältemittel R-32 dem Kältemittel R-410A vorzuziehen. Die Energie- und Kosteneffizienz ist ähnlich bzw. sogar besser. Wobei Anlagen mit solchen Kältemitteln auf Grund ihrer geringen Brennbarkeit durch Bauvorschriften und andere gesetzliche Anforderungen Restriktionen unterliegen können.

Schlüssel dazu ist die entsprechende Sach- und Fachkunde von Kältefachfirmen, Anlagenbetreibern und Planern sowie die Einarbeitung in Normen und gesetzliche Vorgaben. Ein Beispiel für eine solche technische Umsetzung ist die Norm IEC 60335-2-89 mit der Anhebung der Bagatellgrenze bei Kühlgeräten mit brennbaren Kältemitteln von 150 g auf 500 g. Auch die geänderten Anforderungen an die Sach- und Fachkunde von Betreibern finden sich im Entwurf der ÖNORM EN 22712 wieder. (Erös 2020)

5. EINSCHÄTZUNG DER VERWENDETEN KÄLTEMITTEL FÜR GEWERBEKÜHLUNG

Bei einer Umfrage von Kältefachfirmen, Anlagenbetreibern und Kältemittelgroßhandel haben Haas & Halper (2020) erhoben, dass der Anteil an natürlichen Kältemitteln wie R-744 (Kohlendioxid) im Zunehmen ist. Zur Veranschaulichung dieses Trends sei der Zuwachs an transkritischen Anlagen mit dem Kältemittel R-744 in nachstehender Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 2: Anzahl an transkritischen R-744-Anlagen (Shecco 2020)

	Anzahl an transkritischen R-744-Anlagen			Wachstum
Region	2008	2018	Mai 2020	2018 zu 2020 %
Europa	140	> 16.000	29.000	81
U.S.A.		> 370	650	76
Canada		> 245	340	39
Japan		> 3.530	5.000	42

Ersichtlich ist dabei, dass in Europa schon früh diese Technologie eingesetzt wurde. Dementsprechend hoch ist die Anzahl verbauter Anlagen bei gleichzeitiger Zuwachsrate von 81 % von 2018 auf Mai 2020. Die Aufteilung der im Mai 2020 installierten 29.000 transkritischen R-744-Anlagen in Europa zeigt nun Abb. 6

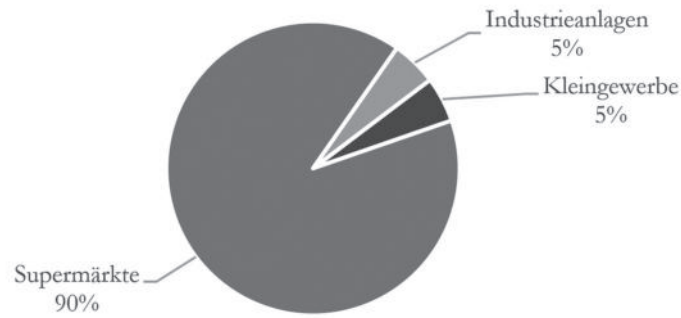


Abb. 6: Aufteilung transkritischer R-744-Anlagen in Europa im Mai 2020 (Shecco, 2020)

So erkennt man in Abb. 6, dass 90 % aller in Europa verbauten transkritischen R-744-Anlagen auf den Bereich der Supermärkte entfallen. Lediglich 5 % aller Anlagen sind Industrieanlagen.

6. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Generell dürfte der Anteil an Kälteanlagen, die mit natürlichen Kältemitteln wie R-290 (Propan) oder R-744 (Kohlendioxid) betrieben werden künftig steigen. Sofern nicht Kältemittel mit sehr geringen GWPs in den nächsten Jahren Marktreife erlangen scheinen auch natürliche Kältemittel die einzig langfristig verfügbare Lösung zu sein, da nur diese die rechtlichen Anforderung gemäß EU-F-Gase-Verordnung (2014) oder Kigali Amendment erfüllen.

LITERATUR

Erös H. (2020) Brennbare Kältemittel (ISBN: 978-3-200-07049-3) Herausgeberin: Österreichische Gesellschaft der Kältetechnik (ÖGKT)

EU-F-Gase-Verordnung (2014) Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 Text von Bedeutung für den EWR abgerufen am 10.10.2020 um 22:00 von https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014R0517&from=DE

EU-Kommission (2020a) Report from the Commission: The availability of refrigerant for new split air conditioning systems that can replace fluorinated greenhouse gases or result in a lower climate impact, abgerufen am 10.10.2020 um 22:00 von https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/news/docs/c_2020_6637_en.pdf

EU-Kommission (2020b) Fluorierte Treibhausgase - Überprüfung der EU-Vorschriften (2015-20) abgerufen am 11.10.2020 um 10:00 von https://ec.europa.eu/info/ law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12479-Review-of-EU-rules-on-fluorinated-greenhouse-gases

Haas F., Halper P. (2020) Überarbeitung der Emissionsfaktoren stationärer Kälteanlagen, unveröffentlichte Bachelorarbeit an der Fachhochschule GmbH Burgenland, Pinkafeld

Motherway B. (2018) Energy efficiency - The big picture, Vortrag im Rahmen der United Nations Open-ended Working Group of the Parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Wien, Juli 2018

Shecco (2020) World Guide to transcritical CO_2 refirgeration, abgerufen am 26.09.2020 um 16:30 von https://issuu.com/shecco/docs/r744-guide

UNEP (2016) Frequently asked questions relating to the Kigali Amendment to the Montreal Protocol, United Nations Environment Programme, abgerufen am 11.10.2020 um 15:00 von https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ faq_kigali_amendment_en.pdf

UNEP (2020) Cooling Emissions and Policy Synthesis Report, (ISBN 978-92-807-3778-3), United Nations Environment Programme

UNTC (2020) Status of Participants to the Kigali Amendment, United Nations Treaty Collection, abgerufen am 11.10.2020 um 15:00 von https://treaties.un.org/Pages/ ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-2-f&chapter=27&clang=_en

Kontaktdaten:
DI Harald Erös
Vorstandsvorsitzender der Österreichischen Gesellschaft der Kältetechnik (ÖGKT)
Althanstraße 1-3/1/30
1090 Wien
Email: office@ögkt.at
www.ögk.at

Marktentwicklung und Trends der Wärmepumpe

R. Freimüller, S. Kopatsch, S. Kaineder
Wärmepumpe Austria, Linz, Österreich

ABSTRACT: According to the European Heat Pump Association (EHPA) Austria ranks number 13 in absolute annual heat pump sales for 2019, after the top runners France (397,000 units), Italy (208,000 units) and Spain (128,000 units) and also Sweden, Norway, Germany, Finland, Denmark, the Netherlands, Poland, Great Britain and Switzerland. Measured by the heat pumps sold per 1000 households in 2019, Austria ranks behind Norway (48 units), Finland (38 units), Estonia (29 units), Denmark (25 units), Sweden (23 units) and also France, Switzerland, Lithuania and Italy with 7.8 sold heat pumps per 1,000 households in tenth place.

The heat pump technology was introduced in Austria in the late 1970s. The sharp rise in fossil fuel prices was a strong driver for this development. During the 1980s, heat pumps were mainly used to heat domestic water. Due to falling oil prices and poor quality management, the sales figures for heat pumps in the Austrian domestic market fell significantly again during the 1990s. From the year 2000 sales increased, especially in the area of heating heat pumps. The backgrounds of this new growth are diverse and interconnected.

The Austrian heat pump market has shown very dynamic developments after the year 2000, as the system requirements for a broad application of heat pump technology for the provision of space heating, waste water heating as well as cooling and air conditioning became more and more favorable. The main success parameters were the technical advancement of the heat pump technology itself, the market diffusion of energy-efficient buildings, increasing comfort demands of the users, a general trend towards monovalent heat supply systems, the growing awareness of the users with regard to the use of renewable energy and last but not least also the increasing cooling and air-conditioning requirements due to increasingly warmer summers.

1. MARKTENTWICKLUNG WÄRMEPUMPEN

1.1 ÜBERSICHT MARKTENTWICKLUNG IN EUROPA

Die European Heat Pump Association (EHPA) listet Österreich in Bezug auf die absoluten jährlichen Wärmepumpen-Verkaufszahlen für das Jahr 2019 nach den Spitzenreitern Frankreich (397.000 Stk.), Italien (208.000 Stk.) und Spanien (128.000 Stk) und weiters Schweden, Norwegen, Deutschland, Finnland, Dänemark, Niederlande, Polen, Großbritannien und Schweiz an dreizehnter Stelle. Gemessen an den pro 1000 Haushalten im Jahr 2019 verkauften Wärmepumpen liegt Österreich nach den Spitzenreitern Norwegen (48 Stk.), Finnland (38 Stk.), Estland (29 Stk.), Dänemark (25 Stk.), Schweden (23 Stk.) und weiters Frankreich, Schweiz, Litauen und Italien mit 7,8 verkauften Wärmepumpen pro 1000 Haushalte an zehnter Stelle. (Biermayr et al. 2020; Nowak 2020)

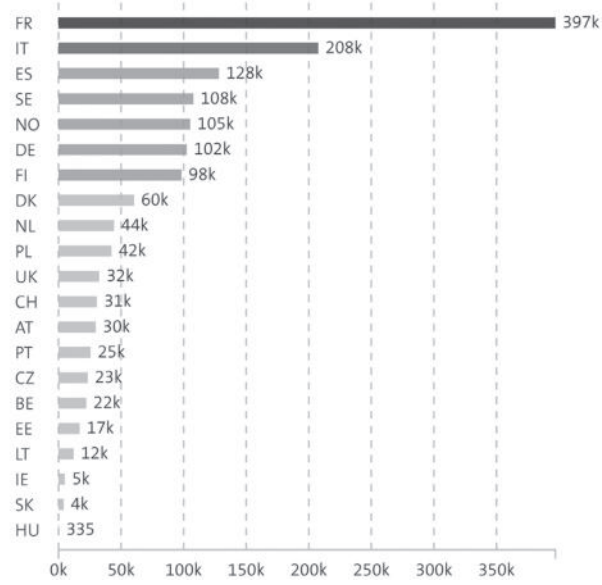


Abb. 1: Wärmepumpen Verkaufszahlen der europäischen Länder in tausend Stück (Nowak, 2020)

In der folgenden Abb. 2 wird die Entwicklung der Wärmepumpen-Verkaufszahlen in Europa nach den unterschiedlichen Wärmequellen gezeigt:

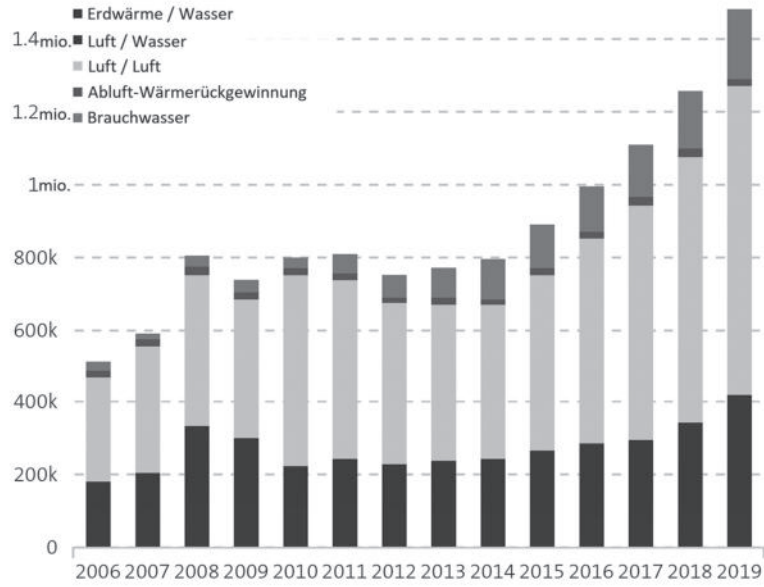


Abb. 2: Wärmepumpen Verkaufsentwicklung in Europa nach Quellentypen in tausend Stück (Nowak, 2020)

1.2 MARKTENTWICKLUNG IN ÖSTERREICH

Die folgenden Ausführengen entspringen dem Bericht Innovative Energietechnologien in Österreich, Marktentwicklung 2019 (Biermayr et al. 2020)

„Die nachfolgende Dokumentation des österreichischen Wärmepumpeninlands- und -exportmarktes für das Datenjahr 2019 berücksichtigt die Datenmeldungen von 39 österreichischen Wärmepumpenproduzenten und Wärmepumpen-Vertriebsfirmen.

1.2.1 Verkaufszahlen nach Typ und Leistungsklasse

Die historische Entwicklung des Wärmepumpen-Inlandsmarktes ist in Abb. 3 bis zum Datenjahr 2019 dargestellt. Die Markteinführung der Technologie erfolgte in den späten 1970er Jahren und war durch stark steigende Preise fossiler Energie motiviert. Wärmepumpen wurden während der 1980er Jahre überwiegend zur Brauchwassererwärmung eingesetzt, siehe hierzu auch Abb. 4. Bedingt durch sinkende Ölpreise und ein mangelhaftes Qualitätsmanagement reduzierten sich die Verkaufszahlen von Wärmepumpen im österreichischen Inlandsmarkt während der 1990er Jahre wieder deutlich. Ab dem Jahr 2000 stiegen die Verkaufszahlen vor allem im Bereich der Heizungswärmepumpen an. Die Hintergründe dieses neuen Wachstums sind vielgestaltig und vernetzt. Wesentlich war die steigende Energieeffizienz neuer Gebäude, die zur Reduktion des Heizwärmebedarfs und zur Absenkung des Temperaturniveaus für den Heizungsvorlauf führte. Hinzu kamen die fortgeschrittene technische Entwicklung der Wärmepumpen, verbunden mit begleitenden Maßnahmen der technischen Qualitätssicherung bis hin zur Aus- und Weiterbildung bzw. Zertifizierung von Installateuren. Im Sinne der Förderung der Nutzung erneuerbarer Energie standen zunehmend auch anreizorientierte energiepolitische Instrumente, z.B. auf der Ebene der Wohnbauförderungen, zur Verfügung.

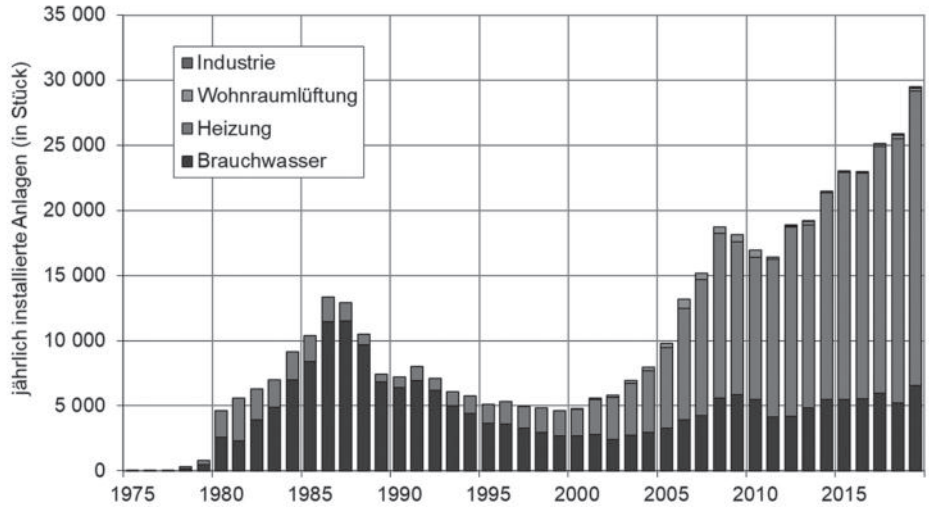


Abb. 3: Wärmepumpen-Verkaufszahlen in Österreich bis 2018 (Biermayer et al. 2020 S. 171)

Die Auswirkungen der Finanz- und Wirtschaftskrise ab dem Jahr 2008 waren für die Wärmepumpenbranche im Vergleich zu anderen Technologien und Wirtschaftsbereichen überschaubar und von kurzer Dauer. Bereits im Jahr 2011 waren wieder steigende Verkaufszahlen bei Heizungswärmepumpen zu beobachten und ab 2012 kam es auch beim Gesamtabsatz zu einem neuerlichen deutlichen Wachstum.

Im Jahr 2019 konnten im Inlandsmarkt insgesamt 29.482 Wärmepumpen aller Kategorien und Leistungsklassen (Heizungs-, Brauchwasser-, Wohnraumlüftungs- und Industriewärme- pumpen) abgesetzt werden. In Bezug auf das Vorjahr steigerten sich die Verkaufszahlen damit um 13,9 %. Damit setzte sich das längerfristige Wachstum der Verkaufszahlen im Jahr 2019 mit einer starken Dynamik fort.

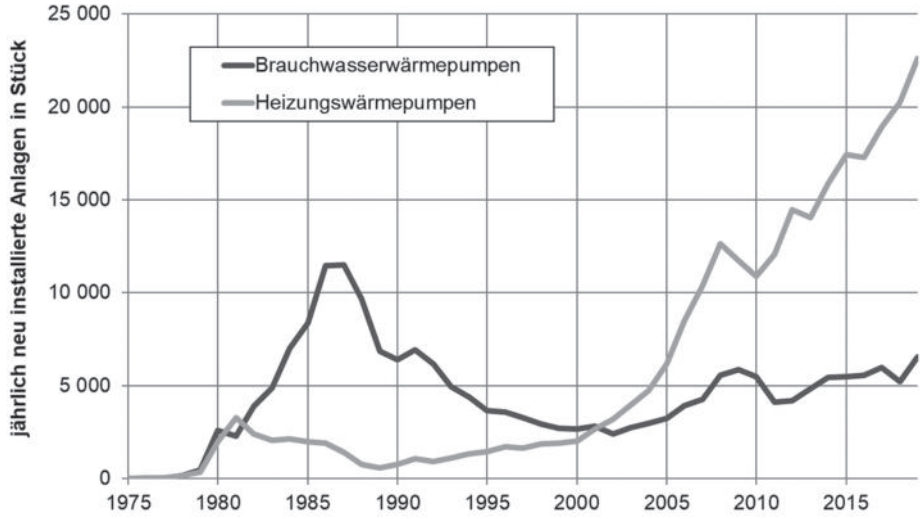
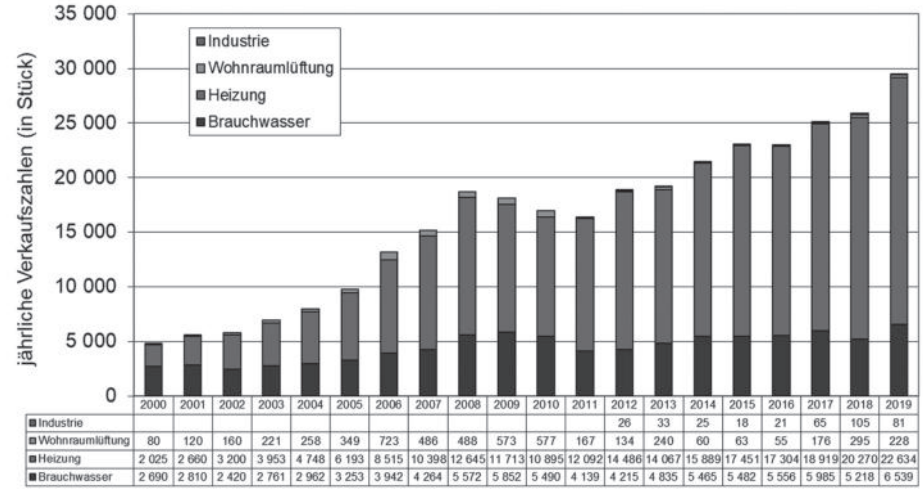


Abb. 4 – Brauchwasser- und Heizungswärmepumpen in Österreich bis 2019 (Biermayr et al. 2020 S. 172)

In Abb. 5 ist die Entwicklung des Wärmepumpen-Inlandsmarktes für das Zeitfenster der Jahre 2000 bis 2019 dargestellt. Hierbei ist die Phase des starken exponentiellen Wachstums der Absatzzahlen im Zeitraum von 2000 bis 2008 deutlich zu erkennen. Die jährlichen Verkaufszahlen für Heizungswärmepumpen stiegen in diesem Zeitraum von 2.025 Stück auf 12.645 Stück an, was einem jährlichen Zuwachs von 25,7 % entspricht. Die Verkaufszahlen für Brauchwasserwärmepumpen stiegen im selben Zeitraum von 2.690 Stück auf 5.572 Stück an, äquivalent einem jährlichen Wachstum von 9,5 %. Bedingt durch die Finanz- und Wirtschaftskrise kam es zu Veränderungen des Marktumfeldes und zu einem jähen Trendbruch. Maßgeblich waren vor allem die Depression der Bauwirtschaft, die restriktive Kreditvergabe, aber auch der Einbruch des Ölpreises.



	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Industrie													26	33	25	18	21	65	105	81
Wohnraumlüftung	80	120	160	221	258	349	723	486	488	573	577	167	134	240	60	63	55	176	295	228
Heizung	2 025	2 660	3 200	3 953	4 748	6 193	8 515	10 398	12 645	11 713	10 895	12 092	14 486	14 067	15 889	17 451	17 304	18 919	20 270	22 634
Brauchwasser	2 690	2 810	2 420	2 761	2 962	3 253	3 942	4 264	5 572	5 852	5 490	4 139	4 215	4 835	5 465	5 482	5 556	5 985	5 218	6 539

Abb. 5: Jährliche Wärmepumpen-Verkaufszahlen in Österreich 2000 bis 2019 (Biermayr et al. 2020 S. 173)

Obwohl sich der Wärmepumpenmarkt nach der Finanz- und Wirtschaftskrise rasch erholen konnte, wurde die Wachstumsdynamik der Jahre 2000 bis 2008 bisher nicht wieder erreicht. Markant war in diesem

Zusammenhang auch die Stagnation der Verkaufszahlen der Brauchwasserwärmepumpe. Die Verkaufszahlen der Heizungswärmepumpen überstiegen erstmals im Jahr 2002 die Verkaufszahlen der Brauchwasserwärmepumpen. Im Jahr 2019 wurden im österreichischen Inlandsmarkt 3,5-mal mehr Heizungswärmepumpen als Brauchwasserwärmepumpen abgesetzt. Dieser Effekt resultiert zum Teil aus einem Trend zu monovalenten Wärmebereitstellungsanlagen, welche sowohl Raumwärme als auch die Brauchwassererwärmung bereitstellen können. Ein steigender Anteil an Wärmepumpen- Kombianlagen substituiert dabei auch separate Brauchwasserwärmepumpen.

1.2.2 In Betrieb befindliche Anlagen

Zur Berechnung der in Betrieb befindlichen Anlagen wurde eine technische Lebensdauer der Anlagen von 20 Jahren angenommen. Durch den historischen Verlauf der Marktdiffusion der Brauchwasserwärmepumpen mit einem ersten Diffusionsmaximum im Jahr 1986 kam es trotz neuerlich steigender Diffusionsraten ab dem Jahr 2000 zu einem Absinken des Bestandes an Brauchwasserwärmepumpen ab dem Jahr 2000, siehe Abb. 6 und Abb. 7. Im Jahr 2009 überstieg der Bestand an Heizungswärmepumpen erstmals den Bestand an Brauchwasserwärmepumpen. Bei den Heizungswärmepumpen liegt dieser Effekt nicht vor, da das historische Diffusionsmaximum in den 1980er Jahren weitaus schwächer ausgeprägt war, als jenes der Brauchwasserwärmepumpen. In der Kategorie der Heizungswärmepumpen schlagen sich die Zuwächse seit dem Jahr 2000 bereits deutlich im Anlagenbestand nieder.

Den Berechnungen zufolge waren im Jahr 2019 in Österreich 89.450 Brauchwasserwärmepumpen, 230.057 Heizungswärmepumpen, 5.453 Wohnraumlüftungswärmepumpen und 374 Industriewärmepumpen in Betrieb. Insgesamt waren dies 325.334 Wärmepumpen für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche. Die hier dargestellten Bestandszahlen bilden in der Folge die Basis der Kalkulation des energetischen Ertrages und der Emissionseinsparungen in den nachfolgenden Kapiteln.

Im österreichischen Inlandsmarkt wurden vom Beginn der Marktdiffusion bis zum Jahr 2019 insgesamt 472.670 Wärmepumpenanlagen verkauft. Davon waren 203.709 Brauchwasserwärmepumpen, 263.134 Heizungswärmepumpen, 5.453 Wohnraumlüftungswärmepumpen und 374 Industriewärmepumen.

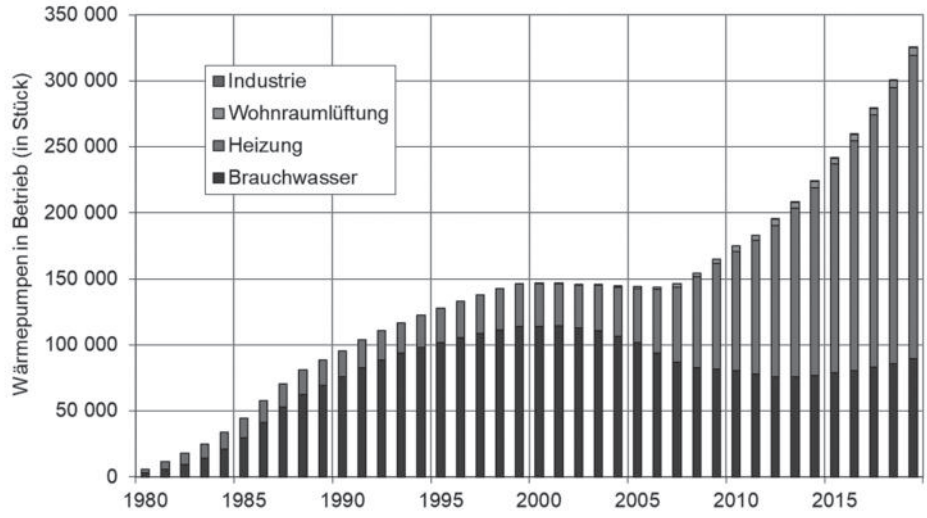


Abb. 6: Wärmepumpen-Bestandsentwicklung in Österreich bis 2019 Lebensdauer: 20 Jahre; (Biermayr et al. 2020 S. 179)

Wie anhand obenstehender Abbildungen gut sichtbar wird, hat die historische Marktdiffusion große Auswirkungen auf den in Betrieb befindlichen Bestand, aber auch auf die zukünftigen Verkaufszahlen.

Vorausgesetzt, dass die Anschaffung einer Wärmepumpe von den privaten Wärmepumpenbetreibern nach dem Erreichen der technischen Lebensdauer der Wärmepumpe bestätigt wird, kann dies zu einer sehr dynamischen Entwicklung der jährlichen Verkaufszahlen führen. Nämlich vor allem dann, wenn parallel zum Ersatz der aus dem Bestand ausscheidenden Altanlagen neue Märkte – wie z.B. der Sanierungsmarkt oder der Markt für gewerbliche und industrielle Anwendungen – erschlossen werden. Bei den Heizungswärmepumpen kann diese dynamische Entwicklung der Verkaufszahlen im Zeitraum von 2020 bis 2025 entstehen. Zum prinzipiell wachsenden Markt der Erstanschaffung kommt dann noch eine jährlich wachsende Zahl an Ersatzkäufen hinzu.

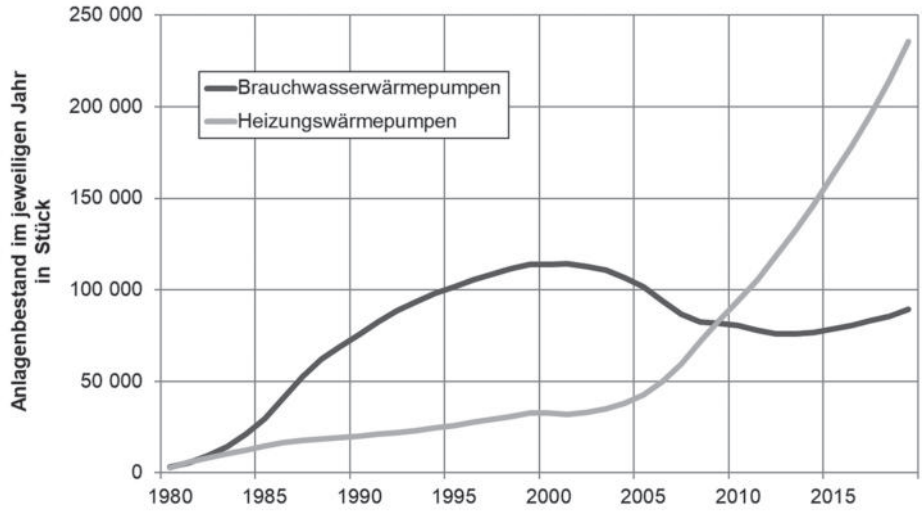


Abb. 7: Bestandsentwicklung Brauchwasser- u. Heizungswärmepumpen Lebensdauer: 20 Jahre; (Biermayr et al. 2020 S. 179)

1.2.3 Voraussichtliche Entwicklungen des Marktes

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, entwickelte sich der österreichische Wärmepumpenmarkt ab dem Jahr 2000 sehr dynamisch, da die Systemvoraussetzungen für eine breite Anwendung der Wärmepumpentechnologie zur Bereitstellung von Raumwärme, Brachwassererwärmung sowie Kühlung und Klimatisierung immer günstiger wurden. Wesentliche Erfolgsparameter waren dabei die technische Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnologie selbst, die Marktdiffusion energieeffizienter Gebäude, steigende Komfortansprüche der NutzerInnen, ein allgemeiner Trend zu monovalenten Wärmebereitstellungssystemen, das wachsende Bewusstsein der AnwenderInnen in Hinblick auf die Nutzung erneuerbarer Energie und nicht zuletzt auch der steigende Kühl- und Klimatisierungsbedarf aufgrund immer wärmerer Sommer.

Unter Berücksichtigung dieses Diffusionsumfeldes wurde von Hartl et al. (2016) die Österreichische Technologie- und Marktroadmap Wärmepumpe publiziert, welche detaillierte Angaben zur möglichen zukünftigen Entwicklung des Marktes bis 2030 enthält und in der vorliegenden Marktstudie bereits mehrfach zitiert wurde. Das in dieser Roadmap enthaltene Hoch-Szenario weist für das Jahr 2030 eine jährliche Verkaufszahl von Heizungswärme-pumpen (inklusive Kombianlagen) von 62.056 Stück und einen in Betrieb befindlichen Anlagenbestand von 624.000 Stück aus. Angesichts der tatsächlichen aktuellen Entwicklung, welche im Raum zwischen dem Mittel-Szenario und dem Hoch-Szenario stattfindet, erscheint das Erreichen des Hoch-Szenarios unter weiterhin guten Rahmenbedingungen bis 2030 ambitioniert machbar.

Die Risiken in Hinblick auf die Erreichung des Hoch-Szenarios liegen einerseits im Bereich von strukturellen Veränderungen des Marktes, wie der Wandel vom Neubau zur Sanierung und andererseits in nicht

kalkulierbaren exogenen Einflussfaktoren, wie die aktuelle Corona-Krise. Die Robustheit der Wärmepumpen-Marktdiffusion im österreichischen Inlandsmarkt hat sich jedoch bereits im Zuge der Finanz- und Wirtschaftskrise 2008 gezeigt. Ein temporärer Rückgang der Wachstumsdynamik war im Wärmepumpenmarkt in diesem Zusammenhang nur von geringer Dauer. Sollten sich die Auswirkungen der Corona-Krise auf die allgemeine Wirtschaftsentwicklung in einem ähnlichen Rahmen halten, so werden auch nur überschaubare hemmende Auswirkungen auf die weitere Marktentwicklung erwartet.

1.2.4 Akteure und treibende Kräfte

Dass die Marktdiffusion der Wärmepumpe in Österreich begleitende Akteursnetzwerk ist aufgrund der Wachstumsphase ab dem Jahr 2000 und aufgrund des erreichten Marktvolumens etabliert und tatkräftig. Das volkswirtschaftliche Rückgrat der Branche sind die österreichischen Wärmepumpenhersteller, welche Wärmepumpensysteme durch fortlaufende Forschung und Entwicklung auch in innovativen Anwendungsbereichen salonfähig gemacht haben und an der Erschließung neuer Marktsegmente arbeiten. Die starke Beteiligung entsprechender Betriebe an nationalen und internationalen Forschungsprojekten belegt deren Innovationskraft und Innovationswillen.

Österreichische Wärmepumpenhersteller sind im Verband Wärmepumpe Austria (WPA) organisiert, der die Aufgaben der Information und Kommunikation zum Themenbereich Erneuerbare Energie mit dem Schwerpunkt Wärmepumpe wahrnimmt und sich für verbesserte Rahmenbedingungen für die Marktdiffusion der Wärmepumpe einsetzt. Mittels Verband Wärmepumpe Austria spricht die österreichische Wärmepumpenbranche mit einer Stimme, was eine wesentliche Voraussetzung für eine optimale Marktexpansion ist.

Die entscheidende Akteursgruppe schlechthin sind die aktuellen und zukünftigen NutzerInnen der Wärmepumpentechnologie mit ihrem Nachfrageprofil und ihrem Erfahrungspool. Das Nachfrageprofil inklusive der wahrgenommenen Eigenschaften der Technologie und ihres Umfeldes determinieren weitestgehend die aktuelle Nachfrage und folglich die aktuellen Verkaufszahlen. Der wachsende Erfahrungspool hat mittel- bis langfristige Auswirkungen auf das Diffusionsgeschehen. Die Transaktionskosten der NutzerInnen für die Informations-beschaffung im Zuge des Innovations-Entscheidungsprozesses werden aufgrund der guten Organisation der Branche als gering eingeschätzt, was einen wichtigen diffusionsfördernden Faktor darstellt.

Wesentliche treibende Kräfte genereller oder exogener Natur werden auf der Nachfrageseite gesehen. Diesbezüglich sind der gestiegene Komfortanspruch von NutzerInnen in Hinblick auf Automatisierbarkeit, Wartungsfreiheit und Fernwirktauglichkeit der Systeme und der in Österreich steigende Raumkühl- und -klimatisierungsbedarf maßgeblich. Unter zusätzlicher Berücksichtigung des Trends zu monovalenten Systemen hat die Wärmepumpe gute Chancen, in Zukunft große Marktanteile abdecken zu können.

1.2.5 Maßnahmen zur Steigerung der Marktdiffusion

Angesichts der Herausforderungen, welche durch die nationalen Klima- und Energieziele 2030 und darüber hinausgegeben sind, müssen bei der Diskussion um diffusionsfördernde Maßnahmen die zukünftigen Knackpunkte adressiert werden. Dies ist wesentlich, um keine wertvolle Zeit an Nebenschauplätzen zu verlieren.

Einen Impuls für die inländische Marktdiffusion der Wärmepumpe lieferte der Start der „Raus aus dem Öl"-Kampagnen der Länder und des Bundes. Der Start der Kampagnen war ein deutliches Signal, welches bereits im Jahr 2019 Wirkung zeigte. Flankiert wurden die Kampagnen mit entsprechenden anreizorientierten Instrumenten z.B. im Rahmen der Wohnbauförderungen der Länder. Dabei waren neben der relativen Veränderung des wahrgenommenen Preisgefüges wiederum informatorische Komponenten von großer Bedeutung. Einzelne Vorstöße mit normativen Instrumenten waren in Hinblick auf die konkrete Ausgestaltung eher von informatorischer Natur. Wenn der Verkauf neuer Ölkessel mit diesem Maßnahmenpaket binnen einzelner Jahre vollkommen gestoppt werden kann, ist diese energiepolitische Herangehensweise auch für die weiteren erforderlichen Schritte zu empfehlen. Kann der Verkauf von Ölkessel damit nicht gestoppt werden, so ist vermutlich ein Nachschärfen im normativen Bereich erforderlich. Profiteure des Tauschs alter Ölkessel gegen ein neues Heizsystem auf Basis erneuer-

barer Energie sind Wärmepumpen und Pelletskessel, was im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung und einer hohen nationalen Wertschöpfung ist.

Eine "Raus aus dem Erdgas"-Kampagne wirkt aktuell für manche LeserInnen vielleicht noch futuristisch. Eine solche Maßnahme wird jedoch unumgänglich sein, wenn die nationalen Klima- und Energieziele 2030 und 2050 erreicht werden sollen. Der oftmals strapazierte aber bisher wenig konkret dargestellte Ansatz von "Grünem Öl" und "Grünem Gas" erscheint aus der Sicht der Ressourcen, der Ökologie, der Sozioökonomie und der Diffusionstheorie nicht oder nicht in der gebotenen Zeit machbar. Im Sinne einer zeitgerechten und nachhaltigen Strategie muss die Herausforderung "Raus aus dem Erdgas" mit prompt verfügbaren Technologien und Ressourcen bestritten werden. Die Wärmepumpe ist in diesem Zusammenhang eine wichtige Option. Bei 100 % erneuerbarem Strom im Jahr 2030 gewährleistet diese Technologie in Österreich eine effiziente und klimaneutrale Wärme- und Kälteversorgung auf Basis inländischer Energieressourcen und Technologie made in Austria.

Die großen Systemveränderungen sofort anzugehen, gebietet die empirische Erfahrung aus den vergangenen Jahrzehnten. Einerseits geht es dabei um die langen Zeitkonstanten, welche für Veränderungen in einem Energiesystem zu berücksichtigen sind. Diese resultieren aus der langen technischen Lebensdauer der eingesetzten Technologien, der erforderlichen hohen Investitionen, sowie aus institutionellen und systemischen Trägheiten, die sich aus dem Widerstand der Profiteure des fossilen Energiesystems ergeben. Andererseits geht es um einen kontinuierlichen und für die heimische Wirtschaft optimalen Pfad, in dem die nationale Wertschöpfung z.B. durch einen möglichst hohen Anteil an im Inland produzierten Anlagen und erbrachten Dienstleistungen maximiert werden kann.

1.2.6 Chancen für die österreichische Wirtschaft

Die Chancen für die österreichische Wirtschaft sind in zweierlei Hinsicht gegeben. Einerseits liegen die Chancen in einem stark expandierenden Massenmarkt, welcher durch den unumgänglichen Ersatz von Wärmebereitstellungsanlagen auf Basis fossiler Energie durch Technologien auf Basis erneuerbarer Energie entsteht. Und andererseits liegen die wirtschaftlichen Chancen in innovativen Anwendungen und in neuen Konzepten, welche ein reiches Betätigungsfeld für forschungs- und entwicklungsaffine Unternehmen darstellen.

Weitere Chancen für die österreichische Wärmepumpenbranche liegen im Bereich der zukünftigen Wärme- und Kälteversorgung urbaner Strukturen in Hinblick auf den Ausstieg aus einer erdgasbasierten Wärmeversorgung. Hierbei stellen sich zahlreiche Forschungsfragen rund um die Systemintegration von (Groß)Wärmepumpen in Wärmenetze, die Nutzung niedertemperaturiger industrieller Abwärme und urbanen Wärmesmogs, beginnend bei der Umgebungsluft über die Aktivierung von Gebäudebauteilen, die Nutzung versiegelter Flächen, die Kühlung des sich ständig erwärmenden Grundwassers bis hin zu einem saisonalen Ausgleich von Wärme und Temperatur über saisonale geothermische Speicherung. Bei allen diesen Systemen spielt die Wärmepumpe eine zentrale Rolle und die Marktchancen sind in Hinblick auf die voraussichtlich erforderlichen Klimawandel-Folgenanpassungen alleine in Süd- und Mitteleuropa exorbitant.

Engagement ist in diesem Zusammenhang bei der Forcierung der Forschung in diesen Bereichen erforderlich. Soll die österreichische Wärmepumpenbranche in den skizzierten zukünftigen Themenfeldern Marktführerschaften, Kompetenzvorsprünge und Produktions-kapazitäten entwickeln, so müssen die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich rasch intensiviert und durch entsprechend ausgestatteter nationaler Forschungsprogramme effektiv unterstützt werden.

1.2.7 Vision für 2050

In der Studie "Wärmezukunft 2050" von Kranzl et al. (2018) wird die Zukunft der Wärmebereitstellung in Österreich auf Basis eines umfassenden Modellansatzes untersucht. Die AutorInnen der Studie zeigen, dass ein weitgehender Ersatz fossiler Heizanlagen bis 2050 möglich ist. Heizöl wird in diesem Szenario ab dem Jahr 2040 nicht mehr genutzt und Erdgas hat im Jahr 2050 als einzig verbleibender fossiler Energieträger im Wärmemix nur noch einen Anteil von 10 %. Das gegenständliche Szenario geht davon aus, dass par-

allel zum Tausch der Heizsysteme bis zum Jahr 2050 eine Halbierung des Energieverbrauchs für Heizung und Brauchwassererwärmung durch Sanierung und Effizienzsteigerung stattfindet. Ohne diese drastische Effizienzsteigerung ist eine Dekarbonisierung des österreichischen Wärmesektors bis 2050 nicht möglich.

In dem skizzierten Szenario deckt die Wärmepumpentechnologie im Jahr 2050 ca. 42 % der insgesamt pro Jahr installierten Leistung an Heiz- und Warmwassersystemen in Österreich ab. Der Einsatz von elektrischem Strom für Heizen und die Brauchwassererwärmung wird sich dabei bis zum Jahr 2050 durch den gleichzeitigen Rückgang von Strom-Direktheizungen sogar reduzieren, womit auch einem deutlich stärkeren Ausbau der Wärmepumpe nichts im Weg steht.

Für eine Vision für 2050 kann damit einmal mehr auf die "Österreichische Technologie- und Marktroadmap Wärmepumpe" von Hartl et al. (2016) und das dort ausgeführte Hoch-Szenario verwiesen werden. Dies bedeutet 60.000 jährlich im Inlandsmarkt abgesetzte Heizungswärmepumpen im Jahr 2030 und 600.000 in Betrieb befindliche Wärmepumpensysteme. Dies bedeutet in Bezug auf das Wärmewendeszenario von Kranzl et al. (2018) eine vorgezogene Entwicklung, welche im weiteren Verlauf bis 2050 auch Raum für die Substitution der noch verbleibenden fossilen Energieträger schaffen würde.

Eine Vision im Sinne von innovativen Produkten und Anwendungen ist eine starke Integration der Wärmepumpentechnologie in urbane, netzgebundene Wärme- und Kälteversorgungs-systeme sowie die Erschließung der Märkte im mittleren und hohen Temperaturbereich in gewerblichen und industriellen Prozessen.

1.3 WÄRMEPUMPEN TRENDS UND CHANCEN

Quelle der folgenden Seiten: österreichische Technologie-Roadmap für Wärmepumpen (Hartl et al. 2016)

1.3.1 Wärmepumpen für Wohn- und Nichtwohngebäude

- Der Absatz von Heizungswärmepumpen ist in den letzten Jahren insbesondere aufgrund wachsender Verkaufszahlen im kleinsten Leistungssegment bis 10kW kontinuierlich gestiegen. Luft/Wasser Wärmepumpen stellen aufgrund ihrer geringen Investitionskosten sowie der einfachen Installation den dominanten Wärmepumpentyp dar. Diese Trends werden in den Szenarien bis 2030 bestätigt.
- Schallemissionen von Luft/Wasser Split-Wärmepumpen und die damit verbundenen potenziellen Akzeptanzprobleme werden als die größte Herausforderung bei der Entwicklung des Massenmarktes in den Leistungssegmenten bis 10 kW und größer 10 kW bis 20 kW gesehen. Die weitere Marktentwicklung in diesen Segmenten hängt maßgeblich von dieser Thematik ab. Forschungsschwerpunkte betreffen hierbei die Reduktion der Schallemissionen durch technische und normative Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.
- Heizungswärmepumpen für den Einsatz im Neubau sind technologisch ausgereift. Potenzial für Forschung und Entwicklung gibt es bis 2030 beim Einsatz der Wärmepumpe im Zuge der Gebäudesanierung. Der Sanierungsmarkt wird von zahlreichen ExpertInnen als der größte Zukunftsmarkt gesehen. Die identifizierten Forschungsthemen betreffen dabei kombinierte Wärmepumpensysteme und deren effiziente Integration, Automatisierung und Regelung, Konzepte für Wärmepumpen zum simultanen Heizen und Kühlen und Großwärmepumpen für den Einsatz in sanierten großvolumigen Gebäuden.

1.3.2 Wärmepumpen in Smart Electric Grids

- Wärmepumpen gelangten in den letzten Jahren immer stärker in den Fokus von Power-to-Heat und Lastflexibilisierungsmaßnahmen. Seitens der nationalen Wärmepumpenbranche wurden dafür „Smart Grid Ready" Wärmepumpen entwickelt und auf den Markt gebracht. Die Wärmepumpenindustrie ist damit für diese Anwendungen bereits gerüstet.
- Der Handlungsbedarf liegt im Moment bei den Netzbetreibern und Energieversorgern. Für eine breite Anwendung von Wärmepumpen in Smart Electric Grids bedarf es zum einen eines Ausbaus von Smart Electric Grid Technologien, zum anderen sind seitens der Netzbetreiber und Energieversorger offe-

ne Fragen zur physikalischen Schnittstelle und zum Informationsaustausch zu klären sowie geeignete Markt- und Geschäftsmodelle zu entwickeln.

1.3.3 Wärmepumpen in thermischen Netzen

- Die Integration von Wärmepumpen in thermische Netze wurde im Ausland bereits vielfach erfolgreich demonstriert. In Österreich ist diese Anwendung jedoch sehr innovativ. Mit Stand der Technik Wärmepumpen sind die in Österreich üblichen Vorlauftemperaturen von Wärmenetzen von bis zu 120°C sowie Quellentemperaturen von 55°C machbar, die Anwendung stellt bislang eine betriebswirtschaftliche Herausforderung dar.
- Eine zukünftige Absenkung der Vorlauftemperaturen thermischer Netze, wie sie insbesondere im Kontext der vermehrten Einspeisung industrieller Abwärme bzw. der verstärkten Nutzung von Umweltwärme diskutiert wird, verlangt nach sogenannten „Booster-Wärmepumpen", das sind Wärmepumpen zur dezentralen Temperaturanhebung vor Ort. Das Potenzial derartiger Wärmepumpen wird von nationalen Herstellern gesehen. Entsprechende Produkte wurden bisher noch nicht entwickelt.

1.3.4 Wärmepumpen für Industrieprozesse

- Die Integration von Wärmepumpen in Industrieprozesse befindet sich trotz des großen technischen Potenzials noch in einer sehr frühen Diffusionsphase, die aufgrund der geringen nationalen Absatzzahlen noch keine seriöse Trendabschätzung erlaubt. So sind derzeit nur wenige nationale Innovatoren und frühe AnwenderInnen am Markt tätig.
- Die größten Hemmnisse bei der Marktdiffusion von Industriewärmepumpen liegen im informatorischen Bereich. Der Bekanntheitsgrad der technischen Möglichkeiten und der wirtschaftlich umsetzbaren Anwendungspotenziale ist bei den relevanten AkteurInnen gering. Auch die erforderliche Vernetzung von AnwenderInnen, AnlagenplanerInnen und ProduzentInnen ist in einem sehr frühen Stadium. Die Dokumentation und Verbreitung einer größeren Zahl von nationalen „Good Practise" Beispielen wäre in diesem Bereich ein wichtiger Schritt.
- Rahmenbedingungen wie z.B. der Anstieg der Erneuerbaren in der Elektrizitätsversorgung und die erweiterten technischen Möglichkeiten der Technologie durch die Verfügbarkeit neuer Kältemittel bieten der nationalen Wärmepumpenbranche einen weiten Bereich für Innovationen, Patente und neue Märkte.
- Von Seiten nationaler Forschungseinrichtungen und der öffentlichen Hand wurde dieses Marktpotenzial erkannt. So ist das Fördervolumen der nationalen Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Fokussierung auf der Entwicklung neuer Konzepte für Industriewärmepumpen in den Jahren 2013 und 2014 besonders stark gestiegen.
- Die Forschungs- und Entwicklungsthemen bis 2030 umfassen insbesondere die Umsetzung von Musterlösungen und Pilotanlagen unter Einsatz der bereits am Markt verfügbaren Wärmepumpentechnologie in ausgewählten Branchen und Prozessen, die Entwicklung verbesserter Industriewärmepumpen für höhere Nutzungstemperaturen und die Erarbeitung neuer Konzepte für Industriewärmepumpen.

1.3.5 Marktszenarien bis 2030

Bei der Entwicklung der Marktszenarien wurden Erkenntnisse aus abgeschlossenen Forschungsprojekten, Analysen der historischen Marktentwicklung und Erkenntnisse aus den ExpertInnenworkshops zusammengeführt. Marktszenarien wurden für die unterschiedlichen Wärmepumpentypen und Leistungsklassen entwickelt und auf Basis der jährlichen Verkaufszahlen und der in Betrieb befindlichen Anlagen für den Zeitraum von 2015 bis 2030 quantitativ und qualitativ dargestellt. Für jeden Wärmepumpentyp und jede Leistungsklasse wurde ein Nieder, ein Mittel und ein Hoch Szenario entwickelt. Die Ergebnisse der Szenarien sind für das Jahr 2030 für das Aggregat der Heizungswärmepumpen (alle Leistungsklassen) in Abb. 8 dargestellt.

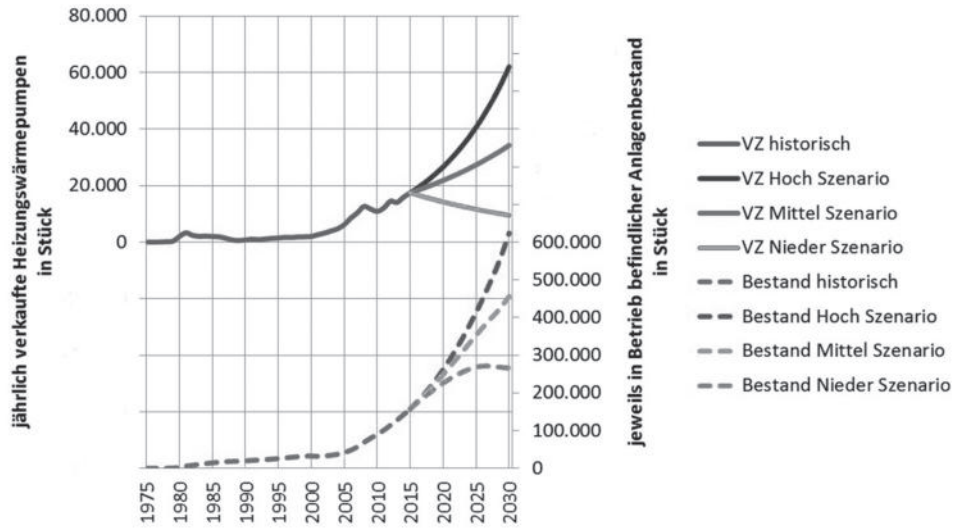


Abb. 8: Ergebnisse der Szenarien bis 2030 für das Aggregat der Heizungswärmepumpen (alle Leistungsklassen). Dargestellt sind die jährlichen Verkaufszahlen und die Anzahl der jeweils in Betrieb befindlichen Anlagen. Abkürzung: VZ…jährliche Verkaufszahlen (Hartl et al. 2016 S.13)

Die durch den Einsatz von Wärmepumpen erzielten Nettoeinsparungen der Treibhausgasemissionen können im Vergleich mit dem Referenzjahr 2015 bis zum Jahr 2030 bis zu einen Faktor 5,4 erhöht werden und damit zu einer Einsparung von mehr als 3 Mio. Tonnen $CO_{2äqu}$ führen. Einen besonderen Stellenwert nehmen dabei Industriewärmepumpen ein, die trotz vergleichsweiser geringer Stückzahlen einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtbilanz erbringen. Im Hochszenario werden bis zu 4.500 neue Arbeitsplätze geschaffen, wobei ein Branchenumsatz von 1,2 Mrd. Euro zu verzeichnen ist. Die wichtigsten Elemente bis 2030 sind dabei einerseits die Entwicklung des Heizungswärmepumpen Massenmarktes und andererseits die Entwicklung eines Wachstumsmarktes im Bereich der Industriewärmepumpen.

2. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Der Trend zu ökologischen Heizungssystemen setzt sich fort. Der europäische Wärmepumpenmarkt setzt jährlich über 1 Mio. Wärmepumpen ab. In Österreich wurden 2018 erstmals mehr als 25.000 Wärmepumpen installiert. Damit ist heute jedes vierte in Österreich verkaufte Haustechniksystem eine Wärmepumpe. Besonders im Neubau ist dieses Heizungssystem bereits seit Langem beliebt. So entscheiden sich mehr als 50 % aller Bauherren von Ein- und Zweifamilienhäusern für dieses umweltfreundliche Heizungssystem. In Österreich sind mehr als 300.000 Wärmepumpen in Betrieb und entlasten die Umwelt jährlich um etwa. 600.000 t CO_2. Zusätzlich entwickelt sich die Wärmepumpe als Wirtschaftsmotor der erneuerbaren Energietechnologien. So erwirtschaftet die Wärmepumpenbrache in Österreich mittlerweile 300 Mio € Umsatz und sichert damit mehr als 1.300 Jobs (Vollzeitäquivalente) in einer aufstrebenden Branche.

LITERATUR

Biermayr P., Dißauer C., Eberl M., Enigl M., Fechner H. et al. (2020) Innovative Energietechnologien in Österreich: Marktentwicklung 2019 - Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft, Bundesministerium für Klimaschutz Umwelt, energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Hrsg.) 14/2020

Faninger G. (2007) Erneuerbare Energie in Österreich – Marktentwicklung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 11/2007

Hartl M., Biermayr P., Schneeberger A., Schöfmann P. (2016) Österreichische Technologie- Roadmap für Wärmepumpe, Berichte aus Energie und Umweltforschung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 8/2016

Nowak, T. (2020) European Heat Pump Market and Statistics Report 2020, ehpa – european heat pump association

Kranzl L., Müller A., Maia I., Büchele R., Hartner M. (2018) Wärmezukunft 2050 – Erfordernisse und Konsequenzen der Dekarbonisierung von Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in Österreich, Endbericht, Energy Economics Group, TU Wien,

Kontaktdaten:
Richard Freimüller
Wärmepumpe Austria
Bockgasse 2a
4020 Linz
E-Mail: richard.freimuller@waermepumpe-austria.at

Session 5b

TechFM4.0 I

Digitales, Ergebnisorientiertes Techn. Facility Management

Fuhrmann / IBFM-Ingenieurbüro Facility Management / AT

Digital Twin with Multi-Input and Multi-Output optimisation for Air-Conditioning Systems

Heschl, Klanatsky, Wenig / FH Burgenland AT
Türk / Schrack Seconet AG / AT

Digitales, Ergebnisorientiertes Techn. Facility Management

M. Fuhrmann
IBFM-Ingenieurbüro Facility Management, 2512 Tribuswinkel, Österreich

1. EINLEITUNG

Seit Einführung des Facility Managements wird der Begriff Facility Management und der damit verbundene Geschäftszweig in einem sehr breiten und unterschiedlichen Kontext aufgefasst und verwendet.

Jeweils getroffene, in die Praxis umgesetzte Definitionen von Facility Management am österreichischen FM-Markt, sind geprägt durch historisch gewachsene Unternehmensstrukturen, unterschiedliche Interessen von Projektbeteiligten, unterschiedliche Interessensgemeinschaften und Arbeitskreisen, ein sehr stark anwachsendes und im Umbruch befindliches Normenwesen rund um das Thema Facility Management, Betreiberverantwortung, Energieeffizienz, etc..

Die Aufgabenstellungen der FM-Projekte sind grundsätzlich projektspezifisch und weisen demzufolge auch in der Grundstruktur oftmals sehr unterschiedliche FM-Ansätze auf.

Die Herausforderungen im Facility Management bestehen darin, diesen breiten Marktanforderungen möglichst gesamtheitlich und jedenfalls digital gerecht zu werden und dabei einen grundlegenden, allgemein anerkannten „Stand der FM-Technik“ zu etablieren.

2. METHODIK

Damit die FM-Leistungen auch klar anerkannt, verstanden und damit honoriert werden, braucht es eine eindeutige Leistungs- bzw. Produktdefinition.

Dazu ist es erforderlich zunächst mit dem FM-Kunden FM-Ziele zu vereinbaren, die im nächsten Schritt in nachvollziehbare, sowie zustands- und bedarfsorientierte FM-Strategien fließen.

Daraus sind wiederum messbare und zur bestmöglichen Unterstützung des Kerngeschäftes des FM-Kunden aussagekräftige Leistungskennzahlen (KPIs) abzuleiten. Eine derartige grundsätzliche Vorgangsweise ist zur Professionalisierung des FM eine eindeutige Marktforderung.

Übergeordnet ist zur zielorientierten Abwicklung das grundsätzliche FM-Prozessmodell nach DIN EN 15221-1 projektspezifisch anzuwenden.

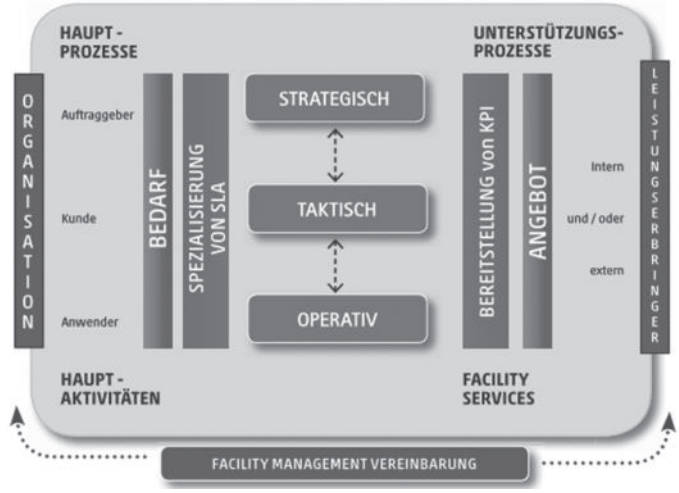


Abb. 1: Facility Management – Modell (DIN EN 15221-1, 2007)

Zur bestimmungsgemäßen Umsetzung sind dabei auf den 3 Ebenen des Facilty Managements vorab abgestimmte, klar definierte Prozesse in einem Regelkreismodell abzuarbeiten.

Innerhalb der einzelnen FM-Ebenen sind - um letztendlich ergebnisorientiertes FM zu erreichen - sämtliche darin durchzuführendende Prozesse nach einem Controlling-Kreislauf, der auf den Schritten Plan, Do, Check und Act (PDCA-Zyklus) basiert, auszuführen.

Für die Auftraggeber-Organisation ist die Qualität der FM-Dienstleistung von grundlegender Bedeutung, da die FM-Qualität das Kerngeschäft und damit die Organisationsziele des Auftraggebers erheblich beeinflussen kann.

Im modernen FM werden in der Praxis die 3 FM-Ebenen wie folgt umgesetzt:

LEISTUNGEN DES STRATEGISCHEN FM (ABSTIMMUNG FM-PLANER MIT AG)

Das primäre Ziel des Strategischen Facility Management ist das Sicherstellen des nachhaltigen Erreichens der vereinbarten FM-Ziele zur bestmöglichen Unterstützung des Kerngeschäftes des Auftraggebers (AG).

Dazu werden im strategischen Facility Management zunächst kundenspezifische FM-Ziele, sowie davon abgeleitete FM-Leistungskennzahlen (FM-KPIs) ausgearbeitet.

Die projektspezifischen Kennzahlen ermöglichen es die FM-Ziele zu messen, zu analysieren und Abweichungen festzustellen. Aus der jahrelangen Projekterfahrung haben sich insgesamt 8 Zielkategorien innerhalb des Technischen Facility Managements herauskristallisiert.

Das Erreichen der FM-Vorgaben wird im strategischen FM durch die Implementierung eines datenbankgestützten Controlling-Kreislaufes (Plan-Do-Check-Act) qualitätsgesichert.

Die dafür notwendigen Verantwortlichkeiten und Entscheidungsbefugnisse werden in einem Funktions- und Leistungsmodell transparent den Leistungsinhalten gegenübergestellt.

LEISTUNGEN DES TAKTISCHEN FM (PLANUNG UND CONTROLLING DES OPERATIVEN FM)

Zentrale Aufgaben des Taktischen Facility Managements sind die Planung der operativ durchzuführenden FM-Dienstleistungen und die Durchführung des FM-Controlling. Dies erfolgt unter der Prämisse der Erreichung der vorab auf der strategischen Ebene vereinbarten FM-Ziele.

Im Mittelpunkt dabei steht die FM-Leistungsanalyse und Leistungsanpassung in Form einer periodisch (üblicherweise jährlich) durchgeführten Anlagen- und energetischen Inspektion die auf projektspezifischen



ZIELE im FACILITY MANAGEMENT

Ziele: klar, eindeutig, messbar, realistisch, erreichbar --> **S M A R T**

	FM-Hauptziel	FM-Subziel
1.	**Sicherheit**	1.1 Arbeitssicherheit 1.2 Gebäudesicherheit
2.	**Betreiberpflichten**	2.1 Erfüllungsgrad Prüfpflichten 2.2 Festgestellte Mängel
3.	**Werterhalt**	3.1 Anlagenaktualität 3..2 Anlagenzustand
4.	**Ressourceneinsatz, Energieeffizienz, Klima- & Umweltschutz, Intelligente Arbeitswelten** Nachhaltigkeit: Ökologische Qualität	4.1 Ressourceneinsatz 4.2 Energieeffizienz 4.3 Klima- & Umweltschutz 4.4 Intelligente Arbeitswelten
5.	**Wirtschaftlichkeit / Lebenszykluskosten** Nachhaltigkeit: Ökonomische Qualität	5.1 Wirtschaftlichkeit 5.2 Lebenszykluskosten
6.	**Qualität der Nutzung** Nachhaltigkeit: Soziokulturelle und funktionale Qualität	6.1 Mensch & Organisation 6.1.1 Behaglichkeit 6.1.2 Raumklimaklasse 6.2 Fläche & Infrastruktur 6.2.1 Flächenbelegung 6.2.2 Flächeneffizienz 6.2.3 Barrierefreiheit 6.2.4 Energieeffizienz GA
7.	**Qualität der Technischen Gebäudeausrüstung (Errichtung, große Instandsetzung, Verbesserung)** Nachhaltigkeit: Technische Qualität	7.1 Technologisierung 7.2 Gewährleistung 7.3 Aktualität Dokumentation 7.4 Qualität Anlagentechnik 7.4.1 Heizung 7.4.2 Lüftung 7.4.3 Kälte 7.4.4 Sanitär 7.4.5 Elektro 7.4.6 MSR 7.4.7 Fördertechnik 7.4.8 Lichttechnik
8.	**Qualität der Techn. Betriebsführung (TBF)** Nachhaltigkeit: Prozessqualität	8.1 Technische Verfügbarkeit 8.2 Technisches Monitoring 8.3 IH-Effektivität 8.4 IH-Produktivität 8.5 IH-Mitarbeiterentwicklung

Abb. 2: FM-Ziele

Messungen sämtlicher relevanter Anlagen- und Betriebsparameter beruht (FM Performance Check). Diese Leistung kann effizient nur datenbankgestützt durchgeführt werden.

Das Ziel dieser Inspektion, die durch ein Team von FM-Know-How-Trägern durchzuführen ist, ist es auf Basis von aufbereiteten Leistungskennzahlen aus der FM-Vorperiode zielgerichtete FM-Maßnahmen (Service Level Agreements – SLA`s) für die nächste FM-Periode, abgestimmt auf bestmögliche Unterstützung des Kerngeschäftes des FM-Kunden, festzulegen.

Darauf aufbauend werden dynamische Instandhaltungs-, Energieeffizienz- und Nachhaltigkeitsstrategien erarbeitet und mit den Vertretern des AG abgestimmt, um somit ganzheitlich ergebnisorientiertes Technisches Facility Management zu ermöglichen.

Im Bereich der ergebnisorientierten Instandhaltung zum Beispiel werden auf Basis der vereinbarten Ziele bedarfsorientierte Instandhaltungsstrategien nach DIN EN 13306 gewählt, die letztendlich in anlagenspezifischen Service Level Agreements operativ umgesetzt werden.

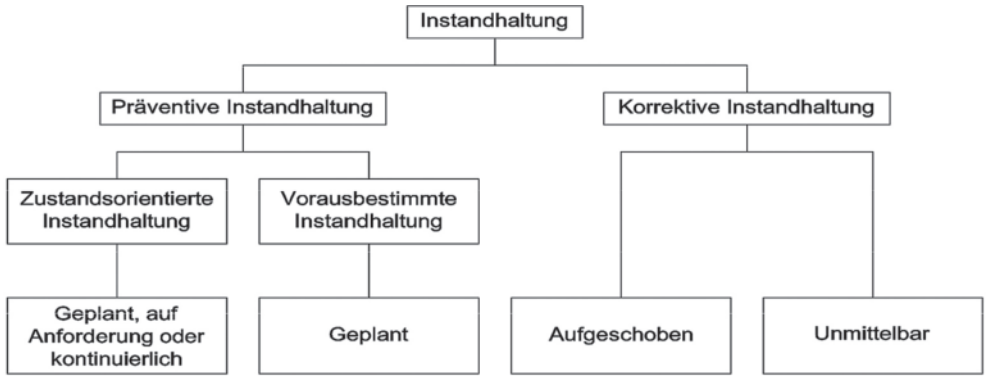


Abb. 3: Ergebnisorientierte Instandhaltung (DIN EN 13306, 2010)

LEISTUNGEN DES OPERATIVEN FACILITY MANAGEMENT

Das operative FM-Leistungsmodell des Facility Service-Anbieters beruht somit ganzheitlich auf messbarer FM-Ergebnisorientierung, die auch gleichzeitig das mit dem AG abgestimmte FM-Produkt in den einzelnen Leistungsbereichen darstellt. Dazu ist es erforderlich sämtliche Leistungen inhaltlich und intervallmäßig periodisch (üblicherweise jährlich) an geänderte FM-Anforderungen anzupassen, um eine bestmögliche Ausrichtung des FM auf die Hauptprozesse des AG zu gewährleisten.

→ Damit schließt sich bestimmungsgemäß der FM-Regelkreislauf!

3. SCHLUSSFOLGERUNG

Im Forschungsprojekt „techFM 4.0“ werden die Möglichkeiten zur digitalen Umsetzung der vorab beschriebenen Anforderungen des ergebnisorientierten Technischen Facility Management erarbeitet.

Im Ergebnis werden Methoden vorliegen

- um FM-relevante, alphanumerische und grafische Daten mit Building Information Modeling - Planungs- und Errichterdaten standardisiert zu verschmelzen um tatsächlich konsistente Daten lebenszyklusbegleitend zur Verfügung zu haben
- die es ermöglichen mit einem BIM „as built-Datenmodell“ das auf die Anforderungen des FM abgestimmt ist, auf Basis definierter Sensorik Datenanalyse (Anlageninspektion) und damit leistungskennzahlenorientiertes Gebäudemanagement zu betreiben.

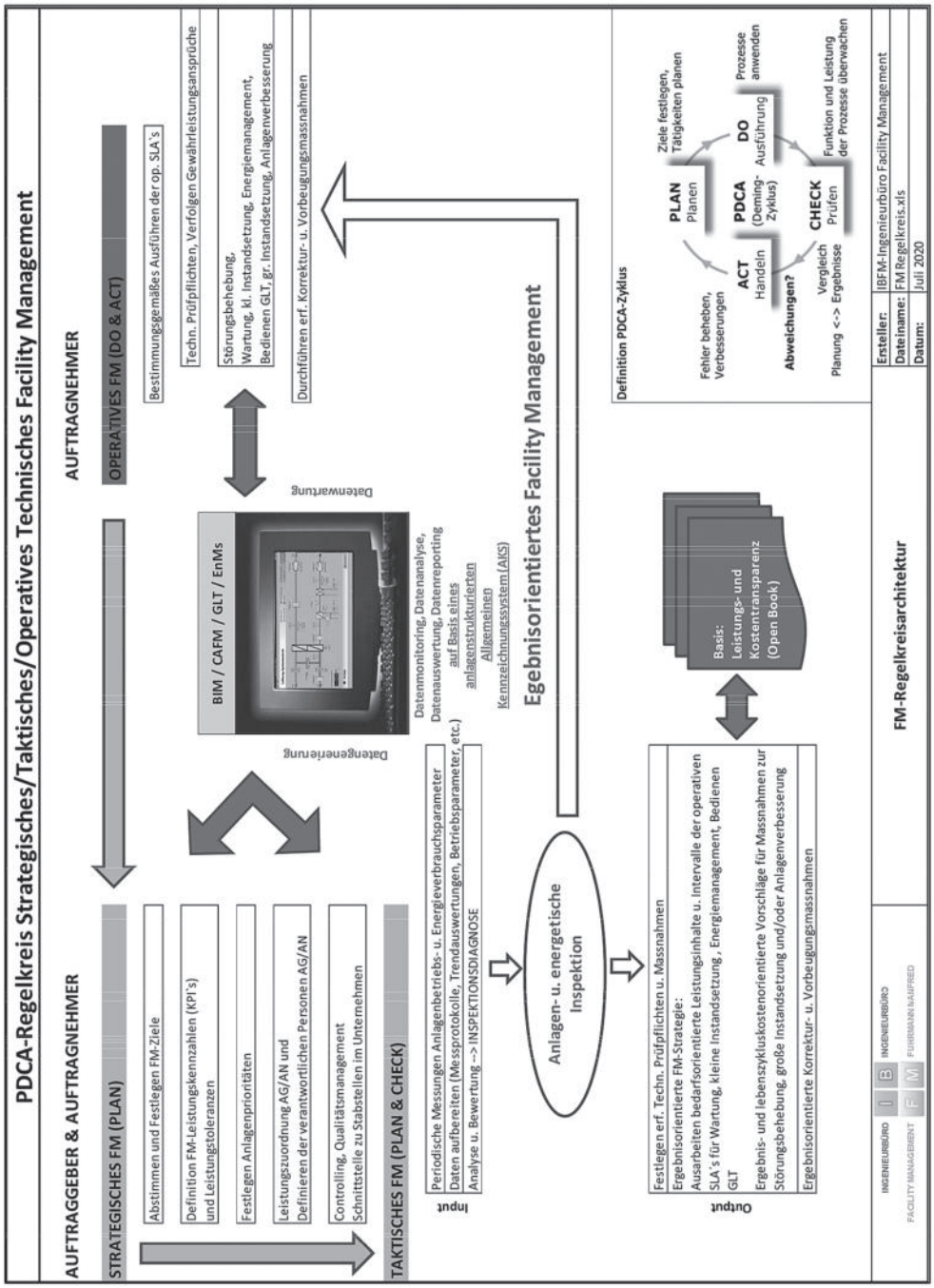


Abb. 4: Ergebnisorientierter FM-Regelkreis

ACKNOWLEDGEMENT

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des FFG Förderprogramms „Forschungskompetenzen für die Wirtschaft – Innovationslehrgänge 3. Ausschreibung“ bzw. des Projekts techFM4.0 (PNr. 863054) durch das „Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort“ finanziell unterstützt.

LITERATUR

DIN EN 15221-1 (2007) Facility Management - Teil 1: Begriffe, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 13306 (2010) Instandhaltung-Begriffe der Instandhaltung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Kontaktdaten Autor:
Ing. DI Manfred Fuhrmann
Anton Afritschgasse 27
2512 Tribuswinkel
Email: manfred.fuhrmann@gmx.at

Digital Twin with Multi-Input and Multi-Output optimisation for Air-Conditioning Systems

C. Heschl, P. Klanatsky, F. Wenig
Fachhochschule Burgenland GmbH, Eisenstadt, Austria
R. Türk
Schrack Seconet AG, Wien, Austria

ABSTRACT: Within this paper, a modular and scalable energy inspection method for performance analysis and Fault-Detection and Diagnostics (FDD) of air conditioning systems is presented. The significant innovation aspect is the guarantee of a high degree of automation through the exploitation of operating data with model-based analysis. To detect deviations from the ideal operating condition and initiate optimisation measures automatically numerical methods are deployed in combination with the building automation system (BAS). The generic approach opens access to the use of data-driven commissioning, maintenance, and repair strategies.

1. INTRODUCTION

The topics of digital construction and operations increasingly present new challenges to all project stakeholders in the construction industry. Due to the rapid development of digital communications and collaborative work, construction processes are being realigned to guarantee a continuous and loss-free data exchange between all trades involved. This aims to prevent errors and improve productivity along the entire value-added chain and consequently over the entire life cycle of a building. The working methods used for this are known as Building Information Modelling (BIM). In the USA and Northern Europe, BIM is widely used and highly valued in small and large construction projects. In the case of Austria, the development of BIM know-how is also well advanced, but more and more in large construction enterprises. However, small and medium-sized enterprises (SMEs) still require know-how to bridge the gap. Also, current development work is centred on the planning and construction process. Information requirements to ensure efficient operation are hardly considered. There is also a lack of digital tools to support commissioning management employing technical monitoring. Especially the extended use of BIM through the structured combination with an operational data twin allows the provision of efficient use of resources of building services installations and systems.

To sidestep these performance gaps, digital building models (BIM models) will in future have to be provided with a uniform identification and a definition of characteristics - already in the planning phase. Through the identification, objects can be represented clearly in the model, and by standardising features (attributes), which of these can be used across all trades, e.g. in technical building management and building automation. The creation and assignment of uniform identification systems and unambiguous feature definitions, which form the basis for further use of the BIM model in the operation and utilisation phase, is of particular importance. Only in this way is it possible to link the domain-specific information with the operational data and create the essential prerequisite for automated system optimisation during commissioning and throughout the entire life cycle. This also enables added value to be gained from the already existing building automation.

This paper presents a viable concept for a modular and scalable energy inspection employing automated operational performance analysis and Fault-Detection and Diagnostics (FDD) for an air-conditioning system. The major innovative leap forward in this context is the assurance of a high degree of automation through the targeted use of operating data and multi-input multi-output (MIMO) optimisation analysis. Numerical

methods are used in combination with building automation (BA) to independently detect deviations from the ideal operating condition at facility and system-level and to be able to initiate optimisation and inspection measures automatically (autonomous analysis operations). The generally acceptable approach hence achieved open access to the use of data-driven commissioning, maintenance, and repair strategies.

2. DEVELOPMENT OF THE DIGITAL TWIN

2.1 TEST FACILITY AND DEVELOPMENT ENVIRONMENT

An existing air-conditioning system was used for the development and validation of the digital twin with the MIMO-optimisation algorithm. The plant was designed for an air volume flow rate of 4300 m^3/h and has a steam humidifier, a cooling coil, and a preheating and post-heating coil and an energy recovery system based on a regenerative enthalpy exchanger (see. Fig. 2.1). The cooling and heating supply is provided by a reversible heat pump and/or warm and cold water tank. The fans are designed as EC motors so that infinitely variable operation up to 20 % of the nominal volume flow rate is possible.

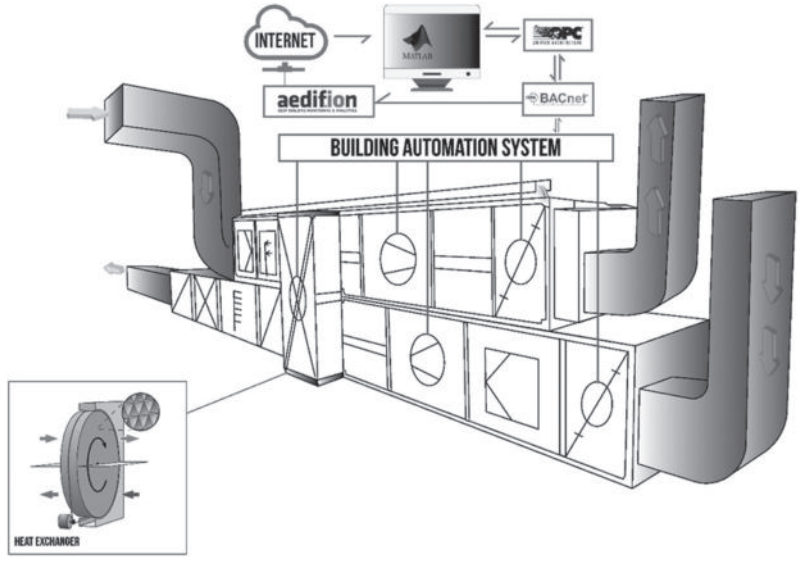


Fig. 2.1: Schematic diagram of the full air-conditioning system under investigation

The air is distributed to the individual ventilation zones via distribution pipes. Independently variable volume flow rate controllers provide the supply of the desired air volume flow rate for each zone. The sensors already available were supplemented by temperature and humidity sensors in the fresh air duct and energy meters for the heating and cooling coils. In this way, the data basis for a (quasi-stationary) energy balance of the system could be achieved without significant additional financial outlay.

2.2 DATA ACQUISITION AND DATA SUPPLY

The data was provided entirety via the building automation system. For this purpose, the sensor data were transferred to the Building Automation Communication Network (BACnet) via gateways and stored in a cloud platform via an edge device (See. Fig. 2.2).

The proposed configuration offers data from the air conditioning system and the entire building automation system. This made additional data (room air temperature, CO_2 concentrations, setpoint

temperatures, valve positions, etc.) from sub-systems available so that all relevant data can be centrally stored and easily included in the analysis procedure. The combination of the operating data with the system-defined ontology and semantics opens up new approaches for energy demand analysis and optimisation.

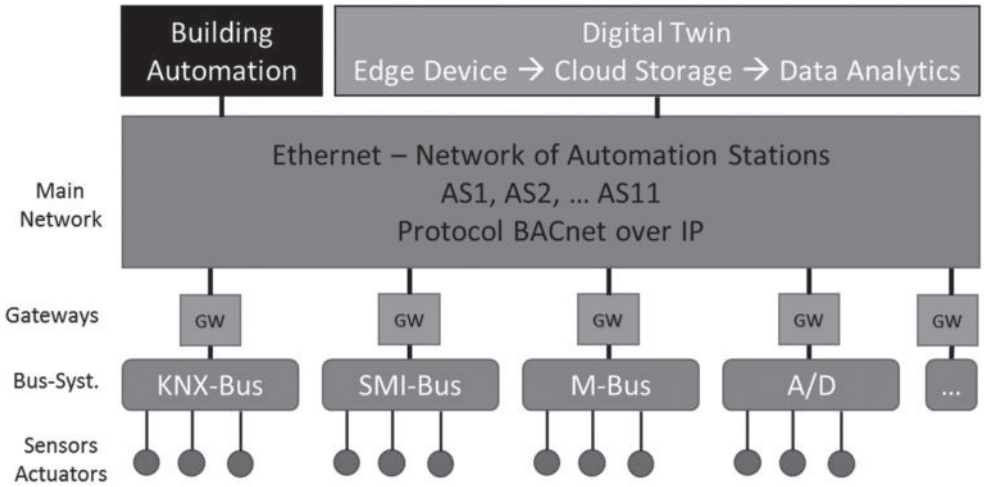


Fig. 2.2: Scheme of the digital twin integration

2.3 DEVELOPMENT OF THE MIMO-OPTIMISATION

Within the building technology service sector, the national implementation of the European decarbonisation strategy is considerably influenced by the EPBD guidelines. For example, the legally required energy inspection of heating and air conditioning systems was implemented by the EU Directive 2010/31. Similar innovations are expected, e.g. pertaining to the automated energy inspection and the introduction of the Smart Readiness Indicator (SRI) by the EU Directive 2018/844. Besides, continuous further development of the normatively defined energy performance of buildings (e.g. EN 16798-5-1) is recognisable. In particular, the normative developments enable the provision of system-specific information such as partial load efficiencies of heat recovery systems. This information can, therefore, also be presented as a basis for model-based analysis. A prerequisite for this, however, is that the client information requirements (CIR) contained in corresponding performance specifications already in the planning phase.

If such information is provided, a thermodynamic model of the air-conditioning system can be derived. With the model, the change of state due to the heat recovery system, cooling and heating coils and the humidifier can be determined. The boundary conditions can be directly assigned based on the given inputs such as weather conditions and the thermal comfort constraints. The minimum energy effort can be computed based on the minimisation of the energy consumption of all relevant devices (heating and cooling coil, humidifier, etc.). This can be achieved by applying a multi-input multi-output optimisation algorithm. To achieve the best possible scalability of the analysis algorithm, a gradient-based optimisation solver for non-linear objective and constraint functions was used. Information from the BIM model can therefore be linked and created without additional manual effort for the matrix derivation. The implementation of the proposed MIMO-optimisation approach is shown in Fig. 2.3.

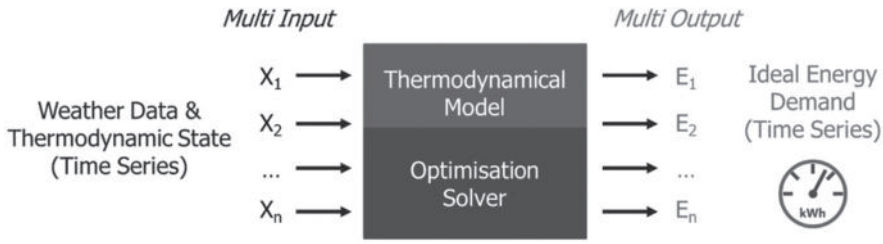


Fig. 2.3: Scheme of the used MIMO-optimisation approach during the data analytic procedure

3. RESULTS

3.1 ANALYSIS OF THE ACTUAL STATE

The EPBD standards facilitate the international harmonisation of the methodology for the assessment of the energy performance of buildings. In this context, the EN 16798-1 specifies the requirements for air-conditioning systems regarding the indoor environmental parameters such as thermal comfort, indoor air quality, acoustics etc. The standard includes designing criteria based on physical quantities, occupancy schedules and energy demand calculation methods. Also, the EN 16798-5-1 includes appropriate BIM parameter requirements to compute the efficiency of heat recovery systems under full and partial load conditions. Due to these parameters, the energy consumption of the entire air-conditioning system can be determined based on thermodynamical principles and compared with the actual energy demand. Fig. 3.1 shows the measured and calculated results based on the digital twin data of an existing air-conditioning system for one year. The comparison shows a good correlation between the experimental data and computation results. Hence, the outlined method appears to be eligible for forecasting and evaluating the energy demand for air conditioning systems.

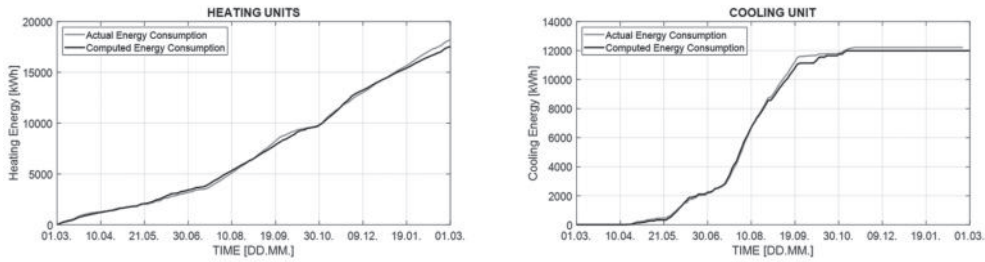


Fig. 3.1: Model validation results for heating coils (left) and cooling coil (right)

Additionally, the EN 16798-1 offers standardised categories to classify the building system design. For the determination of the ventilation rate, several methods are proposed. Besides the perceived air quality and predefined flow rate determination, methods using limit values of substance concentration can be applied. The latter design approach calculates the ventilation rates based on a mass balance formula for the concentration of the substance taking into account the outdoor concentration. In such a case, the CO_2 concentration can be used as a tracer of human occupancy and therefore enabling demand-controlled ventilation. Based on this, the energy demand for different indoor environmental qualities (IEQ) can be determined and compared. Fig. 3.2 shows the determined energy-saving potential of the heating (left diagram) and cooling units (right diagram) for different IEQ scenarios between March 2018 and February 2019.

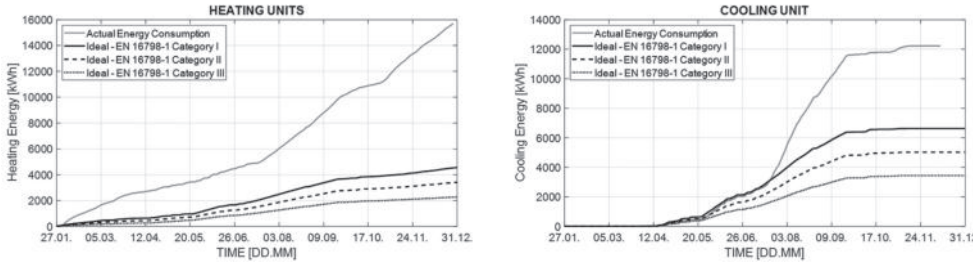


Fig. 3.2: Results of the energy consumption analysis for the heating and cooling units

For the heating units, the calculations predict a saving potential of 71 % for the category I variant, 78 % for the category II variant and 85 % category III variant. For the cooling case, 46 %, 59 % and 72 % were assessed for the investigated categories. An identical energy consumption analysis was also rendered for the steam humidifier. For the steam humidifier, a saving potential of 37 %, 63 % and 87 % have been calculated for the IEQ category I, II and III.

3.2 EVALUATION OF THE IMPROVEMENT MEASURES

Based on the energy-saving analysis control strategy, enhancements have been derived, and between July and October 2019, appropriate control adjustments applied. During this period, an IEQ category III was assigned. Thereafter, the energy consumption of the air-conditioning system was again analysed. In addition, an occupancy evaluation was carried out. The evaluation indicated high satisfaction regarding indoor air quality and thermal comfort.

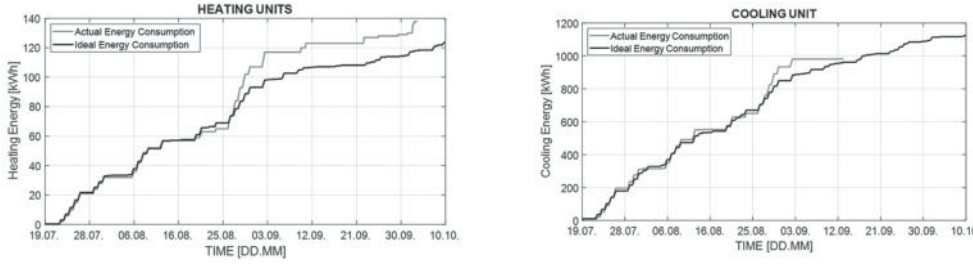


Fig. 3.3: Energy consumption comparison after control strategy adjustments

The impact of the adjustments to the actual energy consumption is illustrated in Fig. 3.3. The experimental results concur well with the expected ideal energy consumption of the heating and cooling unit. The same findings were achieved during the humidifier energy demand analysis. Accordingly, the proposed modular and scalable energy inspection method can facilitate the Fault-Detection and Diagnostics (FDD) analysis of air conditioning systems. The anomaly detection on building automation system-level can initiate optimisation and inspection measures automatically. Hence, the achieved results open access to the use of data-driven commissioning, maintenance, and repair strategies.

4. CONCLUSION AND SUMMARY

A model-based data analysis approach for energy demand inspection of air-conditioning systems was developed. In order to represent a reliable partial load behaviour and high scalability, the approach consists of several combinable submodels which are eligible to compute the thermodynamical state and energy

consumption of the heat recovery system, humidifier, heating coil and cooling coil. To evaluate the performance gaps, the submodels were linked via constraint functions, and the ideal energy demands were identified by applying a MIMO optimisation approach. The proposed method permits to evaluate the actual performance of the air conditioning system against the ideal benchmark and to initiate countermeasures. Furthermore, the applied approach provides the necessary information requirements for BIM modelling so that the results could be exploited for future planning and optimisation operation of ventilation systems.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has received funding from the Federal Ministry Republic of Austria – Digital and Economic Affairs, promotional programme "Innovationslehrgänge" operated by Austrian Research Promotion Agency under Grant Agreement number 863054 (project techFM4.0).

REFERENCE

EPBD (2018) Directive (EU) 2018/844 of the European Parlament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency

REHVA (2019) Qualitätsmanagement für Gebäude, Federation of Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, 1050 Brüssel, Belgien

EN 16798-1 (2019) Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – aprt 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1-6

EN 16798-5-1 (2017) Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – part 5-1: Calculation methods for energy requirements of ventilation and air conditioning systems (Modules M5-6, M5-8, M6-5, M6-8, M7-5, M7-8)- Method 1: Distribution and generation

Contact Details:
Christian Heschl
Fachhochschule Burgenland
7423 Pinkafeld
Email: christian.heschl@fh-burgenland.at

Session 6b

TechFM4.0 II

Ein Weg zur messdatengestützten bautechnischen Bauteilinspektion

Veitsberger, Markl / normconsult ZT GmbH / AT

IoT und Data Analytics zur Optimierung des Wiener Fernwärmenetzes

Lindmeier, Buchner / Wien Energie GmbH / AT

Ein Weg zur messdatengestützten bautechnischen Bauteilinspektion

H. Veitsberger, J. Markl
normconsult ZT GmbH, Hainersdorf, Österreich

ABSTRACT: The ageing process of building components and structures lasts over years and is usually characterized by little changes during the long period of utilization time. For a successful building management it is crucial to identify the point in time when essential maintenance, repair and operations needs to be done. Currently facility management processes detect this specific moment based on the experience of the facility management professionals. There is a high demand on the responsible experts know-how, compared to other technology sectors, where for a considerable time already predictive maintenance based on measured data is used. Therefore the usage of measured data for dynamic maintenance can help to audit the availability of facilities and as well, can influence their efficiency and operational life in an advantageous way.

Through a literature search diverse ageing mechanisms, considerable for building components and structures, can be found. Also the factors, that influence the operational life significantly are described in these works. Thereby factors are declared, which could be a good index of operational wear reserve. As well as, both the authors‘ experience in valuation of buildings within their occasion-related maintenance measures and the systematic descriptions found in literature, illustrate the different performance phases during the buildings life cycle. Particularly in the last third of the usual utilization period a significant performance decrease can be expected. It appears crucial to distinguish this specific decline.

At the present changes are mostly detected through professionals, based on their experience, who introduce appropriate measures. Within the project Tech FM 4.0 building performances are not only pointed out by building technology evaluations, but also by available parameters from building operations as well as existing measured data. The parallel analyses from measuried data related to building components and the connected rooms show a correlation of the different results. On the basis of these analyses the point in time for maintenance measurements can be detected.

In accordance with this systematic the described method has been used on real building‘s measured data. It shows that there is a possible prospect to change to measured based inspection cycles also in terms of constructional engineering.

1. EINLEITUNG

Die Systematik und Ausprägung der Alterung von Baukonstruktionen ist ein über Jahre stattfindender Prozess mit kleinen Änderungen des Zustandes von Baukonstruktionen über die Nutzungszeit. Wesentlich für eine angepasste Gebäudebewirtschaftung ist das Erkennen des Zeitpunktes der erforderlichen Wartungs - und Instandhaltungsmaßnahmen der Baukonstruktionen. Derzeit erfolgt die Festlegung des erforderlichen Zeitpunktes der Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahme in den allermeisten Prozessen des Facility Managements aus der Erfahrung des jeweils handelnden Facility Managers beziehungsweise seiner Fachleute. Im Vergleich zu anderen Technologie-Sektoren, in denen seit geraumer Zeit messdatengestützte Wartungszyklen unter dem Schlagwort predictive maintenance angewandt werden, stellt dies einen hohen Anspruch an die Kompetenz der handelnden Personen. Durch den Einsatz von durch Messdaten gestützte dynamischen Wartungszyklen können einerseits die Verfügbarkeit der Anlagen als auch die Effizienz und die Dauerhaftigkeit des Betriebes günstig beeinflusst werden. Im Zuge des Projektes Tech FM 4.0 war es Ziel die beeinflussenden Faktoren zu identifizieren und ein Bewertungsmodell zu generieren um eine robuste und vielfältig einsetzbare Methode der Gebäudebewertung zu entwickeln.

2. ANGABEN ZUR DEGRADATION IN DER LITERATUR

In der Literatur stehen den Experten Nutzungsdauerkataloge, Herstellerangaben und verschiedene Studien zu Baukonstruktionen und Anlagenteilen zur Verfügung. In diesen wird im Wesentlichen die mögliche und allgemein anzunehmende Lebensdauer von verschiedenen Anlagen und Gebäudeteilen im Gebäude beschrieben. Die Ausführlichkeit der Angaben über die verschiedenen Konstruktionen und Anlagen ist unterschiedlich, so gibt es über Glasfassadenbauten beispielsweise wenig Angaben (Lieb 2013). Ziegel-Massiv-Konstruktionen hingegen sind gut beschrieben. (BBSR 2011; SV-Landesverband 2006, Zelger et al. 2009)

Im Zuge einer Literaturrecherche wurden die Alterungsmechanismen von Baukonstruktionen insbesondere der mögliche Degradationsverlauf betrachtet. Dieser Verlauf lässt sich im Wesentlichen für eine Baukonstruktion wie in Abb. 1 darstellen. Es wird von einem Sollzustand nach der Errichtung ausgegangen, der durch den Abnutzungsvorgang verlassen wird. Durch Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen soll der Abnutzungsvorgang nach Möglichkeit gebremst werden um einen Schadenseintritt zu vermeiden oder hinauszuzögern, der zum Ausfall der Anlage führen kann. Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass besonders im letzten Drittel der Nutzungsdauer die Performance des Gebäudes stärker abfällt als zuvor (Ritter 2011)

Durch dynamische Wartungszyklen, basierend auf dem Wissen aus Messdaten, soll der Punkt dieses Abfallens, der schlussendlich zum Ausfall des Systems führt, erkannt werden und durch gezielte Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen entsprechend den übergeordneten strategischen FM Zielen verhindert oder gebremst werden.

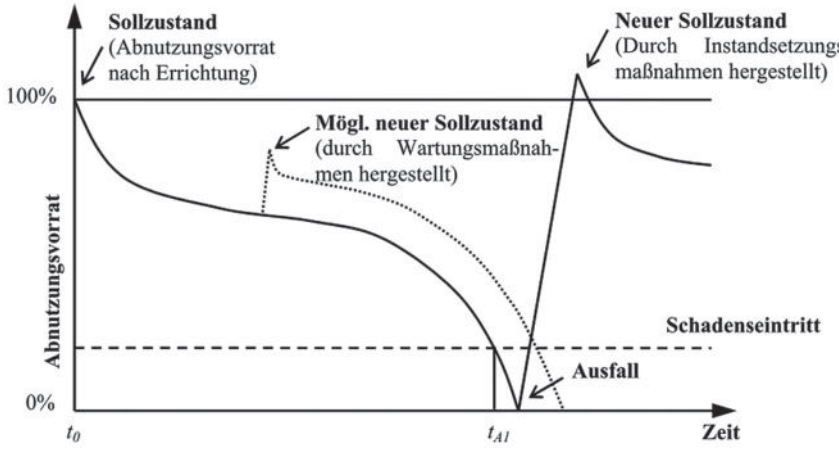


Abb. 1: Theoretischer Verlauf der Abnutzung eines Bauteils (Ritter 2011)

Die Abbildung des Degradationsverlaufes durch Messwerte erfordert eine Bestimmung eindeutiger Indikatoren, welche günstiger Weise im bisherigen Facility Management schon vorhanden oder mit wenig Aufwand zu erhalten sind.

Mittels ISO 15686 wird der Degradationsverlauf basierend auf einer Faktorenmethode ermittelt. Im Wesentlichen werden die Veränderung der Bauteilqualität betrachtet, der Einfluss der Umgebungsbedingungen – innen und außen – und die Gebrauchsbedingungen erörtert. In Bezug auf Baukonstruktionen haben nach Bahr & Lennerts (2010) vor allem drei physikalische Vorgänge einen negativen Einfluss auf die Entwicklung der Bauteilqualität:

- Feuchtigkeit im Bauwerk
- Sonneneinstrahlung
- Temperaturveränderungen

Diese Veränderungen lassen sich zum Beispiel mittels Feuchtigkeitsmessung, Messung von Temperaturverläufen in der Konstruktion und mittels Messung des Wärmedurchgangswiderstands ermitteln. Diese Messstellen sind aber meist in Gebäuden (noch) nicht für diesen Zweck vorhanden.

Im Zuge des Projektes TechFM wurde ein Ansatz zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) durch Messungen nach ISO 9869 intensiver untersucht und es zeigte sich aus dieser vertieften Untersuchung, dass für eine tragfähige Aussage zum U-Wert lange Messzeiten und eine Filterung der Daten erforderlich werden. Es zeigte sich aber auch, dass auch mit einer geringeren Datenpunktanzahl eine Tendenz ersichtlich werden kann.

3. MESSUNG DES WÄRMEDURCHGANGSWIDERSTANDES

Der Wärmedurchgangswiderstand R (m^2K/W) und der Wärmedurchgangskoeffizient U ($W/(m^2K)$) lassen sich basierend auf der ISO 9869 messen und berechnen. Die Ermittlung der Koeffizienten ist ein probates Mittel zur Bewertung einer Baukonstruktion und sie erlauben eindeutige Rückschlüsse auf den tatsächlichen Ist-Zustand ebendieser.

Über mehrere Jahre immer gleich gemessen und ausgewertet würde sich so eine mögliche Veränderung in der Konstruktion abbilden lassen. Essentiell ist dabei die Beachtung möglicher Einflussgrößen, welche beispielsweise den Wärmedurchgangskoeffizienten an sich verfälschen können. Ausrichtung und Orientierung der Fassade haben Einfluss auf die durch solare Einstrahlung eingebrachte Wärmeenergie in das System. Der U-Wert ist dabei während solcher Erwärmungs- und Abkühlphasen deutlich zu unterscheiden von einem Wert außerhalb der genannten Zeiträume (Wegerer & Harreither 2019). Auch weist die Norm auf die Verwendung von geeigneten Messmitteln und deren sachgemäße Anbringung hin. Ausgehend von den normativen Vorgaben und der eigenen Erfahrung in der Bauwerksbeurteilung zeigt sich, dass eine solche Messung für einzelne Fassaden praktikabel sein kann. Nachteilig ist, dass mit zunehmender Größe und Komplexität eines Bauwerkes auch die Messungen aufwendiger werden und zudem keine Aufschlüsse über bereits vergangene Ereignisse und den bisherigen Verlauf der Degradationskurve geben können.

Zur praktischen Überprüfung der Eignung der Koeffizienten wurde eine U-Wert-Messung und Auswertung durchgeführt. In Abb. 2 ist der Messaufbau ersichtlich, wobei neben Wärmestrom- und Temperatursensoren auch ein Pyranometer installiert wurde, um mögliche Einflüsse aus Sonneneinstrahlung herausfiltern zu können.

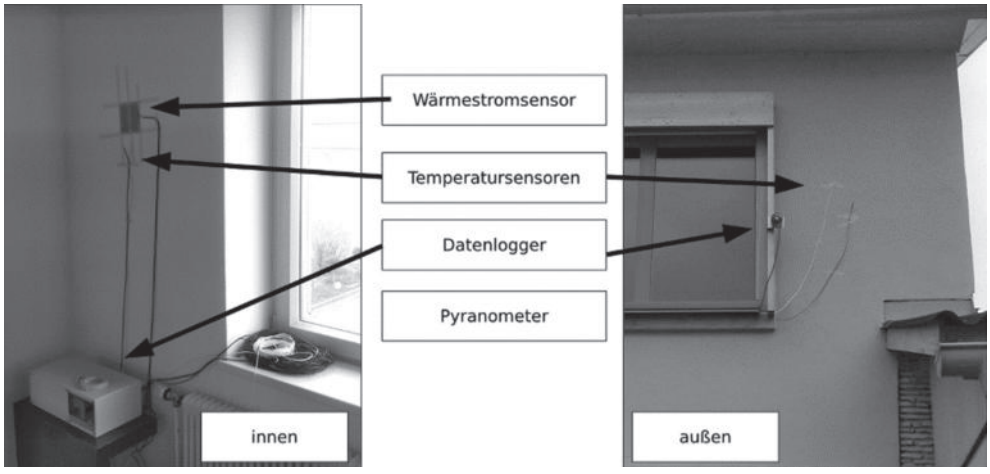


Abb. 2: Messsensorik zur U-Wert-Bestimmung

Da in der Messung und Berechnung laut ISO 9869 im Prinzip der Energieverlust aus dem System bezogen auf die Fläche dargestellt wird, liegt es nahe einen eigenen Kennwert für diesen Energieverlust auf ähnliche Weise zu berechnen und dabei auf bereits existierende Daten aus der Gebäudeverwaltung und der

Gebäudeleittechnik zurückzugreifen. Im Nachfolgenden wird dieser Leistungsparameter als Wärmeverlustindikator bezeichnet und mit WVI abgekürzt. Ein Vergleich mit einer U-Wert-Messung diente hierbei der Verifikation und Anpassung des WVI.

4. WÄRMEVERLUSTINDIKATOR EINER FABRIKHALLE

Im Zuge des Projektes wurde ein Wärmeverlustindikator WVI für eine Fabrikhalle im Großraum Graz erstellt. Es handelt sich dabei um eine Fabrikhalle mit verschieden genutzten Anbauten und einer Gesamt-Grundfläche von über 10.000 m². Die Halle wurde saniert und erweitert, somit liegen unterschiedliche Gegebenheiten bei den Hüllflächen vor. Eine Schätzung der Wärmedurchgangskoeffizienten zum späteren Vergleich mit dem WVI ergab folgendes Bild (siehe Tab. 1):

Tab. 1: Wärmedurchgangskoeffizient - Schätzwerte

Bezeichnung	Geschätzter Wärmedurchgangskoeffizient U W/(m²K)	Minimaler und maximaler Wärmeverlustindikator WVI W/(m²K)
Grundfläche	1,000	
Fassade	3,000	
Dach	0,400	
Mittelwert	0,814	0,555 bis 1,177

Um den WVI berechnen zu können wurden Bestandspläne, Wetteraufzeichnungen und Energiedaten aus dem Facility Management aus den Jahren 2017 bis 2020 zur Verfügung gestellt. Sind Lücken in den Datenreihen nicht allzu groß, lassen sich mit dieser Methode dennoch haltbare Werte berechnen.

In Abb. 3 und Abb. 4 sind beispielsweise die Datensätze für Außen- und Innenlufttemperatur dargestellt. Der Datensatz für die Außenlufttemperatur war fast zur Gänze durchgängig vorhanden, kleinere Datenlücken konnten kompensiert werden. Jedoch war die Qualität der Innenluftdaten wesentlich niedriger und ließ für das Jahr 2017 keine belastbaren Aussagen zu. Da aber der Vergleich der Innen- und Außenlufttemperatur für die Berechnung des WVI essentiell ist, wurden die Daten für den oben genannten Zeitraum aus der Bewertung genommen.

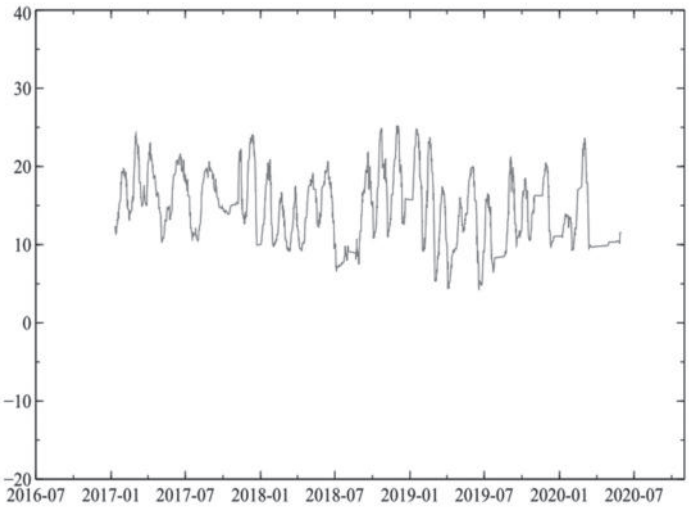


Abb. 3: Außenlufttemperatur-Daten 2017-2020

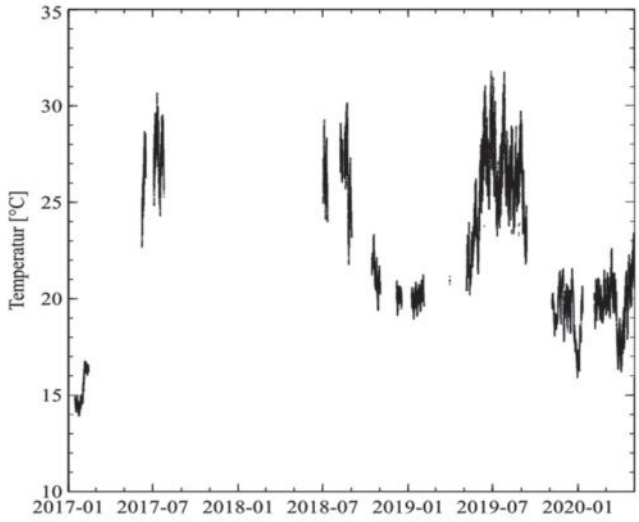


Abb. 4: Innenlufttemperatur-Daten 2017-2020

Offene Fragen wurden durch eine Besichtigung des Standortes geklärt und in die Methode eingearbeitet. In der Auswertung wurden folgenden Randbedingungen variiert:

- Größe der Bezugsfläche
- Zeitliche Einschränkung von 24 Stunden auf Zeitraum außerhalb der Betriebszeit
- Betrachtung der Energieströme mit / ohne Prozessenergie

In Abb. 5 sind die ausgewerteten WVI für die große Bezugsfläche in den Jahren 2018, 2019 und 2020 dargestellt. OZ bedeutet „ohne Zeiteinschränkung“ (siehe durchgängige Linien) und bedeutet eine Auswertung von Daten aus 24 Stunden pro Tag, ZE bedeutet eine „Zeiteinschränkung“ in der Auswertung auf den Zeitraum außerhalb der tatsächlichen Betriebszeit. Die Abkürzung PE weist darauf hin, dass die „Prozessenergie“ (siehe gestrichelte Linien) in den Energieströmen mitberücksichtigt wurde. Aus der unten angeführten Darstellung lässt sich schließen, dass es in den Jahren 2018-2020 in allen vier dargestellten Varianten eine Zunahme des WVI gab, jedoch mit unterschiedlicher Stärke, was im allgemeinen aber eine Verschlechterung der Bausubstanz über den Zeitraum darstellt.

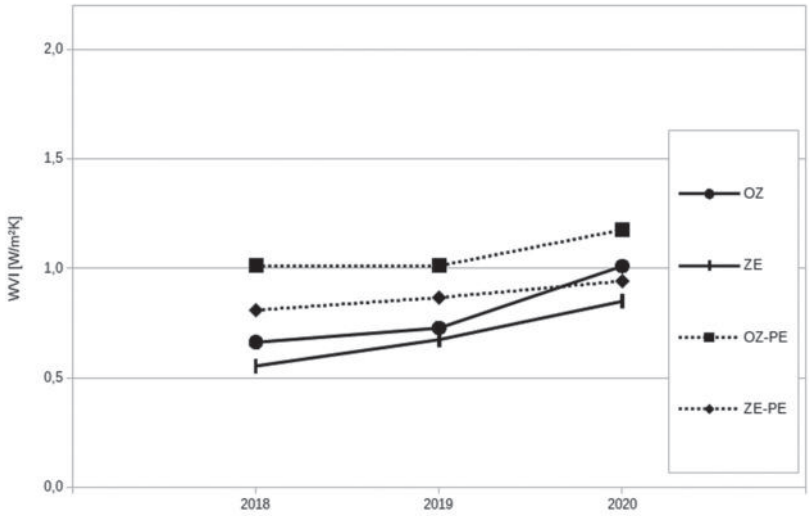


Abb. 5: Wärmeverlustindikator von 2018 bis 2020 für die große Bezugsfläche

Bei einer weiteren Betrachtung wurde die Hüllfläche um den Wert der Größe der Bodenplatte verkleinert. Es zeigen sich ähnliche Tendenzen wie in der obigen Abbildung, jedoch mit stärkerer Ausprägung (siehe Abb. 6)

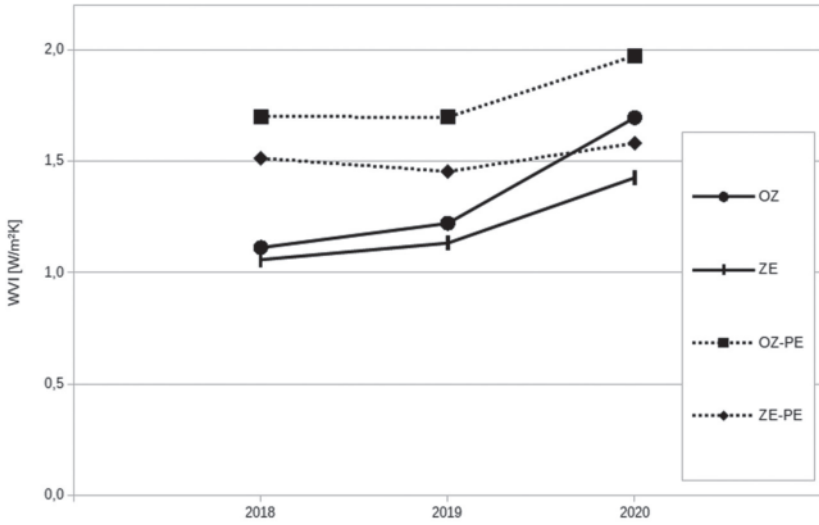


Abb. 6: Wärmeverlustindikator von 2018 bis 2020 für die kleine Bezugsfläche

5. ERGEBNISSE

Mit der Überwachung der Messdaten über mehrere Jahre können sich zuverlässige Aussagen über die Performance der Gebäudehülle machen lassen und der tatsächliche Ist-Zustand schneller bewertet werden. Die Berechnung des WVI erweist sich tendenziell als robuste Methode, da kurzfristig beeinflussende Effekte keine signifikanten Einflüsse auf die grundsätzliche Tendenz haben. Es können die vorliegende Datenaufzeichnung bis zu einem gewissen Grad sogar lückenhaft sein. Im Vergleich zur Energiebilanzierung können unbekannte Effekte wie manuelles Eingreifen in die gebäudetechnische Anlage (beispielsweise Abschalten der Lüftungsanlagen nach Empfinden) zu keiner beziehungsweise nur zu geringen Verschiebungen der Werte führen.

Die Ermittlung des Wärmeverlustindikators kann sich daher als geeignete Methode um eine Kennzahl für einen dynamischen Effekt aus statischen Werten zu generieren erweisen. Mit Hilfe des WVI wird, nach entsprechender Validierung und zusätzlicher Kenntnisse zur Datenqualität, auch der Degradationsstatus des Gebäudes geeignet dargestellt werden können. Mittels weiterer Auswertungen von anderen Gebäudestandorten soll die Methode noch verbessert und validiert werden.

6. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Um Aussagen über den Ist-Zustand einer Baukonstruktion machen zu können wurden anhand einer Literaturrecherche wesentliche Faktoren herausgearbeitet. Basierend auf der messtechnischen Ermittlung des Wärmeverlustkoeffizienten U (W/(m²K)) wurde eine robuste Methode entwickelt um den Degradationsstatus einer Baukonstruktion gestützt auf Messdaten darzustellen. Der Wärmeverlustindikator WVI (W/(m²K)) wurde anhand einer Fabrikhalle für die Jahre 2018-2020 erstellt und plausibilisiert. Im Vergleich zur U-Wert-Messung sind Kenntnisse über den tatsächlichen Wandaufbau nicht notwendig, und im Gegensatz zur Energiebilanz können Störfaktoren den WVI nur bedingt beeinflussen. In weiteren Schritten wird der WVI für andere Gebäude angewandt und es wird angestrebt die Methode über mehrere Gebäudetypen und Nutzungen anzuwenden um eine Charakterisierung der Treffsicherheit zu erhalten. Mit Energiedaten über viele Jahre können so Veränderungen in den Baukonstruktionen dargestellt werden und Betrieb und Wartung wirtschaftlich positiv beeinflussen.

ACKNOWLEDGEMENT

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des FFG Förderprogramms „Forschungskompetenzen für die Wirtschaft – Innovationslehrgänge 3. Ausschreibung“ bzw. des Projekts techFM4.0 (PNr. 863054) durch das „Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort“ finanziell unterstützt.

LITERATUR

Bahr C., Lennerts K. (2010) Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen Endbericht. Bonn, Deutschland: BBSR

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2011) Nutzungsdauer von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Bonn, Deutschland: BBSR

Hauptverband der allgemein beeideten u. gerichtlich zertifizierten Sachverständigen Österreichs (2006) Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile. Graz, Österreich: SV-Landesverband Steiermark und Kärnten

ISO 15686 (2011) ISO 15686-1:2011-05 Hochbau und Bauwerke - Planung der Lebensdauer - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Rahmenbedingungen. Genf, Schweiz: ISO

ISO 9869 (2014) BS ISO 9869-1:2014 Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance Part 1: Heat flow meter method. Genf, Schweiz: ISO

Lieb K. (2013) „Sie hält und hält und hält…“ - Structural Glazing Fassade im Dauertest Was sich daraus für Fenster und Fassaden ableiten lässt. Rosenheimer Fenstertage 2013, Seite 49-53. Rosenheim, Deutschland: ift Rosenheim

Ritter F. (2011) Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen Modellierung und Praxisnahe Prognose, Dissertation. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, Deutschland

Wegerer P. & Harreither C (2019) Wärmeschutz: U-Wert – In-Situ-Messung, BauphysikerInnen-Treffen 2019, Seite 3-16. Wien, Österreich: Technische Universität Wien

Zelger T., Mötzl H., Scharnhorst A. & Wurm M. (2009) Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen Endbericht. Wien, Österreich: IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie GmbH

Kontaktdaten:
Dipl.-Ing. Hannes Veitsberger
Dipl.-Ing. Julia Markl
normconsult ZT GmbH
Hainersdorf 6
8264 Hainersdorf
Email: veitsberger@normconsult.at

IoT und Data Analytics zur Optimierung des Wiener Fernwärmenetzes

I. Lindmeier, S. Buchner
Wien Energie GmbH, 1030 Wien, Österreich

ABSTRACT: The district heating network of Vienna is a historically grown (and still growing) system since 1965 and has more than 1200 piping kilometres and more than 10.000 substations. That is the main reason why nearly 65 % of the substations work as "stand-alone" solutions with no real-time data connection. Due to this problem in 2019 a Pilot project was started which deals with the usage of IoT and Data Science to make the Viennese district heating system ready for digital maintenance solutions and the implementation of renewable energy system by optimizing the system temperatures and control parameters. Therefore in a testbed (10 MW installed capacity) the Potential of IoT solutions (different sensors and wireless technologies such as NB-IoT, LoRa-Wan and Sigfox) was tested. Data Analytic Tools like KNIME and Python were used to analyse the data and get an deeper insight into it. After one year of Pilot phase it was possible to rise the energy efficiency of the testbed (lowering supply temperatures by 5 K) and show that wireless technologies work quite well and give new possibilities in operating district heating networks. In a next step the data and knowledge gained are then used to implement machine learning models for load prediction and anomaly detection in the Gufos (Gebietsumformer).

1. MOTIVATION

Die Folgen des Klimawandels bzw. das Ziel diesen einzudämmen stellt Energieversorger vor spannende Herausforderungen, so auch die Wien Energie GmbH als Betreiber des größten Fernwärmenetzes Österreich. Bis vor wenigen Jahren lag das Hauptaugenmerk auf der Sicherstellung der Wärmebereitstellung und Zufriedenheit des Endkunden. Der Fokus lag auf dem einwandfreien Anlagenbetrieb und somit auf Anlagenwartung und Störungsbehebung. Im Notfall wurden Systemtemperaturen erhöht, um die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Der Kunde und seine Zufriedenheit steht auch heute noch im Mittelpunkt, jedoch stellt die Forderung nach vermehrter Einbindung erneuerbarer Energieträger, Netzbetreiber von historisch gewachsenen Systemen durchaus vor Herausforderungen. Entwicklungen im Bereich IoT und Data Science bieten spannende Möglichkeiten die Anforderungen der Zukunft schneller und effizienter zu meistern und Lösungen wirtschaftlich zu skalieren.

2. FERNWÄRMEVERSORGUNG WIEN

2.1 NETZSTRUKTUR

Das Wiener Fernwärmenetz besteht aus mehr als 1.200 Trassenkilometer und teilt sich in ein Primärnetz (Vorlauftemperatur bis 160 °C und Druck bis 28,5 bar) und viele Sekundärnetze (Vorlauftemperatur bis ca. 95 °C und Druck bis 12 bar). Abb. 1 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Aufteilung in Primär- und Sekundärnetze in Wien. Jedes Sekundärnetz bzw. jeder Großabnehmer ist durch eine (Gebiets-) Umformerstation (Gufo bzw. Ufo) hydraulisch vom Primärnetz getrennt.

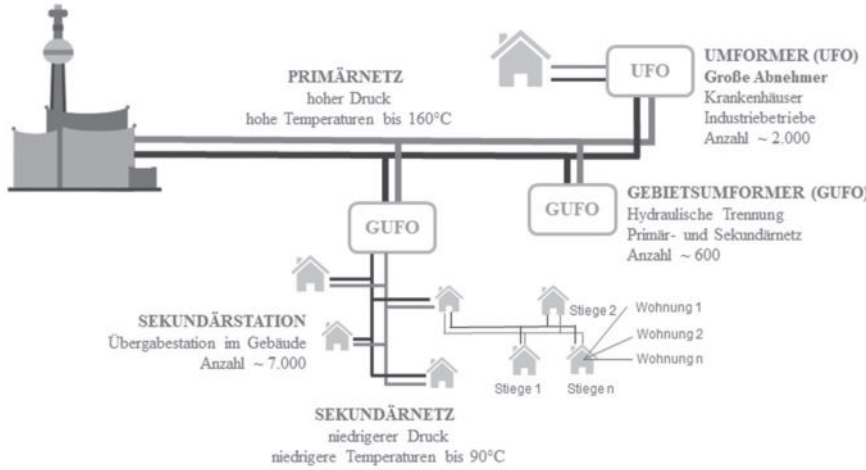


Abb. 1: Schematische Darstellung des Wiener Fernwärmenetzes mit seiner Unterteilung in Primär- und Sekundärnetz (Die Müllverbrennungsanlage Spittelau steht exemplarisch für den gesamten Kraftwerkspark)

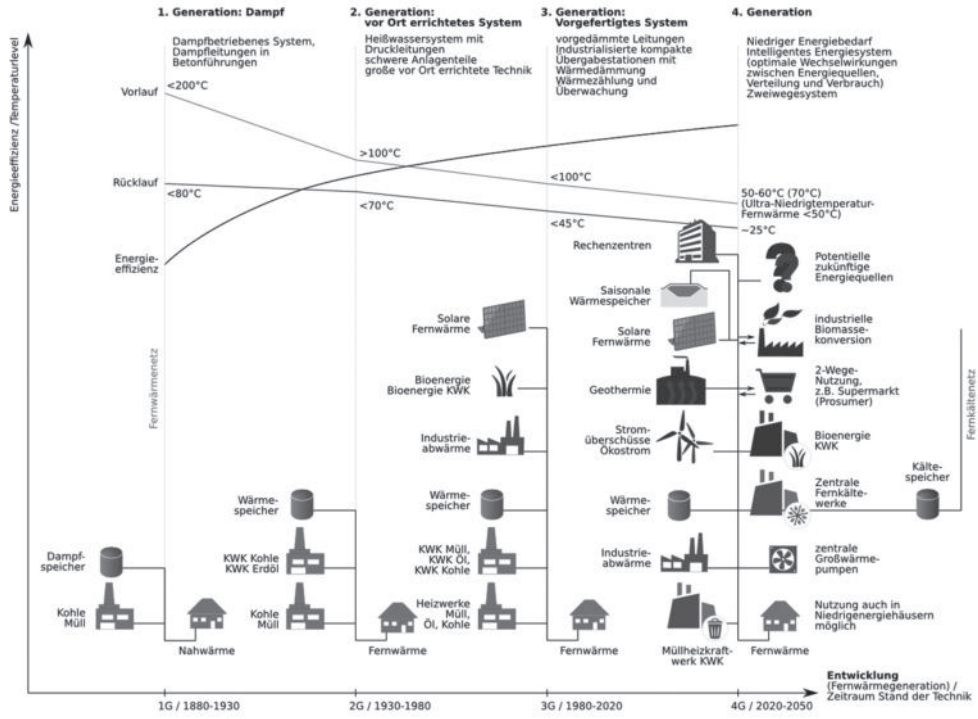


Abb. 2: Entwicklung der Fernwärmeversorgung über die letzten Jahrzehnte mit steigender Komplexität der Energiebereitstellung und damit steigender Energieeffizienz (Lund, 2014)

Betrachtet man die Entwicklung der Fernwärmeversorgung nach Lund (2014) in Abb. 2, so muss es das Ziel sein ein Netz der 4. Generation zu betreiben. Aktuell kann man das Wiener Fernwärmenetz nicht eindeutig einer einzigen Generation zuordnen. Maßnahmen wie die Einbindung von Industrieabwärme, die zentrale Einspeisung durch Großwärmepumpen und die Nutzung von Überschussökostrom finden bereits statt und entsprechen zum Teil einem Netz der 4. Generation. Zieht man jedoch rein die Systemtemperaturen als Bewertungskriterium heran, so muss man das Primärnetz der 2. Generation und den Großteil der Sekundärnetze der 3. Generation zuordnen.

Um vermehrt erneuerbare Energieträger einbinden zu können bzw. ein Fernwärmenetz der 4. Generation zu schaffen, ist die Absenkung der Vor- und Rücklauftemperaturen sowohl in den Sekundärnetzen und in weiterer Folge im Primärnetz unabdingbar. Während die Vorlauftemperatur, in den Grenzen der vertraglich festgelegten Möglichkeiten, vom Betreiber beeinflusst werden kann, ist die Rücklauftemperatur wiederrum stark von der Anlageneffizienz auf Abnehmerseite abhängig und liegt nur eingeschränkt im Einflussbereich des Netzbetreibers. Die Abnehmer müssen auf andere Art und Weise motiviert werden ihre Anlagen so effizient wie möglich zu betreiben – Anreizpunkte können hier zum Beispiel flexible Tarife darstellen wie in Diget (2019)

2.2 AUFBAU SEKUNDÄRNETZE

Jedes Sekundärnetz ist über einen Gebietsumformer (Gufo) hydraulisch vom Primärnetz getrennt. Jeder Gufo verfügt über einen oder mehrere (parallel geschaltene) Wärmetauscher, welche wiederrum auf der Primärseite mit je einem Wärmemengenzähler und einem Regelventil ausgestattet sind. Die Regelung der Vorlauftemperatur erfolgt in Abhängigkeit der Außentemperatur auf Basis eines Temperaturfühlers in der Versorgungsleitung am Austritt des Gufos. Jeder Abnehmer in einem Sekundärnetz verfügt über mindestens einen Wärmemengenzähler (siehe auch Abb. 3), wobei es aufgrund unterschiedlicher vertraglicher Gegebenheiten vorkommen kann, dass kein Wärmemengenzähler für die Trinkwarmwasserbereitung (Abrechnung über Kaltwassermenge) vorhanden ist und nur die Heizungswärme messtechnisch erfasst wird. In solchen Fällen gibt es z.B.: im Sommer keine Information darüber welche Temperaturen tatsächlich beim Kunden angekommen sind.

Ungefähr 30 % der Wärmemengenzähler sind fernaufgeschalten und liefern tagesaktuelle 15-min-Werte, jedoch nicht in Echtzeit. Ebenso sind mehr als 1/3 aller Gufo-Regelungen fernaufgeschalten und ermöglichen dadurch einen Livezugriff auf die Anlagenparameter, sowie deren Sensorwerte. Gespeichert werden hierbei aber auch nur die notwendigsten Sensorwerte und Regelungsparameter in 15 min Intervallen.

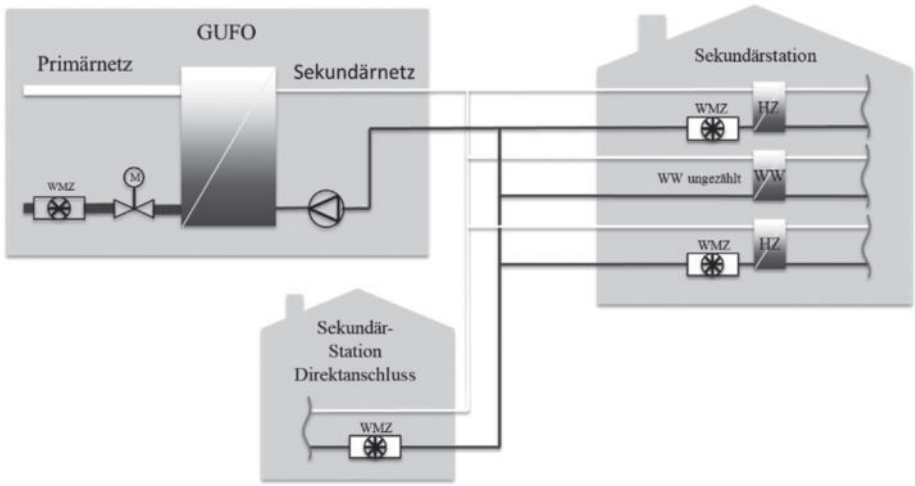


Abb. 3: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Sekundärnetzes mit zwei Sekundärstationen inkl. der Wärmemengenzählervarianten

2.3 AKTUELLE BETRIEBSWEISE SEKUNDÄRNETZE

Je nach Anschlussart werden in Abhängigkeit der Außentemperatur entsprechende Vorlauftemperaturen vertraglich zugesichert. Die Vorlauftemperatur bzw. die Heizkurve ist in der Anlagenregelung des Gufos implementiert und sollte normalerweise nur minimal überhöht gefahren, um Wärmeverluste zu kompensieren und so auch beim, am weitesten entfernten Abnehmer die zugesicherte Vorlauftemperatur garantieren zu können. Da jedoch keine Echtzeit- oder nahezu Echtzeitinformation zu den tatsächlichen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen beim jeweiligen Abnehmer zur Verfügung stehen, wird aus Sicherheitsgründen die Heizkurve oft weit höher gefahren als tatsächlich notwendig. Grund hierfür ist meist eine Versorgungsproblematik während der Übergangszeit oder während besonders kalter Perioden.

Eine dynamische Fahrweise des gesamten Systems (Vorlauftemperatur und Systemdruck) abgestimmt auf die Anforderungen der Abnehmer ist aktuell nicht möglich, da aufgrund fehlender Echtzeitdaten die Information bzgl. der tatsächlich ankommenden Temperaturen fehlt.

2.4 MÖGLICHE BETRIEBSWEISE SEKUNDÄRNETZE

Im Idealfall stehen dem Netzbetreiber sämtliche Informationen aus dem Sekundärnetz bzw. von den Abnehmern (inkl. Informationen aus den Gebäudeleitsystemen) zur Verfügung und die Regelung erfolgt in bidirektionaler Kommunikation mit den Anlagenregelungen der Abnehmer – ein ideales Zusammenspiel mit dem Ziel der effizientesten Betriebsweise. Bei historisch gewachsenen Systemen inkl. unterschiedlichster Abnehmer (sowohl unterschiedlich in Alter, Anlagenart, Anlagenregelung, Nutzungsart und Vertragssituation etc.) stellt diese Form der Betriebsweise aber eine große Herausforderung, sowohl aus wirtschaftlicher, technischer als auch vertragsrechtlicher Sicht, dar.

Ziel ist es ein Optimum aus niedrigen Systemtemperaturen und Wassermenge zu erreichen. Sind die Kapazitäten bzgl. der Wassermengen noch nicht begrenzt, so kann es ein einfacher erster Ansatz sein eine Art Schlechtpunktregelung umzusetzen, welche sich an der niedrigsten Vorlauftemperatur im Netz orientiert. Ziel ist es diese Temperatur an die minimal garantierte Vorlauftemperatur lt. Vertragsbedingungen anzunähern bzw. diese zu erreichen. In diesen Fällen ist zumindest gewährleistet, dass das Netz nicht mit überhöhten Temperaturen betrieben wird und die vertraglichen Rahmenbedingungen erfüllt werden.

Im nächsten Schritt ist zu prüfen ob Potential besteht die lt. Vertragsbedingungen gelieferte Vorlauftemperatur theoretisch noch weiter zu senken. Da in den meisten Fällen leider keine Informationen zu den Parametern (Heizkurve) in den Heizungsregelungen der Abnehmer vorhanden sind, kann man ohne Einwilligung des Kunden nur über Umwege erkennen, ob die gelieferte Vorlauftemperatur zum Erreichen des Vorlaufsollwertes auf Kundenseite ausreicht. Dies kann vereinfacht abgeschätzt werden durch das Verhältnis aus aktuell benötigter Wassermenge zur Auslegungswassermenge. Sollte die Vorlauftemperatur im Sekundärnetz nicht reichen, um die Sollwerte auf der Abnehmerseite zu erreichen, nähert sich die Wassermengenauslastung 100 %.

Auf diese Art kann erhoben werden, ob ein Abnehmer eine Heizkurve in der Regelung hinterlegt hat, welche nicht zu den Vertragsbedingungen passt (sprich die Wassermengenauslastung liegt sehr oft bei 100 %) oder ob der Abnehmer seine Anlage so effizient betreibt, dass die minimale Vorlauftemperatur lt. Vertrag theoretisch unterschritten werden könnte. Eine weitere Absenkung ist selbstverständlich nur mit Einverständnis aller in diesem Netz versorgten Abnehmer möglich und stellt in weiterer Folge eine große Herausforderung sowohl für den Vertrieb, als auch die Rechtsabteilung und der damit verbundenen Tätigkeit einen passenden Vertrag zu erstellen dar. Aber auch hier bietet IoT und Datenanalytik die Möglichkeit auf Basis feiner aufgelöster Daten und größerer Datenmengen die Problematik und die Vorteile anschaulich für Kunden aufzubereiten bzw. stellen diese Informationen die Basis für flexible Tarife dar, die in diesem Fall auch einen wirtschaftlichen Mehrwert für Kunden darstellen. Prognosemodelle trainiert auf Basis historischer Daten und selbstlernende Modelle ermöglichen zusätzlich die Netzregelung entsprechend effizienter zu gestalten.

Dieser Ansatz stellt selbstverständlich nur einen ersten Kompromiss dar und kann bei Anlagen, welche direkt ohne Wärmetauscher an das Sekundärnetz angeschlossen werden nicht angewandt werden, hier sind andere Lösungsansätze notwendig.

2.5 IOT UND DATA SCIENCE ZUR NETZOPTIMIERUNG

Betrachtet man den klassischen Workflow einer Data Science Fragestellung in Abb. 5, so steht am Beginn des Prozesses das Sammeln der Daten bzw. eine entsprechende Datenbasis. Machine Learning Modelle benötigen eine ausreichend große und qualitativ hochwertige Datenbasis um diese trainieren und validieren zu können. Wie bereits in den vorherigen Abschnitten erwähnt, stehen aktuell jedoch nur von ca. 40 % aller Anlagen Informationen in 15 min Zeitintervallen und auch hier nicht in nahezu Echtzeit zur Verfügung.

Grund hierfür ist vor allem die Tatsache, dass die Fernaufschaltung in Echtzeit jedes Wärmemengenzählers und jeder Anlagenregelung in den letzten Jahrzehnten technisch nur eingeschränkt möglich war oder schlicht zu teuer gewesen wäre und auch die entsprechende Rechenleistung zur Nutzung von Machine Learning Modellen nur eingeschränkt vorhanden oder sehr teuer einzukaufen war – Nutzen zu Aufwand sprach in den letzten Jahrzehnten nicht für solch eine Lösung. Durch die Entwicklungen im Bereich der Datenübertragung, Rechnerleistungen, Softwaretools zum effizienten Verarbeiten von Big Data, etc. ergeben sich jedoch wirtschaftlich abbildbare Use- und Business Cases.



Abb. 4: Data Science Workflow

Bei Fernwärmenetzen handelt es sich um relativ träge Systeme und es reicht, nach aktuellem Stand, aus ca. alle 10 bis 15 Minuten einen aktuellen Messwert (bzw. mehrere Messwerte in einem Paket bei Wärmemengenzählern) zu schicken. Somit erfordern die zu übertragenden Datenmengen keine große Bandbreite. Herausforderungen sind eher die Reichweite, die Eindringtiefe in das Gebäude (Heizungsstationen liegen meist im Keller) sowie der Stromverbrauch.

Abb. 6 zeigt eine Übersicht ausgewählter Funkübertragungsstandards, wobei für den Anwendungsfall im Bereich der Fernwärme (Anlagen tief im Gebäude, nicht invasive Sensorik gewünscht, …) die Technologien mit großer Reichweite, hoher Bauteildurchdringung und niedrigem Energieverbrauch von Interesse sind. Durch Technologien mit besonders niedrigem Energieverbrauch wie z.B.: Sigfox besteht erstmals die Möglichkeit mit batteriebetriebenen Sensoren über lange Zeiträume (bis 5 Jahre), zeitlich relativ fein aufgelöste Daten (ca. 10 min) unkompliziert zu generieren.

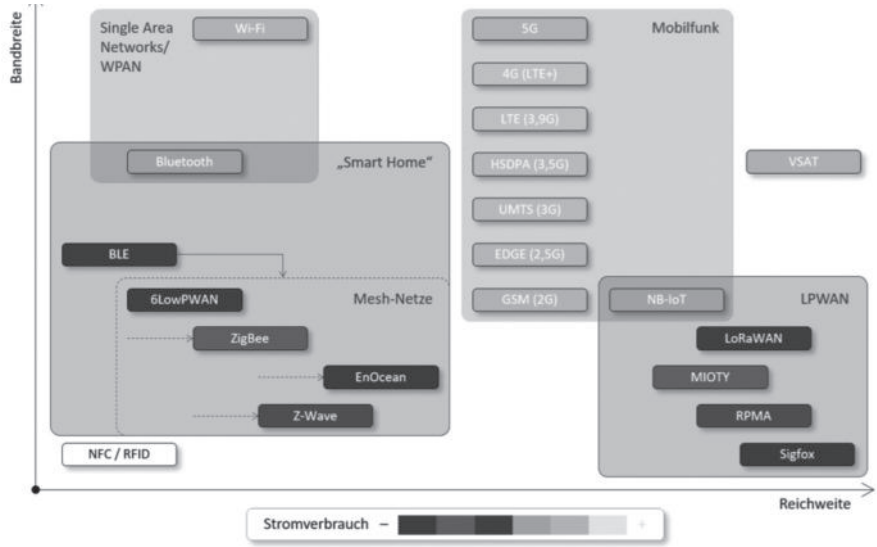


Abb. 5: Ausgewählte Standards und Produkte für kabellose digitale Datenkommunikation (AGFW 2020)

3. ERGEBNISSE PILOTPROJEKT

Anfang 2019 wurde ein internes Pilotprojekt gestartet, welches es, unter anderem, zum Ziel hatte, ein ausgewähltes Gufo-Netz mit zusätzlicher IoT-Sensorik auszustatten, um die Basis für eine dynamischere Betriebsweise zu schaffen. Die gewonnenen Daten wurden mit Hilfe von Data Analytics Tools wie Python und KNIME hinsichtlich ihres Betriebsverhalten näher analysiert.

3.1 PILOTGUFONETZ

Ausgewählt wurde ein durchschnittlich großes Gufo-Netz mit 7 Abnehmern und einer Anschlussleistung von 10 MW. Die Regelung des Gufos verfügte bereits seit Inbetriebnahme über eine Fernaufschaltung und es lagen historische Sensorwerte und zum Teil Regelungsparameter in 15 min Zeitschritten in den Datenbanken vor. Die Regelungen der Abnehmer und auch die Verrechnungswärmemengenzähler waren nicht fernaufgeschalten und mussten noch manuell monatlich abgelesen werden.

Da es sich bei den Anlagen um Bestandsbauten handelte, musste in jeder Übergabestation nachträglich eine Datenfernübertragung für die Wärmemengenzähler realisiert werden. Dies erfolgte in enger Zusammenarbeit mit einem Wärmemengenzählerhersteller und basierte auf der Übertragungstechnologie NB-IoT. Es wurden außerdem Tests mit LoRa-Wan durchgeführt, jedoch konnte in einzelnen Gebäuden mit herausfordernder Fassadenstruktur (Stahlbeton und Aluminium-Fassade) kein ausreichend starkes Signal empfangen werden.

Auch in diesem Pilotnetz gab es einige Abnehmer, welche keinen Wärmemengenzähler für die Warmwasserbereitung aufwiesen. Um auch im Sommer Informationen zur aktuell gelieferten Vorlauftemperatur zu erhalten, wurde in diesen Anlagen der Einsatz von batteriebetriebenen Temperatursensoren und der Datenübertragung über SigFox getestet.

3.2 ERGEBNISSE

Durch die Fernaufschaltung der Wärmemengenzähler und die zusätzlichen Sigfox Temperatursensoren war sofort ersichtlich, dass der Gufo mit einer 5-7 K überhöhten Vorlauftemperatur betrieben wurde. Aus dem Anlagenbuch war erkennbar, dass es zwei Jahre zuvor bei einem Abnehmer zu Versorgungsproblemen gekommen war und die Regelungsparameter daher erhöht wurden. Dieses Problem schien jedoch behoben worden zu sein, wodurch sich das Projektteam entschloss, die Vorlauftemperatur des Gufo-Netzes bis auf Vertragsbedingungen herabzusetzen und das Verhalten des Netzes zu beobachten. Abb. 6 zeigt die Veränderung des Effizienz KPIs Massenstrom (Primärseite) je übertragene Leistung. Hier ist zu erkennen welchen positiven Effekt die Absenkung im Sekundärnetz auf das Primärnetz hat (Absenkung des Primärmassenstroms durch Erhöhung der Primärspreizung).

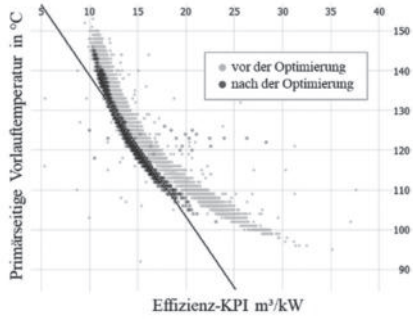


Abb. 6: Darstellung des Effizienz KPI Durchfluss Primärseite je Wärmeleistung über die primärseitige Vorlauftemperatur vor und nach der Optimierung

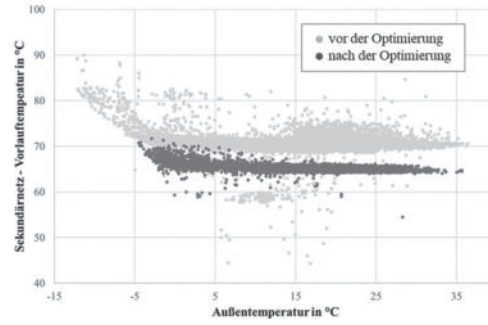


Abb. 7: Darstellung sekundärseitigen Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur vor und nach der Optimierung

Abb. 7 zeigt die gefahrene Vorlauftemperatur im Sekundärnetz in Abhängigkeit der Außentemperatur. Die Vorlauftemperatur konnte ohne Probleme um mehr als 5 K abgesenkt werden. Es traten zu keinem Zeitpunkt seit der Umstellung Probleme bei einem Abnehmer auf und auch die Auswertung der Massenstromauslastung zeigt, dass der „schlechteste" Abnehmer eine max. Auslastung von gerade mal 45 % aufweist. Das lässt den Schluss zu, dass theoretisch eine weitere Absenkung unter Vertragsbedingungen (in Kooperation mit den Abnehmern) möglich ist.

3.3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Untersuchungen in dem Pilotprojekt zeigten, dass die neuen Funkübertragungstechnologien großes Potential aufweisen, um vor allem in Bestandsobjekten Zähler fernaufzuschalten oder zusätzliche Sensorik nicht-invasiv (und mit Batteriebetrieb) zu installieren. Bei der Auswahl der Übertragungstechnologie wird vermutlich eine Mischung aus NB-IoT, LoRaWan und/oder SigFox zum Einsatz kommen, da jede dieser Technologien andere Vorzüge hat und diese auf den Anwendungsfall abgestimmt werden müssen.

Die nahezu in Echtzeit zur Verfügung stehenden Informationen zu den thermodynamischen Bedingungen bei den Abnehmern zeigen ein großes Optimierungspotential auf. Diese neuen Daten ermöglichen es in Zukunft die Gufo-Regelung dynamischer und vor allem auf die Anforderungen des Netzes abgestimmt zu betreiben.

Data Analytics Tools wie Python oder KNIME ermöglichen eine komfortable und skalierbare Analyse großer Datenmengen und die Anwendung von Machine Learning Modellen für z.B. Anomalieerkennung im Gufo (Grad der Verschmutzung eines Wärmetauschers oder driftende Sensoren) oder Prognosemodelle zur Optimierung der Regelung.

Die Enwicklungen im IoT und Data Science Bereich (im speziellen bezüglich Data Analytics und KI-Plattformen) schaffen Raum für neue Use Cases, welche auch wirtschaftlich abbild-, schnell realisier- und skalierbar sind.

ACKNOWLEDGEMENT

Teile der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen des FFG Förderprogramms „Forschungskompetenzen für die Wirtschaft – Innovationslehrgänge 3. Ausschreibung" bzw. des Projekts techFM4.0 (PNr. 863054) durch das „Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort" finanziell unterstützt.

LITERATUR

AGFW (2020) AGFW-Orientierungshilfe zur Digitalisierung in der Fernwärmebranche

Diget T. (2019) Motivation Tariff – The key to a low temperature district heating network. Hot|Cool International Magazine on District Heating and Cooling, 19-22

Lund, H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V.,. (2014) 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. Energy 68, 1-11, https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089.

Kontaktdaten:
Ines Lindmeier
Wien Energie GmbH
Thomas Klestil Platz 14
1030 Wien
Email: ines.lindmeier@wienenergie.at

Stefan Buchner
Wien Energie GmbH
Thomas Klestil Platz 14
1030 Wien
Email: stefan.buchner@wienenergie.at

Session 7b

Smart Building

Die Leuchte im smarten Gebäude – Kommunikation – Sensor – Service Provider

Weiss, Wenzl, Kröpfl / Joanneum Research Forschungsges.mbH / AT

Soft Sensors for Perceived Human Comfort in Office Rooms Based on a Combination of Building Simulations and Data-Driven Modelling

Gursch, Schlager, Feichtinger / Know-Center GmbH / AT
Brandl / TU Graz / AT

Die Leuchte im smarten Gebäude – Kommunikation – Sensor – Service Provider

A. P. Weiss, F.-P. Wenzl, A. Kröpfl
Institut für Oberflächentechnologien und Photonik – Smart Connected Lighting, Joanneum Research Forschungsges.mbH, Pinkafeld, Österreich

ABSTRACT: Since the introduction of the LED as the dominant light source the lighting industry is undergoing a massive transformation. In buildings, the main purpose of a luminaire is evolving from the sole purpose of providing light to an important network node in the framework of a smart building. The transmission of data via visible light, also known under the abbreviation VLC (visible light communication), extends the function of the luminaire towards a communication access point. The technical principle of VLC is that the intensity of the light is modulated at a frequency, well above the perception threshold of the human eye. A photosensitive element receives this modulated light and transforms it into an electrical signal, that consecutively is demodulated and the transmitted data is reconstructed. VLC enables high bandwidths and secure communication since light is not penetrating through solid walls, unlike Radio frequency based technologies. Furthermore, VLC is not influenced by noise or interference in the Radio frequency spectrum. Additionally VLC can be operated in sensible areas like intensive care units where radio frequency based communication is not allowed. With VLC a comprehensive communication network can be established inside a building. In order to add the role of a sensor node to a luminaire two main approaches are possible. One approach is to add sensors, like microphones or environmental sensors, etc. to a luminaire and perform signal acquisition with these dedicated sensors. The second approach is to utilize the light itself for performing sensory tasks. This approach is also known as Visible Light Sensing, usually abbreviated as VLS. In VLS by utilizing the received light or rather detecting the change in received light compared to the transmitted light (both with respect to light intensity and spectral power distribution), sensor functions can be realized. Especially the scenario where only reflected light from objects or persons is detected and processed, enables the possibility to perform tasks like identification or occupancy detection. The tasks of identification or occupancy detection are already examples of how the luminaire finally evolves towards a service provider inside a smart building. In this work, we will show the technological background of the described functions, show insights into the advantages and limitations and give an outlook of future developments in these scientific areas.

1. EINLEITUNG

Die Beleuchtungsindustrie steht mit der immer größer werdenden Marktdurchdringung von LEDs als Leuchtmittel vor großen Umbrüchen. In Gebäuden verschiebt sich die Aufgabe des Beleuchtungskörpers vom reinem Lichtpunkt weg, zu einem wichtigen Knotenpunkt im Netzwerk eines smarten Gebäudes. Die Übertragung von Daten mittels sichtbarem Licht, auch *Visible Light Communication* (VLC) genannt, erweitert den Beleuchtungskörper um die Funktion als Kommunikationsknotenpunkt. Die Funktionsweise des VLC ist es, die Intensität des Lichts in einer Frequenz deutlich über der Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Auges zu modulieren. Ein photosensitives Element empfängt dieses modulierte Licht und setzt es in ein elektrisches Signal um, dass nachfolgend demoduliert wird und die gesendeten Daten rekonstruiert (Khan 2017). VLC ermöglicht hohe Bandbreiten, sichere Kommunikation da Licht nicht wie Radiofrequenz (RF) basierte Technologien (z.B. WiFi) durch Wände dringt und außerdem hohe Stabilität da keine Störungen durch RF Signale verursacht werden. Zusätzlich kann VLC auch in sensiblen Bereichen eingesetzt werden z.B. Operationssäle, wo keine RF basierte Kommunikation erlaubt ist. Mit VLC lässt sich

ein umfassendes Kommunikationsnetzwerk im Gebäude spannen. Für die Möglichkeit den Beleuchtungskörper auch als Sensorknoten in einem Gebäude einzusetzen gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Strategien. Ein Ansatz ist es, herkömmliche Sensorik in den Beleuchtungskörper zu integrieren, wie zum Beispiel Temperatursensoren oder Infrarot-Entfernungssensoren etc.. Der zweite Ansatz ist die direkte Verwendung von sichtbaren Licht um Sensorfunktionalitäten zu realisieren. Dieser Ansatz wird unter dem Begriff *Visible Light Sensing* (VLS) zusammengefasst. Die Funktionalität des VLS steht dabei nicht im Widerspruch zur Technologie des VLC, im Gegenteil, in manchen Szenarien ist die Modulation des Lichts vorteilhaft für die Funktion des Beleuchtungskörpers als Sensorknoten. Auf Basis dieser Sensorikfunktionen der Leuchte können schließlich übergeordnete Services realisiert werden die besonders in Hinblick auf smarte energieeffiziente Gebäude von großem Interesse sind.

Dieser Beitrag gliedert sich in folgende Kapitel: Kapitel 2 beschreibt die Technologie der *Visible Light Communication*, beginnend bei der Beschreibung der Funktionsweise. Danach wird auf Vorteile und bestehende Einschränkungen eingegangen. Kapitel 3 beschreibt die Einsatzmöglichkeiten des Beleuchtungskörpers als Sensorknoten. Hier wird anhand von Beispielen gezeigt in welcher Weise Sensorfunktionen realisierbar sind. Kapitel 4 erläutert, wie der Beleuchtungskörper schließlich zum Service Provider im smarten Gebäude werden kann. Kapitel 5 fasst diesen Beitrag zusammen und liefert einen Ausblick in zukünftige Entwicklungen.

2. VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

2.1 GRUNDLEGENDES PRINZIP

Das grundlegende Prinzip des VLC, die Kommunikation mittels sichtbaren Lichtsignalen ist nahezu so alt wie die Menschheit selbst. Während früher durch den Wechsel von Hell/Dunkel Phasen analog zum Morse Code, Nachrichten übertragen wurden, werden in der modernen VLC Kommunikation vorrangig Light Emitting Diodes (LEDs) als Transmitter und photosensitive Elemente, üblicherweise Photodioden, als Empfänger eingesetzt. Die Modulation der Lichtintensität erfolgt in einem Frequenzbereich der oberhalb der Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Auges liegt und wird dadurch auch nicht als *Flickering* (Flimmern) wahrgenommen. Das verwendete Lichtspektrum des VLC liegt üblicherweise zwischen 380 nm (blau) und 780 nm (rot) Wellenlänge, teilweise wird aber auch der Infrarot-Bereich dem VLC zugerechnet, insbesondere für *Uplink*-Anwendungen (Datenübertragung vom Empfänger zur Leuchte). Damit kann zusätzlich zur gewünschten Raumbeleuchtung eine Datenübertragung stattfinden. Dazu können handelsübliche LEDs verwendet werden, obwohl festgehalten werden muss, dass die vorherrschenden Farbkonversions LEDs, aufgrund ihres Aufbaus aus üblicherweise blauen LEDs mit einer Schicht aus Farbkonversionsphosphoren in ihrer erreichbaren Modulationsfrequenz eingeschränkt sind. Der Empfänger, bestückt mit einem photosensitiven Element empfängt die modulierten Lichtsignale und wandelt diese in elektrische Signale um. Diese elektrischen Signale werden danach demoduliert und die Daten rekonstruiert. Grundsätzlich sind alle aus der RF basierten Kommunikation bekannten Arten von Modulation oder Codierung einsetzbar, wie zum Beispiel ON/OFF *Keying* (OOK) oder auch komplexere Modulationsarten, mit kleinen Adaptierungen, wie zum Beispiel *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM). Abb. 1 zeigt schematisch die Funktionsweise des OOK.

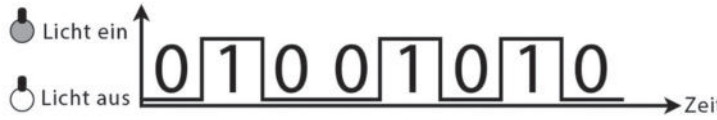


Abb. 1: Schematische Darstellung des On/Off Keying in VLC nach (Johannsson 2017)

Durch Kodierung des Datenstroms mittels z.B. 8b/10b Kodierung wird sichergestellt, dass in Summe die Anzahl der Zustände Licht an/Licht aus nahezu identisch ist und auch dadurch kein Flickering im Licht bemerkbar ist. Die erreichbaren Bandbreiten in der Kommunikation liegen mittlerweile bei mehreren

hundert MBps (Ibhaze et al. 2020). Die wesentlichen Vorteile des VLC sind, dass es höhere Datensicherheit gewährleistet, da Licht nicht durch Mauern und Wände dringt und es durch Signale aus dem RF Spektrum nicht beeinflusst wird. Außerdem kann es auch in Bereichen in denen Explosionsgefahr herrscht, z.B. im Bergbau oder in RF sensiblen Bereichen z.B. Operationssäle oder Flugzeuge, eingesetzt werden. Grundsätzlich ist für die Kommunikation mittels VLC eine direkte Sichtverbindung (*Line-of-Sight*, LoS) vorteilhaft, jedoch zeigen neuere Forschungsergebnisse (Zhijian et al. 2018), dass auch wenn keine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger gegeben ist, Kommunikation möglich ist. In Zhijian et al. (2018) wurde gezeigt das bei direkter LoS Kommunikation 433 Mbps mit einer *bit error rate* (BER) von 10^{-5} in einem Abstand von 3.6 m erreichbar sind. Im *non*-LoS Szenario in dem das Licht an Oberflächen, im konkreten Fall an Spiegeln reflektiert wird bleibt die Bandbreite von 433 Mbps stabil jedoch erhöht sich die BER auf 10^{-4}. Im Falle der Reflexion des Lichtsignals an Papier konnten noch immer 195 Mbps mit einer BER von 10^{-5} erreicht werden. Umgebungslicht, sei es künstliches Licht oder Sonnenlicht, führt ebenfalls zur Degradation der Leistungsfähigkeit von VLC Systemen, da es ähnlich zu RF-Systemen zu einer Verschlechterung des *Signal-to-Noise* (SNR) Verhältnisses führt. Als Gegenmaßnahmen werden hier spezielle elektronische Schaltungen (Pham et al. 2017), die die Signalanteile des Umgebungslichts filtern eingesetzt oder optische Filter (Yeon-Ho & Se-bin 2013), die Licht das außerhalb eines gewissen Einfallswinkel auf die Photodiode trifft, unterdrücken.

2.2 KOMMERZIELL VERFÜGBARE PRODUKTE

Im Bereich der Visible Light Communication sind bereits mehrere Hersteller mit kommerziell verfügbaren Produkten, bestehend aus Leuchten und Receivereinheiten, auf dem Markt vertreten. Die wohl bekanntesten Firmen sind Lucibel, PureLiFi sowie Signify. Diese ersten kommerziell verfügbaren Produkte zeigen, dass die Technologie des VLC beginnt sich im Markt zu etablieren. Außerdem sind bereits die ersten Standardisierungen im Bereich des VLC unter dem IEEE 802.15.7 Standard erfolgt.

2.3 AUSBLICK VLC

In den kommenden Jahren wird der Marktanteil von VLC unterstützenden Beleuchtungskörpern kontinuierlich steigen. Dabei ist davon auszugehen das VLC nicht die derzeitigen drahtlosen Kommunikationsmöglichkeiten wie WiFi verdrängen wird, sondern es eher zu einer Hybridlösung im Sinne von nahtlosem Umschalten zwischen den Technologien kommt. Besonders in Hinblick auf die Sättigung der RF-basierten Kommunikationskanäle durch die kontinuierlich wachsende Anzahl an verbundenen Geräten, bietet die Technologie des VLC eine Entlastung dieser Netze, da dadurch ein komplett anderes Spektrum zur Übertragung genutzt wird. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Potentiale der Kommunikation mittels VLC in modernen Gebäuden immer mehr an Bedeutung gewinnen werden, besonders im Hinblick auf Hybridlösungen im Zusammenspiel mit anderen etablierten Kommunikationstechnologien.

3. SENSORKNOTEN

Wie eingangs erwähnt können zwei Ansätze zur Erweiterung des Beleuchtungskörpers zum Sensorknoten verfolgt werden. Der erste Ansatz besteht darin dezidierte Sensoren im oder am Beleuchtungskörper zu integrieren. Der zweite Ansatz ist die Verwendung des Lichts selbst als Medium zur Ausführung von Sensorfunktionen. Beide Ansätze werden nachfolgend getrennt beschrieben, wobei sich die beiden Ansätze nicht ausschließen und durchaus auch gemeinsam in einer Leuchte verwendet werden können.

3.1 BELEUCHTUNGSKÖRPER MIT SENSORELEMENTEN

Zur Steuerung smarter energieeffizienter Gebäude bedarf es einer Vielzahl an Sensoren die laufend die aktuellen Zustände, z.B. Temperatur, überwachen und dadurch eine intelligente Steuerung ermöglichen. Die Integration dieser Sensoren in den Beleuchtungskörper bietet einige Vorteile. So entfällt zum einen beispielsweise aufwändiger Installationsaufwand zur Stromversorgung, da im einfachsten Fall nur der Be-

leuchtungskörper getauscht werden muss. Zum anderen und insbesondere im Zusammenspiel mit der im vorigen Kapitel beschriebenen Technologie des VLC ist bereits eine Anbindung an das Kommunikationsnetz im Gebäude gegeben. Drittens können durch direkte Interaktion des Sensors mit der Leuchte selbst, Maßnahmen realisiert werden Das einfachste Beispiel dafür wäre ein Umgebungslichtsensor der automatisch die Lichtstärke anpasst, zum Beispiel bei Sonnenlichteinfall die Lampe automatisch dimmt oder ganz ausschaltet. Bei der Integration der Sensoren in den Beleuchtungskörper sind jedoch auch einige wichtige Gesichtspunkte zu beachten. Die Position der Leuchte im Raum entspricht nicht immer der idealen Position die dieser Sensor benötigt. Außerdem ist im Design oder mittels geeigneter Kompensationsalgorithmen darauf zu achten, dass die Sensordaten nicht durch den Beleuchtungskörper selbst beeinflusst werden. Das einfachste Beispiel hierfür wäre, dass die Eigenerwärmung der LEDs einen möglichen Temperatursensor zur Messung der Raumtemperatur beeinflusst. Dass das Konzept des Beleuchtungskörpers als Sensorknoten großes Potential hat, zeigen die jüngsten Forschungsergebnisse und bereits großflächig installierten Testbeds. In Marin et al. (2018), dem i-Light Projekt wurden Sensoren zur Erfassung der Luftfeuchtigkeit und Temperatur, des Umgebungslichts, der Luftqualität, des CO_2-Gehalts sowie ein Rauchdetektor und Sensoren zur Präsenzerkennung in einen Beleuchtungskörper, genannt Smart Bulbs integriert. Außerdem übernimmt dieser Beleuchtungskörper mittels *Bluetooth Low Energy* (BLE) Schnittstelle auch die Funktion zur Kommunikation mit *wearable devices* wie z.B.: einer Smartwatch. Hauptausrichtung dieses Projekts ist die Realisierung von Monitoring und ggfs. Alarmierung im Bereich des Ambient Assistent Living. Ein weiteres Beispiel in diesem Bereich ist das Smart Light Testbed in San Diego, in dem Straßenlampen mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet wurden (Watson 2017). Mit Hilfe dieser Sensoren wurden Applikationen wie die Erkennung freier Parkplätze im innerstädtischen Bereich realisiert, oder auch die Erkennung von Schüssen mit Hilfe von Mikrophonen auf den Straßenlaternen. Im Falle der Schusserkennung werden gezielt Algorithmen eingesetzt die das charakteristische Profil von Schüssen erkennen und den Ort des Ereignisses mittels Triangulierung feststellen können. Im Fall der Detektion eines solchen Ereignissen wird automatisch eine Alarmierung an die zuständige Polizeidienststelle versandt.

3.2 VISIBLE LIGHT SENSING

Visible Light sensing (VLS) erweitert die Verwendung des sichtbaren Lichts und der dazu notwendigen Infrastruktur in die Domäne der Sensorik und Detektion. Im Allgemeinen können die Anwendungsszenarien des VLS in vier unterschiedliche Kategorien unterteilt werden (Wang & Zuniga 2017), je nach Platzierung des empfangenden Elements und ob die Lichtquelle aktiv moduliert wird oder nicht. In diesem Beitrag wird auf die Kategorie der passiven Lichtquelle und des passiven Objekts fokussiert, da dieses Szenario den geringsten Installationsaufwand für eine Anwendung in Gebäuden zur Folge hat. Abb. 2 zeigt ein solches Szenario.

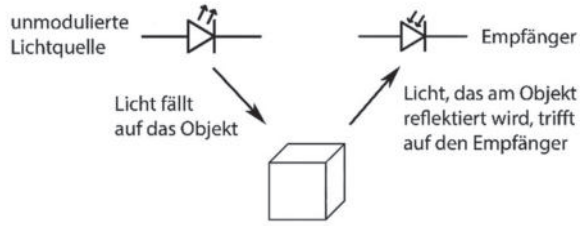


Abb. 2: Schematische Darstellung eines passiven Visible Light Sensing Szenarios nach (Wang & Zuniga 2017)

Das Licht das von der Lichtquelle auf das Objekt trifft, wird am Objekt reflektiert und ein Anteil dieses reflektierten Lichts wird am Empfänger detektiert und ausgewertet. Das reflektierte Licht unterscheidet sich sowohl in der farblichen Zusammensetzung als auch in der empfangenen Lichtintensität vom ausgesendeten Licht. So spielt der Abstand zwischen der Lichtquelle, dem Objekt und dem Empfänger eine

entscheidende Rolle dahingehend, wieviel Licht an den Empfänger rückreflektiert wird. Durch die Auswertung dieser Änderungen in der empfangenen Lichtstärke des reflektierten Lichts, kann bei bekannten Positionen der Lichtquelle und des Empfängers auf die Position des Objekts rückgeschlossen werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die farbliche Zusammensetzung des reflektierten Lichts, welches sich sowohl aufgrund des Materials aus dem das Objekt besteht, als auch aufgrund der Farbe des Objekts, von derer des ausgesendeten Licht unterscheidet. Dadurch können unterschiedliche Objekte oder auch unterschiedliche Seiten des Objekts identifiziert werden. In Weiss et al. (2019) konnte gezeigt werden, dass die 6 Seiten eines Würfels, beklebt mit Folien unterschiedlicher Farbe, auch bei vorhandenem Umgebungslicht eindeutig nur mit Hilfe einer unmodulierten LED und einer einfachen Rot-Grün-Blau (RGB) sensitiven Photodiode, identifiziert werden können. Durch die Integration des empfangenden Elements direkt in den Beleuchtungskörper, können somit Aufgaben wie Identifikation und Detektion realisiert werden. Durch Beschaltung von LEDs im *Reverse Bias Mode* ist es außerdem möglich die LED selbst als Empfänger des reflektierten Licht einzusetzen (Yanbing et al. 2017). In Yanbing et al. (2017) wurde auf Basis von Leuchten die zwischen „normalem" Betrieb, d.h. LEDs emittieren Licht, und Betrieb im *Reverse Bias Mode* als Sensor, umgeschaltet werden können, ein System zur Belegungserkennung realisiert. Diese Arbeit zeigt wie anhand der Reflexionen verursacht durch die Benutzer des Raums, abgeleitet werden kann, ob Benutzer anwesend sind oder nicht. Deprez et al. (2020) zeigt die Anwendung des Prinzips des passiven *Visible Light Sensing* in einem System, bestehend aus *off-the-shelf* Deckenleuchten (18 W 7000 K LED Panele) ausgestattet mit einer Phototodiode, im Szenario der Erkennung von Personen-Präsenz und deren Durchschreiten eines Korridors bei unterschiedlichen Verhältnissen von Umgebungslicht. In Weiss et al. (2020) konnte, in einem in kleineren Maßstab ausgeführten Modell, erfolgreich die Erkennung verschiedener Posen einer dem Menschen nachempfundenen Figur, nur anhand der Reflexionen gezeigt werden. Diese Arbeiten zeigen, dass die Technologie des *Visible Light Sensings* eine vielversprechende Lösung bei der Schaffung eines Sensornetzwerkes innerhalb eines Gebäudes sein kann, dass mit minimalem Installationsaufwand etabliert werden kann und nahezu unauffällig ist.

3.3 AUSBLICK

Beide der vorgestellten Möglichkeiten, den Beleuchtungskörper als Sensorknoten zu nutzen ist gemein, dass besonders im Hinblick auf den Installationsaufwand große Ersparnisse erzielbar sind. Durch die laufende Weiterentwicklung der zugrundliegenden Algorithmen und auch durch die Definition von Standards (DALI) bezüglich der Kommunikation mit Sensoren im Beleuchtungsnetzwerk, werden in absehbarer Zeit die verfügbaren Sensordaten die von einem Beleuchtungskörper akquiriert werden kontinuierlich steigen.

4. SERVICE PROVIDER

In der Verschränkung der Funktion als Kommunikationsschnittstelle mit der Funktion des Sensorknotens im Beleuchtungskörpers ergeben sich neue Möglichkeiten zur Bereitstellung von Services in Gebäuden wie z.B. Fallerkennung und gezielter Steuerung von Klimaanlagen oder Belüftungssystemen. Besonders die bedarfsgerechte Steuerung von HKLS Systemen in Gebäuden auf Basis von Belegungserkennung mittels intelligenter Beleuchtungskörper kann zur Reduktion des Energieverbrauchs maßgeblich beitragen wie in Lo & Novoselac (2010) gezeigt. Mit den Technologien der VLC und des VLS können die notwendigen technischen Voraussetzungen geschaffen werden, ohne den sonst meist erheblichen infrastrukturellen Aufwand zu benötigen, da die vorhandenen Beleuchtungskörper dafür verwendet werden können.

5. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Die Evolution des Beleuchtungskörpers vom reinen Lichtpunkt zum wichtigen Knoten im Netzwerk eines smarten Gebäudes schreitet kontinuierlich voran. Getrieben vom Preisdruck durch Produkte aus Fernost wird von Seiten der Beleuchtungsindustrie diese Innovationen besonders intensiv erforscht, sowie im Rah-

men von Standardisierungen getrieben. Die bereits großflächig ausgerollten Testfelder mit intelligenten sensorgestützten Straßenlampen zeigen, dass diese Vision bereits in die Realisierungsphase eingetreten ist. Ähnliches lässt sich auch im Bereich der *Visible Light Communication* anhand der steigenden Anzahl an kommerziell verfügbaren Produkten in diesem Bereich beobachten. Besonders in Hinblick auf den von der Europäischen Union propagierten *Green Deal* wird es von besonderem Interesse sein die bereits bestehende Beleuchtungsinfrastruktur in Gebäuden dahingehend zu modernisieren, dass sie einerseits dazu beiträgt die Neuinstallation von zusätzlichen Geräten, z.B. *WiFi Access Points* durch Kommunikation mit VLC unnötig zu machen und andererseits durch die durch die Leuchte erfassten Daten genauere, energieeffizientere Regelungen des Gebäudes ermöglicht. Da es besonders in Hinblick auf die gesetzten Klimaziele notwendig sein wird, alle zur Verfügung stehenden Technologien zur Erreichung dieser Ziele zu nutzen, ist es abzusehen, dass es hier zu keinem Verdrängen oder Ersetzen von einer Technologie durch eine andere kommen wird, sondern eher zu optimierten Hybridlösungen.

6. DANKSAGUNG

Dieses Projekt wird von Bund und Land Burgenland sowie dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung im Rahmen des Programms Investitionen in Wachstum und Beschäftigung kofinanziert.

LITERATUR

Deprez, K., Bastiaens, S., Martens, L., Joseph, W., Plets, D. (2020) Passive Visible Light Detection Of Humans, Sensors, 20(7), Basel, Switzerland

Watson B. (2017) From Light To Bright: San Diego Is Building The World's Largest Municipal Internet Of Things Homepage General Electric, https://www.ge.com/news/reports/light-bright-san-diego-leads-way-future-smart-cities, letzter Abruf 16.09.2020

Ibhaze A. E., Orukpe P. E., Edeko F. O. (2020) High Capacity Data Rate System: A Review of Visible Light Communication Technology, Journal of Electronic Science and Technology, 100055, ISSN 1674-862X.

Johannsson B. (2017) Pulse-Based Modulation for VLC Systems, Master Thesis, TU Delft, Netherlands

Khan L.U. (2017) Visible Light Communication: Applications, Architecture, Standardization and Research Challenges, Digital Communications and Networks. vol. 3, no. 2, pp. 78-88.

Lo L.J. & Novoselac A. (2010) Localized air-conditioning with occupancy control in an open office, Energy Build. 42 (7), pp. 1120–1128

Marin I., Vasilateanu A., Molnar A.J., Bocicor, I., Cuesta-Frau D., Molina-Picó A. & Goga, Nicolae. (2018). i-Light—Intelligent Luminaire Based Platform for Home Monitoring and Assisted Living. Electronics. 7. 220. 10.3390/electronics7100220.

Pham Q.N.; Rachim V.P.; An J.; Chung W.-Y. (2017) Ambient Light Rejection Using a Novel Average Voltage Tracking in Visible Light Communication System, Applied Sciences. 7. 670. 10.3390/app7070670.

Wang Q. & Zuniga M. (2017) Passive Sensing and Communication Using Visible Light: Taxonomy, Challenges and Opportunities, https://arxiv.org/pdf/1704.01331.pdf

Weiss A. P., Madane K., Zahiri Rad S., Wenzl F.P. (2019) Implementation of a cost-efficient passive visible light sensing approach for the determination of surface colors, In: Proceedings of the 2019 Austrochip Workshop on Microelectronics (Austrochip), pp. 81-86, doi 10.1109/Austrochip.2019.00026

Weiss A. P., Zahiri Rad S., Wenzl F. P. (2020) Pose detection with backscattered visible light sensing utilizing a single RGB photodiode: A model based feasibility study, In: Proceedings of the IEEE 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing, (IWCMC), pp. 137-142

Yanbing Y., Jie H., Jun L., Sinno P. (2017) CeilingSee: Device-Free Occupancy Inference through Lighting Infrastructure Based LED Sensing, In: Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), Kona, HI, pp. 247-256

Yeon-Ho C. & Se-bin O. (2013) Efficient optical filtering for outdoor visible light communications in the presence of sunlight or artificfal light, In: Proceedings of the International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), pp. 749-752. 10.1109/ISPACS.2013.6704649.

Zhijian L., Pengfei T., Houqiang F., Jossue M., Xuanqi H., Hong C., Xiaodong Z., Xiaoyan L., Ran L., Lirong Z., Xiaolin Z., Erdan G., Yi L., Yuji. Z. (2018) Experimental demonstration of non-line-of-sight visible light communication with different reflecting materials using a GaN-based micro-LED and modified IEEE 802.11ac, AIP Advances 8, 105017. 10.1063/1.5048942.

Kontaktdaten:
Dr. Andreas Peter Weiss
Industriestrasse 6
7423 Pinkafeld
Email: andreas-peter.weiss@joanneum.at

Soft Sensors for Perceived Human Comfort in Office Rooms Based on a Combination of Building Simulations and Data-Driven Modelling

H. Gursch, E. Schlager, G. Feichtinger
Know-Center GmbH Research Center for Data-Driven Business and Big Data Analytics, Graz, Austria
D. Brandl
Graz University of Technology – Institute of Thermal Engineering, Graz, Austria

ABSTRACT: The comfort humans perceive in rooms depends on many influencing factors and is currently only poorly recorded and maintained. This is due to circumstances like the subjective nature of perceived comfort, lack of sensors or data processing infrastructure. Project COMFORT (Comfort Orientated and Management Focused Operation of Room condiTions) researches the modelling of perceived thermal comfort of humans in office rooms. This begins at extensive and long-term measurements taking in a laboratory test chamber and in real-world office rooms. Data is collected from the installed building services engineering systems, from high-accurate reference measurement equipment and from weather services describing the outside conditions. All data is stored in a specially developed central Data Management System (DMS) creating the basis for all research and studies in project COMFORT.

The collected data is the key enabler for the creation of soft sensors describing comfort relevant indices like predicted mean vote (PMV), predicted percentage of dissatisfied (PPD) and operative temperature (OT). Two different approaches are conducted complementing and extending each other in the realisation of soft sensors. Firstly, a purely data-driven modelling approach generates models for soft sensors by learning the relations between explanatory and target variables in the collected data. Secondly, simulation-based soft sensors are derived from Building Energy Simulation (BES) and Computational Fluid Dynamic (CFD) simulations.

The first result of the data-driven analysis is a solar Radiation Modelling (RM) component, capable of splitting global radiation into its direct horizontal and diffuse components. This is needed, since only global radiation data is available for the investigated locations, but the global radiation needs to be divided into direct and diffuse radiation due to their hugely differences in their thermal impact on buildings. The current BES and CFD simulation provide as their results soft sensors for comfort relevant indices, which will be complemented by data-driven soft sensors in the remainder of the project.

1. INTRODUCTION

Comfort conditions in rooms and buildings are currently poorly recorded and maintained by the building management due to a lack of appropriate sensors, data management and data analytics. Project COMFORT (Comfort Orientated and Management Focused Operation of Room condiTions) combines, aggregates and enriches data from sensors and simulations to quantify, evaluate and optimise the perceived human thermal comfort using several modelling approaches such as data-driven analyses, Building Energy Simulation (BES) and Computational Fluid Dynamic (CFD) simulations (COMFORT 2020).

If a physical quantity is not directly measurable due to reasons like costs, availability of energy supply, utility or practicability, a soft sensor (also called virtual sensor) (Fortuna et al. 2007) can be used instead. Soft sensors are typically implemented as software programs and usually deliver information determined by other measured quantities inputted to complex physical simulation models or simpler data-driven modelling approaches. The target quantity of a soft sensor can represent a physical quantity similar to a hardware sensor but also a characteristic value, a trend or an index figure.

A central objective of COMFORT is the augmentation of collected sensor data influencing perceived human thermal comfort (Feichtinger et al. 2020) and soft sensors are an important part to achieve this. Generally speaking, COMFORT focuses on the development of novel soft sensors using simulation tools such as BES and CFD complemented and extended by purely data-driven modelling approaches. The focus lies in particular at soft sensors for parameters influencing the perceived human thermal comfort in office rooms, including air temperature, humidity, air turbulence, air speed, Predicted Mean Vote (PMV), Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) and Operative Temperature (OT). These parameters are investigated under laboratory conditions in a full-scale test chamber located at the Campus Inffeldgasse in Graz and also under real-world condition in office building of LogicData located in Deutschlandsberg. The test chamber is designed to resemble an office room.

The next section gives an overview of related work and literature relevant to this article. This is followed by a description of the implementation consisting of Data Management System (DMS), the BES, CFD simulation and the data-driven analyses. The following section gives some results and in the last section consist of a discussion and an outlook.

2. RELATED WORK

The perceived human comfort in rooms is a prominent topic for building users, building operators, architects and civil engineers alike. Uncomfortable conditions can severely influence the well beings of humans and, in extreme forms, can lead to building-related illnesses, often summarised under the term Sick Building Syndrome (SBS) (Nag 2019). It is difficult to objectively rate the comfort in a room or a building, even though every human being perceives comfort and can give a subjective assessment of their personal comfort in a particular room. The aspects thermal, visual, acoustic and air quality or respiratory comfort are often investigated separately to better analyse and understand the influencing factors of perceived human comfort (Song et al. 2019). Each of these categories is influenced by physical factors like air temperature, humidity, brightness, loudness, CO_2 concentration, and human factors like clothing, metabolism or activities. Physical and human factors determine the comfort humans perceive at a specific location and time. Various comfort indices have been defined to rate, compare and analyse comfort. Due to the complexity of the influencing factors, these indices have defined boundaries where they can be applied and deliver meaningful results (Fabbri 2019).

PMV is an index quantifying the opinion of healthy adults on a seven-point scale from Cold (-3) to Hot (+3). The Standard ISO 7730 gives a formula how PMV can be calculated from climate measurements, metabolism and clothing to predict the general thermal comfort in moderate environments. The PPD quantifies the percentage of humans dissatisfied with the perceived thermal comfort and can be calculated from the PMV as specified by Standard ISO 7730 (Fabbri 2019; Nag 2019). The OT is an index combing the amount of heat experienced by air temperature, radiation temperature and the heat exchange by radiation and convection. The OT definition is given by the Standard ISO 7933 (Fabbri 2019). While PMV, PPD and OT are the indices evaluated in this work, there exist many more in the literature (Fabbri 2019; Charles 2003). PMV, PPD and OT indices are investigated in combination with quantities like air temperature, surface temperatures and humidity measurements in the presented work. Since temperature perception is also affected by the air flow (Koskela et al. 2001; Charles 2003), the air velocity and the degree of turbulence, these factors are also included here.

Soft sensors calculate values that are difficult to measure like local air speed, or indices without direct physical representation like PMV. While soft sensors have many applications in industrial processes (Fortuna et al. 2007), they can also be applied in building simulation and operation. Furthermore, soft sensors can establish the connection between new Machine Learning (ML) approaches and existing simulations (Liu et al. 2007). The application of ML to building simulation and comfort analysis is not limited to soft sensors but has many potential applications, regardless if supervised (Chaudhuri et al. 2017), unsupervised (Ghahramani et al. 2018) or semi-supervised (Dey et al. 2018) ML approaches are used. One application of ML that has received attention in recent literature is the coupling of BES and CFD to co-simulation

(Gros et al. 2019). Even though the augmentation of co-simulation with ML has huge potentials, ML is no requirement to establish co-simulation of BES and CFD, since there are many successful examples of co-simulation without ML described in the literature (Tian et al. 2018).

3. METHODS

3.1 MODELLING FRAMEWORK

Fig. 1 illustrates the modelling framework consisting of several sub-models interdependent on each other. A comprehensive DMS provides all required sensor data (e.g., outdoor temperature, wind speed, global radiation) and building information (e.g., room temperature, heating and cooling). This data is the input for the computation of soft sensors based on data-driven and building simulation approaches, like BES and CFD alike. Additionally, the results of the building simulations also server as input parameters for the development of data-driven soft sensors aimed at Air Flow Modelling (AFM) and Thermal Comfort Modelling (TCM).

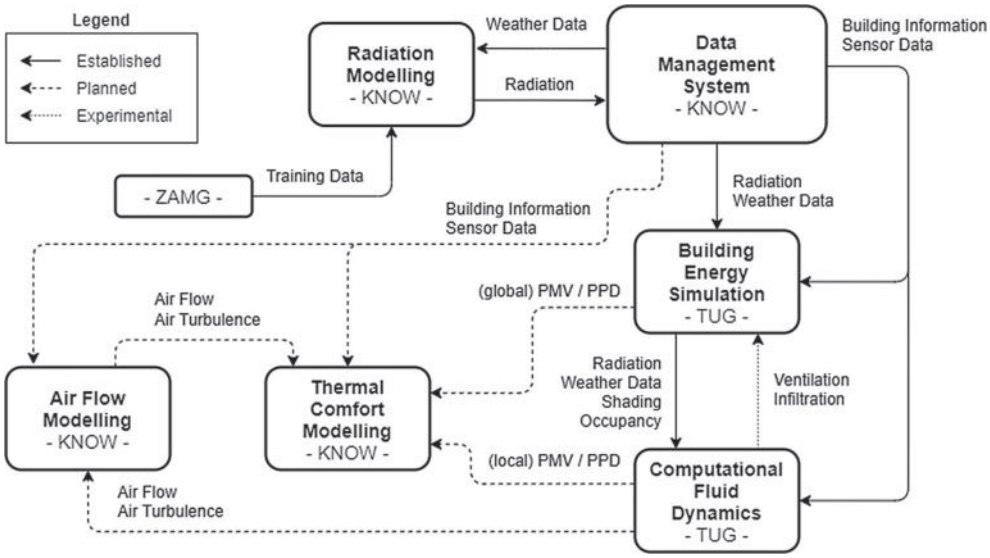


Fig. 1: Complete framework with two simulation and three data-driven modelling components.

3.2 DATA MANAGEMENT SYSTEM (DMS)

As depicted in Fig. 1, the available data sources consist of a newly developed DMS holding indoor sensor data and outdoor weather data (Olefs et al. 2013). Additionally, solar radiation data is used in Radiation Modelling (RM), which is not stored in the DMS due to its limited and special use. However, the output of the RM is stored in the DMS. The data and describing meta data in the DMS include:

- Data provided by the building services engineering systems, like temperatures and HVAC data available in 15-minute intervals starting from September 2019.
- Reference measurements collected by special measuring instruments, including temperatures, humidity, air speed and CO_2 concentration available in 6-second intervals starting from July 2019.
- Temperature & HAVC data from two test chambers running at controlled laboratory conditions located at Graz University of Technology available in 1-second intervals starting from July 2019.

- Newly developed wireless sensors measuring nodes collecting temperature and humidity values at 1-minute intervals starting from July 2019. Also, door and window opening openings as change-of-value data starting from January 2020.
- Live weather data for Deutschlandsberg including temperature, humidity, global solar radiation, air pressure, wind speed and direction available in 10-minute intervals starting from September 2019.
- Additional live weather data for Deutschlandsberg like cloudiness and weather conditions available as change-of-value data starting from December 2019.
- Direct horizontal radiation and diffuse radiation as output of the RM.

3.3 SIMULATION-BASED SOFT SENSORS

A comprehensive BES approach is used to predict expected thermal comfort in a zone consisting of one or more rooms. In this work, the BES calculates global PMV and PPD values representing the average PMV and PPD per zone. These are complemented by the CFD approach simulating thermal conditions on a very detailed basis to calculate local PMV, PPD and OT values and to identify local spots of discomfort. Both building simulation tools, BES and CFD, are unilaterally linked whereas bilateral model coupling of BES to CFD and vice versa is currently under development.

3.4 DATA-DRIVEN SOFT SENSORS

As depicted in Fig. 1, the modelling framework includes the three different data-driven soft sensors for RM, AFM and TCM. Solar radiation has a significant impact on perceived human comfort in office rooms, causes temperature variations and local hot spots due to heat gains via windows. Direct and diffuse radiation have very different thermal influences in building simulations, but require complex and very costly measurement equipment. To conduct BES and CFD based on those radiation components, RM trains a data-driven soft sensor on historical radiation data provided by ZAMG to lean a split of global radiation into direct horizontal and diffuse radiation. The RM uses a regression modelling approach with direct fraction of the radiation as target value. The explanatory variables for the regression are weather information like outdoor temperature, air pressure, relative humidity and sunshine duration and also computed parameters like zenith angle, apparent solar time, extra-terrestrial radiation, clearness index and persistence. The final model has an objective function using a linear regression approach with polynomials of order three yielding the fits best. Other objective functions including linear regression functions with polynomials of lower or higher order than three, a linear function using Principal Component Analysis, a logistic objective function or a mixture of both, logistic and linear terms were tested but perform worse.

Similar to radiation, also local air movements impact the thermal comfort of humans in a room. AFM aims at data-driven soft sensors for air flow and air turbulence at different locations in a zone. This data-driven regression modelling approach uses the simulation-based soft sensors resulting from the CFD simulation as target values. The corresponding explanatory variables are stored in the DMS and consist of measured quantities such as outdoor temperature, air pressure, air speed, door and window contacts. The DMS data is further complemented by data resulting from the CFD simulation such as room temperature, operating temperature and relative humidity. To reduce the set of explanatory variables, an iterative elimination procedure by level of significance is applied.

A more comprehensive, multi-step procedure is applied to the TCM in developing data-driven soft sensors for PMV and PPD analysing perceived human comfort at different locations in a zone. In a first step, the TCM establishes the required explanatory variables and regression methods by modelling global PMV and PPD values for a zone. This is later extended into an elaborate model capable of predicting multiple local PMV and PPD values for a zone. In either case, the TCM approach works on the measured quantities in combination with soft sensors and BES and CFD results. Similar to AFM, the explanatory variables are iteratively reduced based on the level of significance.

While the RM was trained on weather data and data provided by ZAMG, AFM and TCM focus on a limited set of time-series data over a period of ten days with a sampling rate varying between one and ten minutes. This is due to the computational and time restrictions of the CFD simulation and poses a significant challenge for AFM and TCM.

4. RESULTS

The preliminary results consider two main parts of the general modelling framework, firstly, the RM and, secondly, the BES and CFD approaches. Fig. 2 depicts the results for the data-driven soft sensors developed by the RM approach using the direct fraction (*left*) as the target value. Post processing steps are applied on the direct fraction, so that unrealistic values such as fractions smaller than zero or greater than one are eliminated. The direct radiation (*right*) is than calculated from these post-processed direct fractions. The test splits are represented by the different colours of the dots in both plots indicating errors in an acceptable range. In an optimal case, all dots would be located along the straight line indicating that predicted values would perfectly match overserved values.

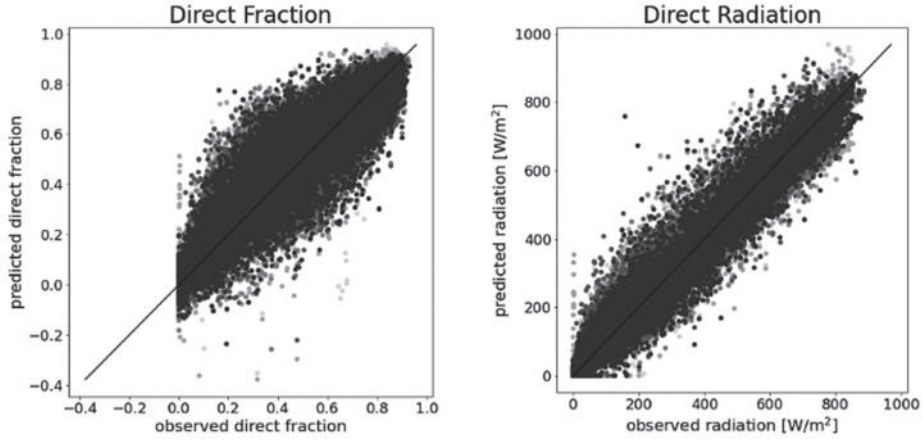


Fig. 2: Comparison of measurement and prediction of direct horizontal radiation using polyno-mials of order three illustrated by the direct fraction (left) and the direct radiation (right).

The results shown in Fig. 2 are generated by a third order linear regression model with ridge regression. During the RM creation several different models have been tested, including linear models from order one to five, with and without ridge regression, linear models with Principal Component Analysis performed on the features, logistic models and combinations of linear-logistic models. The third order linear regression model with ridge regression proved to be the best compromise between model complexity, robustness, overfitting and prediction error.

The simulation approach bases its soft sensors for the test chamber in Graz on the results of the BES and CFD simulations. In the test chamber an air inlet is located at the left top and an air outlet at the right bottom. A dummy body is placed at the centre of the test chamber to imitate heat emitted by a human. The simulation approach uses coupled BES and CFD simulation, whereby the BES is executed first and delivers the boundary conditions for the CFD simulation. The results of the CFD simulation are depicted in Fig. 3, where the OT (*left*) and air speed (*right*) are shown. The cylinder in the middle of the test chamber is the human dummy and the four white bowls define the locations of the soft sensors. These simulation-based soft sensors deliver air temperature, humidity, OT, air speed, air turbulence, local PMV, local PPD and local OT. Additionally, also maximum and minimum temperatures and the mean surface temperature are simulated for the whole test chamber. PMV, PPD, air speed and air turbulence are the most important result values, since they represent the soft sensor values giving an indication for the local perceived human comfort.

For the AFM and TCM approach, the implementation and analysis of the final modelling framework is currently in progress and no representative results are available yet.

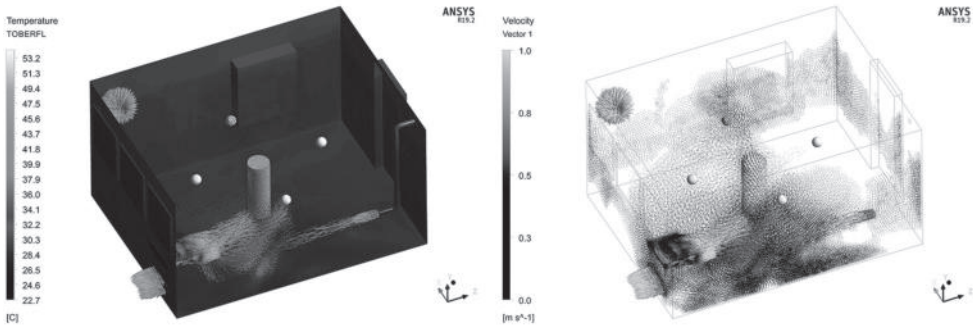


Fig. 3: Simulation-based soft sensor in the test chamber in Graz for operating temperature (left) and air flow velocity (right) using a CFD approach.

5. DISCUSSION AND OUTLOOK

Objectively measuring or simulating perceived human comfort is complicated, expensive and difficult due to its subjective nature. Soft sensors support the quantification of selected aspects of perceived human comfort. Project COMFORT creates soft sensors analysing the thermal comfort in office rooms using data-driven modelling with BES and CFD simulation-based modelling approaches. In many cases these methods can complement each other well thus solving issues not solvable by a standalone approach.

This work shows that a data-driven RM can split global radiation into direct horizontal and diffuse radiation using a comprehensive set of weather data. The results of the RM approach are used by BES and CFD simulations as input parameters when simulating the thermal room conditions. Moreover, BES and CFD simulation develop global and local soft sensors for PMV, PPD and OT. These results indicate the potential use of simulation-based soft sensors to evaluate comfort relevant indices on selected positions in a zone. Hence, these soft sensors are a useful tool to understand and objectively evaluate perceived thermal comfort of humans.

Any data-driven approach requires a rich data base to be successful in developing models and finding new insights. Even though BES and CFD simulation require much smaller data bases, the DMS is useful to create longer and more precise simulations. Furthermore, the DMS shares results, so that data-driven and simulation models can use each other's data as input or for the sake of validation. Thus, the DMS is the basis therefore the central link in the coupling of data-driven, BES and CFD models.

As a next step in this work, the data-driven models for AFM will be developed to predict air speed and turbulence soft sensors. These models will use the results of the CFD simulation as target values and the available measurements from the DMS as potential explanatory variables. Due to the large number of available measurement and simulation data, feature selection and ranking is an important step to reduce the potential explanatory variables to a meaningful subset. All results of AFM are then the input for the TCM part. It may be obvious that the TCM is the most complex part, since it incorporates results from all other data-driven and simulation-based models.

When looking at the BES and CFD simulation, the current experimental transfer of results from the CFD back to the BES will be extended to a full bilateral model coupling. It is expected that the BES delivers more realistic values by incorporating the CFD results and thus capturing the thermal conditions more precisely.

The rich dataset stored in the DMS creates the possibility to analyse models in terms of their dependence on the measured data. Such an analysis leaves out more and more measures while observing the degeneration of the predicting accuracy. Thus, the influence of the measured data on the prediction quality can be evaluated. This gives a better understanding which measurements are absolutely vital and which measurements can be omitted or at least partially replaced by others. Therefore, insights about what sensors are needed to capture influencing factors for perceived human comfort can be improved and the data collection in future projects can be more focused.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the project "COMFORT - Comfort Orientated and Management Focused Operation of Room condiTions" (No. 867533) is funded by the program 'ICT of the Future' (6th Call 2017) of the Austrian Research Promotion Agency (FFG) and the Austrian Ministry for Transport, Innovation and Technology (BMVIT).

The Know-Center is funded within the Austrian COMET Program—Competence Centers for Excellent Technologies—under the auspices of the Austrian Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology, the Austrian Federal Ministry of Economy, Family and Youth and by the State of Styria. COMET is managed by the Austrian Research Promotion Agency FFG.

REFERENCE

Charles, K.E. (2003) Fanger's Thermal Comfort and Draught Models. IRC Research Report RR-162. Ottawa; Canada: Institute for Research in Construction (IRC).

Chaudhuri, T., Soh, Y.C., Li, H. & Xie, L. (2017) Machine Learning Based Prediction of Thermal Comfort in Buildings of Equatorial Singapore. Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC 2017), 72-77.

COMFORT (2020) Comfort Orientated and Management Focused Operation of Room CondiTions (2020), Online: http://comfort.know-center.at, last accessed 15th of September 2020.

Dey, M., Rana, S.P. & Dudley, S. (2018) Semi-Supervised Learning Techniques for Automated Fault Detection and Diagnosis of HVAC Systems. IEEE 30th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2018). 872-877.

Fabbri, K. (2019) Indoor Thermal Comfort Perception: A Questionnaire Approach Focusing on Children. Cham; Switzerland: Springer.

Feichtinger, G., Gursch, H., Schlager, E., Brandl, D. & Gratzl, M. (2020), COMFORT – Data-Driven Analysis and Simulations of Human Comfort in Office Rooms, Symposium Energieinnovation 2020, Online: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/lf/Session_G3/736_LF_Feichtinger.pdf, last accessed 15th of September 2020.

Fortuna, L., Graziani, S., Rizzo, A. & Xibilia, M.G. (2007). Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes. London; UK: Springer.

Ghahramani, A., Castro, G., Karvigh, S.A. & Becerik-Gerber, B. (2018) Towards Unsupervised Learning of Thermal Comfort Using Infrared Thermography. Applied Energy (ISSN: 0306-2619) 211, 41-49.

Gros, A., Mazuroski, W., Mendes, N. & Oliveira, R.C.L.F (2019) Intelligent Co-simulation to Consider Urban Climate in Building Energy Simulation. Proceedings of the International Building Performance Simulation Association (ISSN: 2522-2708), 3734-3741.

Koskela, H., Heikkinen, J., Niemelä, R. & Hautalampi, T. (2001) Turbulence Correction for Thermal Comfort Calculation. Building and Environment (ISSN: 0360-1323) 36(2), 247-255.

Liu, K., Liu, T.-Z., Fang, P. & Li, Z.-P. (2007) Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Dynamic Soft-Sensing Design for Real-Time Building Energy Consumption. International Journal of Distributed Sensor Networks (ISSN: 1550-1329) 13(5), 1-16.

Nag, P.K., (2019) Office Buildings: Health, Safety and Environment. Singapore; Singapore: Springer.

Olefs, M., Baumgartner, D. J., Obleitner, F., Bichler, C., Foelsche, U., Pietsch, H., Rieder, H. E., Weihs, P., Geyer, F., Haiden, T. & Schöner, W. (2016) The Austrian Radiation Monitoring Network ARAD – Best Practice and Added Value. Atmospheric Measurement Techniques (ISSN: 1867-1381) 9(4), 1513-1531.

Song, Y., Mao, F. & Liu, Q. (2019) Human Comfort in Indoor Environment: A Review on Assessment Criteria, Data Collection and Data Analysis Methods. IEEE Access (ISSN: 2169-3536) 7, 119774-119786.

Tian, w., Han, X., Zuo, W. & Sohn, M.D. (2018) Building Energy Simulation Coupled with CFD for Indoor Environment: A Critical Review and Recent Applications. Energy and Buildings (ISSN: 0378-7788) 165, 184-199.

Contact:
Heimo Gursch
Email: hgursch@know-center.at,
Tel.: +43 316 873 30860

Session 8b

Smart Control and Electronic Conversion Technologies

Linear Model Predictive Control of Small-Scale Furnaces

Fallmann, Böhler, Kozek / TU Wien / AT

The efficiency potential and application readiness of Wide Bandgap technology

Díaz Triana / Ecodesign company engineering & management consultancy GmbH / AT
Makoschitz / AIT Austrian Institute of Technology GmbH / AT

The Total Energy Model for Connected Devices

Díaz Triana / Ecodesign company engineering & management consultancy GmbH / AT

Linear Model Predictive Control of Small-Scale Furnaces

M. Fallmann, L. Böhler & M. Kozek
TU Wien, Vienna, Austria

ABSTRACT: A comprehensive linear model predictive control framework for small-scale furnaces is introduced. Its formulation allows to meet restrictive legal emission regulations by utilizing a carbon monoxide formation model and provides a simple model-based approach to handle fuel switches efficiently. Experimental results confirm emission limiting behavior and robustness in the presence of fuel switches as well as changes of the operating point. Proposed methods stand out by their simplicity allowing for its use even in small and cost-driven applications. This paper covers topics published in (Böhler et al. 2020b) and extends them with additional measurement results and suggestions for a control redesign from scratch.

1. INTRODUCTION

Especially in the face of climate change, sustainability of biomass combustion motivates its ongoing research and development. Although highly sophisticated methods dictate hardware design, combustion control largely remains on the level of standard PID approaches (Kaltschmidt et al. 2016).

However, current and in particular upcoming legal emission regulations call for control algorithms being able to increase efficiency while maintaining robustness and simplicity of current methods. Model predictive controllers (MPCs) satisfy these requirements and have already been used for combustion control. Despite some successful implementations in large furnaces, see e.g. Kortela & Jämsä-Jounela (2014), their complexity inhibited broad application for small-scale units up to now. Therefore, this paper suggests a simple and purely linear model predictive control approach. Besides its overall simplicity, the ability to handle fuel switches in a highly efficient way stands out and has not been covered in related works.

In terms of emission limiting control, published approaches either lack of appropriate formation models, see e.g. Korpela et al. (2009), or utilize highly complex emission models needing time-consuming identification procedures (Peng et al. 2004). By contrast, this work relies on a static nonlinear formation model, proposed in literature (Böhler et al. 2019), and interlaces its findings into furnace control by methodically chosen reference values. The resulting emission limiting controller is characterized by its efficiency and flexibility and can be easily adapted to other furnaces.

2. FURNACE MODEL

The investigated small-scale biomass grate furnace, see a schematic drawing in Fig. 1, is mainly designed for the combustion of wooden pellets and thereby possesses a nominal heat output of 100 kW. While the fuel mass flow $\dot{m}_{fuel}$ is fed onto the grate, the primary and secondary air mass flows, $\dot{m}_{pa}$ and $\dot{m}_{sa}$, allow for its oxidation. Secondary air supply carried out in a spatially partitioned manner ($\dot{m}_{sa} = \dot{m}_{sa,1} + \dot{m}_{sa,2}$) facilitates mixing of inlet air and partially oxidized gases, therefore increasing combustion quality. Subsequently, the flue gas mass flow $\dot{m}_{fg}$ leaves the combustion chamber with the freeboard temperature T_{fb} and passes through the gas/water heat exchanger before it is finally released into the atmosphere with the reduced flue gas temperature T_{fg}. Without loss of general applicability of the concept presented hereinafter, the return temperature T_{ret} and water mass flow $\dot{m}_w$ are kept constant in the experimental setup. Since relevant heat output is therefore directly proportional to the supply temperature T_{sup}, major importance of this physical quantity in the given investigation is further emphasized.

The lumped model utilized within this work is based on simple analytic approaches, discussed in Gölles et al. (2014) and Seeber et al. (2019), and extended by appropriate terms to fulfill specific process behavior apparent from open-loop experiments. For the sake of brevity, the state space representation of the resulting grey-box model is abbreviated by the nonlinear vector-valued state function $\boldsymbol{f}$ and output function $\boldsymbol{g}$, see Eq. (1), where $\boldsymbol{x}$ is the state vector, $\boldsymbol{u}_m{}^T = [\dot{m}_{fuel,1}, \dot{m}_{pa}, \dot{m}_{sa,1}, \dot{m}_{sa,2}]$ the input vector, $\boldsymbol{\theta}$ the vector of identified but a priori unknown model parameters, $\boldsymbol{p}$ the vector of fuel parameters, and $\boldsymbol{y}^T = [T_{sup}, O_2, T_{fb}]$ the output vector.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}_m, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{p}) \\ \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) \end{aligned} \tag{1}$$

For a comprehensive insight into the equations, please see Böhler et al. (2020b). Since $\boldsymbol{p}$ comprises all fuel-related parameters, i.e. the upper calorific value H_u, the water content

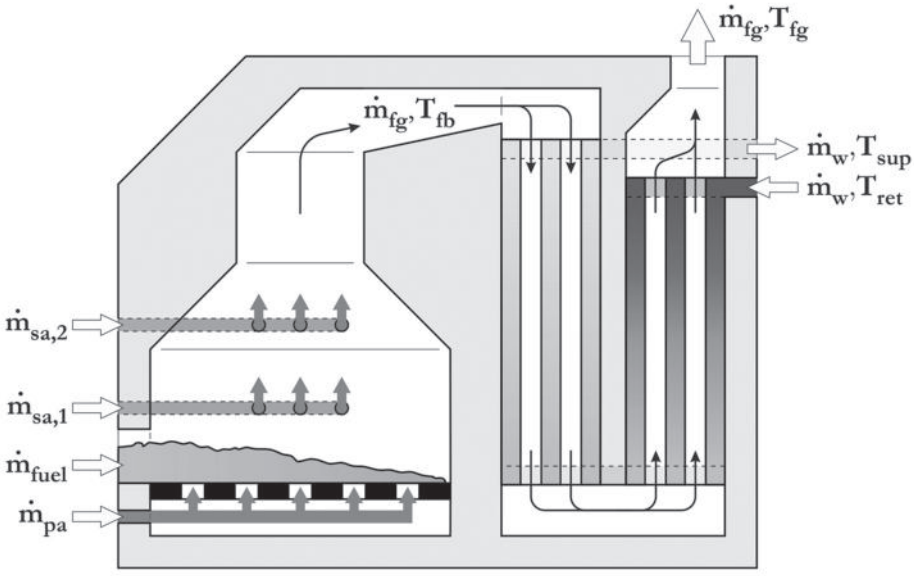


Fig. 1: Schematic illustration of the furnace with physical quantities essential for modelling.

w_{H_2O}, and ash content a_{ash}, the furnace model can be adapted to the combustion of other fuels in a simple and fast manner by updating related parameter values. Thus, the proposed modelling approach enables an advanced model-based control design inherently capable of handling fuel switches without extensive additional system identification.

In view of high combustion efficiency and emission reduction, formation of carbon monoxide (CO) is of particular interest. Böhler et al. (2019) developed a CO formation model, based on a neural network, for the combustion of wooden pellets using the very same furnace investigated here and thereby found a static dependency of CO on O_2 and T_{fb} to be appropriate, see Fig. 2a. Due to its highly nonlinear nature, a linear control approach with direct incorporation of the formation process lacks of desired performance. However, a closer analysis of the CO map unveils a simple emission limiting operating strategy to improve performance and simultaneously keep complexity

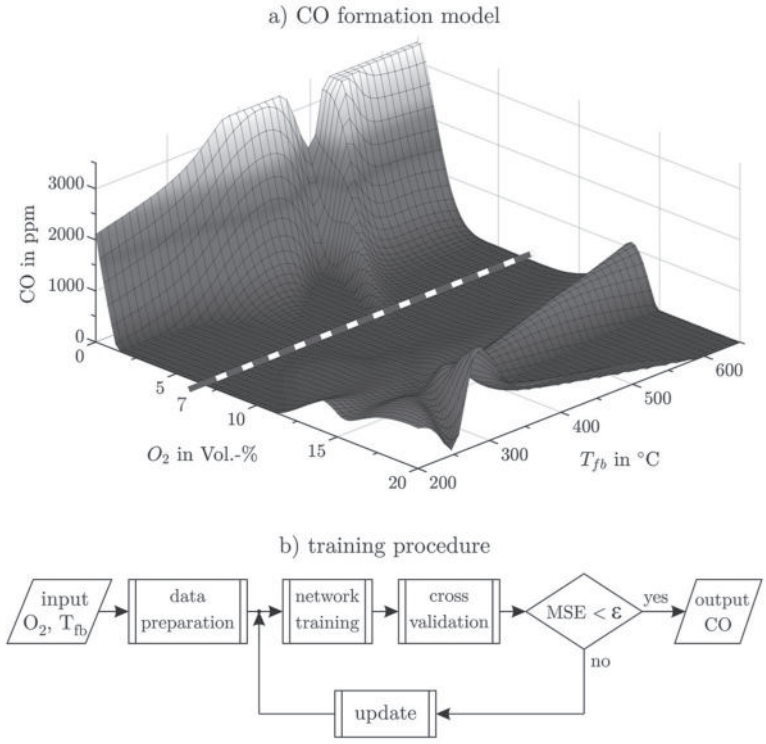


Fig. 2: In (a) a graphical representation of the utilized CO emission model for the combustion of wooden pellets is depicted. Besides the dependency of CO emissions on the oxygen concentration O_2 and freeboard temperature T_{fb}, a suboptimal but simple O_2 reference value for low CO emissions, indicated by the dashed line at 7 Vol.-%, is shown. Please note that the sharp limit at 3500 ppm indicates sensor saturation. The general training procedure (b) for the CO estimation model essentially consists of training, validation, and update in a loop until a performance criterion is met, e.g. mean squared error MSE falls below a certain value ε.

at bay. A constant oxygen concentration of 7 Vol.-% within the whole operating range fulfills these requirements for the combustion of wooden pellets, see line in the CO map (Fig. 2a) and results based on this strategy presented in **Section 4.** As measurements of O_2, T_{fb}, and CO are available in most furnaces, similar formation maps could be generated for other furnaces as well as fuels. The general training procedure, see Fig. 2b, comprises data preparation and identification in the loop until a predefined performance criterion is fulfilled. Detailed information is presented in Böhler et al. (2019).

3. CONTROLLER DESIGN

The conceptual architecture of the overall control structure (Fig. 3) is reasonably divided into the extended furnace, comprising immutable units established by the furnace manufacturer, and the extended controller, for which its design is discussed within this section.

Since application of simple PI control loops is common for control of small-scale biomass furnaces (Kaltschmidt et al. 2016), satisfying performance, related to such an approach, calls for decoupling and linear input-output behavior of the process under consideration. Therefore, the manufacturer intended the input interface to bridge the gap between these generally not compatible demands. Its implementation

together with the actuator dynamics is described by the mapping $[\boldsymbol{T}_{sup,ref}(k), \boldsymbol{u}^T(k)] \mapsto \boldsymbol{u}_m^T$. Based on empirically evolved knowledge in the form of static look-up tables, the feedforward controller determines input values $\boldsymbol{u}_{ff}$ subject to the supply temperature reference $\boldsymbol{T}_{sup,ref}$

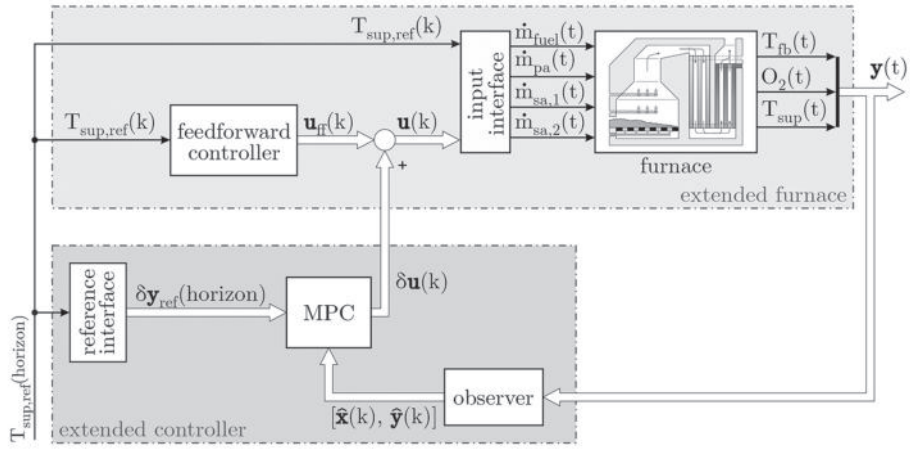


Fig. 3: Conceptual architecture of the overall control structure. While the presented furnace, its input interface, and feedforward controller together constitute the extended furnace, the extended controller comprises an MPC, a state observer, and an interface calculating necessary reference values.

and the currently used fuel in order to allow for high combustion quality during undisturbed steady-state operation. However, not only missing disturbance rejection but also the solely static implementation calls for a feedback-based and deviation-related control action δu yielding total control input $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_{ff} + \delta\boldsymbol{u}$.

In this work a linear MPC is established to fulfill this requirement. Therefore, a linearized model of the furnace together with the input interface is needed. Out of the large set of steady state operating points the, ν-gap metric, introduced by Vinnicombe (2001) and utilized by Böhler et al. (2020a) for a similar purpose, provides a useful framework to determine a linearization point in a methodically correct manner. Comparison of different linear models concerning their ability to be controlled by a single linear controller reveals an optimal linearization point robust in the face of changing the operating point. Based on the so defined linearized model, the basic MPC formulation (Wang 2009) is appropriately adapted to fit the specific needs. The conclusive optimization problem is given by Eq. (2) subject to the dynamics of the linearized system and constraints according to Eqs. (3), whereby J is the cost function, $\boldsymbol{\Delta U}$ is the vector of stacked incremental inputs within the horizon, $\boldsymbol{Y}$ and $\boldsymbol{Y}_{ref}$ are the vector of stacked outputs and output references, respectively, and $\boldsymbol{R}$ and $\boldsymbol{Q}$ are weighting matrices.

$$\Delta \boldsymbol{U}^* = \arg\min_{\Delta \boldsymbol{U}, s}\{J\} = \arg\min_{\Delta \boldsymbol{U}, s}\left\{\Delta \boldsymbol{U}^T \boldsymbol{R}\, \Delta \boldsymbol{U} + \left(\boldsymbol{Y}_{ref} - \boldsymbol{Y}\right)^T \boldsymbol{Q}\left(\boldsymbol{Y}_{ref} - \boldsymbol{Y}\right) + J_{sc}(s)\right\} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{u}_{min} \leq \boldsymbol{u}(k) \leq \boldsymbol{u}_{max} \qquad \forall k \in horizon \quad (3a)$$

$$O_{2,min} - s \leq O_2(k) \qquad \forall k \in horizon \quad (3b)$$

While real actuator limits (lower bound $\boldsymbol{u}_{min}$, upper bound $\boldsymbol{u}_{max}$) require input constraints, see Eq. (3a), to be incorporated as hard limits, hard output constraints could drive the problem infeasible. To overcome this issue, relevant lower oxygen limit $O_{2,min}$ is softened by introducing a so-called slack variable s, see Eq. (3b). Related cost term $J_{sc}(s)=c_1 s+c_2 s^2$ enables tuning of soft constraint's strength by appropriately

adapting positive real-valued constants c_1 and c_2. According to the receding horizon principle, only the first element of $\boldsymbol{\Delta U}^*$, the solution found by optimization, is utilized to form the actual control input.

To overcome lack of full state measurability, an extended Kalman filter, see e.g. Haykin (2004), provides estimates of the model states $\hat{\boldsymbol{x}}$ and outputs $\hat{\boldsymbol{y}}$. Due to the separation principle, the observer is designed independently of the controller, based on actual open-loop plant behavior.

Since the desired supply temperature represents the primary objective, the reference interface additionally provides reference values for O_2 and T_{ft}. To account for the deviation-related controller setup, absolute reference values $\boldsymbol{y}_{ref}$ are related to output values $\boldsymbol{y}_{ff}$ gained by only applying feedforward control action, therefore providing $\delta\boldsymbol{y}_{ref} = \boldsymbol{y}_{ref} - \boldsymbol{y}_{ff}$ to the MPC.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Experimental results of the closed-loop introduced in **Section 3** are presented in Fig. 4 for the combustion of different solid biofuels. While all MPC configurations rely on a prediction horizon of 30 min and a control horizon of 15 min, weighting matrices are slightly adapted from experiment to experiment to serve specific fuel characteristics (Böhler et al. 2020b). Although the supply temperature reference profile - as the fundamental user input - covers the whole operating range in all experiments, strategies differ in the applied oxygen reference related thereto. While combustion control of wooden pellets (Fig. 4a) and olive stones (Fig. 4b) consider introduced emission limiting control strategy, combustion of wood chips (Figs. 4c and 4d) is carried out based on (slightly adapted) oxygen references provided by the feedforward controller.

In view of wooden pellets, comparison of CO emissions (subplot indicated by ★ in Fig. 4a) associated with proposed operating strategy (solid line) and averaged emissions related to conventional mode (dashed line) clearly underpins the beneficial use of oxygen references based on emission models. Overall improvement is additionally apparent by a decrease of the total average value from 99 to 24 ppm.

Besides emission reduction, fuel flexibility as wells as a simple way of handling fuel switches is highly valuable as not considered in any previous work on biomass furnaces. Fuel analysis supplies sufficiently accurate parameter values to appropriately adapt the furnace model and, based on that, the MPC matrices. Fig. 4b-d depict experimental results for combustion of olive stones and wood chips with two different water contents, for which fuel switches were handled with the MPC approach. Measurement data clearly indicate high robustness in the presence of fuel-related modifications.

Even though the proposed MPC scheme provides comprehensive advantages, its performance is mainly limited by given add-ons kept very simple in their design. Therefore, a complete model-based redesign of the overall control setup seems to enable extensive improvements. Substantial enhancement would come along with replacing the static feedforward controller by a dynamic (and nonlinear) one. Since then the feedback control law only has to cover perturbation rejection. With this in mind, a standard state feedback control is likely to perform as well as the proposed sophisticated model predictive approach. Associated simplicity of the overall control architecture would immensely decrease application barriers.

5. CONCLUSIONS

Presented control strategy for small-scale biomass furnaces enhances basic advantages of a model predictive approach by emission limiting oxygen references and a model-based framework to handle fuel switches in an efficient way. Maintaining overall performance while simplifying system complexity could be achieved by comprehensive redesign of the feedforward path, driving it a promising concept for broader application.

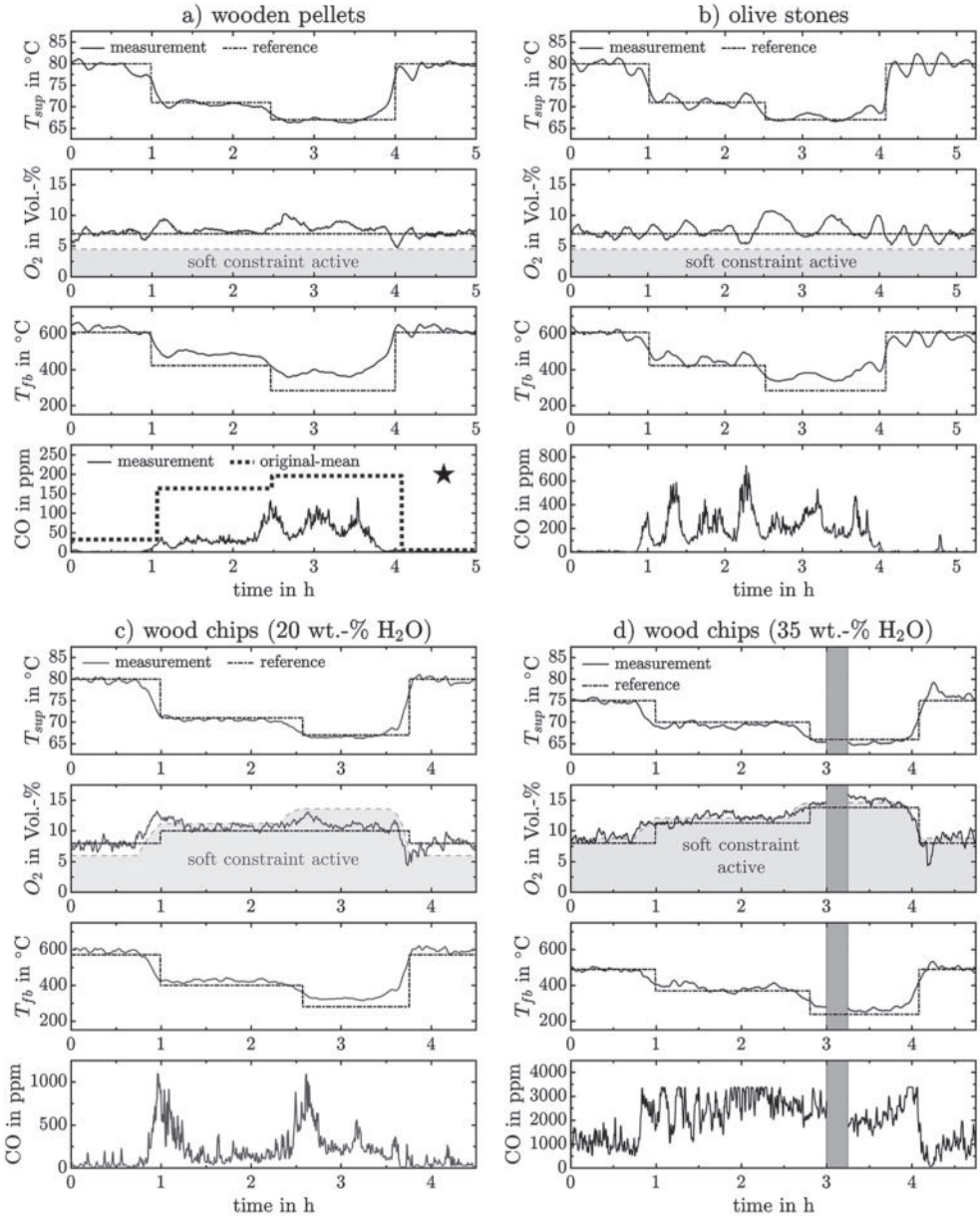


Fig. 4: Experimental closed-loop output results obtained by utilizing introduced controller design for combustion of different solid biofuels. Output results and measured CO emissions for the combustion of (a) wooden pellets and (b) olive stones are obtained by introducing emission limiting control settings. While results for the combustion of wood chips with a water content of (c) 20wt.-% are based on slightly adapted O_2 references, those for wood chips with a water content of (d) 35wt.-% rely on references supplied by the feedforward controller only. Shaded background highlights O_2 value ranges that cause additional costs due to violation of the implemented soft constraint. Vertical areas in (d) indicate interruption due to automatic furnace cleaning.

6. ACKNOWLEDGMENTS

The continuing support and the supply with test data of the furnace by FH-Burgenland, Herz Energietechnik GmbH, and Binder Energietechnik GmbH are gratefully acknowledged. This project (#853.606) is funded by the Climate and Energy Fund and conducted under the 2015 Energy Research Program.

REFERENCE

Böhler L., Görtler G., Krail J., and Kozek M. (2019) Carbon monoxide emission models for small-scale biomass combustion of wooden pellets. Applied Energy 254, 113668.

Böhler L., Krail J., Görtler G., and Kozek M. (2020a) Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces. Applied Energy 276, 115339.

Böhler L., Fallmann M., Görtler G., Krail J., Schittl F., and Kozek M. (2020b) Emission Limited Model Predictive Control of a Small-Scale Biomass Furnace. Applied Energy (submitted).

Gölles M., Reiter S., Brunner T., Dourdoumas N., and Obernberger I. (2014) Model based control of a small-scale biomass boiler. Control Engineering Practice 22, 94-102.

Haykin S. (2004) Kalman filtering and neural networks. United States of America: John Wiley & Sons.

Kaltschmidt M., Hartmann H., and Hofbauer H. (2016) Energie aus Biomasse: Grund-lagen, Techniken und Verfahren. Germany: Springer-Verlag Berlin-Heidelberg.

Korpela T. M., Björkqvist T. K., Lautala P. A. (2009) Control strategy for small-scale wood chip combustion. IFAC Proceedings Volumes 42, 119-124.

Kortela J., Jämsä-Jounela S.-L. (2014) Model predictive control utilizing fuel and moisture soft-sensors for the biopower 5 combined heat and power (chp) plant. Applied Energy 131, 189-200.

Peng H., Ozaki T., Toyoda Y., Shioya H., Nakano K., Haggan-Ozaki V., Mori M. (2004) RBF-ARX model-based nonlinear system modeling and predictive control with application to a NOx decomposition process. Control Engineering Practice 12, 191-203.

Seeber R., Gölles M., Dourdoumas N., and Horn M. (2019) Reference shaping for model-based control of biomass grate boilers. Control Engineering Practice 82, 173-184.

Vinnicombe G. (2001) Uncertainty and Feedback: H(infinity) Loop-shaping and the (nu)-gap Metric. Great Britain: Imperial College Press.

Wang L. (2009) Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®. Great Britain: Springer-Verlag London Limited.

Contact:
Markus Fallmann,
TU Wien, Getreidemarkt 9/E325,
1060 Wien, Austria,
Tel.: +43 (1) 58801 325523,
Email: markus.fallmann@tuwien.ac.at

The efficiency potential and application readiness of Wide Bandgap technology

A. Díaz Triana
Ecodesign company engineering & management consultancy GmbH, Vienna, Austria
M. Makoschitz
AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Vienna, Austria

ABSTRACT: Semiconductors incorporating Wide Bandgap (WBG) technology used in power electronic systems offer opportunities for improved energy efficiency and reduction of greenhouse gas emissions (GHG). Technical features of WBG include higher blocking voltages, faster switching speeds, and increased operating temperatures. Due to these properties, power devices with WBG materials such as Silicon carbide (SiC) and Gallium nitride (GaN) have the potential to provide a paradigm shift in performance and energy efficiency over the well established silicon based power devices, for example in metal oxide field effect transistors (MOSFET) and insulated gate bipolar transistors (IGBT). Such components are commonly used in most power converters, and thus the energy savings potential in many applications can be significant.

This paper examines the prospects of use for WBG power electronic circuits, focusing on potential energy savings in end-use applications such as data centers (DC), converters for renewables (Photovoltaic and wind), inverters and motor drives. Furthermore, the paper also discusses the status of policy in relation to the adoption of WBG technology. Finally, an Application Readiness Map is briefly discussed, showing the technology development and market presence of WBG in the short and long-terms.

1. INTRODUCTION

Power electronic systems condition and control the conversion and flow of electricity, and are handling a wide range of power levels, from milliwatts to gigawatts. Technologies, systems and applications incorporating power electronic conversion devices and modules are enabling higher living standards and sophisticated industrial activities, as well as contributing to the reduction of GHG emissions. The rising awareness about needed energy savings has brought forward the development of WBG integrated power electronic systems, as they show an improved efficiency. Further benefits of WBG-based semiconductors involve higher blocking voltages, faster switching speeds and increased operating temperatures. This enables the design of smaller and lighter systems, by a reduction in the size of its components and the cooling equipment. Devices with WBG technology are expected to reach market readiness within the next 10 years for different industrial sectors. So far, WBG semiconductor materials based on SiC and GaN are the most mature ones, commercially available so far.

Estimates show that a wide-spread adoption in excess of 90 % of such new power electronic systems utilizing WBG semiconductor devices would lead to an annual decrease in energy use of 25 % worldwide (Makoschitz et al. 2020). To promote energy efficiency of power electronics, the Technology Collaboration Program 4E of the International Energy Agency launched the Power Electronic Conversion Technology Annex – PECTA in 2019. By collecting and analyzing information about WBG-based power electronic devices, and coordinating internationally acceptable approaches that promote WBG-based power electronics, PECTA is generating greater understanding and action amongst governments and policy makers. A recent report from PECTA published in May 2020 on the efficiency potential of WBG and the application readiness of WBG technology is the basis for this paper. PECTA is scheduled to continue its work at least until 2024 (PECTA 2020).

2. WBG TECHNOLOGY AND ENERGY EFFICIENCY

2.1 POSITIONING OF TECHNOLOGIES

Silicon-based power semiconductors are the devices of choice in the vast majority of power electronics applications. The dominant role of silicon power devices, which include e.g., MOSFETs, has been achieved by the tremendous advancements over the years in the quality of starting material, in processing and fabrication techniques, and in evolving design concepts for the devices. In parallel to the developments of silicon devices, components based on WBG materials have been the subject of intense research, and are being developed due to the substantial advantages at device level that their inherent material properties can realize. WBG refers to the energy bonding atoms together in the semiconductor. These bonds are much stronger than for silicon and give the WBG materials much superior performance due to the fact that higher electric fields are needed to break these atomic bonds. The main advantageous properties of SiC and GaN are the much higher critical electric field and excellent thermal conductivity (especially for SiC), as shown in Tab. 1.

Tab. 1: Silicon and WBG material properties (Adapted from Kaminski 2012).

Parameter	Silicon (Si)	4H-SiC	GaN	Diamond
Bandgap (eV)	1.12	3.26	3.39	5.47
Critical Field Ecrit (MV/cm)	0.23	2.2	3.3	5.6
Permittivity εr (-)	11.8	9.7	9.0	5.7
Electron Mobility μn (cm^2/V s)	1400	950	800/1700*	1800
BFoM $\varepsilon_r \cdot \mu_n \cdot E_{crit}^3$	1	500	1300/2700*	9000
Thermal Conductivity (W/cm K)	1.5	3.8	1.3/3**	20

* Significant difference between bulk and 2DEG ** Difference between epi and bulk

Such WBG-based components can be manufactured on much thinner base regions for realizing unipolar type power semiconductors such as MOSFETs, for a wider range of voltage ratings (beyond their bipolar Silicon counterparts), with higher power densities, and improved electrical performance in terms of:

- Low conduction losses during light and partial load, due to absence of bipolar junction,
- Very low switching losses, due to absence of any stored bipolar charge, enabling a factor 10 higher operational frequencies,
- Higher operating temperature capabilities, due to low current leakage,
- Compact, due to switch and diode integration with the available built-in diode in the MOSFET.

This superior performance has a clear impact on almost all power electronic applications for achieving much improved efficiencies, while operating at higher current densities, frequencies, and temperatures. Substantial reductions will be achieved in the overall system size and weight due the potential downsizing of the semiconductor, passive components/magnetic, and the cooling system. SiC has proved to have the most advanced vertical power device concepts suitable for low to medium voltage applications (available for blocking voltages from 650 V to 10 kV).

At the moment most GaN devices are, however, still not suitable for such voltage-levels (currently < 650 V). Therefore, three-phase grid connected power electronics (230 V_{rms}/50 Hz) based on GaN devices can only be realized via multilevel or hybrid topologies. However, due to their lower switching losses com-

pared to SiC devices (in the same voltage and current area), and their availability for smaller voltage levels, the possibility of greatly reducing weight and volume makes them ideal for consumer and mobile products (<100 V_{DC}) (Makoschitz et al. 2020), as shown in Fig. 1.

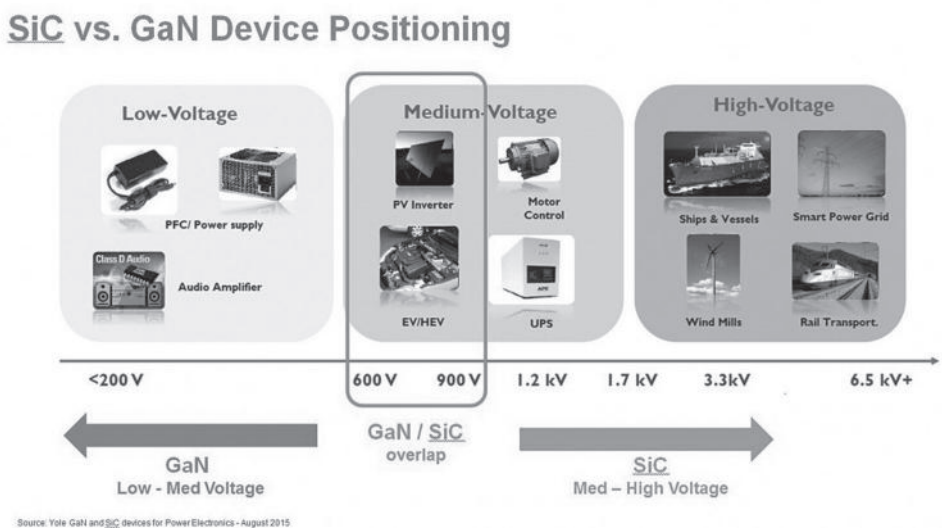


Fig. 1: SiC and GaN positioning in applications and voltage ranges (Lee 2016).

2.2 POTENTIAL ENERGY SAVINGS

As previously discussed, the use of WBG technology in a vast majority of appliances and devices would result in a higher efficiency (Zhang 2013), and thus remarkable energy savings whereas the potential is however dependent on the application as well. The further use of WBG technology is enhanced by advances in component technology, economic driven optimization, but also by an increasing awareness of energy efficiency and environmental impacts, e.g., by the reduction of energy consumption. A number of selected applications were analyzed in PECTA, in terms of the energy efficiency potential that could be achieved with WBG, by comparing the average efficiency of Silicon based devices to new WBG materials. It was estimated that WBG technology could reduce the losses in the worldwide installed wind power generators by around 35'000 GWh/year, as shown in Tab. 2 (Makoschitz et al. 2020).

Tab. 2: Energy efficiency and savings of Si and WBG-based inverters for wind generators (Makoschitz et al. 2020).

	Silicon Inverter	SiC Inverter
Average efficiency (%)	95	98
Production (TWh/year)	1127.8	1163
Energy savings(TWh/year)	0	35.6
Energy savings (%)	0	3.06

Energy savings for data centers incorporating WBG technology would be in the range of 28'000 GWh/year worldwide, for PV inverters savings would be around 10'000 GWh/year, and for laptops, tablets and cellular phones energy savings would be in the range of 7'700 GWh/year. It is worth mentioning that these energy savings are also linked to cost savings. For example, the production and long-term costs of wind inverters are reduced when replacing Si IGBTs with SiC MOSFETs. SiC devices brought a monetary

improvement of the system efficiency up to μEuro=2.36 % in comparison with Si devices. If the growth of wind generated energy continues at the current rate, it is expected that the accumulated installed capacity will be about 860 GW by 2027. Replacing Si devices with SiC devices will lead to money saving up to 13 B$ (by considering feed-in tariff of 0.12 $/kWh and load factor of 38.9 % for offshore wind turbines). For GaN devices, which can be used for low voltage application, there is still a projected market of 1.8 B$ by 2027, with significant growth across a range of sectors, particularly power supplies and automotive applications (Makoschitz et al. 2020).

3. APPLICATION READINESS MAP (ARM)

PECTA recently published an Application Readiness Map (ARM), to analyze and visualize the development of WBG-based applications. The WBG roadmap of the European Center for Power Electronics (ECPE), and the inputs of experts from academia, research, industry and policy-makers served as basis for PECTA´s ARM. A strong increase in the demand for WBG power electronics, especially for SiC based solutions is expected, due to the maturity and increasing reliability of the technology, as well as to the decreasing manufacturing costs. The automotive sector is likely to dominate the further expansion due to the electrification of automotives. This will determine the cost structure and device concepts of WBG technology, including the production and development of SiC MOSFET switches in the voltage range from 650 V up to 10 kV. One key event was the decision of Tesla to use SiC MOSFET in the traction inverter of their Tesla Model 3, with about 100’000 cars per quarter being produced (Makoschitz et al. 2020).

With the increase in production volumes and lowering cost, SiC based power electronics will further expand in the automotive market for traction inverters, DC/DC conversion, and different charging concepts. Similar trends are expected for rail applications, both for traction and auxiliary inverters; in industrial application and large motor drives. The electrification of other transport fields e.g., aircrafts, shipping and trucks, is also anticipated. The increase in demand for SiC will require extensive increase in material and processing capabilities. It is likely that the SiC wafer production will partly move from 150 mm to 200 mm, to reduce the cost due to size and volume increase, and also to using newer processing production tools for SiC technology.

GaN power electronics are currently incorporated in different applications at lower voltage and power levels, such as in automotive for DC/DC converters and on-board chargers, in photovoltaic applications as power optimizer, and in small (<5 kW). When the quality and maturity of the GaN technology improves, it will also be further used in current applications and expand into applications where SiC is now used. Especially the development of vertical GaN concepts (as discussed in Ohta et al. 2015), can assist in reaching higher blocking voltages for GaN devices. Another area of application for GaN could be information and communication technologies (ICT) and data centers for lower voltages up to 650 V, which is now dominated by Si solutions. This includes, power supplies, low voltage DC/DC conversion and uninterrupted power supply (UPS), where the possibility for higher switching frequency and lower losses will give higher efficiency than corresponding Si components (super junction and MOSFET). This could also include household power supplies and chargers.

However, doing estimations of the concrete timing when WBG power electronics will be significantly present in different applications is difficult, and depends on various factors, such as the current development of the electrification of the automotive and transport sector, and ongoing political initiatives and legislations for reducing greenhouse gas emissions.

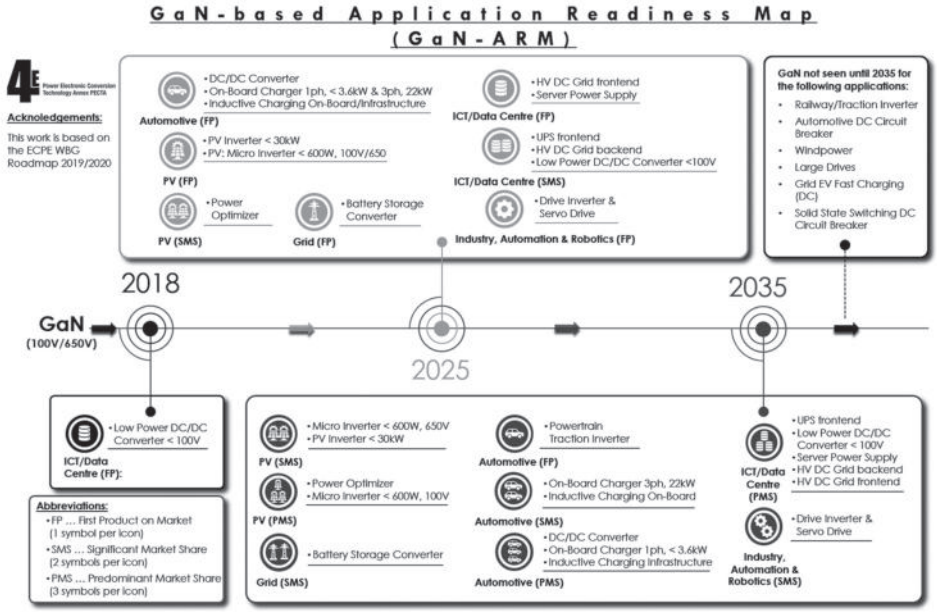


Fig. 2: Application Readiness Map for GaN technology (Makoschitz et al. 2020).

SiC MOSFETs and GaN HEMTs (High-electron-mobility transistors) are likely to replace prevalent Si technology for most applications:

- For the automotive applications, SiC MOSFET (650 V - 1.2 kV) and GaN HEMTs (650 V) are expected to be the dominant devices for all power conversion applications, this includes inverter drives, charging technology and DC/DC conversion.
- For ICT and large data centers, SiC will dominate in high voltage applications, while GaN will be the dominant power electronic device in applications at lower voltages (< 650 V), DC/DC converters and power supplies (shown in Fig. 2).
- Considering currently commercially available products and trends for photovoltaic and industrial applications, GaN HEMT is expected to be the dominant device in low voltage systems (< 650 V) and for power optimization, while SiC MOSFET (650 V - 3.3 kV) will dominate for higher voltage levels in residential or commercial systems.
- For railway traction and auxiliary systems, SiC MOSFET (1.2 kV - 6.5 kV) will be the dominant device solution.
- For wind power, both generator and connection to the grid, SiC MOSFET together with the Si IGBT will be used (Rahimo 2010, Rahimo et al. 2018). For medium voltage large drives, such as naval, Si IGBT (650 V - 6.5 kV) will still be dominating but together with SiC MOSFET at the same voltage range.

4. POLICY INSTRUMENTS FOR WBG TECHNOLOGY

The commitment to policy instruments depends on the phases of maturity of a given technology, i.e., innovation, penetration enhancement, consolidation. To unfold the potential for energy efficiency and savings from adopting the emerging WBG technology, the process of market entry might need to be accompanied and complemented by policies and other of support measures. PECTAs work in this field focuses on identifying and assessing the suitability and feasibility of policy measures for WBG technology, e.g., the use

of specific instruments, such as mandatory energy efficiency legislation based on technology standards, labeling schemes, or voluntary agreements in industry. Concerning technology standards, the Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC) is developing standards for the microelectronic industry, within two sub-committees for power electronic conversion devices based on SiC and GaN. Their work on standards is not yet covering energy efficiency aspects. Some semiconductor manufacturing companies are also taking own initiatives, by providing extensive technical information though data sheets for their selected SiC and GaN devices and including some energy efficiency information. Apart from these examples, PECTA experts could not identify other standards or policies in place for energy efficiency of SiC and GaN devices. This fact stresses the importance of initiatives like PECTA, in gathering and coordinating international policy approaches, and providing information to policy makers (Makoschitz et al. 2020).

5. SUMMARY AND OUTLOOK

Relevant contributions of PECTA are the analysis of trends and technology development, the assessment of the short and long-term adoption and integration of WBG into current state-of-the-art solutions and novel concepts, and informing policy makers for expediting the integration of WBG into relevant applications. To accomplish this, PECTA´s work plan for the upcoming period will focus on:

- Investigating in depth the energy efficiency figures for selected applications.
- Assessing the energy and environmental related aspects of WBG, with a life cycle perspective.
- Refining PECTA´s Application Readiness Map (ARM).
- Investigating possible policy measures, and mapping these to applications over a timeline.
- Exploring the type and scope of possible standards in support of WBG market entrance and adoption.
- Measuring in laboratory the power supply efficiency of selected devices.

These tasks will be carried out in collaboration with international experts from research, academia and industry, and should provide in-depth insights into the most relevant WBG topics for decision-makers (e.g., policy instruments and efficiency standards), and for promoting engagement with stakeholders, especially from industry.

REFERENCE

Kaminski N. (2012) SiC and GaN Devices - Competition or Coexistence?. 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Germany.

Lee B. (2016) Will III-V Power Devices Happen?. Semiconductor Engineering. https://semiengineering.com/will-iii-v-power-devices-happen/.

Makoschitz M., Krischan K., Bergmann P., Díaz A., Brueniger R. (2020) Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map. IEA 4E Power Electronic Conversion Technology Annex. https://pecta.iea-4e.org/files/otherfiles/0000/0186/PECTA_Report_Total-V10final-May-2020.pdf.

Ohta, H., Kaneda N., Horikiri F., Narita Y., Yoshida T., Mishima T., Nakamura T. (2015) Vertical GaN p-n Junction Diodes with High Breakdown Voltages Over 4 kV. IEEE Electron Device Letters, vol. 36, Issue 11, pp. 1180 - 1182.

PECTA (2020) Structure and Tasks. PECTA - Power Electronic Conversion Technology Annex (2020). https://pecta.iea-4e.org/structure-tasks

Rahimo M. T. (2010) Ultra High Voltage Semiconductor Power Devices for Grid Applications. International Electron Devices Meeting (IEDM), USA.

Rahimo M. T., Vobecky J., Kopta A., Wikstrom T., Hammerli. M. (2018) Power Semiconductor Technology Advancements for Enabling Next Generation Grid Systems. CIGRE- International Council of Large Electric Systems, France.

Zhang J. (2013) Power electronics in future electrical power grids. 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), USA.

ACKNOWLEDGEMENT

The work and the Austrian participation in IEA 4E PECTA are funded by the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology under the FFG Grant 870645. More information under: https://nachhaltigwirtschaften.at/en/iea/technologyprogrammes/4e/iea-4e-tcp-pecta.php

Contacts:
Dr. Adriana Díaz Triana
Ecodesign company GmbH
Schwindgasse 4/2 1040 Wien.
Email: diaz@ecodesign-company.com

Dr. Markus Makoschitz
AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 2, 1210 Wien
Email: markus.makoschitz@ait.ac.at

The Total Energy Model for Connected Devices

A. Díaz Triana
Ecodesign company engineering & management consultancy GmbH, Vienna, Austria

ABSTRACT: The rising number of devices connected to networks has implications on energy demand and use. Although network connected devices can reduce energy wastage of appliances and equipment by controlling and optimizing the operation of systems that deliver energy services, there is often additional energy used to create, maintain and transmit data over the network. Network connected devices include a large diversity of products in the residential, business and public sectors, such as smart TVs, mobile phones, sensors, lighting, thermostats, voice assistants, speakers, video cameras, etc.

The Electronic Devices and Networks Annex - EDNA of the International Energy Agency´s Energy Efficient End-Use Equipment collaboration provides analysis and policy guidance for promoting and improving the energy efficiency of connected devices and systems. This paper discussed EDNA´s Total Energy Model (TEM). TEM is a quantitative model of the "total energy use" of connected devices, which was developed to better understand the *additional* energy needed for devices when connected to a communications network (EDNA 2019). TEM results, in particular those for network standby and streaming energy use, provide a reputable source of information to assess possible energy efficiency measures. Selected results are discussed as well.

1. INTRODUCTION

The global stock of network connected devices is estimated to increase from around 15 billion in 2018 to 46 billion in 2030, as shown in Fig. 1, for the product categories security, information and communication technologies (ICT), entertainment, automation, and local area networks. This represents a 300 % increase from 2018 to 2030, or an average compound annual growth rate of 9.8 %. The majority of this growth of stock corresponds to automation network connected devices, which includes sensors, controls and connected appliances. The estimated energy consumption of network connected devices in all categories is estimated to reach 1200 TWh/year in 2030, and from 2018 until 2030 the *standby* energy consumption of all devices is projected to double (Ryan et al. 2019, Ryan et al. 2020). One major driver for this rising energy consumption is the increasing installation of entertainment and automation devices which require a permanent network connection to enable their functions on demand (Ryan et al. 2019). Results from the TEM model show that, despite the large stock of automation devices, their energy consumption is relatively low, compared to a lower stock for the ICT and entertainment categories, with higher energy consumption, largely due to the streaming functionality.

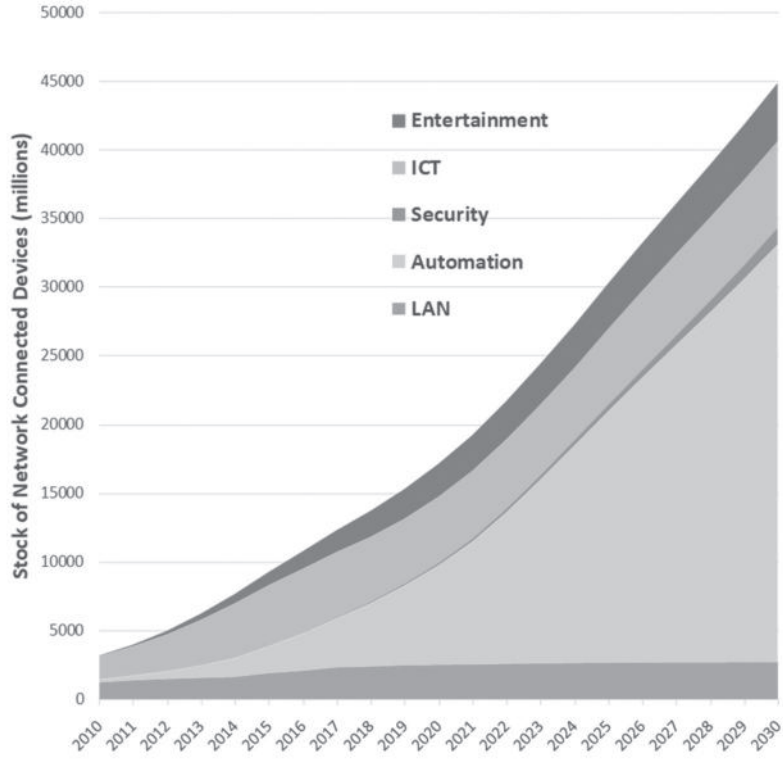


Fig. 1: Estimated global stock of network connected devices by category (Ryan et al. 2020).

2. SCOPE OF THE TOTAL ENERGY MODEL

TEM quantifies the total *additional* energy that results from devices becoming network connected. The key definitions that guide the scope of the TEM are the definition of network-connected devices, the definition of what is *"additional"* energy use, identifying the conditions of energy use, and defining what energy use is related to being *"network connected"*. The scope of network connected devices includes three sectors: residential, business, and public; and the product categories of security, ICT, entertainment, and automation. The devices are identified as:

- **Electronic edge devices:** devices that store and use data (e.g., laptops and smart phones), and *Other* edge devices with no data-related functions (e.g., networked kitchen and household appliances).
- **Wireless and fixed network equipment:** made up of wired and wireless Local Area Networks (LAN) and mobile networks; as well as Data Centers (DC) and Wide Area Networks (WAN).

The energy uses for each device category are considered as follows:

- Electronic edge device: all modes/conditions of energy use of *connected* edge devices.
- Other edge devices: all modes/conditions of energy use of connected devices that exists to service the device functions while connected to the network, where this is *additional* to the normal functioning of the device or service that is being performed.

- **LAN equipment:** all modes/conditions of energy use of LAN equipment is due attributable to data services for connected edge devices.
- **Data centers (DC)/WAN:** energy use by the DC/WANs that is attributable to the data services for connected edge devices.

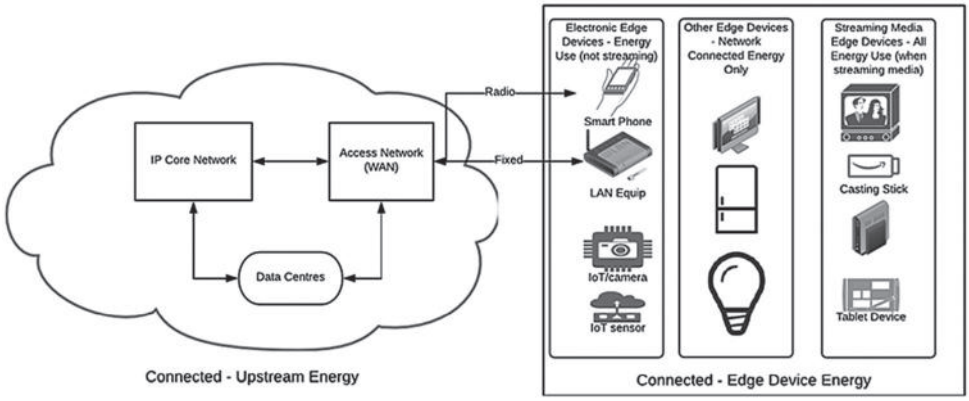


Fig. 2: Scope of network connected energy consumption (Ryan et al. 2020).

The total *additional* energy use of network-connected devices focuses on *three main conditions* (For a constant network connection the **off-mode** of devices is not relevant, and thus it is not included in the TEM):

- **Network active:** the condition in which a device is communicating actively with another device on a network.
- **Network standby:** the condition which allows a device to resume its main function upon a receiving a remotely initiated trigger via a network connection.
- **Media streaming:** the condition in which audio-visual content data is transmitted over a network to a smart TV, casting stick or similar entertainment device, and includes the energy that the device uses to fulfill its primary function. The energy use of streaming media services requires separating the total transmitted data into streaming data and non-streaming traffic in the downstream (connected device and edge network), and upstream (Data centers, wide area and core networks) categories. The downstream category includes the streamed media receiving edge device, e.g., a display or a TV (Ryan et al. 2019; Ryan et al. 2020).

Tab. 1 shows the example of energy uses for smart TVs and connected lights.

Tab. 1: Energy uses for Smart TV and connected lights (Ryan et al. 2019).

Device	Condition	Functions	Included in TEM	Explanation
Smart TV	On mode	Streaming video	No	*On mode* is not additional energy use to the normal use
	Network standby	To enable on demand streaming	Yes	Is required to be connected to stream video
	Network active	Provide data control and transfer while streaming or main functions	Yes	Is required for data functions (assumed to be the same power demand as network standby condition)
Connected light	On mode	Providing light	No	Not additional to normal use of light.

3. ENERGY USE DATA AND SCENARIO MODELLING

The TEM includes different energy use scenarios to examine, for example, how changes in technology, device sales over time, and daily time of use by condition impacts energy use of network connected devices. The TEM sums the individual energy use by condition (network active/network standby/streaming) for connected devices, and allocates the upstream energy use of the network (DC and WAN) to each device type. For the edge device and edge network equipment, a bottom-up product stock model of energy is used, meaning that energy use is estimated at the device level, and summed to provide global/regional energy consumption. For each product included, relevant data to model the network connected energy consumption was acquired, including e.g., (regional) sales and shipment data, and streaming media power consumption. The data relating to the sales, the service life, stock of equipment, and the energy use characteristics all vary over time. For the DC/WAN component, including access networks, the specific energy intensity of DC/WAN equipment types per data traffic carried over the WAN was included. The regional upstream energy use is calculated according to the share of data attributed to various DC/WAN technology types of the total projected data traffic. The energy intensity (energy use per data transferred, or EI), the share attributed to each DC/WAN technology types, and the total network traffic also vary over time. To attribute the upstream energy use to the edge devices, the estimated data consumption of network devices is used to proportion the upstream energy use to the connected device Finally, the DC and WAN traffic components are further split into the *streaming media* and *non-streaming* EI, and allocated so that the average EI is unchanged. The DC EI is further disaggregated by *ICT equipment* and *infrastructure equipment,* and by utilization rate. Very specific considerations are included in the TEM for the streaming media, for example the amount of data streamed during high and low utilization levels. This segmentation is necessary since the EI of the server's traffic changes with utilization level. Media streaming power consumption by device and time of use estimates are also key variables included. The type of server (Solid state disk server – SSD, Hard disk drive storage server - HDD and "standard" server with non-video traffic) and the WAN's Core network traffic EI, were considered in the model (as explained in Ryan et al. 2020).

The TEM shall provide a current/historical and projected energy use of the connected devices and their upstream energy impacts, on a global and regional basis. Input data are collected from historical values over the period up to 2016 or 2017, so the year 2017 presents the *current estimated energy use,* and the period 2010 to 2017 is historical energy use. The model uses projections from various sources for the period 2018 to 2030. This is the *projected energy use.* Data sources are not readily available after 2023, so projections

until 2030 are highly uncertain, with rapidly changing technologies and services (Ryan et al. 2019). The inclusion of regionalization in the TEM is largely based on regional differences in equipment installed. The model covers eight regions and a Global (GL) category. The regions are North America (NA), West Europe (WE), Central & East Europe (CE), Far East & China (FE), India Subcontinent (IN), Rest of Asia Pacific (AP), Latin America (LA), and Africa & Middle East (AF) (Ryan et al. 2020).

4. PROJECTIONS OF ENERGY CONSUMPTION UNTIL 2030

The TEM allows modeling global and regional projections of network connected energy consumption. Selected results are discussed in this section. Driven by many more products becoming network connected, device energy is increasing remarkably until 2030, whilst the energy demand of non-streaming upstream is slightly decreasing, as shown in Fig. 3. Total energy consumption for streaming media (both edge device and upstream energy use of connected devices) is projected to grow from 210 TWh in 2018 (0.9 % share of electricity demand) to 350 TWh in 2030 (1.2 % of total electricity demand).

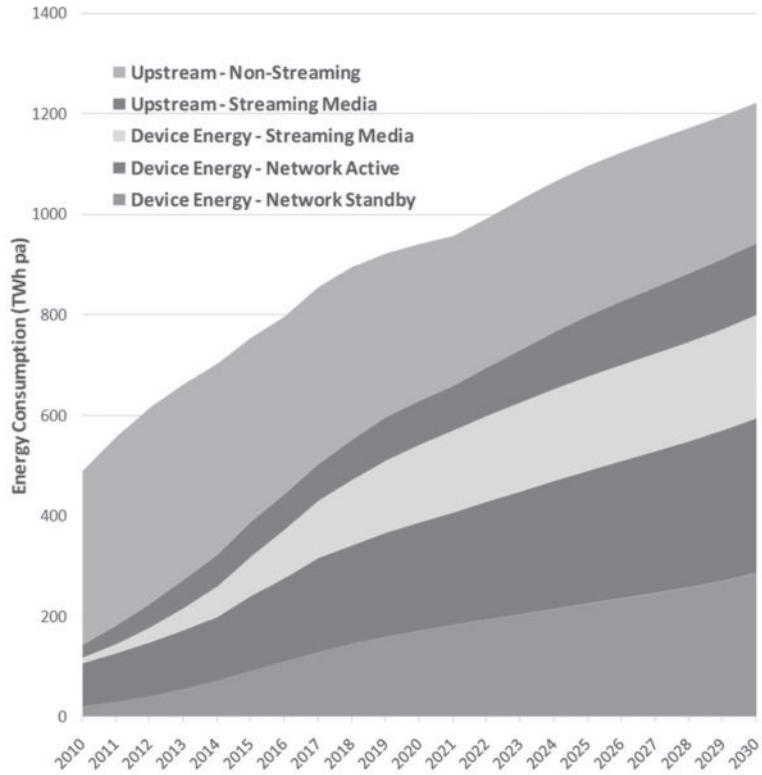


Fig. 3: Total energy consumption comprising upstream traffic, including streaming and non-streaming, and all connected devices in all conditions (Ryan et al. 2020).

Fig. 4 shows the energy consumption of entertainment devices. By 2030 devices in streaming media condition will be consuming about twice as much energy as other devices in network standby condition. Changes to energy consumption due to streaming during the recent Corona virus lockdowns were not included in the TEM, due to insufficient data and time to model these impacts. Fig. 5 shows that the total energy consumption of edge devices in the Far East and China (FE) region will be over one third of the

world's by 2030. The India Subcontinent (IN) shows a much lower forecast of the energy consumption of edge devices, primarily due to its lower stock of stationary edge devices. In 2020, the proportion of the IN stock to total global stock of entertainment category devices is 2.8 %, while in the Far East and China it is 18.7 %. By 2030, the IN proportion increases to 12.1 %, while in the FE to 25.4 %. This demonstrates that regional differences in the stock of edge devices has an impact on the relative energy consumption, and that as this difference diminishes so will the comparative edge device energy consumption (Ryan et al. 2020).

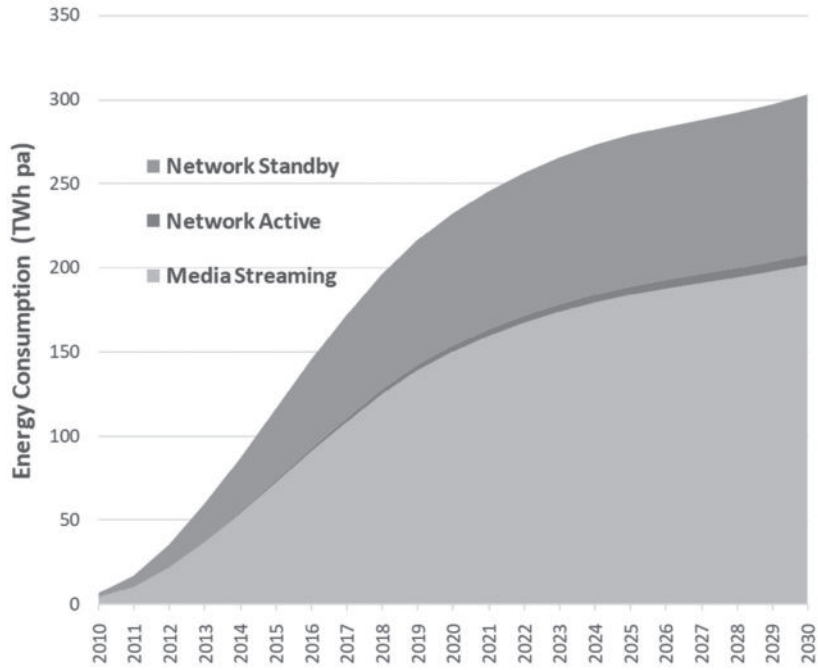


Fig. 4: The entertainment category - Device energy consumption globally by condition (Network standby, network active, and media streaming), (Ryan et al. 2020).

5. SUMMARY

EDNA´s Total Energy Model (TEM) helps identify emerging issues associated with network connected devices, estimating the additional energy use at device level, but also upstream in the communication network. As the number of network connected devices continues to grow, policy makers need to evaluate and implement effective energy policies. The TEM can guide decision-making towards reducing the energy impacts of connected products, e.g., by evaluating the effects of policy measures on network standby and/or on energy demand from streaming media.

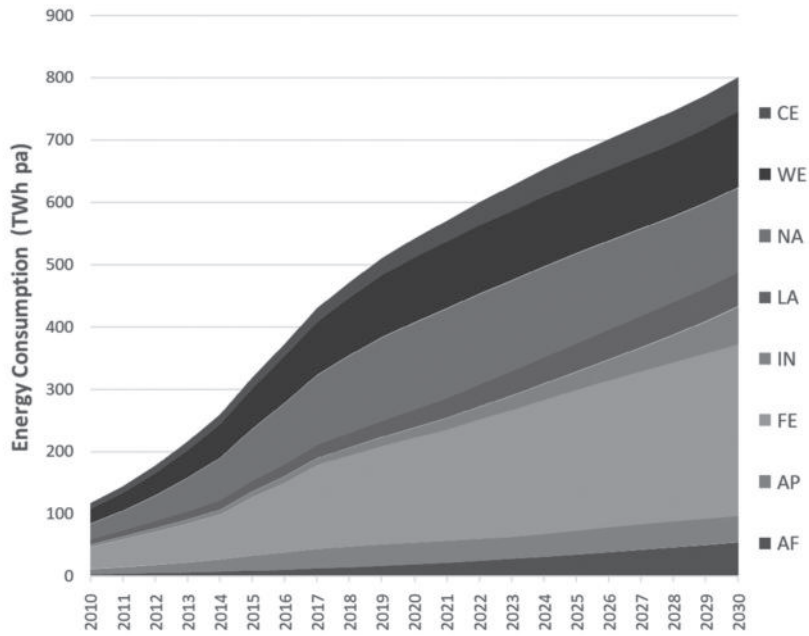


Fig. 5: Total energy consumption of connected edge device by region, per year (Ryan et al. 2020).

REFERENCE

EDNA (2019) Total Energy Model. Electronic Devices and Networks Annex – EDNA (2019). https://edna.iea-4e.org/tasks/task8.

Ryan P., Smith T., Wu A. (2019) Total Energy Model for Connected Devices. Report for IEA-4E EDNA: https://www.iea-4e.org/document/429/total-energy-model-for-connected-devices.

Ryan P., Smith T., Wu A. (2020) Addendum Report for Total Energy Model V2.0. Report for IEA-4E EDNA. Internal document (soon to be published under: https://edna.iea-4e.org/library). June 2020.

ACKNOWLEDGEMENT

This work and the Austrian participation in EDNA are funded by the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology under the FFG Grant: 876731: https://nachhaltigwirtschaften.at/en/iea/technologyprogrammes/4e/iea-4e-annex-edna-workingperiod-2019-2024.php

Contact
Dr. Adriana Díaz Triana.
Ecodesign company GmbH.
Schwindgasse 4/2, 1040 Wien.
Email: diaz@ecodesign-company.com

Session 2c

Umwelttechnik

Der Kachelofen in der CFD-Simulation

Mantler, Schiffert, Haselböck / Österreichischer Kachelofenverband / AT
Schüssler, Riebenbauer, Stangl / ACAM Engineering GmbH / AT

Effizienzsteigerung einer Müllverbrennungsanlage durch Integration einer Rauchgaskondensation

Huemer / FH Burgenland / AT

Untersuchung eines Elektroabscheiderkonzepts zur Reduktion von Staubemissionen

Schittl, Jauschnik / Forschung Burgenland / AT
Pöttler / Herz Energietechnik GmbH / AT
Krail / FH Burgenland / AT

Der Kachelofen in der CFD-Simulation

J. Mantler, T. Schiffert, R. Haselböck
Österreichischer Kachelofenverband, Wien, Österreich
F. Schüssler, S. Riebenbauer, F. Stangl
ACAM Engineering GmbH, Wiener Neudorf, Österreich

ABSTRACT: The thermal behavior in a tile stove (Kachelofen) is complex and varies at all time. For this reason, a coupled thermal and numerical flow model was created within the funded FFG (Austrian Research Promotion Agency) project "KachelofenSimulation". The simulation models provide a good basis for considering thermal comfort in rooms and enables more specific experiment design for further research. The validation of the simulation models was carried out with measurements in the research institute of the Austrian Kachelofenverband. Literature on thermal comfort shows the complexity and challenge of comprehensively describing this term. The essential parameters are temperatures, velocities, contents of the air as well as many individual influences. With existing measurement results, a first tile stove simulation model was created. The solid was defined with the physical properties of chamotte and the negative volume ("air body") with the properties of air. The meshing in finite elements was carried out after optimization by a convergence study. The results for the air volume are around 500 000 elements and about 75 000 elements for the chamotte body. Boundary conditions were defined for the combustion chamber heat output, the volume flow at the flue gas connector, the heat transfer to the environment and the ambient conditions. The knowledge from meshing and the boundary conditions were applied to further simulation models. Additionally, the geometry of the heat-emitting volume in the combustion chamber was improved. Also, the boundary conditions of the heat transfer on the tile stove surface was enhanced by models and measurements. For the tile stove with an air gap between the inner and an outer chamotte layer an analytical calculation of the heat transfer was developed. The simulation models were validated with built tile stoves in the research facilities of the Austrian Kachelofenverband. Temperatures on the surface, in the solid phase and in the exhaust gas were used for the validation. The influence of the tile stove construction (structure of the chamotte layers, orientation of the flues, door arrangements and different combustion chambers), the influence of the room position (tile stove in the center or on the side of the room), the influence of wall material in the installation room (wood or concrete) as well as influence on fire protection were analyzed with the simulation models of the tile stoves. The generated simulation models reproduce the reality of the tile stoves very good. They can be used in the future to investigate the interactions of tile stoves in rooms and buildings more closely.

1. EINLEITUNG

Der Kachelofen ist ein seit Jahrhunderten bewährtes Produkt, das durch technologische und stilistische Innovationen auch heute als Heizsystem sehr beliebt ist. Trotz der langen Geschichte sind die Hafnerprodukte so weiterentwickelt, dass diese einen wesentlichen Beitrag zur ökologischen Energiewende leisten und behagliches Raumklima bereitstellen können. Beim Kachelofen wird Scheitholz als Brennstoff verwendet. Das Abgas heizt das Zugsystem aus Schamotte auf. Die Schamotte geben die Energie aufgrund der hohen Wärmekapazität und der geringen Wärmeleitfähigkeit langsam an den Raum ab. Das ermöglicht lange Speicherzeiten. Daher werden Kachelöfen je nach Ausführung nur alle 8 bis 24 Stunden beheizt. Abb. 1 zeigt das Funktionsprinzip.

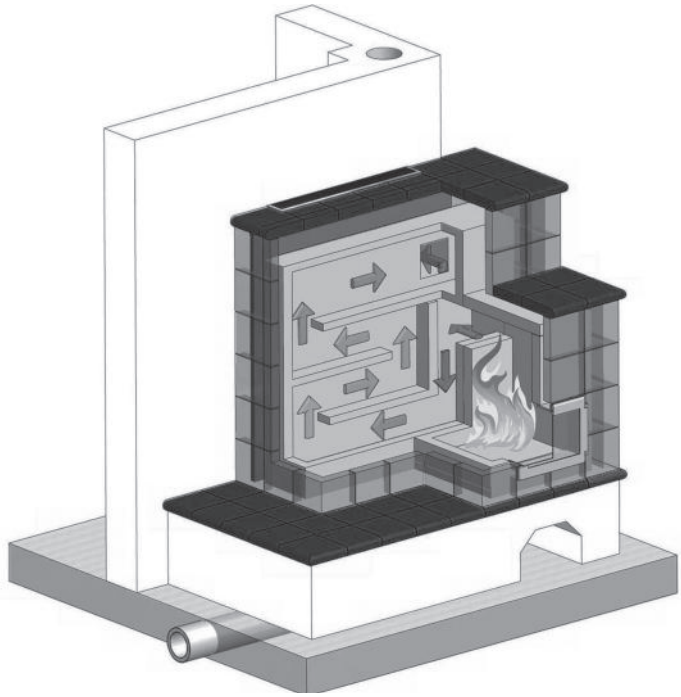


Abb. 1: Funktionsprinzip Kachelofen

Die zyklische Beheizung führt zu keinem konstanten Betriebszustand und die thermischen Zustände sind in jedem Punkt und zu jeder Zeit variabel. Hafner*nnen können mit dem Kachelofenberechnungsprogramm, welches die aktuellen technischen Richtlinien (EN 15544) berücksichtigt, sowie aufgrund der hohen Fachkompetenz, Kachelöfen gut auslegen. Weiterführende Fragestellungen lassen sich hinsichtlich des transienten Verhaltens bis dato nicht ohne weiteres bzw. nur mit hohem Versuchsaufwand für einen spezifischen Fall beantworten. Dazu zählen beispielsweise die Position des Kachelofens im Wohnraum, die Erfüllung von Behaglichkeitskriterien oder das thermische Verhalten des keramischen Speichers über die Zeit.

2. WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNG

Ziel des FFG-Projektes „KachelofenSimulation“ war die Erstellung eines gekoppelten thermischen und numerischen Strömungsmodells für Kachelöfen. Das Modell sollte die Temperaturen im Zugsystem, im Festkörper des Kachelofens selbst sowie die Wärmeabgabe an den Raum abbilden. Darauf aufbauend sollten Fragen der thermischen Behaglichkeit beantwortet werden. Eine Validierung der Simulationsmodelle sollte mit Messungen am Österreichischen Kachelofenverband erfolgen.

3. METHODIK

Grundlage für die Simulationsmodelle waren Temperatur-Messungen an der Oberfläche eines Kachelofens sowie das CAD-Modell des Ofens. Das CAD-Modell wurde vernetzt und Randbedingungen definiert. Die Berechnung der Modelle erfolgte unter Verwendung von Siemens Simcenter 12.0 und der Maya HTT Solver. Die Ergebnisse des Simulationsmodells wurden analysiert und mit den realen Messdaten verglichen. Die Abweichungen der ersten Modelle wurden durch Verbesserung der Randbe-

dingungen möglichst minimiert. Es wurden außerdem weitere und genauere Messungen an Kachelöfen durchgeführt, um Temperaturverläufe im Schamottekörper selbst, im Luftspalt und im Abgas an mehreren Stellen zur Validierung zur Verfügung zu haben. Abb. 2 zeigt die Methodik für die Erstellung des Modells für den Kachelofen.

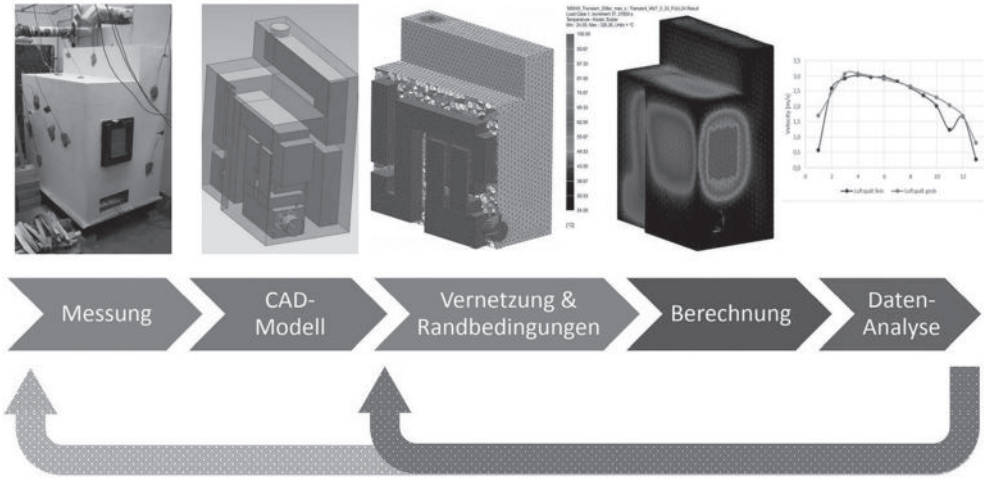


Abb. 2: Methodik für die Erstellung des Kachelofen-Simulationsmodells

4. ERGEBNISSE

4.1 BEHAGLICHKEIT

Die Literatur zu „thermischer Behaglichkeit" zeigt die Komplexität und Herausforderung zur umfassenden Beschreibung dieses Begriffs. Die wesentlichen Parameter zur Bestimmung und Vorhersage von thermischer Behaglichkeit ist die Lufttemperatur, Temperatur der umgebenden Flächen, Strömungsgeschwindigkeit der Luft, Luftfeuchtigkeit, Geruchsstoffe sowie die CO_2-Konzentration. Außerdem unterscheidet sich der individuelle Einfluss des Empfindens von Behaglichkeit bei jedem Menschen je nach Alter, Geschlecht, körperlicher Betätigung, Bekleidung, körperlicher und psychischer Verfassung sowie der Aufenthaltsdauer im Raum. Neben physiologischen sind auch soziale und kulturelle Aspekte entscheidend. Die individuellen Parameter und Umgebungsparameter sind stark voneinander abhängig bzw. miteinander verknüpft (Dornigg 2014). Aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen unterschiedliche Wahrnehmung von Behaglichkeit bei Betrachtung verschiedener individueller Aspekte. Bei gleichen thermischen Bedienungen sind Männer öfter zufrieden als Frauen. Frauen nehmen vor allem niedrige Temperaturen als nicht behaglich war (Choi et al. 2010; Forgiarini Ruppa et al. 2015; Mishra et al. 2016). In Bezug auf das Alter bevorzugen ältere Menschen höhere Temperaturen als jüngere (Forgiarini Ruppa et al. 2015). Wenn NutzerInnen Einfluss auf Behaglichkeitsparameter haben, erhöht sich der thermische Komfort, die Gesamtzufriedenheit und die Produktivität. Das Bewusstsein der „Einflussmöglichkeiten" alleine erhöht die Zufriedenheit (Mishra et al. 2016). Die größte Angst in Bezug auf die Zufriedenheit der InsassInnen besteht, wenn ein Gebäude und seine Systeme zu kompliziert oder nicht beeinflussbar sind (de Dear et al. 2013). Die Simulation von thermischer Behaglichkeit ist aufgrund des starken Einflusses von nicht berücksichtigbaren individuellen Größen schwierig. Sie kann jedoch eine Tendenz aufzeigen, um Erkenntnisse zu gewinnen und Maßnahmen einzuleiten (Dornigg 2014).

4.2 SIMULATIONSMODELLE

4.2.1 Randbedingungen

Die Randbedingungen sind ein wesentlicher Faktor für aussagekräftige Ergebnisse eines Simulationsmodells. Diese wurden in mehreren Schritten adaptiert und verbessert, um die realen Einflussgrößen bestmöglich abzubilden. Die Randbedingungen, welche berücksichtigt wurden, sind:

- Wärmeleistung im Brennraum im zeitlichen Verlauf
- Abgasvolumenstrom im zeitlichen Verlauf
- Wärmeübergangskoeffizienten im Zugsystem und an Kachelofenoberfläche
- Umgebungsbedingungen
- Spezifische Stoffdaten

4.2.2 Kachelofen-Simulationsmodelle

Für die Simulationsmodelle wurde der Festkörper mit den physikalischen Eigenschaften von Schamotte und das Negativvolumen („Luftkörper") mit den Eigenschaften von Luft definiert. Die Vernetzung in finite Elemente erfolgte nach Optimierung mittels Konvergenzstudie und ergab für das Luftvolumen rund 500.000 und für den Schamottekörper rund 75.000 Elemente. Aus den Kachelofenmodellen wurden der Einfluss des Kachelofen-Aufbaus (Hüllenaufbau, Zugverlauf, Türanordnungen und Brennräume) analysiert. Abb. 3 zeigt von einem Kachelofenmodell den Festkörper und das Luftvolumen eines Simulationsmodells.

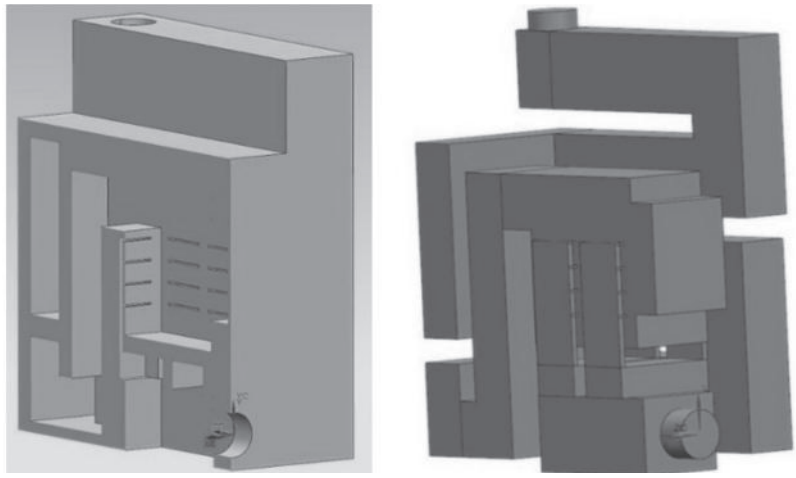


Abb. 3: Kachelofenmodelle – Schnitt Festkörper (li); Luftvolumen (re)

4.2.3 Auswirkungen im Raum um den Kachelofen

Die Position des Kachelofens im Aufstellraum hat einen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturzonen im Raum. Die Ergebnisse aus den Simulationsmodellen zeigen anhand eines Beispiels für eine Couch, was die Erfahrung bestätigt. Bei seitlicher Position des Kachelofens außerhalb des Strahlungsbereichs beeinflusst vor allem die Lufttemperatur die Behaglichkeit. Wenn die Couch im Blickfeld des Kachelofens steht, beeinflusst sowohl die Strahlung als auch die Lufttemperatur die gefühlte Temperatur für die Personen auf der Couch und es bilden sich mehrere Temperaturzonen aus. Dadurch können Personen leichter einen individuell behaglichen Bereich wählen (Abb. 4).

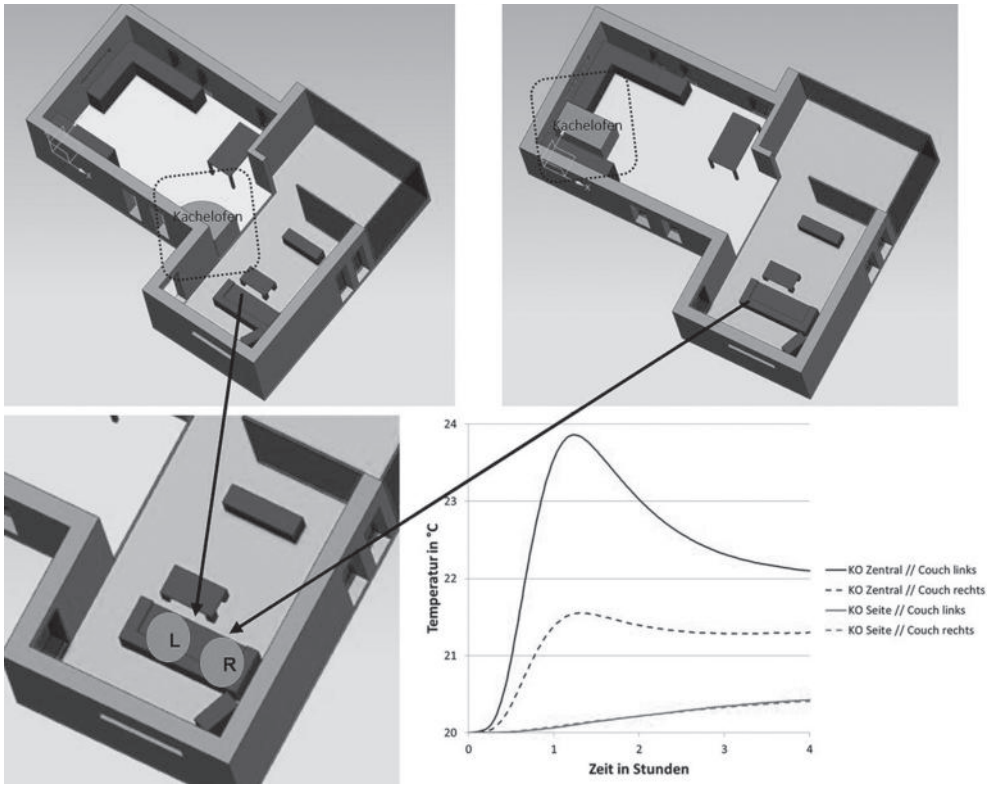


Abb. 4: Einfluss der Position des Kachelofens

Außerdem wurde mit Kachelofen-Simulationsmodellen der Einfluss der Wandaufbauten im Aufstellraum analysiert. Die Raumwände wurden aus Beton und aus Holz gewählt. Im Vergleich der Wandaufbauten von Holz und Beton kann man Unterschiede in den Lufttemperaturen trotz identischer Wärmeleistung im Raum feststellen. Aufgrund der höheren Wärmekapazität und der höheren Wärmeleitfähigkeit von Beton wird mehr Energie in den Wandflächen eingelagert als bei den Wandaufbauten aus Holz. Daraus resultiert, dass die Lufttemperaturen bei den Wandaufbauten aus Holz um 2 bis 3 °C höher sind als bei dem Beispiel mit Betonwänden.

4.2.4 Validierung

Die Validierung der Simulationsmodelle erfolgte mit Messungen in der Versuchsanstalt der Hafner Österreichs. Dabei wurden bei zwei Kachelöfen (jeweils einer in Bauweise mit und einer ohne Luftspalt) die Temperaturen an der Ofen-Oberfläche, im Schamotte-Festkörper und im Abgas mit Thermoelementen und der Wärmebildkamera erfasst. In den finalen Modellen zeigen die Ergebnisse der Simulation hohe Übereinstimmung zu den Messdaten sowie eine gute Reproduzierbarkeit bei unterschiedlichen Bauformen und Umgebungsbedingungen. Die beiden Temperaturverläufe der Kachelofenoberflächen an verschiedenen Punkten geben dies grafisch wieder (Abb. 5).

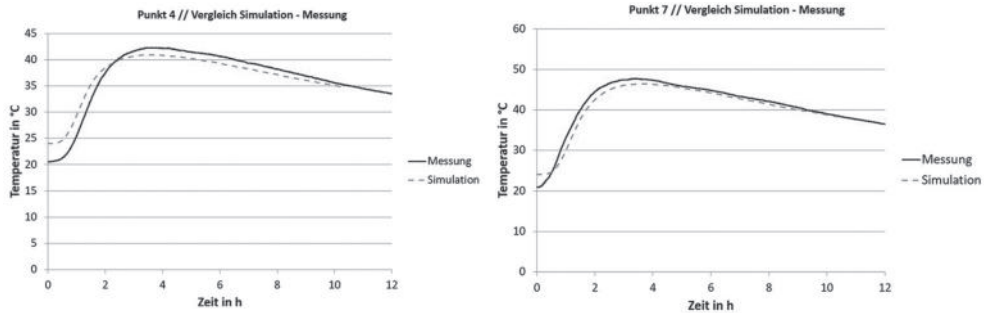


Abb. 5: Vergleich Temperaturverläufe Messung und Simulation

5. ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Beim Kachelofen ist das thermische Verhalten komplex und zu jeder Zeit variabel. Deshalb wurde im Rahmen des geförderten FFG-Projektes „KachelofenSimulation" ein gekoppeltes thermisches und numerisches Strömungsmodell erstellt. Dieses bildet eine gute Grundlage zur Betrachtung der Behaglichkeit in Räumen und ermöglicht die gezieltere Versuchsplanung für weitere Forschungsfragen. Die Validierung der Simulationsmodelle erfolgte mit Messungen in der Versuchsanstalt des Österreichischen Kachelofenverbandes. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts „KachelofenSimulation" liefern eine gute und fundierte Grundlage für das „System Kachelofen". Damit kann zukünftig der Kachelofen als „Blackbox" für eine detaillierte Betrachtung der Interaktionen von Kachelofen in Wohnräumen bzw. ganzen Gebäudeeinheiten betrachtet werden.

LITERATUR

Choi J., Aziz A., Loftness V. (2010) Investigation on the impacts of different genders and ages on satisfaction with thermal environments in office buildings. Building and Environment 45, p. 1529-1535

de Dear R, Akimoto T, Arens E. (2013) Progress in thermal comfort research over the last twenty years. Indoor Environmental Quality (IEQ)

Dornigg I. (2014) Einsatz der Gebäudesimulation zur Evaluierung der thermischen Behaglichkeit, Masterarbeit Fachhochschule Oberösterreich

Forgiarini Ruppa R., Giraldo Vásquezb N., Lambertsa, R. (2015) A review of human thermal comfort in the built environment. Energy and Buildings 105, p. 178-205

Mishra A.K., Loomans M.G.L.C., Hensen J.L.M. (2016) Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions – An overview, Building and Environment 109, p. 82-100

Kontaktdaten:
Johannes Mantler
Dassanowskyweg 8
1220 Wien
Email: mantler@kachelofenverband.at

Effizienzsteigerung einer Müllverbrennungsanlage durch Integration einer Rauchgaskondensation

S. Huemer
FH Burgenland, Pinkafeld, Österreich

ABSTRACT: Fossil fuels are used for the production of electricity and heat. Carbon dioxide goes into the atmosphere through the combustion process of fossil fuels and increases the concentration in it. (BMNT 2018) One approach to decarbonising the energy systems involves the project „ Waste heat from flue gas cleaning “, which deals with the heat recovery in the waste incineration plant Spittelau (Green Energy Lab 2020). Condensation enthalpy is released by the cooling of the flue gas. This serves as a heat source for a heat pump. The diploma thesis considers the efficiency increase of the existing waste incineration plant by the heat recovery system. For this purpose, measurement data from the process control system is used for the analysis. A simulation of the flue gas condensation provides the usable heat flow potential as well as the amount of condensate. Subsequently, a calculation of the efficiency increases due to the integration of the heat pumps. Further considerations are the process recovery of the condensate in the waste incineration plant and the possibilities of waste heat utilization of the heat pump and heat recovery from condensate. The existing plant has an efficiency of 83.70 % (average of 7,268 h/year). This value can be increased by 12.86 % due to the installation of the flue gas condensing units. The resulting condensate (about 9 kg/h per line) can be completely recycled into the existing water cycle after appropriate treatment steps. The saving of water is 117.840 m³/year. The accumulated waste heat of approx. 582 kW cannot be usefully used in the plant since the investigated process is discontinuous. An alternative use by a heat pump could further increase the efficiency. The diploma thesis work shows the efficiency increase of the waste incineration plant as well as the possibilities of condensate recirculation. The use of waste heat from heat pump and condensate waste heat can take place through another heat recovery system. In the future, a holistic view of waste incineration or biomass plants can lead to a further increase in the efficiency of the entire plant and thus promote decarbonisation. In the course of the measurement data evaluation, the turbine oil cooling turned out to be another waste heat source, which is not considered in the diploma thesis. (Huemer 2019)

1. EINLEITUNG

Die Bereitstellung von elektrischer Energie und Wärme erfolgt größtenteils über die Verbrennung von fossilen Brennstoffen und führt zwangsweise zum Ausstoß von Kohlendioxid (CO_2) (BMNT 2018). Das Projekt „Abwärme aus Rauchgasreinigung“ der Wien Energie beschäftigt sich mit der Rückgewinnung von Wärme in der Müllverbrennungsanlage (MVA) Spittelau in Wien. (Green Energy Lab 2020) Es wird angedacht das Reingas (=Abgas nach der zweistufigen Nasswäsche), durch entsprechende Umbauten, weiter abzukühlen und die durch Kondensation freiwerdende Energie mittels Wärmepumpe zu nutzen. Das anfallende Kondensat soll durch eine Wasser-Aufbereitungsanlage wiederverwendbar gemacht und in den Prozess rückgeführt werden. Die neue Wärmepumpenanlage erzeugt zudem Abwärme, welche in der Müllverbrennungsanlage genutzt werden könnte. In der Masterarbeit (Huemer 2019) werden drei konkrete Fragestellungen abgehandelt:

- Wie kann durch eine Rauchgaskondensationsanlage die Effizienz einer Müllverbrennungsanlage gesteigert werden?
- Welche Qualität des Kondensates ist für eine Rückführung in andere Prozesse erforderlich und welche Wasseraufbereitungs-Schritte sind hierzu notwendig?
- Wie kann die anfallende Abwärme der Wärmepumpen unter Berücksichtigung von technischen Aspekten in der bestehenden Anlage genutzt werden?

2. EVALUIERUNG EFFIZIENZSTEIGERUNG

Zur Evaluierung einer Effizienzsteigerung erfolgt zu Beginn eine Betrachtung der Ist-Situation der Anlage und deren Kennziffern. Zur Ermittlung des Wärme- sowie Wasserrückführungpotentiales werden Simulationen sowie gemessene Prozesswerte verwendet und für die Evaluierung der nutzbaren Energie bzw. des Wassers interpretiert.

2.1 BESCHREIBUNG MÜLLVERBRENNUNGSANLAGE SPITTELAU

Die Müllverbrennungsanlage besteht aus zwei Müllverbrennungskessel (zwei baugleiche Verbrennungslinien 16 t/h Müll) inkl. einem zusammenhängenden Wasser-Dampf-Kreislauf (60 t/h Frischdampf bei 400 °C, 40 bar, einer Rauchgasreinigung (Zusammenführung der Abgasströme vor der Denox) einem Wasserkreislauf und einer Abwassereinigung. Der erzeugte Dampf der beiden Anlagen produziert zudem Strom durch Antrieb einer Turbine. Der Rauchgasweg vom Kessel bis hin zu den Tropfenabscheidern der 2-Stufigen Wäsche.

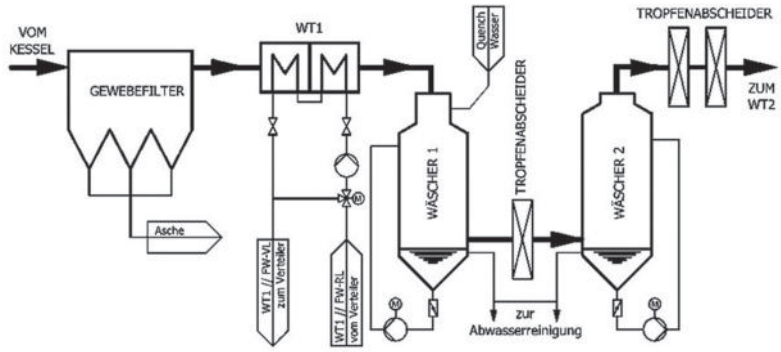


Abb. 1: Rauchgasreinigung (Entstaubung+2-Stufige Nasswäsche)

Das abgekühlte Rauchgas verlässt den Abhitzekessel mit ca. 180 °C und durchströmt den Gewebefilter. Das Rauchgas verlässt den Filter mit einer Temperatur von 170 °C und wird anschließend durch das Wärmeverschubsystem im Wärmetauscher (WT 1) auf 130 °C abgekühlt. Das abgekühlte Rauchgas wird in der Quench durch Eindüsung von Kaltwasser weiter abkühlt (60 - 65 °C). Das Rauchgas strömt durch einen Tropfenabscheider seitlich in die zweite Reinigungsstufe (Abtrennung SO_2) ein. Anschließend durchlaufen die beiden Gasströme der jeweiligen Linie die Entstickungsanlage und gelangen über den Kamin ins Freie. Die neue Rauchgaskondensationsanlage sollte nach der zweiten Wäscherstufe installiert werden.

2.2 NEUE RAUCHGASKONDENSATIONSANLAGE

Eine neue Kondensationskolonne soll die Enthalpie von kondensiertem Wasserdampf nutzbar machen (vgl. Abb. 2). Das Rauchgas gelangt seitlich nach der 1.Stufe der nassen Reinigung in den Wäscher 2, worin im Gegenstromprinzip Schwefeldioxid durch das zirkulierende Wäscherwasser absorbiert wird. Eine neue Kondensationskolonne wird auf den bestehenden Wäscher platziert. Eine Pumpe leitet das Kondensat aus dem Tank zurück zur Kondensationsanlage. Dazwischen erfolgt die Wärmeübergabe an einen Zwischenkreislauf der Wärmepumpe (Verdampferkreislauf) und Wasser kann ausgeschleust werden. Elektrische Energie treibt einen Verdichter im Kältekreislauf an. Die Wärmeabfuhr und Verflüssigung des Kältemittels finden im Kondensator (KD) statt. Diese Energie hebt das Temperaturniveau des Fernwärme-Rücklaufwassers auf Vorlauftemperatur an.

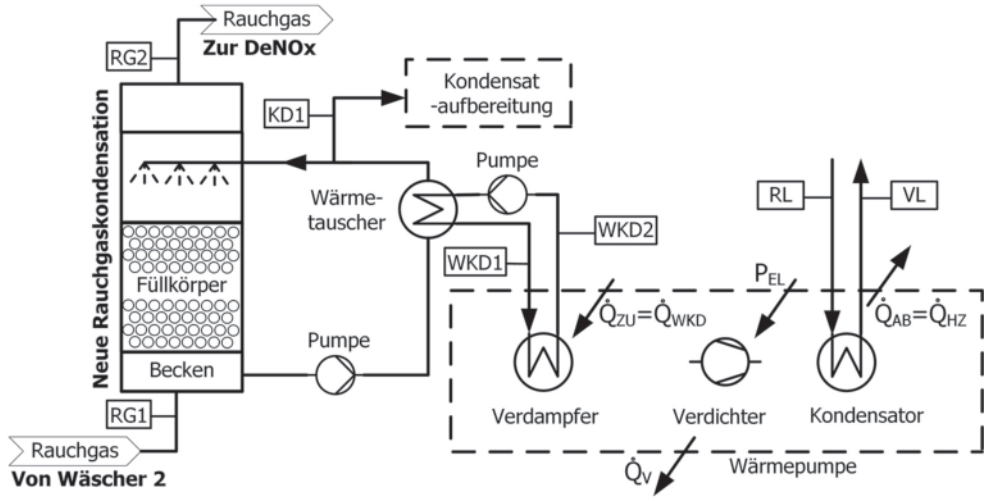


Abb. 2: Rauchgaskondensationsanlage

2.3 ENERGIEBILANZ MÜLLVERBRENNUNGSANLAGE

Durch die Integration der neuen Rauchgaskondensationsanlagen und deren Wärmepumpen verändert sich die Energiebilanz der Müllverbrennungsanlage. Die Bilanzgrenze und deren Leistungswerte finden sich in Abb. 3 wieder.

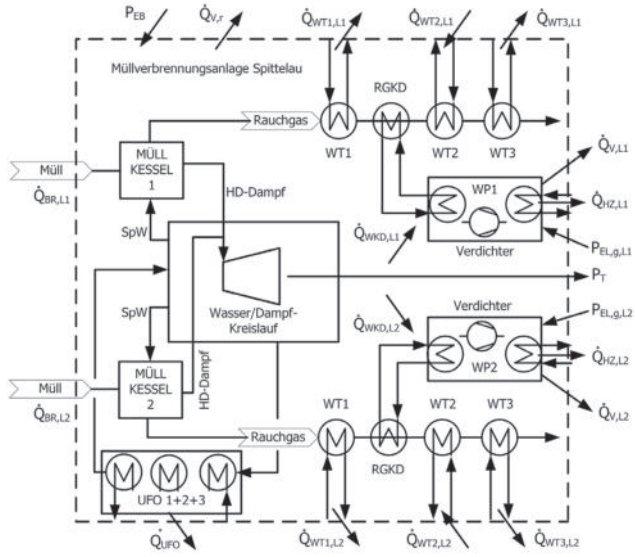


Abb. 3: Energiebilanz MVA Spittelau

Die Evaluierung erfolgt auf Basis von Messdaten (insgesamt 7.267 Messpunkte). Die Berechnung des Anlagenwirkungsgrades vor dem Umbau erfolgt über eine Energiebilanz (1) und lautet:

$$\dot{Q}_{BR,L1} + \dot{Q}_{BR,L2} + P_{EB} + \dot{Q}_{WT2,L1} + \dot{Q}_{WT2,L2} = \dot{Q}_{UFO} + \dot{Q}_{WT1,L2} + \dot{Q}_{WT3,L2} + \dot{Q}_{WT1,L1} + \dot{Q}_{WT3,L1} + \dot{Q}_{V,r} + P_T \quad (1)$$

Durch die Kenntnis der Leistungen kann der Wirkungsgrad gemäß Gleichung (2) berechnet werden:

$$\eta_\alpha = \frac{\dot{Q}_{UFO} + P_T - P_{EB} - \dot{Q}_{WT2,L1} - \dot{Q}_{WT2,L2} + \dot{Q}_{WT1,L1} + \dot{Q}_{WT3,L1} + \dot{Q}_{WT1,L2} + \dot{Q}_{WT3,L2}}{\dot{Q}_{BR,L1} + \dot{Q}_{BR,L2}} \quad (2)$$

Die Berechnung erfolgt für jeden Messpunkt im Programm Excel. Der Medianwert wird als Grundlage verwendet. Die Daten sind in Tab. 1 dargelegt (Datum 08.11.2016):

Tab. 1: Kennzahlen MVA Spittelau ohne WP

Wärmestromdaten	ZU/AB Leistung	Bezeichnung	Kennzahl	Einheit
Brennstoffleistung L1	ZU	$\dot{Q}_{BR,L1}$	44.570	kW
Brennstoffleistung L2	ZU	$\dot{Q}_{BR,L2}$	43.760	kW
Wärmeleistung WT1 – L1	AB	$\dot{Q}_{WT1,L1}$	1.499,68	kW
Wärmeleistung WT2 – L1	ZU	$\dot{Q}_{WT2,L1}$	1.695,75	kW
Wärmeleistung WT3 – L1	AB	$\dot{Q}_{WT3,L1}$	965,72	kW
Wärmeleistung WT1 – L2	AB	$\dot{Q}_{WT1,L2}$	1.534,55	kW
Wärmeleistung WT2 – L2	ZU	$\dot{Q}_{WT2,L2}$	2.093,59	kW
Wärmeleistung WT3 – L2	AB	$\dot{Q}_{WT3,L2}$	976,36	kW
Wärmeleistung UFO 1+2+3	AB	$\dot{Q}_{UFO}$	63.744	kW
Wärmeverlust gesamt	AB	$\dot{Q}_{V,r}$	-*	kW
Elektrische Turbinenleistung	AB	P_T	12.960	kW
Elektrischer Eigenbedarf	ZU	P_{EB}	3.680,07	kW

*berechnet aus Energiebilanz

Die Verlustleistung beträgt 14.119 kW und der Wirkungsgrad im Medianwert 84 %.
Die Berechnung des Wirkungsgrades inkl. Rauchgaskondensation wird aus der Energiebilanz gemäß Gleichung 3 wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{BR,L1} + \dot{Q}_{BR,L2} + P_{EB} + P_{EL,g,L1} + P_{EL,g,L2} + \dot{Q}_{WT2,L1} + \dot{Q}_{WT2,L2} = \dot{Q}_{UFO} + \dot{Q}_{V,r} + P_T + \dot{Q}_{HZ,L1} + \dot{Q}_{HZ,L2} + \dot{Q}_{V,L1} + \dot{Q}_{V,L2} + \dot{Q}_{WT1,L2} + \dot{Q}_{WT3,L2} + \dot{Q}_{WT1,L1} + \dot{Q}_{WT3,L1} \quad (3)$$

Die Formel für den Wirkungsgrad (Gl. 4) lautet:

$$\eta_\omega = \frac{\dot{Q}_{UFO} + P_T - P_{EB} - \dot{Q}_{WT2,L1} - \dot{Q}_{WT2,L2} + \dot{Q}_{WT1,L1} + \dot{Q}_{WT3,L1} + \dot{Q}_{WT1,L2} + \dot{Q}_{WT3,L2}}{\dot{Q}_{BR,L1} + \dot{Q}_{BR,L2}} + \frac{\dot{Q}_{HZ,L1} + \dot{Q}_{HZ,L2} - P_{EL,g,L1} - P_{EL,g,L2}}{\dot{Q}_{BR,L1} + \dot{Q}_{BR,L2}} \quad (4)$$

Zur Berechnung werden die Ausgangskennzahlen gemäß Tab. 1 verwendet. Als zusätzlicher Wärmebedarf im WT2 werden 200 kW angenommen (Addition zum Ausgangswert). Die Kennzahlen der Wärmepumpe stammen vom Hersteller (vgl. Tab. 2).

Tab. 2: Kennzahlen Wärmepumpen

Wärmestromdaten	ZU/AB Leistung	Bezeichnung	Kennzahl	Einheit
Kondensatorleistung WP L1	AB	$\dot{Q}_{HZ,L1}$	7.906	kW
Abwärme Wärmepumpe L1	AB	$\dot{Q}_{V,L1}$	376	kW
Kondensatorleistung WP L2	AB	$\dot{Q}_{HZ,L2}$	7.906	kW
Abwärme Wärmepumpe L2	AB	$\dot{Q}_{V,L2}$	376	kW
Elektrische Leistungsaufnahme L1	ZU	$P_{EL,L1}$	1.933	kW
Gesamte elektr. Leistungsaufnahme L1	ZU	$P_{EL,g,L1}$	2.033	kW
Elektrische Leistungsaufnahme L2	ZU	$P_{EL,L2}$	1.933	kW
Gesamte elektr. Leistungsaufnahme L2	ZU	$P_{EL,g,L2}$	2.033	kW

Bei Integration einer Rauchgaskondensation inkl. Wärmepumpen beträgt die Verlustleistung 2.021 kW und der Wirkungsgrad 96,8 %.

2.4 KONDENSATRÜCKFÜHRUNG

Durch die Abkühlung des Rauchgases fallen je Verbrennungslinie ca. 9 m³/h an Kondensat an. In diesem Betrachtungsschritt wird die Rückführung in den Prozess ermittelt. Hierzu werden unterschiedliche Wasserverbraucher im Kraftwerk auf deren Anforderungen betrachtet. Die Evaluierung ergibt eine mögliche Rückführung in den Prozess (nach einer Umkehrsomoseanlage (UO) - vgl. Abb. 4).

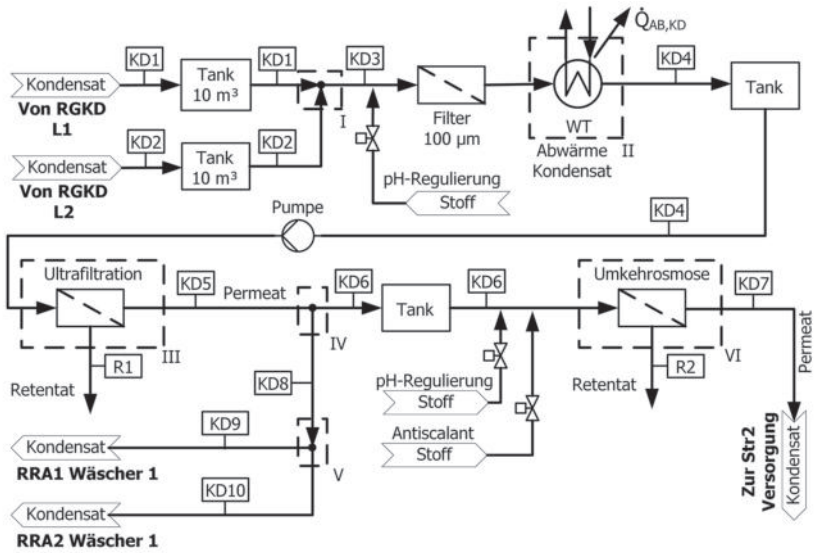


Abb. 4: Kondensatrückführung

Ein Großteil der Kondensatmenge wird als Quenchwasser im Wäscher 1 der beiden Linien verwendet. Der Rest wird aufbereitet und in den KW-Kreislauf eingespeist.

2.5 WÄRMERÜCKGEWINNUNG

Zur Einhaltung der Betriebsbedingungen der UO (in Abb. 4 dargestellt) wird eine Kondensatkühlung erforderlich. Die vorhandene Leistung beträgt 206 kW bei 43 °C nutzbarem Temperaturniveau. Die beiden neuen Wärmepumpen ergeben je 188 kW nutzbare Abwärme bei 40 °C. Zur Evaluierung werden Messdaten aus dem PLS verwendet.

3. ERGEBNISSDARSTELLUNG

Die Ergebnisse der drei Evaluierungen erfolgen in Hinblick auf die Wirkungsgradsteigerung, die Kondensatrückführung sowie die Wärmerückgewinnung.

3.1 WIRKUNGSGRADSTEIGERUNG

Zu Beginn wird die bestehende Anlage auf deren Wirkungsgrad analysiert. Anschließend wird die Integration der Wärmepumpe in den gesamten Müllverbrennungsprozess analysiert. Die Wirkungsgradverteilung der bestehenden Anlage wird in Abb. 5 dargestellt.

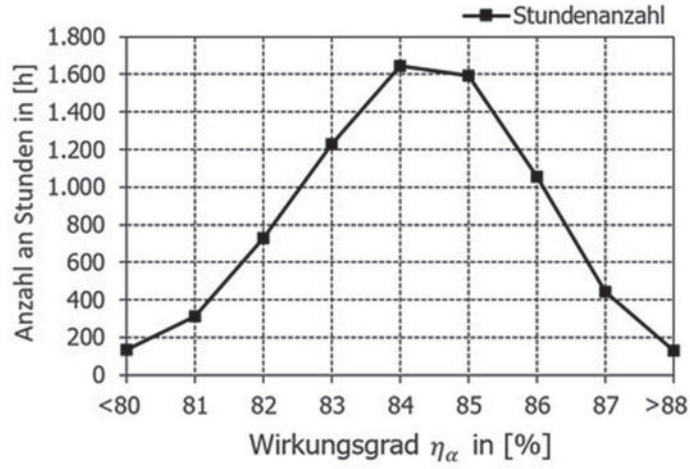


Abb. 5: Wirkungsgradverteilung Bestandsanlage

Im Medianwert betrug der Wirkungsgrad 84 %, wobei dieser durch die Integration der Kondensationsanlage auf beinahe 97 % gesteigert werden kann.

3.2 WÄRMERÜCKGEWINNUNG VON ABWÄRME

Die Evaluierung ergibt keine nützliche Abwärmenutzung im Kraftwerks-Prozess. Eine zusätzliche Wärmepumpe könnte die vorhandene Leistung (582 kW) als Wärmequelle nutzen.

3.3 KONDENSATRÜCKFÜHRUNG

Abb. 6 zeigt das Ergebnisschema der Kondensatrückführung.

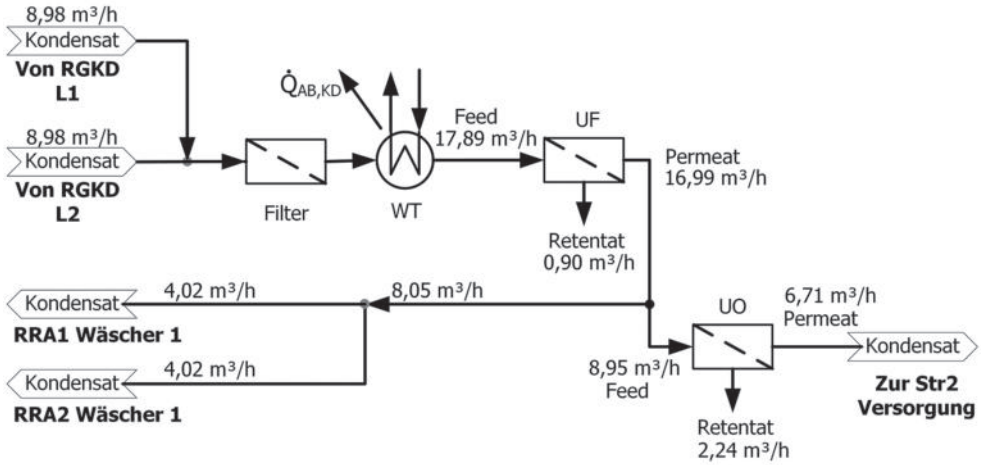


Abb. 6: Ergebnisschema Kondensatrückführung

Bei 8.000 Betriebsstunden pro Jahr kann durch die Rückführung in die Wäscher (je 4,02 m³/h) und die Nutzung im Kühlwasserkreislauf (6,71 m³/h Str2 Versorgung) insgesamt der Frischwasserbedarf um 117.840 m³/a reduziert werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND CONCLUSIO

Die Masterarbeit wurde im Zuge des Projektes „Abwärme aus Rauchgaskondensation" verfasst. Das Projekt beschäftigt sich mit der Nutzung vorhandener Abwärme im Rauchgas der Müllverbrennungsanlage Spittelau in Wien. Es wird angedacht, das Rauchgas durch einen neu zu installierenden Füllkörperwäscher abzukühlen und die dabei freiwerdende Kondensationsenthalpie als Wärmequelle für eine Wärmepumpe zu nutzen. Durch die Prozessführung fällt kontinuierlich Kondensat und Abwärme der Wärmepumpen an. Diese Potentiale sollten in der bestehenden Anlage genutzt werden. Es erfolgte eine Evaluierung der Effizienzsteigerung. Die Analyse des Wirkungsgrades ergibt eine Kennzahl von ca. 84 %. Die neue Rauchgaskondensationsanlage bewirkt eine Steigerung des Wirkungsgrades um 12,86 %. Das anfallende Kondensat kann in den bestehenden Wasserkreislauf bzw. als Nachspeisewasser in den beiden Wäschern verwendet werden. Die gesamte Wassereinsparung pro Jahr beträgt 117.840 m³ bei 8.000 Betriebsstunden pro Jahr. Bei der Evaluierung der Abwärmenutzung stellte sich nur ein potenzieller Abnehmer der Wärme heraus. Aufgrund der diskontinuierlichen Prozessführung wird eine alternative Nutzung durch eine zusätzliche Wärmepumpe betrachtet. Diese verwendet die gesamte Abwärme von 582,5 kW als Wärmequelle.

Zusammenfassend kann aus den Evaluierungen abgeleitet werden, dass eine Effizienzsteigerung hinsichtlich Wasser und Wärme sinnvoll ist und dadurch die Effizienz der Gesamtanlage gesteigert sowie Rohstoffe eingespart werden können. Im Zuge des Analyseprozesses ist eine weitere Abwärmequelle in der Müllverbrennungsanlage aufgefallen. Die Turbinenölkühlung produziert nutzbare Wärme in der Höhe von mehreren hunderten Kilowatt, welche ungenutzt durch Kühlwasser aus dem Prozess ausgeschleust wird. Es gibt nach wie vor Potenziale, die als mögliche Quellen verwendet werden können, wobei hierzu weitere Analysen erforderlich sind.

LITERATUR

BMNT (2018) Energie in Österreich 2018 - Zahlen, Daten, Fakten, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018. [Online]. Available: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:0e730011-73d9-456c-8e2b-589f0b3f83f2/Energie_in_OE2018_Barrierefrei.pdf. [Zugriff am 22 09 2020]

Green Energy Lab (2020) Projekt Thermaflex, 2020. [Online]. Available: https://greenenergylab.at/projects/wien-high-temperature-heat-pump-spittelau/ [Zugriff am 22 09 2020].

Huemer St. (2019) Effizienzsteigerung einer Müllverbrennungsanlage durch Integration einer Rauchgaskondensation, Masterarbeit an der FH-Burgenland GmbH, Pinkafeld [Online]. Available: https://fh-burgenland.contentdm.oclc.org/digital/collection/p15425dc/id/86231

Kontaktdaten:
Stefan Huemer
Ohlsdorfer Straße 53
4694 Ohlsdorf
Email: stefanhuemer17@yahoo.de

Untersuchung eines Elektroabscheiderkonzepts zur Reduktion von Staubemissionen

F. Schittl, G. Jauschnik
Forschung Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich
M. Pöttler
Herz Energietechnik GmbH, Pinkafeld, Österreich
J. Krail
FH Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich

ABSTRACT: Particulate emissions are formed during the combustion of biogenic fuels depending on the type of furnace, the operating conditions in terms of the combustion quality and the different fuel properties. The release of especially small particles often leads to health problems such as the development or worsening of lung diseases. Downstream electrostatic precipitators (ESP) represent a state of the art separation technology in medium and large biomass plants. However, these precipitators are often difficult to implement in smaller furnaces due to economic aspects and space constraints. This study deals with the integration and experimental investigation of an ESP system into the boiler body of a small scaled biomass furnace (< 100 kW). In Addition to the full load behaviour of the firing system, further test arrangements with different part load conditions of the boiler are being considered in order to analyse the particle precipitation under realistic plant operation with regard to flue gas properties and flow conditions. Furthermore, different fuels are considered. Both, discontinuous as well as time-resolved aerosol measuring methods are used to determine particulate matter emissions. The results of the discontinuous dust measurements show that with the integrated ESP, at least 50 % of the particles in the fine dust range are separated, both at full and partial load operation of the boiler, irrespective of the fuel used. Furthermore, it is shown that partial load conditions favour the separation efficiency due to low velocities and low temperatures of the gas flow over the discharge electrode, which is situated in the reversing chamber. Accordingly, the separation efficiency in part load is between 65 and 85 %, depending on fuel used. In order to enable a more precise observation of the separation behaviour with regard to particle size, additional continuous ELPI (electrical low pressure impactor) measurements are carried out for a selected fuel (wood chips). These measurements show that for small particle collectives (d_p < 1 µm) separation efficiencies of over 55 % (full load) and over 80 % (part load) are achieved.

1. EINLEITUNG

Die thermische Verwertung sowie die Verstromung von biogenen Brennstoffen wird, je nach Bereitstellungskette, den erneuerbaren Energiequellen hinzugezählt und trägt somit maßgeblich zur Verringerung der CO_2-Emissionen bzw. der Energiewende bei. Im Jahr 2017 nimmt beispielsweise die Verwertung fester Biomasse mit rund 42 % einen erheblichen Prozentsatz an der erneuerbaren Energiebereitstellung der EU ein (Eurostat 2019). Diese thermochemische Umwandlung des biogenen Brennstoffs führt jedoch auch zu einer erhöhten Emission an staubförmigen Abgasbestandteilen, welche wiederum gesundheitliche Beschwerden wie z. B. Atemwegserkrankungen hervorrufen (vgl. Donaldson et al. 2002). Die Entstehung sowie die Eigenschaften dieser feinen Aerosole hängen von einer Vielzahl an Faktoren wie z. B. dem Feuerungstyp, dem Betriebsverhalten oder von dem verwendeten Brennstoff ab (Obaidullah et al. 2018).

Eine vielversprechende Möglichkeit der Abscheidung dieser umwelt- bzw. gesundheitsgefährdenden Feinstaubpartikel sind elektrostatische Abscheider, wobei diese aufgrund der Bauformen fast ausschließlich

als nachgeschaltete Teilanlage installiert werden. Eine ausführliche Diskussion hinsichtlich unterschiedlicher Einbindungsmöglichkeiten von elektrostatischen Abgasreinigungsanlagen (ESP) sind in den Arbeiten von Jaworek et al. (2007) und Obernberger & Mandl (2011) enthalten. Bologa et al. (2016) untersuchen die Wirkung solcher Partikelabscheider am Beispiel einer Biomasseverbrennungsanlage mit einer Nennleistung bis ca. 200 kW. Die nach dem Kessel installierte Elektrode, welche mit einer Hochspannung von ca. 30 kV versorgt wird, erreicht einen durchschnittlichen Gesamtabscheidegrad von etwa 80 %. Blank et al. (2015) führen sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen hinsichtlich der Wirkung von Elektroabscheidern anhand einer 26 kW-Pelletfeuerungsanlage durch. Die sägezahn-förmige Sprühelektrode wird dabei nach dem Aschebehälter zentral im Abgasrohr positioniert und mit einer Hochspannung von etwa 15 kV versorgt. Die mit Hilfe von Niederdruck-Berner-Impaktoren bestimmten Abscheidegrade für die PM1-Partieklfraktion bewegen sich zwischen 86,5 % (Volllast) und 91,5 % (Teillast). Die Simulationen stimmen gut mit den experimentellen Daten überein.

Bei Feuerungsanlagen im kleinen Leistungsbereich werden die eben erläuterten ESP-Konfigurationen, bei denen es sich im Wesentlichen um Add-On-Lösungen handelt, jedoch selten umgesetzt. Grund dafür sind einerseits hohe Investitionskosten sowie Platzbeschränkungen. Berhardt et al. (2017) untersuchen z. B. die Abscheideeffizienz eines integrierten Abscheiders am Bespiel eines 50 kW-Hackgutkessels. Dabei wird die Sprühelektrode, welche mit einer Spannung von etwa 30 kV versorgt wird, direkt in den Kesselkörper eingehängt. Aus den gravimetrischen Impaktormessungen geht hervor, dass je nach Brennstoff Gesamtabscheidegrade von etwa 89 % (Hackgut W40) bzw. 72 % (Holzbriketts) erreicht werden. Ein ähnlicher Ansatz zur Abscheiderimplementierung wird in der Arbeit von Kelz et al. (2019) vorgeschlagen. Die Sprühelektrode wird in einem speziell für variierende Brennstoffe konstruierten Biomassekessel mit einer Nennleistung von 50 kW direkt in den Wärmetauscher installiert. Neben diskontinuierlichen gravimetrischen Messmethoden kommen werden zusätzlich zeitkontinuierliche Staubmessungen mit einem elektrischen Niederdruck-Impaktor zum Einsatz. Insgesamt werden drei unterschiedliche Brennstoffe (Pellets, Pappel-Hackschnitzel und Maisspindel) vermessen. Bei Nennbetrieb werden für Partikel kleiner 1 µm Abscheidegrade zwischen 68 % (Pellets) und 90 % (Hackschnitzel) erreicht. Unter Teillastbedingungen können, je nach Brennstoff, zwischen 68 % (Maisspindel) und 85 % (Pellets) der PM1-Emissionen abgeschieden werden können.

2. MATERAILIEN UND METHODEN

2.1 EINBINDUNG DES ELEKTROSTATISCHEN ABSCHEIDERS

Das Integrationskonzept für den elektrostatischen Abscheider sieht vor, dass eine Sprühelektrode in den Kesselkörper, nach dem ersten Rauchrohrzug mittig in der unteren Wendekammer, positioniert wird (vgl. Abb. 1). Die umgebenden Metallflächen der Kesselbewandung bzw. die Wärmetauscherflächen des zweiten Rauchrohrzugs dienen dabei als Niederschlagselektrode. Die Sprühelektrode setzt sich aus zwei Plattenpaaren, bestehend aus je zwei gekrümmten Blechen, zusammen. Die beiden Bleche sind etwa 32 cm lang und 2,3 cm breit. Der Abstand zwischen den beiden Elektroden bzw. die Blechstärke beträgt 6 bzw. 0,5 mm. Die Elektrode wird samt Isolator (ca. 12 cm) mittig und ungefähr 32,1 cm über Null-Niveau in die Wendekammer des Kessels verbaut.

Die Untersuchung des integrierten elektrostatischen Partikelabscheiders erfolgt am Biomassekesselprüfstand der FH Burgenland. Dieser besteht im Wesentlichen aus dem von der Fa. Herz bereitgestellten Hackgutkessel (Type Firematic 100), welcher eine Nennleistung von 100 kW besitzt, den Kesselkreis mit Rücklaufanhebung und einem Pufferspeicher mit rund 6 m³ Speichervolumen. Der Speicher dient zur Aufnahme der abgegebenen Nutzwärme und kann gegebenenfalls über vorgesehene Kühlvorrichtungen entladen werden. Die Randbedingungen können somit konstant gehalten werden und ermöglichen auch längere Versuchszeiträume. Das im Kesselrücklauf verbaute Stellventil mit Magnetantrieb ermöglicht eine exakte Regelung der Rücklauftemperatur, welche die periodischen Vorlauftemperaturschwankungen kompensiert und in Kombination mit der drehzahlgeregelten Pumpe (konstanter Massenstrom) eine Regelung der vom Kessel abgegebenen Leistung ermöglicht. Die Messdatenerfassung bzw. Aufzeichnung erfolgt mittels LabVIEW®.

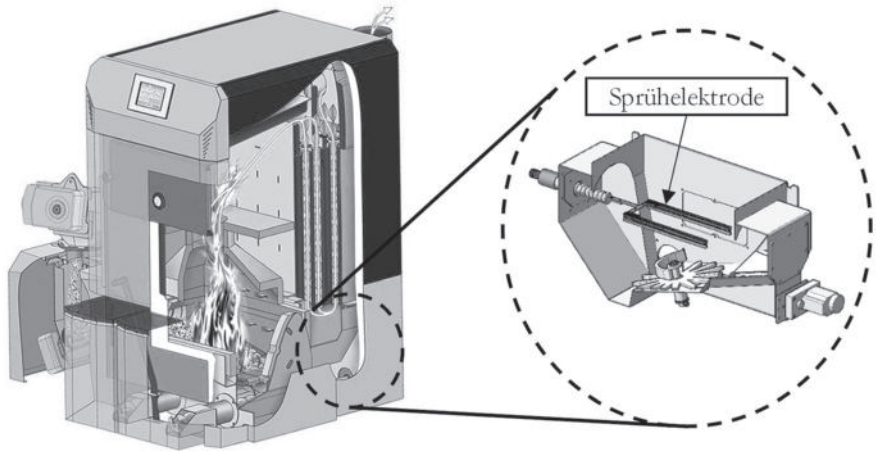


Abb. 1: Untersuchtes Integrationskonzept des elektrostatischen Abscheiders. Die aus zwei parallel angeordneten Platten bestehende Sprühelektrode wird nach dem ersten Wärmetauscherzug in der Wendekammer des Biomassekessels integriert

2.2 MESSMETHODIK

2.2.1 Diskontinuierliche Aerosolmessung

Sowohl die Messmethode mit dem drei-stufigen Jonas-Kaskaden-Impaktor (Fa. Gothe) als auch jene mit dem DGI (Dekati Gravimetric Impactor; Fa. Dekati Ltd.) nutzt die auf die unterschiedlich großen Partikel wirkenden Trägheitskräfte. Der Impaktor setzt sich demnach aus der Entnahmesonde, dem Einlaufkonus, den einzelnen Impaktorstufen sowie einer entsprechenden Begleitheizung, welche die Kondensation der im Abgas enthaltenen Feuchtigkeit verhindert, zusammen. Eine Impaktorstufe besteht wiederum aus einem Einlaufkonus, einer Prallplatte sowie einer mit geeigneten Filtern belegten Sammelplatte. Diese Messungen werden in Anlehnung an die VDI 2066 (2006) durchgeführt, wonach ein Teilstrom des beladenen Rauchgases isokinetisch entnommen und über den Impaktor geleitet wird. Bei den Feinstaubmessungen mit dem DGI wird zusätzlich zur Vorabscheidung grober Staubpartikel ein Zyklon vorgeschaltet. In den unterschiedlichen Stufen mit Trennkörnern von 2,5/10,0 µm bzw. 0,2/0,5/1,0/2,5 µm erfährt das Abgas eine Änderung der Strömungsrichtung. Folglich können Partikel die zu groß (schwer) sind dieser Richtungsänderung nicht folgen und werden auf dem Filter der jeweiligen Stufe abgeschieden. Mit sinkendem Trennkorndurchmesser steigen die wirkenden Kräfte auf die Staubteilchen, wodurch immer kleinere Partikel abgeschieden werden. Des Weiteren verfügen die Impaktoren über einen Endfilter, in dem nach der letzten Stufe im Abgas verbliebene Partikel zurückgehalten werden. Im Anschluss fließt das Abgas über einen wassergekühlten Wärmetauscher sowie über einen Silicagelbehälter, wo dessen Temperatur abgesenkt und die Feuchte auskondensiert wird. In weiterer Folge wird mit Hilfe eines Balgengaszählers das tatsächlich geförderte Normvolumen $\Delta V_{\mathrm{N,tr}}$ bestimmt. Die Partikelbeladung pro Stufe $\Delta m(d_P)$ wird durch Verwiegung der eingesetzten Filter (nach entsprechender Konditionierung im Ofen bzw. Exsikkator) vor und nach der Messung bestimmt. Aus der Gesamtbeladung und dem abgesaugten Rauchgasvolumen kann anschließend unter Zuhilfenahme von Gleichung 1 auf die Partikelkonzentration $y_{\mathrm{N,tr}}(d_P)$ zurückgerechnet werden.

$$y_{\mathrm{N,tr}}(d_P) = \frac{\Delta m(d_P)}{\Delta V_{\mathrm{N,tr}}} \tag{1}$$

2.2.2 Kontinuierliche Aerosolmessung

Die kontinuierliche Bestimmung des Feinstaubgehalts erfolgt unter der Zuhilfenahme eines elektrischen Niederdruck-Impaktors (ELPI) der Fa. Dekati Ltd. Bei diesem Messverfahren wird dem Rauchgas ebenfalls zunächst ein Teilstrom entnommen und in weiterer Folge mit Hilfe zweier in Serie geschalteten Mischer verdünnt. Das Funktionsprinzip der Mischer basiert auf der Ejektionsverdünnung, wonach Druckluft um eine Ejektordüse einen Druckabfall bewirkt und somit das Rauchgas verdünnt. In der Mischkammer wird eine homogene Vermischung sichergestellt. Beim Einsatz für die ELPI-Messung wird der erste Mischer auf das Temperaturniveau des abgesaugten Rauchgases erhitzt und der zweite bei Raumtemperatur betrieben. Es kann somit sichergestellt werden, dass keine Partikel vor der Verdünnung auskondensieren. Die Verdünnung vermindert zudem die Agglomeration der Partikel. Bei dem eingesetzten Modell liegen die Trennkörner der insgesamt 12 Impaktorstufen zwischen 0,04 und 9,24 µm. Der ELPI nutz dasselbe Trennprinzip wie die zuvor erläuterten Kaskaden- bzw. DGI-Impaktoren mit dem Unterschied, dass die Partikel vor Eintritt in den Impaktor elektrostatisch aufgeladen werden. Diese geben dann ihre Ladung auf jener Stufe, auf der sie abgeschieden werden, wieder ab. Auf Basis des so entstehenden Stromsignals $I(d_P)$ wird anschließend eine Anzahlverteilung der abgeschiedenen Partikel $N(d_P)$ unter Zuhilfenahme von Gleichung 2 berechnet. (Keskinen et al. 1992)

$$N(d_P) = \frac{I(d_P)}{E_{\mathrm{Ch}}(d_P)} \tag{2}$$

Darin kennzeichnet $E_{Ch}(d_P)$ eine Funktion zur Beschreibung der Ladungseffizienz, welche wiederum von mehreren Faktoren wie z. B. der durchschnittlichen Anzahl von Elementarladungen pro Partikel abhängt. Um nun massenbezogene Daten zu erhalten wird ein Korrekturfaktor für die Dichte und Form der Partikel berücksichtigt. Aufgrund der Heterogenität der Partikel ist es jedoch nicht möglich durch theoretische Überlegungen verlässliche Korrekturfaktoren zu bestimmen. Deshalb sind parallel zu den ELPI-Messungen weitere Daten notwendig (z. B. gravimetrische Impaktormessungen), um einen mittleren Korrekturfaktor zu generieren. Die exakten Berechnungsvorschriften für die Kalibrierung des ELPI-Signals in beispielsweise in Marjamäki et al. (2000) angeführt.

3. ERGEBNISSE

3.1 BEWERTUNG

Die experimentellen Testläufe werden entsprechend der in Abschnitt 2.2 erläuterten Staub- bzw. Feinstaubmessmethoden im waagrechten Abgasrohr nach dem Kessel durchgeführt. Die einzelnen Messungen können jedoch nicht zeitsynchron durchgeführt werden, da auf der Rohgasseite keine entsprechende Entnahmemöglichkeit zur Verfügung steht. Aus diesem Grund werden die Messungen in zeitlicher Abfolge nacheinander durchgeführt, wobei die Spannung der Sprühelektrode wechselweise ein- und ausgeschaltet wird. Insgesamt werden je Abscheiderstatus drei Messungen durchgeführt, um Abweichungen in den Messergebnissen entsprechend zu berücksichtigen. Die Bestimmung des Abscheidegrads der elektrostatischen Rauchgasreinigungsanlage $\eta(d_P)$ erfolgt demnach indirekt über die Konzentrationsangaben $y_{\mathrm{ESP,aus}}(d_P)$ bzw. $y_{\mathrm{ESP,ein}}(d_P)$ des jeweiligen Partikelkollektivs nach Gleichung 3.

$$\eta(d_P) = \frac{y_{\mathrm{ESP,aus}}(d_P) - y_{\mathrm{ESP,ein}}(d_P)}{y_{\mathrm{ESP,aus}}(d_P)} \tag{3}$$

Auf Grund der unterschiedlichen Messmethoden stehen auch Ergebnisse mit unterschiedlichen Informationstiefen zur Verfügung. Während jene Versuche mit variierendem Brennstoff die vielseitige Anwendung des Abscheiderkonzepts aufzeigen, ermöglichen die hinsichtlich des Partikeldurchmesser feiner aufgelösten Messungen eine Abschätzung des Gesundheits- bzw. Umwelteinflusses sowie einen tieferen Einblick in die Abscheidecharakteristik der einzelnen Partikelklassen. Die Abschätzung des Messfehlers erfolgt anhand der von Schröder et al. (2014) erläuterten Berechnungsvorschriften. Neben den isokinetischen Entnahmebedingungen gilt die Präzision der Gewichtsmessung der leeren bzw. beladenen Filter als maßgebender Einflussfaktor für die Messungenauigkeit (vgl. Kather & Woltersdorf 2013).

3.2 GESAMTABSCHEIDEGRAD FÜR PM2,5

Die Ergebnisse der gravimetrischen Staubmessungen sind in Tab. 1 für insgesamt vier unterschiedliche biogene Brennstoffe und jeweils zwei Lastbereiche aufgelistet. Neben den Verbrennungsbedingungen, welche beispielsweise durch den Sauerstoffgehalt repräsentiert werden, sind außerdem die gemessenen Roh- bzw. Reingaspartikelfraktionen mit einem Durchmesser $d_P \leq 2{,}5$ µm (bezogen auf einen Referenzsauerstoffgehalt von 13 %) sowie die erzielten Abscheidegrade angeführt.

Die ersten Versuche wurden mit herkömmlichen Holzpellets durchgeführt. Wie aus den Daten ersichtlich wird, stellen sich für diesen Brennstoff charakteristische Verbrennungsbedingungen, welche durch niedrige CO- (< 3 mg/m³$_N$) bzw. NO_x-Emissionen (67 bis 85 mg/m³$_N$) gekennzeichnet sind, ein. Die PM2,5-Konzentrationen, welche bei ausgeschalteten ESP gemessen wurden, können mit ca. 22,9 bzw. 10,9 mg/m³$_N$ im Teil- bzw. Nennlastfall beziffert werden. Bei aktiven ESP reduzieren sich die Partikelkonzentrationen im Teil- bzw. Nennlastbetrieb auf etwa 5,7 respektive 4,6 mg/m³$_N$. In Nennbetrieb ergibt sich somit ein Abscheidegrad für die PM2,5-Fraktion von 57,2 %, während bei reduzierter thermischer Last deutliche höhere Abscheidegrade von durchschnittlich 74,6 % erzielt werden können. Die vom Abscheider eingebrachte elektrische Leistung schwankt je nach Lastbereich zwischen 4 und 30 W.

Des Weiteren wurden Tests mit Hackgut durchgeführt, wobei zwei unterschiedliche Feuchtegehalte des Brennstoffs (W20 und W35) untersucht wurden. Betrachtet man zunächst die gasförmigen Emissionen, so erkennt man rasch, dass im Vergleich zu den Versuchen mit Pellets wesentlich höhere CO- bzw. NO_x-Emissionen vorliegen. Die CO-Konzentrationen liegen, je nach Lastzustand und Brennstofffeuchte, zwischen 69 und 234 mg/m³$_N$. Die Freisetzung von Stickoxiden ist mit durchschnittlich 114 mg/m³$_N$ nur geringfügig höher. Im Teillastbetrieb bei der Verbrennung von trockenen Hackgut (W20) kann bei ausgeschaltetem ESP ein PM2,5-Gehalt von etwa 43,5 mg/m³$_N$ gemessen werden, während im Nennbetrieb ca. 31,5 mg/m³$_N$ PM2,5-Partikel emittiert werden. Obwohl die soeben angeführten Rohgasbeladungen wesentlich höher sind als bei den Verbrennungsversuchen mit Pellets, unterscheiden sich die Abscheidegrade kaum von den vorherigen Versuchen. Die geringfügig schlechteren Abscheidegrade (50,1 und 72,2 %) spiegeln sich auch in der Performance des Abscheiders wieder. In der Teillastphase wird bei der Hackgutverbrennung bei einer annähernd gleichen Spannung von ca. 37,7 kV eine um etwa 40 % geringere Stromstärke (ca. 475 µA) erreicht, wodurch die zugeführte elektrische Leistung auf knapp 18 W abfällt.

Charakteristisch für die thermische Verwertung von Biomasse mit hohen Wassergehalt (W35) ist der mit teilweise bis zu 15 % hohe Wasserdampfanteil im Abgas. Im Hinblick auf die Partikelemissionen muss festgehalten werden, dass die Werte für die PM2,5-Fraktion im Rohgas, welche zwischen 19,2 und 28,5 mg/m³$_N$ liegen, vermutlich durch die vorliegenden Verbrennungsbedingungen sowie Abgaszusammensetzung deutlich geringer ausfallen. Um auch hier die Wirkung des elektrostatischen Abscheiders darzulegen, wird ebenfalls der Abscheidegrad, unter der Annahme gleicher Verbrennungsbedingungen für Versuche mit ein- bzw. ausgeschalteten ESP, berechnet. Die Messungen mit aktiven Elektroabscheider ergeben zwar geringe Feinstaubkonzentration von ca. 6,8 (Teillast) bzw. 13,2 mg/m³$_N$ (Nennlast), jedoch nehmen die Abscheidegrade mit 64,9 bzw. 53,6 % im Durchschnitt die geringsten Werte der untersuchten Brennstoffe ein. Nichtsdestotrotz lässt die gute Performance des Abscheiders hinsichtlich dessen Betriebspunkt vermuten, dass dennoch eine positive Wirkung durch die Implementierung der Elektrode gegeben ist. Im Teillastbetrieb wird z. B. eine der höchsten Werte für die elektrische Leistung des Abscheiders (ca. 25 W) gemessen.

Die letzte Versuchsanordnung beinhaltet die Untersuchung eines alternativen biogenen Brennstoffes. In diesem Fall werden Pressrückstände aus der Olivenölherstellung herangezogen. Dieser Brennstoff weist im Hinblick auf Schüttdichte, Heizwert, Wassergehalt sowie Elementarzusammensetzung ähnliche Eigenschaften wie Holzpellets auf. Somit können auch thermische Leistungen von ungefähr 34 bzw. 99 kW erreicht werden, wobei die Schwankungen in der Teillastphase stärker ausgeprägt sind. Trotz der gewählten Standard-Reglereinstellungen (Pellets) können gute Verbrennungsbedingungen geschaffen werden. Die niedrigen CO-Emissionen (ca. 5 mg/m³$_N$) im Vollastfall weisen beispielsweise auf einen nahezu vollständigen Gasphasenausbrand hin. Diese steigen zwar im Teillastbetrieb auf fast 1000 mg/m³$_N$, was jedoch den eingangs erwähnten Betriebsschwankungen zugrunde liegt. Die gebildeten Stickoxidverbindung, welche ungefähr 89 bzw. 105 mg/m³$_N$ im Rauchgas einnehmen, liegen im Durchschnitt der zuvor durchgeführten

Verbrennungsversuche. Die PM2,5-Emissionen sind bei ausgeschaltetem ESP vergleichsweise hoch. Je nach abgegebener Leistung können diese mit etwa 85,5 (Teillast) bzw. 80,4 mg/m³$_N$ (Nennlast) beziffert werden. Berechnet man anschließend den Abscheidegrad für die PM2,5-Fraktion unter Zuhilfenahme der gemessenen Reingaskonzentration bei aktiven ESP von 14,0 (Teillast) bzw. 25,5 mg/m³$_N$ (Nennlast), so erhält man eine Reduktion der Feinstaubpartikel zwischen 68,0 und 83,5 %. Betrachtet man nun die Betriebszustände des Abscheiders, so kann im Teillastbetrieb der Anlage die höchste Spannung aller Versuchsanordnungen mit rund 39,5 kV festgestellt werden. Diese führt jedoch aufgrund der geringen Stromstärke (ca. 264 µA) zu einer maximalen Leistung von lediglich 10 W. Im Volllastfall kann ein ähnliches Verhalten beobachtet werden, wobei auch hier eine im Vergleich zu den Pelletsversuchen halb so hohe Stromstärke zu einer minimalen Leistung von knapp über 2 W führt.

Tab. 1*: Feinstaubemissionen ($d_P \leq 2{,}5$ µm) und Abscheideeffizienz des integrierten elektrostatischen Abscheiders für unterschiedliche Brennstoffe und Lastfälle der Biomassefeuerung*

Brennstoff	Q (kW)	y_{O2} (%)	T (°C)	u (m/s)	I_{ESP} (µA)	U_{ESP} (kV)	$y_{ESP,aus}$ [1] (mg/m³)	$y_{ESP,ein}$ [1] (mg/m³)	η (%)
Pellets	36	12,2	111	1,2	795	37,8	22,6	5,7	74,6
Pellets	93	7,3	146	2,5	151	25,3	10,9	4,6	57,2
Hackgut W20	32	11,4	102	1,3	475	37,7	43,5	12,0	72,2
Hackgut W20	104	6,7	187	3,2	307	23,0	31,5	15,7	50,1
Hackgut W35	39	9,7	103	0,9	633	39,1	19,2	6,8	64,9
Hackgut W35	85	8,2	170	3,2	230	23,3	28,5	13,2	53,6
Olivenkerne	34	12,8	104	0,9	264	39,5	85,5	14,0	83,5
Olivenkerne	99	6,1	158	2,4	86	27,8	80,4	25,5	68,0

1 Die PM2,5-Fraktionen sind auf einen Referenzsauerstoffgehalt von 13 % bezogen.

3.3 FRAKTIONSABSCHEIDEGRAD

Ergänzend zu den gravimetrischen Staubmessungen werden Versuche am Beispiel eines ausgewählten Brennstoffs (Hackgut W20) unter Zuhilfenahme kontinuierlicher Aerosolmesstechniken (ELPI) durchgeführt. Diese Versuchsanordnung wird wie zuvor in Teil- und Nennlastphasen der Feuerungsanlage unterteilt. Abb. 2 veranschaulicht die Ergebnisse hinsichtlich der Partikelbeladungen sowie der Abscheideeffizienz des ESP in Abhängigkeit des Kessellastzustandes.

Betrachtet man zunächst den Nennlastbetriebsfall der Feuerung (vgl. Abb. 2, oben), so kann beobachtet werden, dass im Rohgas mit rund 80 mg/m³$_N$ der Höchstwert der Beladung bei einem Partikeldurchmesser von 5,15 µm vorliegt. Mit sinkendem Durchmesser bzw. Volumen der Partikel reduziert sich folglich die Massenbeladung im Rohgas auf unter 40 mg/m³$_N$, wobei die Abscheidewirkung mit durchschnittlich 39,5 % konstant bleibt. Obwohl diese Fraktion ($d_P \geq 1{,}99$ µm) etwa 59,1 % der massebezogenen Staubbeladung des gesamten untersuchten Partikelkollektivs ausmacht, so ist dennoch festzuhalten, dass vor allem kleine Partikel ($d_P \leq 1$ µm), welche bis in die kleinsten Verzweigungen der Lunge eindringen können, hauptverantwortlich für gesundheitliche Beschwerden sind. Betrachtet man nun lediglich diesen Bereich der gemessenen Korngrößenverteilung, so kann man deutlich erkennen, dass für PM1-Partikel, welche zwar aufgrund der geringen Größe auch eine geringe Masse aufweisen, deutlich höhere Abscheidegrade erreicht werden. Im Nennlastfall der Feuerung beträgt der mittlere Abscheidegrad für PM1 etwa 54,3 %. Das Verteilungsmaximum der gemessenen Aerosolfraktion (ca. 32 mg/m³$_N$) liegt bei einem Partikeldurchmesser von 0,21 µm vor, während der maximale Abscheidegrad von etwa 61,8 % bei etwas größeren Partikeln auftritt. Des Weiteren kann man den für die Kalibrierung der ELPI-Daten erforderlichen DGI- bzw. Gesamtstaubmessungen entnehmen, dass durch die Integration des ESP auch die Gesamtstaubemissionen um durchschnittlich 53,8 % verringert werden können. Hinsichtlich des Abscheiderbetriebs kann festgehalten

werden, dass eine mittlere Spannung von ca. 23,1 kV ohne häufige Überschläge gehalten werden kann und somit eine durchschnittliche Leistung von 7,4 W eingebracht wird.

Analog zu den Messreihen mit variierenden Brennstoffen wurde im Zuge der ELPI-Messung ein Versuch im Teillastbetrieb des Kessels (vgl. Abb. 2, unten) durchgeführt. Das Bild der Partikelemissionen zeigt ähnliche Verhältnisse wie zuvor bei den Volllastmessungen, wobei hier tendenziell geringere Beladungen auftreten. Die höchste Staubbeladung tritt erneut bei großen Partikeln (d_P = 5,15 µm) auf und ist mit ungefähr 43 mg/m³$_N$ nur halb so hoch wie im Nennlastbetrieb. Trotz der etwas geringen Staubkonzentrationen können deutlich höhere Abscheideeffizienzen im Teillastbereich erzielt werden, wobei der grundsätzliche Zusammenhang mit dem Partikeldurchmesser auch hier gegeben ist. Demnach steigt der Abscheidegrad nach anfänglichem konstanten Wert von 69,8 % zwischen 1,99 und 5,15 µm kontinuierlich an, je kleiner die Partikel werden. Mit dem Beginn der PM1-Fraktion liegt dieser bereits deutlich über 75 % und ist somit um fast 30 % höher als im Nennlastbetrieb der Feuerung. Im Gegensatz zur Nennlastphase ist das Verteilungsmaximum der Aerosolfraktion hinsichtlich der Partikelgröße jedoch nicht so eindeutig ausgeprägt. Dieses befindet sich zwischen 0,21 und 0,32 µm und kann für den Rohgasstrom mit ca. 20,9 mg/m³$_N$ beziffert werden. Bei aktiven ESP verringert sich diese Beladung um knapp 14,1 mg/m³$_N$, wodurch sich ein maximaler Abscheidegrad von 84,9 % für den Teillastbetrieb ergibt. Anders als bei Nennlast, wo nach diesem Verteilungsmaximum der Abscheidegrad wieder deutlich abfällt (auf ca. 45,8 % für d_P = 0,13 µm), kann dieser im Teillastbetrieb konstant auf über 80 % gehalten werden. Die Gesamtstaubemissionen können durch den Einsatz des ESP's um rund 66,4 % verringert werden. Im Betrieb erreicht der Abscheider durchschnittlich eine Spannung von 37,5 kV bzw. eine elektrische Leistung von 27,8 W.

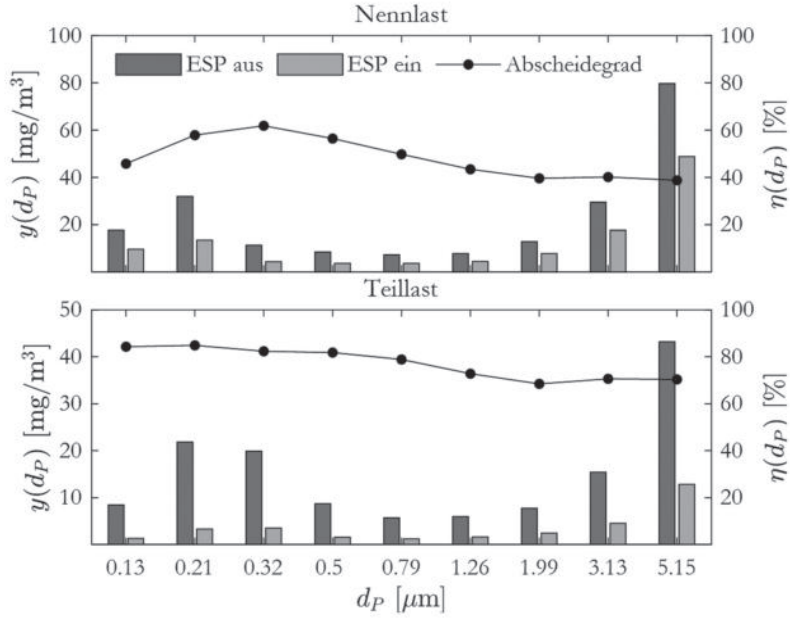


Abb. 2: Feinstaubemissionen ($d_P \leq 5{,}15$ µm) und Abscheideeffizienz des integrierten elektrostatischen Abscheiders für trockenes Hackgut (W20) in Abhängigkeit des Lastzustandes der Biomassefeuerung (oben: Nennlast, unten: Teillast) sowie des Partikeldurchmessers

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die nachträgliche Implementierung eines elektrostatischen Abscheiders in eine Kleinkesselanlage durchaus zur Minderung der Feinstaubemissionen beiträgt. Wie aus den Ergebnissen der unterschiedlichen Messdurchläufe hervorgeht, werden durch die vorgeschlagene Abscheiderkonfiguration vor allem kleine Partikel – jene mit einem Durchmesser < 1 µm – mit einer Effizienz von mindestens 50 % aus dem Rauchgas entfernt. Je nach Brennstoff und Lastzustand der Feuerung variiert dieser Abscheidegrad, wobei Teillastzustände des Kessels die Partikelabscheidung aufgrund von niedrigeren Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten fördern ($\eta \approx 70$ %). Bei weiterer Verfeinerung des Rauchgaspartikelkollektives (zwischen 0,13 und 1,26 µm) erkennt man zudem, dass feinere Partikel sowohl im Teil- als auch in Nennlastbetriebsphasen mit höherer Effizienz (bis zu 80 %) abgeschieden werden. Die dargelegten Ergebnisse verdeutlichen somit das Konzept sowie die Wirkung eines integrierten Elektroabscheiders und rechtfertigen dessen Einsatz, vor allem angesichts des niedrigen Energiebedarfs für dessen Betrieb. Demungeachtet sind weitere Untersuchungen, beispielsweise hinsichtlich der Partikelbildungsmechanismen sowie der Abreinigung der Elektroden notwendig, um die Technologie am Markt verfügbar zu machen.

DANKSAGUNG

Das F&E-Projekt „EmiL“ (Emission Limited Biomass Combustion) wurde mit den finanziellen Mitteln des Klima- und Energiefonds durchgeführt und von der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) abgewickelt. Programmlinie „Energieforschung (e!MISSION)“ (2. Ausschreibung), Projektnummer: 853.606

LITERATUR

Berhardt A., Lezsovits F., Groß B. (2017) Integrated Electrostatic Precipitator for Small-Scaled Biomass Boilers. Chem. Eng. Technol. 40(2), 278-288, DOI: 10.1002/ceat.201600200.

Blank M., Schöffl M., Scharler R., Obernberger I. (2015) New CFD based model for the design and optimisation of electrostatic precipitators for biomass com-bustion plants. In: Proceedings of the 23rd European Biomass Conference and Exhibition, Wien, AT: ETA-Florence Renewable Energies, pp. 540-545.

Bologa A., Ecker M., Rheinheimer H., Paur H. (2016) Development and Demon-stration of an Electrostatic Precipitator, which is Optimally Adapted to a Bio-mass Boiler. In: Proceedings of the 24th European Biomass Conference and Exhibition, Amsterdam, NL: ETA-Florence Renewable Energies, pp. 434-440.

Donaldson K., Brown D., Clouter A., Duffin R., MacNee D., Renwick L., Tran L., Stone V. (2002) The pulmonary toxicology of ultrafine particles. J. Aerosol Med. 15(2), 213-220, DOI: 10.1089/089426802320282338.

Eurostat (2019) Energy, transport and environment statistics. 2019 edition. Europe-an Commission, Environment and energy, DOI: 10.2785/660147.

Jaworek A., Krupa A., Tadeusz C. (2007) Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review. J. Electrostat. 65(3), 133-155, DOI: 10.1016/j.elstat.2006.07.012.

Kather A., Woltersdorf N. (2013) Feinstaubemissionen aus biomassebefeuerten Kleinfeuerungsanlagen. Hamburg, DE: TU Hamburg-Harburg, Institut für Energietechnik.

Kelz J., Zemann C., Muschick D., Hofmeister G., Gölles M., Retschitzegger S. (2019) Performance evaluation of an electrostatic precipitator in a small-scale bi-omass boiler by using different biomass feedstocks. In: Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition. Lissabon, PT: ETA-Florence Renewable Energies, pp. 1932-1938.

Keskinen J., Pietarinen K., Lehtimäki M. (1992) Electrical low pressure impactor. J. Aerosol Sci. 23(4), 353-360, DOI: 10.1016/0021-8502(92)90004-F

Marjamäki M., Keskinen J., Chen D. R., Pui D. (2000) Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI). J. Aerosol Sci. 31(2), 249-261, DOI: 10.1016/S0021-8502(99)00052-X

Obaidullah M., Bram S., De Ruyck J. (2018) An Overview of PM Formation Mech-anisms from Residential Biomass Combustion and Instruments Using in PM Measurements. International Journal of Energy and Environment 12, 41-50.

Obernberger I., Mandl C. (2011) Survey on the present state of particle precipitation devices for residential biomass combustion with a nominal capacity up to 50 kW. Graz, AT: TU Graz, Institut für Prozess- und Partikeltechnik.

Schröder T. et al. (2014) Messmethodensammlung Feinstaub - Methodenvorschlag zur Feinstauberfassung an Feuerungsanlagen für feste biogene Brennstoffe (Bd. 8). (V. Lenz, D. Thrän, D. Pfeiffer, Hrsg.) Leipzig, GE: Fischer Druck.

VDI 2066 (2006) Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung. Normenausschuss, VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL).

Kontaktdaten:
Florian Schittl
Forschung Burgenland GmbH
Steinamangerstraße 21
7423 Pinkafeld
Email: florian.schittl@forschung-burgenland.at

Session 3c

Abfallentsorgung – Neue Wege

Stoffflussanalyse einer thermochemischen Vorbehandlungsanlage

Peinsipp, Meirhofer / Forschung Burgenland / AT
Wartha, Kranner / FH Burgenland / AT

Ökologischer Vergleich unterschiedlicher Abfallentsorgungsprozesse in der Slowakei und Österreich mittels Ökobilanzierung

Wartha, Lang / FH Burgenland / AT

Abfallrecht-Herausforderungen für Holzgasanlagen – Vergaserrückstand Quo Vadis?

Ragossnig / RM Umweltkonsulenten ZT GmbH / AT

Stoffflussanalyse einer thermochemischen Vorbehandlungsanlage

M. Peinsipp, M. Meirhofer
Forschung Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich
C. Wartha, R. Kranner
Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich

ABSTRACT: The material flow analysis (MFA) is used as a method for the description and analysis of defined systems to quantify flows and stocks of materials or substances. Depending on the question to be solved, the complexity of a system is to be reduced by an adapted system definition, according to which only relevant goods and processes are considered within fixed temporal and spatial framework conditions. A material flow analysis is a representation and modeling of systems such as region, plants, companies or households in order to derive targeted measures or to compare different scenarios for optimization. Uniform definitions of terms for easier traceability and comparability with other study results are important for a material flow analysis.

As a part of the research project *Waste2Material* (funded by EFRE), series of measurements are carried out on a test facility for the thermochemical processing of a residual waste fraction with a low calorific value. During the series of measurements, relevant flows such as solids, gases and fluids are analyzed within test series. The measurement data obtained from the experiments are the basis for the material flow analysis. The additional investigation of the water content from good flows enables a dry solid balance and a water balance of the test facility. After all flows of the thermochemical plant have been determined within the goods balance, the total masses of input and output flows can be identified during the respective measurement series. Furthermore, the distribution of the input material to the output flows can be examined by calculate the transfer coefficients. For the material balance based on chemical elements and compounds, system flows are analyzed for selected substances as part of the measurements. The substance concentrations are determined either continuously during the test series (gases) on site or subsequently in the laboratory (solids, wastewater). In order to identify the distribution of the chemical elements and compounds within the test facility, the transfer coefficients are calculated at the substance level.

In this article, the procedure for a material flow analysis of a thermochemical plant is explained and selected results are presented.

1. EINLEITUNG

Das absolute Aufkommen von gemischtem Siedlungsabfall aus dem kommunalen Bereich stieg in den letzten zehn Jahren in Österreich um 5,8 % (BMK 2020). Im Burgenland wird, wie in zahlreichen anderen Regionen auch, der gemischte Siedlungsabfall in einer mechanisch- biologischen Abfallbehandlung (MBA) aufbereitet. Ziel der MBA ist die Herstellung von Ersatzbrennstoffen zur thermischen Verwertung und die Herstellung stabilisierter Fraktionen zur Deponierung. Ungefähr 50 % des Inputstroms (Neubauer & Ohlinger 2006) wird am Ende der mechanischen Aufbereitung der biologischen Behandlung zugeführt, um den Abfallstrom biologisch zu stabilisieren und diesen schlussendlich deponiefähig zu machen.

Unerwünschte Nebeneffekte der biologischen Behandlung sind die Bildung von gasförmigen Emissionen, die anfallenden Deponierungskosten sowie die ungenutzten Wertstoffe im Abfallrest. Im Wesentlichen handelt es sich bei den Emissionen um Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen, wobei Kohlenstoff hauptsächlich in Form von CO_2, als flüchtige organische Verbindungen (VOC) und kleinere Mengen als Methan (CH_4) freigesetzt werden.

Im Rahmen des von EFRE geförderten Forschungsprojektes „Waste2Material“ wurden in einer Anlage Fraktionen aus der mechanischen Aufbereitung thermochemisch vorbehandelt, um die Möglichkeit zu

überprüfen, die biologische Behandlungsstufe durch eine thermochemische Vorbehandlung zu ersetzen. Dabei wird die technische Umsetzbarkeit, die Wirtschaftlichkeit und der Umweltnutzen einer thermochemischen Vorbehandlung analysiert.

Es wurden unterschiedliche Messreihen durchgeführt, um Erkenntnisse hinsichtlich des materialspezifischen Anlagenbetriebs, der Qualität des entstehenden Pyrolysefeststoffes, der Abwasser- und Abgassituation und der abfallrechtlichen Rahmenbedingungen zu gewinnen.

Um die Qualität dieses thermochemischen Prozesses und die Messreihen untereinander beurteilen zu können, wurde eine Stoffflussanalyse durchgeführt. Die Stoffflussanalyse erlaubt eine Bilanzierung auf Güter- und Stoffebene, sodass sowohl sämtliche Anlagenströme im Messzeitraum erfasst werden als auch eine detaillierte Beobachtung der Verteilung einzelner chemischer Substanzen innerhalb der thermochemischen Anlage möglich ist.

Im vorliegenden Beitrag wird die Vorgehensweise für eine Stoffflussanalyse einer thermochemischen Vorbehandlungsanlage beschrieben und erste Ergebnisse präsentiert.

2. BESCHREIBUNG DER THERMOCHEMISCHEN ANLAGE

Die thermochemische Vorbehandlungsanlage ist seit 2011 am Standort Riedlingsdorf in Betrieb und wurde für die Herstellung von Pflanzenkohle aus Biomasse entwickelt. Für die Messreihen im Rahmen des Projektes „Waste2Material" wurde eine Fraktion aus der mechanischen Aufbereitung als Inputmaterial verwendet.

Über ein Förderband wird das Inputmaterial in die Beschickungseinheit der Anlage geführt. Nach der Materialaufgabe, mit Hilfe zweier Zellradschleusen, erfolgt der Weitertransport über eine Doppelwellenschnecke zu den beiden Pyrolysereaktoren. Die Doppelwellenschnecke dient einerseits der Beförderung des Inputmaterials und sorgt andererseits für die Zerkleinerung, Durchmischung und Lockerung des Materials. Im Pyrolysereaktor wird das Aufgabematerial bei ca. 550-600 °C unter Ausschluss von Sauerstoff pyrolysiert. Der bei der Pyrolyse entstehende Pyrolysefeststoff (Pyrolysekoks) wird mittels Wassereindüsung gekühlt und über Förderschnecken und Zellradschleusen ausgetragen. Das Pyrolysegas wird über einen Zyklon vom Grobstaub gereinigt und in die Brennkammer zur Nachverbrennung geleitet. Die Temperatur in der Brennkammer beträgt ca. 1000 °C und eine Lambdasonde regelt die Dosierung der Umgebungsluft. Die Temperaturregelung in der Brennkammer erfolgt durch das Einsprühen von Kühlwasser, wenn zu hohe Temperaturen erreicht werden. Des Weiteren kann Harnstoff zur NOx-Reduktion mit dem Kühlwasser eingedüst werden. Nach der Brennkammer wird der Abgasstrom über einen nachgeschalteten Zyklon entascht und über den Mantel der Pyrolysereaktoren rückgeleitet, um den Pyrolyseprozess rekuperativ mit Wärme zu versorgen. Anschließend erfolgt die Kühlung des Abgasstromes über zwei Wärmetauscher, bevor das Abgas im Gaswäscher gereinigt wird.

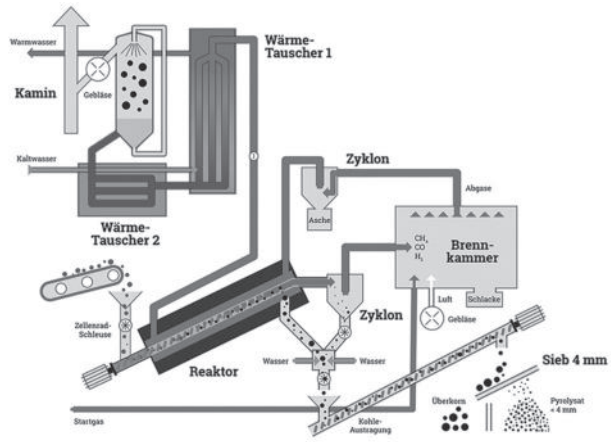


Abb. 1: Schematische Darstellung der thermochemischen Anlage (Dunst 2019)

Bei dem verwendeten Gaswäscher handelt es sich um eine Füllkörperkolonne. Das Absorbat wird im unteren Wäscherteil gesammelt und über eine Pumpe einem Plattenwärmetauscher zugeführt. Das Reingas wird dann über ein Saugzuggebläse in den Kamin geleitet, wo es in die Umgebung emittiert wird. Das von der thermochemischen Anlage anfallende Abwasser wird einer kommunalen Kläranlage zugeführt.

3. SYSTEMDEFINITION

Innerhalb der Systemdefinition werden konkrete Fragestellungen formuliert, welche für die Charakterisierung des Systems essentiell sind und eine sowohl räumliche als auch zeitliche Abgrenzung definieren. Grundsätzlich sind folgende Punkte innerhalb einer Systemdefinition zu beschreiben (ÖWAV 2003):

- Räumliche und zeitliche Systemgrenze
- Definition von Prozessen und Gütern
- Definition von Subsystemen (optional)
- Stoffauswahl

Die thermochemische Anlage besteht grundsätzlich aus einer Vielzahl von Anlagenteilen, welche jedoch nicht alle in der Stoffflussanalyse berücksichtigt werden, um so eine erhöhte Komplexität des Systems zu vermeiden. In diesem Sinne wird die Versuchsanlage in drei Hauptprozesse untergliedert, welche nachfolgend angeführt sind:

- Prozess **Pyrolyse**: Der Prozess **Pyrolyse** besteht aus den Pyrolysereaktoren, dem der Pyrolyse nachgeschalteten Zyklon sowie der Bewässerung des Pyrolyseprodukts
- Prozess **Nachverbrennung**: Der Prozess **Nachverbrennung** umfasst die thermische Nachverbrennung der Pyrolysegase in der Brennkammer, den nachgeschalteten Aschezyklon und das anfallende Ascheprodukt
- Prozess **Rauchgasreinigung**: Der Prozess **Rauchgasreinigung** beinhaltet den Keramikwärmetauscher sowie den Abgaswäscher

Abb. 2 zeigt die Systemdefinition der thermochemischen Aufbereitungsanlage mit den Hauptprozessen, den Ausgangs- und Zielprozessen und der räumlichen Systemgrenze.

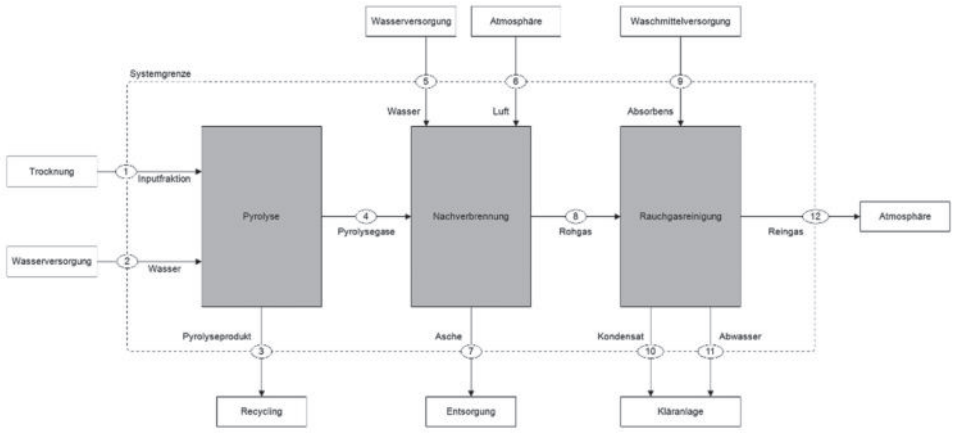


Abb. 2: Systemdefinition der thermochemischen Vorbehandlungsanlage

Die Abbildung der Systemdefinition wurde mit dem Stoffflussanalysetool STAN der Technischen Universität Wien erstellt.

4. MESSDURCHFÜHRUNG

Im Rahmen der einzelnen Messreihen erfolgten Analysen der Feststoffe (Pyrolyseprodukt, Asche), des Abwassers und des Abgases. Zur Überprüfung der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte wurden nach der Abfallverordnung (AVV 2013) und der Allgemeinen Abwasserverordnung (AAEV 2019) die aus der Anlage austretenden Gas- und Flüssigkeitsströme untersucht.

4.1 FESTSTOFFANALYSE

Grundsätzlich wurde eine Beprobung des Inputmaterials (Restmüllfraktion), des während des Pyrolyseprozesses anfallenden Pyrolysekokses sowie der Aschen der Brennkammer und des Brennkammer-Zyklons durchgeführt. Die Beprobung des Inputmaterials erfolgte vor Beginn der Versuchsmessungen. Der anfallende Pyrolysekoks wurde kontinuierlich beprobt, sodass je Versuchstag zwei Halbtagesmischproben entnommen wurden. Während des stationären Betriebs der Versuchsanlage wurden stündlich drei Liter des Pyrolysekokses entnommen. Die Probenahme der Zyklon- und Brennkammerasche wurde am Ende der jeweiligen Versuchsreihe im kalten Anlagenzustand durchgeführt. Innerhalb der Anlagenreinigung wurden hierbei die Feststoffrückstände entfernt und mittels repräsentativer Mischproben beprobt. Sämtliche Proben wurden während der Probenahme in handelsübliche Kübel geleert, abgewogen und Probemasse, Zeit sowie Probennummer dokumentiert. Die Feststoffanalysen der entnommenen Proben wurden anschließend betreffend der Grenzwerte für Reststoffdeponien und Massenabfalldeponien (BMLFUW 2008) vom Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben durchgeführt.

4.2 ABWASSERANALYSE

Die Abwasseranalysen beschränkten sich während der Messreihen auf die Untersuchung des Gaswäscher-Abwassers und des anfallenden Kondensates in einem der Wärmetauscher. Die Abwasserproben wurden von der RM Umweltkonsulenten ZT GmbH auf vorgegebene Parameter der AAEV und AEV Verbrennungsgas (AEV 2019) untersucht.

4.3 GASANALYSE

Im Zuge der durchgeführten Messreihen für die thermochemische Vorbehandlungsanlage wurden bei zwei Messstellen kontinuierliche Gasanalysen durchgeführt. Zum einen wurde das Rohgas aus der Brennkammer vor dem Gaswäscher und zum anderen das über den Kamin emittierte Reingas analysiert. Abb. 3 zeigt beispielhaft den Messaufbau für die Gasanalyse des Rohgases. Das Messequipment und die Datenaufzeichnung wurden in einem externen Messcontainer gelagert und das Gas dann über eine beheizte Messgasleitung von der Messstelle entnommen. Das Probengas wurde anschließend in zwei Teilströme aufgetrennt und der beheizten Messgaszelle am FTIR-Spektrometer (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer) sowie einem paramagnetischen Sauerstoffanalysator zugeführt. Im Abgas wurden Staub, NO_2, CO, org. C, SO_2, O_2, HCl, HF, PCDD/F, Cadmium, Thallium, Quecksilber und die Summe der Elemente Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium und Zinn gemessen.

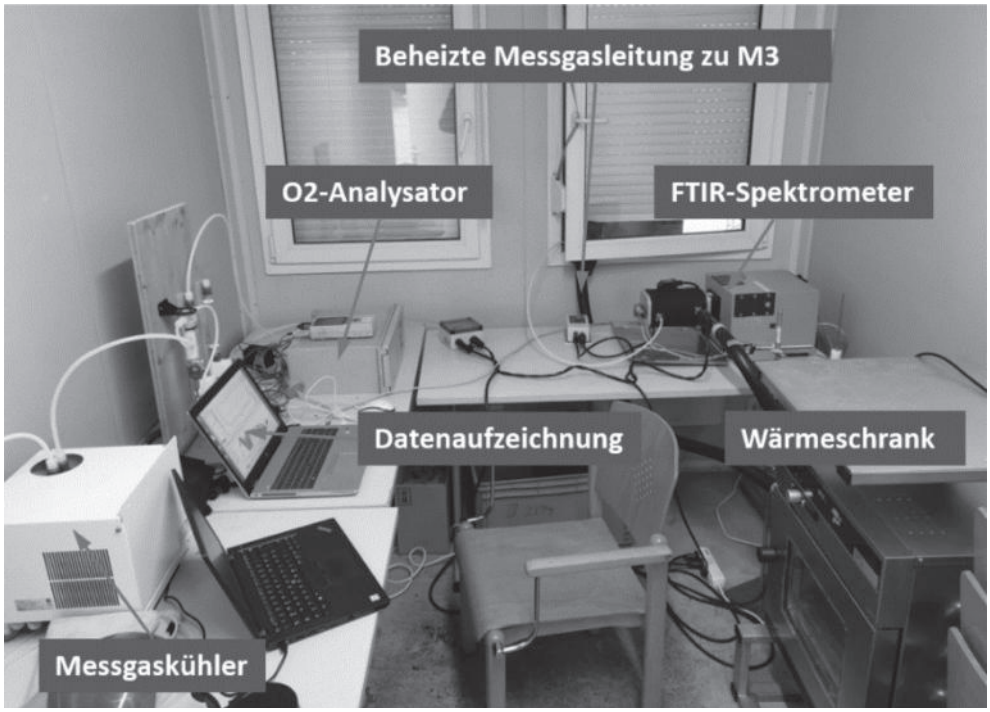


Abb. 3: Aufbau der Gasanalytik im Messcontainer

5. GÜTERBILANZIERUNG

Innerhalb der Güterbilanzierung werden sämtliche Input- und Outputströme der thermochemischen Vorbehandlungsanlage während des jeweiligen Messzeitraumes ermittelt. Da die Ergebnisse der Feststoffanalysen auf Trockensubstanz bezogen sind, wird sowohl Trockenmasse als auch Gesamtmasse (inkl. Wassergehalt) bilanziert. Nachfolgend wird für die jeweiligen Input- bzw. Outputströme die Vorgehensweise in der Berechnung der Ströme erklärt.

- Die mechanisch aufbereitete **Inputfraktion** wird gesiebt, gewogen, getrocknet und danach der thermochemischen Anlage zugeführt. Der Massenstrom des Inputmaterials wird aus der Differenz von zu Beginn gewogenem Material und dem Abwiegen des noch im Lagerbunker befindlichen Materials erhalten. Nach Analyse der Wassergehalte des Inputmaterials im Labor kann somit auch der trockene Inputstrom berechnet werden.
- Das zur Kühlung des Pyrolyseprodukts eingebrachte **Frischwasser** und das **Kühlwasser** für die Nachverbrennung werden über einen Wasserzähler erfasst.
- Die **Verbrennungsluft** für die Nachverbrennung wird mittels Verbrennungsrechnung ermittelt. Die entnommenen Proben des Inputmaterials werden zunächst aufbereitet und im Labor analysiert. Dabei werden CHNS-Analysen sowie Bestimmungen des Aschegehalts durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Elementaranalysen der Proben wird ein repräsentativer Mittelwert gebildet und anschließend über die Verbrennungsrechnung die Luftmenge und das Abgasvolumen berechnet.
- Der Massenstrom an Absorbens an beiden Versuchstagen wurde messtechnisch erfasst. Das **Absorbens** ist grundsätzlich ein Gemisch aus Frischwasser, rückgeführtem Absorbers und frischer Natronlauge.

- Das **Pyrolyseprodukt** wurde während des Verlassens der Anlage mit Kühlwasser besprüht. Durch Wiegung wurde die Menge an Pyrolyseprodukt ermittelt. Im Labor wurde anschließend der Wassergehalt bestimmt.
- Die **Asche** von Brennkammer und Zyklon wurde nach der jeweiligen Messreihe entnommen und abgewogen.
- Das anfallende **Abwasser** des Rauchgaswäschers wurde messtechnisch erfasst.
- Der Güterstrom des **Reingases** wurde aus der Verbrennungsrechnung sowie aus der Bilanz erhalten. Durch die Bestimmung des Abgasvolumens aus den Elementaranalysen der Inputfraktion kann der Massenstrom an Reingas erhalten werden. Der Wassergehalt des Reingases ergibt sich aus den Messwerten der Abgasanalysen, wo auch der Wasserdampfgehalt ermittelt wurde.

6. STOFFBILANZIERUNG

Die Auswahl an zu analysierenden Stoffen wird an die Fragestellungen und Zielsetzungen der Stoffflussanalyse angepasst und es wird versucht, einen möglichst hohen Informationsertrag im Verhältnis zum Untersuchungsaufwand zu erhalten (ÖWAV 2003). In diesem Sinne wurden während der Messreihen nur ausgewählte Stoffe in den jeweiligen Anlagenströmen analysiert. Aus der Vielzahl an erhaltenen Messdaten wurde unter Einbezug von Störeinflüssen und Messfehlern ein für die jeweilige Messreihe repräsentativer Mittelwert errechnet. Weiters wurden innerhalb der Stoffbilanzen nur chemische Elemente bilanziert, wobei im Falle gebildeter chemischer Verbindungen Umrechnungen durchgeführt wurden. Auf Basis der Güterbilanz wurden durch Multiplikation der Stoffkonzentrationen mit den Anlagenströmen die Stoffflüsse der thermochemischen Vorbehandlungsanlage errechnet. Mittels der durchgeführten Stoffbilanzen wurden die Transferkoeffizienten einzelner Stoffe ermittelt. Ein Transferkoeffizient beschreibt die Verteilung eines Stoffes ausgehend vom Inputstrom in die einzelnen Outputströme der thermochemischen Anlage.

7. ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Aus den Ergebnissen der Stoffflussanalyse resultiert, dass sich aufgrund der starken Inhomogenität des Inputmaterials teils große Schwankungen hinsichtlich der einzelnen Stoffflüsse und dahingehend der stofflichen Zusammensetzung der austretenden Anlagenströme ergeben. Aus der Stoffbilanzierung wurde festgestellt, dass bei Halbmetallen, Schwermetallen und Nichtmetallen prozentual der größte Teil der jeweiligen Stoffströme im Pyrolysefeststoff vorzufinden ist. Die Transferkoeffizienten betragen für das Pyrolyseprodukt zumeist über 90 % bezogen auf den entsprechenden Stoffluss im Inputstrom.

Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die Ergebnisse der Stoffbilanzierung für die Schwermetalle Blei und Cadmium. Für Blei ist ersichtlich, dass 98 % des im Inputmaterial vorhandenen Bleis mit dem Pyrolysefeststoff ausgetragen wird und sich nur geringe Anteile in Abwasser, Asche und Reingas befinden. Bei Cadmium hingegen ergibt sich aus der Analyse, dass 82 % über den Pyrolysefeststoff, 8 % über das Reingas, 7 % über die Asche und 3 % über das Abwasser ausgetragen werden.

Es wurde zur Erkenntnis gelangt, dass durch die Zugabe von Kalkhydrat zum Inputmaterial eine signifikante Reduktion des Chlorgehalt im Reingas erreicht werden konnte. In Abb. 6 und Abb. 7 sind die Ergebnisse der Stoffbilanz für Chlor ohne und mit der Zugabe von Kalkhydrat zum Inputmaterial ersichtlich. Befinden sich bei der Messreihe ohne Kalkhydrat noch 92 % des Chlors im Reingas, so sind es mit Kalkhydrat nur mehr ein Prozent. Durch die Beigabe von Kalkhydrat zum Inputstrom konnte HCl gebunden und zum größten Teil als $CaCl_2$ mit dem Pyrolysefeststoff ausgetragen werden.

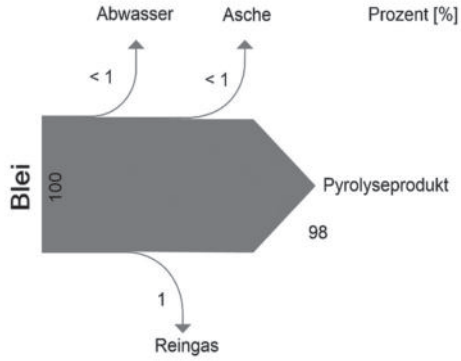


Abb. 4: Stoffbilanz Blei

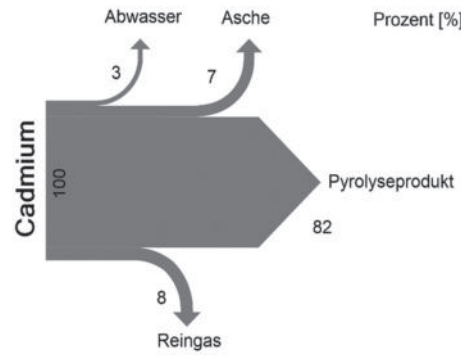


Abb. 5: Stoffbilanz Cadmium

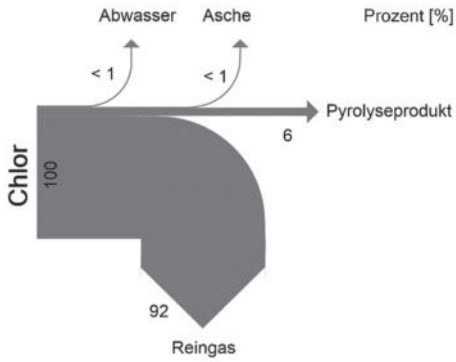


Abb. 6: Stoffbilanz Chlor ohne Kalkhydrat

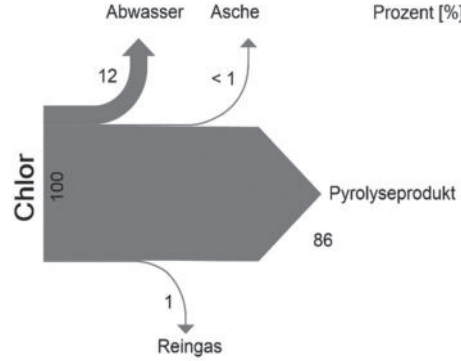


Abb. 7: Stoffbilanz Chlor mit Kalkhydrat

Die Stoffbilanzen für Schwefel und Quecksilber sind in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt. Aus der Schwefelbilanz ergibt sich, dass der Großteil an Schwefel im Pyrolyseprodukt gebunden wird (89 %).

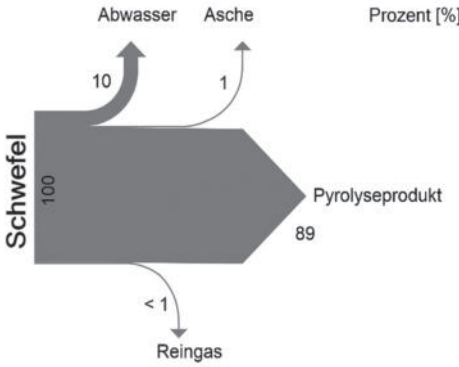


Abb. 6: Stoffbilanz Chlor ohne Kalkhydrat

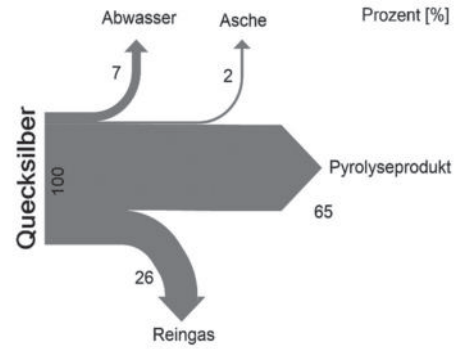


Abb. 7: Stoffbilanz Chlor mit Kalkhydrat

Zehn Prozent des Schwefels werden in Form von Sulfit und Sulfat im Abwasser nachgewiesen. Aus der Stoffbilanz von Quecksilber resultiert, dass ca. 65 % des im Inputmaterial befindlichen Quecksilbers in den Pyrolysefeststoff und 7 % in das Abwasser übergegangen sind. Da innerhalb der thermochemischen Vorbehandlung Temperaturen über 500 °C erreicht und somit der Siedepunkt von Quecksilber (356,7 °C) überschritten wurde, konnten 26 % des Quecksilbers im Reingas vorgefunden werden.

Der Prozess der thermochemischen Vorbehandlung ist noch nicht ausgereift und es sind daher noch weitere Optimierungen nötig. In der nächsten Stufe wird eine Verbesserung der Staubabscheidung sowie der Abwasserbehandlung getestet.

LITERATUR

Abfallverbrennungsverordnung (AVV). (2013) Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verbrennung von Abfällen

Abwasseremissionsverordnung - Verbrennungsgas (AEV). (2019) Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Begrenzung von Abwasseremissionen aus der Reinigung von Verbrennungsgas

Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV). (2019) Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen

BMK (2020) Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2020 (Referenzjahr 2018). Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien.

BMLFUW (2008) Verordnung des Bundesministers für Umwelt über die Ablagerung von Abfällen (Deponierung). Bundesministerium für Land-, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Wien

Dunst G. (2019) Anlagenschema. Sonnenerde GmbH. Riedlingsdorf

Neubauer C., Ohlinger A. (2006) Ist-Stand der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung (MBA) in Österreich, Zustandsbericht 2006; Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2006, ISBN 3-85457-868-7

ÖWAV (2003) Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft. Wasser-Abfall Regelwerk, Regelblätter des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV)-Regelblatt 514. Wien

Kontaktdaten:
Michael Peinsipp
Steinamangerstraße 21
7423 Pinkafeld
Email: michael.peinsipp@forschung-burgenland.at

Ökologischer Vergleich unterschiedlicher Abfallentsorgungsprozesse in der Slowakei und Österreich mittels Ökobilanzierung

C. Wartha, S. Lang
FH Burgenland, Pinkafeld, Österreich

ABSTRACT: The aim of this work is the comparison of environmental impact of the processes of waste disposal. In order to investigate the environmental impact of the processes of waste disposal a Life Cycle Analysis was done. The environmental impact of landfills, waste incineration, mechanical-biological waste treatment plant and a thermochemical pretreatment process were analyzed. This analyze was done with an open source software which is called openLCA. OpenLCA is an open source and free software for Sustainability and Life Cycle Assessment. Several datasets for the Life Cycle Inventory were measured during own experiments or calculated from data of project partners and from the literature. Basic datasets were used from the database ecoinvent 3.5. The ecoinvent database is the world's leading LCI database which delivers both in terms of transparency and consistency. The environmental impact in the categories Climate change - GWP100, Acidification Potential - average Europe AP, Depletion of abiotic resources - elements, ultimate reserves, Eutrophication – generic, Freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP inf and Human toxicity - HTP inf of the processes of waste disposal in the region Bratislava, Trnava and Burgenland were shown.

1. EINLEITUNG

Im Rahmen des grenzüberschreitenden Interregprojektes „Nachhaltige Regionale Ressourcennutzung" (NAREG) wird von der FH-Burgenland eine ökologische Bewertung unterschiedlicher Abfallverwertungs- und -entsorgungspfade durchgeführt. Das Projekt NAREG verfolgt als Ziel die Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft in den Grenzregionen Österreich-Slowakei sowie die Verminderung von Treibhausgasen. Im Allgemeinen ergibt sich die Relevanz dieses Themas aus den globalen ökologischen Folgen des Klimawandels und aus den daraus resultierenden politischen Maßnahmen. So definiert die EU-Abfallrahmenrichtlinie als oberstes Ziel die Vermeidung bzw. Verringerung der schädlichen Auswirkungen der Bewirtschaftung von Abfällen und die Verbesserung der Effizienz der Ressourcennutzung (Europäische Gemeinschaft 2008). Aus dieser Definition geht hervor, dass die Herausforderungen der Abfallwirtschaft nicht nur in der Rückführung der Rohstoffe aus Abfällen in den Produktionskreislauf liegen, sondern auch in der Abfallbehandlung, die möglichst ökologisch erfolgen soll. Um die Klimaziele zu erreichen wird die Gewährleistung einer möglichst umweltschonenden Verwertungs- bzw. Behandlungsvariante der einzelnen Abfallströme zunehmend wichtiger. Mithilfe einer Ökobilanzierung können die Umweltauswirkungen einer Abfallbehandlungsanlage bewertet werden und die daraus resultierenden Erkenntnisse können zur Weiterentwicklung der Technologie beitragen.

1.1 SIEDLUNGSABFÄLLE IN DER ÖSTERREICHISCHEN-SLOWAKISCHEN GRENZREGION

Die in der vorliegenden Arbeit betrachtete österreichische-slowakische Grenzregion bezieht sich auf das österreichische Bundesland Burgenland und die beiden slowakischen Verwaltungsgebiete Trnava (Trnavský kraj) und Bratislava (Bratislavský kraj). Die Slowakische Republik teilt sich in acht sogenannten „Krajs" auf. Das sind Landschaftsverbände bzw. Landkreise, die über eine Selbstverwaltung (Autonomie) in gewissen Bereichen verfügen. (Slovake 2020)

Nachfolgend werden diese als Landkreise bezeichnet. In Abb. 1 ist die geographische Lage der drei untersuchten Regionen ersichtlich.

Die Abfallmengen in den betrachteten Gebieten sind in etwa gleich groß. Laut Statistischem Amt der Slovakei (Štatistický úrad SK 2020) fallen im Landkreis Trnava 500 kg/Person und Jahr an, in Bratislava 506 kg/Person und im Burgenland laut BMNT (2019) 507 kg/Person und Jahr. Die Prozentuelle Aufteilung der Abfallfraktionen unterscheiden sich aber deutlich. So gehen im Burgenland laut BMNT (2019) 24 % in den gemischten Siedlungsabfall, in den Regionen Bratislava und in Trnava laut Pobožná (2018) 54 %.

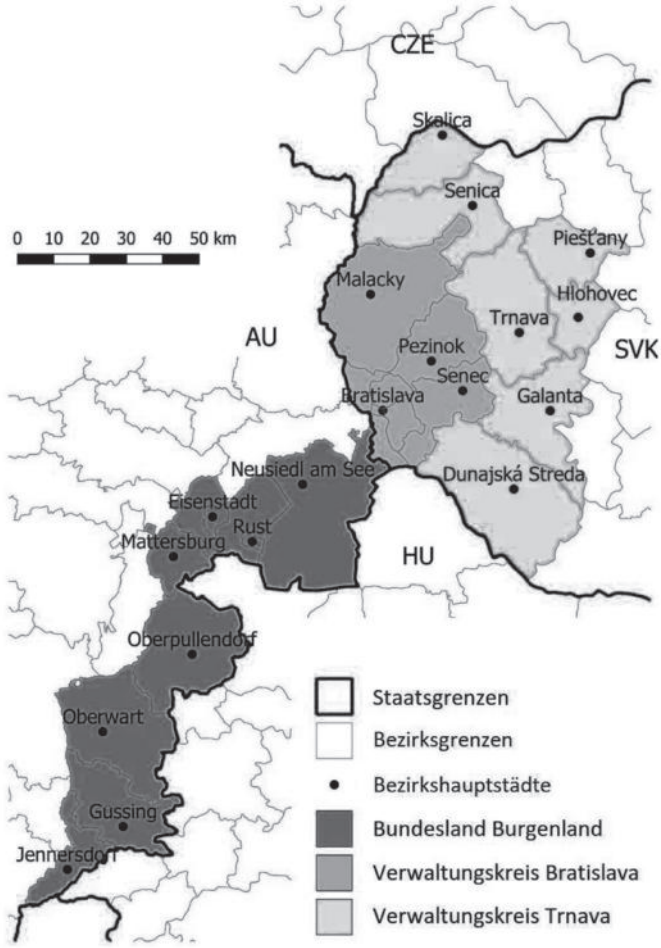


Abb. 1: Landkarte der vergleichenden Grenzregionen nach Bilková et al. (2020)

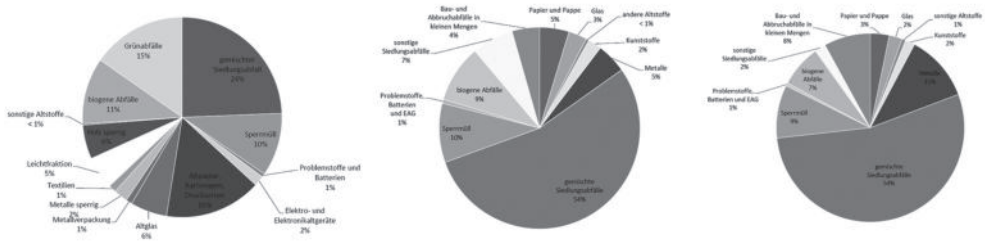


Abb. 2: Prozentuelle Aufteilung der Abfallfraktionen des Siedlungsabfalls im Burgenland (BMNT 2019), Bratislava und Trnava (Pobožná 2018).

Die verwendeten Behandlungstechnologien für die Behandlung der gemischten Siedlungsabfälle unterscheiden sich. Im Burgenland wird der gesamte gemischte Siedlungsabfall einer mechanischen, biologischen Aufbereitung (MBA) zugeführt. Im Landkreis Bratislava werden nach Pobožná (2018) knapp 38 % des gemischten Siedlungsabfalls direkt deponiert und 62 % einer Müllverbrennung zugeführt. Im Landkreis Trnava wird der gesamte gemischte Siedlungsabfall einer Deponierung zugeführt.

2. ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

2.1 RAHMEN UND ZIELDEFINITION

Auf Grundlage des Vergleichs der Abfallbehandlungstechnologien von Siedlungsabfällen im Burgenland und in der Slowakei wurde entschieden, dass vier unterschiedliche Abfallbehandlungsmöglichkeiten für gemischten Siedlungsabfall modelliert werden. Auf österreichischer Seite werden die ökologischen Auswirkungen der mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlage in Oberpullendorf im Burgenland inklusive der Deponierung analysiert. Auf slowakischer Seite die Deponierung des Siedlungsabfalls und die Müllverbrennungsanlage. Des Weiteren wurden die potenziellen Umweltauswirkungen einer thermochemischen Vorbehandlungsanlage, welche derzeit an der Forschung Burgenland in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft für Montan Universität Leoben und den Umweltdienstburgenland entwickelt wird und die biologische Behandlung einer MBA ersetzen soll, untersucht. Die Datengrundlage für die Ökobilanzierung liefern Messergebnisse aus eigenen Untersuchungen und Daten aus der Datenbank Ecoinvent 3.5 (ecoinvent 2020).

Die Durchführung der vergleichenden Lebenszyklusanalyse erfolgt nach den Grundsätzen und Rahmenbedingungen der internationalen Norm ISO 14040 und 14044. Als Instrument zur Durchführung der Ökobilanzierung wird die Open Source Software openLCA verwendet.

Nutzen und funktionelle Einheit

Der Nutzen der untersuchten Produktsysteme ist die Entsorgung von gemischten Siedlungsabfällen. Als funktionelle Einheit wird die Entsorgung des gemischten Siedlungsabfalls für eine Person in einem Jahr in der betrachteten Region definiert.

Systemgrenze

Die Systemgrenze umfasst alle Prozessschritte, die zur unmittelbaren Behandlung, Verwertung und der endgültigen Entsorgung der Abfälle beitragen. Der zeitliche Rahmen, auf denen sich die Daten aus dem Bereich der Abfallsammlung beziehen, sind die Jahre 2018 und 2019.

2.2 SACHBILANZ

Bei der Mechanisch Biologische Aufbereitung (MBA) wurde die mechanische Aufbereitung in der Splittinganlage (Auskopplung sekundär Brennstoffe und Metalle), die Intensivrotte in Oberpullendorf (biologi-

scher Teil), der Transport von Oberpullendorf zur Deponie Nord (Föllig, Großhöflein), die Nachrotte am Deponiegelände sowie die darauffolgende Deponierung berücksichtigt. Für die Deponierung des stabilisierten Restmülls wurden die Daten für eine Inertstoffdeponie aus der Datenbank ecoinvent 3.5 verwendet. Aus der mechanischen Aufbereitung werden pro Tonne trockenen Inputstrom 2,5 kg Aluminium, 0,5 kg Kupfer, 25 kg Eisen, 1 kg Zink, 1 kg Messing und 466 kg heizwertreiche Fraktion ausgeschleust. Die 466 kg heizwertreiche Fraktion ersetzt Steinkohle mit einem Energieinhalt von 6257 MJ. Für die mechanische Aufbereitung werden 61,9 kWh elektrischer Strom und Diesel mit einem Energieinhalt von 69 MJ verbraucht.

Für die ausgekoppelten Metalle und den sekundären Brennstoff wurden Gutschriften im Ausmaß der Herstellung dieser Materialien vergeben. Bei den sekundären Brennstoffen wurde angenommen, dass diese Steinkohle ersetzt.

Die heizwertarme Fraktion aus der mechanischen Aufbereitung wird der biologischen Behandlung zugeführt. Für 534 kg_{tr} werden bei der biologischen Behandlung 69 MJ Diesel und 138 kg Wasser benötigt. Bei der biologischen Stabilisierung werden 396 kg CO_2, 0,53 kg NH_3, 0,35 kg CH_4 und 0,07 kg Lachgas freigesetzt. Durch die biologische Stabilisierung verringert sich die Masse auf 333 kg. Diese werden einer Inertstoffdeponie zugeführt.

Bei der Müllverbrennung wurde die Situation der Müllverbrennungsanlagen der Slowakei verwendet. Die Daten stammen aus der Datenbank Ecoinvent 3.5. Die dabei ausgekoppelte elektrische Energie betrug 1,39 MJ/kg und die Wärmeenergie 2,85 MJ/kg. Das entspricht einen elektrischen Nutzungsgrad von ca. 0,12 und einen thermischen Nutzungsgrad von ca. 0,24.

Für die Deponierung des Restmülls in der Slowakei wurde der Datensatz Restmülldeponie aus der Datenbank ecoinvent 3.5 verwendet.

Bei der Variante mechanische Aufbereitung und thermochemischer Vorbehandlung wird für die mechanische Aufbereitung derselbe Datensatz wie bei der MBA verwendet. Die Sachbilanzdaten für thermochemischen Vorbehandlung stammen aus eigenen Versuchen im Rahmen des Projektes Waste-2-Material.

Für 534 kg trockenen niederkalorischen Restmüll aus der mechanischen Aufbereitung werden für die thermochemische Vorbehandlung 53,4 kWh elektrischer Strom, 267 kg Wasser und 1,6 kg Kalk benötigt. Durch die thermochemische Vorbehandlung wird die Masse an Feststoffen, welche einer Deponierung zugeführt werden müssen auf 209 kg reduziert. Zusätzlich konnte 3,7 kg Aluminium und 12,3 kg Glas aus dem Feststoff abgetrennt werden.

Bei der thermochemischen Vorbehandlung von 534 kg Input, werden unter anderen 261 kg CO_2, 34 g CO und 454 g NO freigesetzt. Alle Emissionen liegen aber unter den Grenzwerten der Abfallverbrennungsverordnung. Die 209 kg Feststoff, die einer Inertstoffdeponie zugeführt werden, beinhalten rund 25 m- % elementaren Kohlenstoff und stellen somit eine Kohlenstoffsenke dar.

2.3 WIRKUNGSBILANZ

Für die Berechnung der Umweltauswirkungen wurde die Methode CML (baseline) [v4.4, January 2015] verwendet. Diese Methode wurde entwickelt durch das "Zentrum für Umweltwissenschaften (Centrum voor Milieukunde Leiden, CML) an der Universität Leiden in den Niederlanden. Die Diagramme in Abb. 3 zeigen die Ergebnisse der Wirkungsbilanz nach CML für ausgewählte Wirkungskategorien. Ersichtlich ist, dass die Umweltauswirkungen für die Abfallentsorgung in den Regionen Bratislava und Trnava deutlich größer sind als die Umweltauswirkungen des Systems MBA im Burgenland. Das liegt einerseits daran, dass deutlich höhere Mengen des Siedlungsabfalls unbehandelt entsorgt werden und andererseits daran, dass die verwendeten Entsorgungsprozesse Müllverbrennung und Deponierung deutlich mehr Umweltauswirkungen aufweisen als die MBA im Burgenland. Die negativen Zahlenwerte bei der Berechnung der Umweltauswirkungen ergeben sich aus den entsprechenden Gutschriften für die ausgekoppelten Wertstoffe. Ersichtlich ist auch, dass die von der FH Burenland im Projekt Waste-2-Material entwickelte thermochemische Vorbehandlung, welche den biologischen Prozess in der MBA ersetzen könnte, eine Verbesserung der Umweltauswirkungen im Bereich Versauerungspotential, Treibhauspotential, bewirkt. In den anderen Kategorien schneidet die Methode etwas schlechter ab, als die derzeitig angewendete Methode.

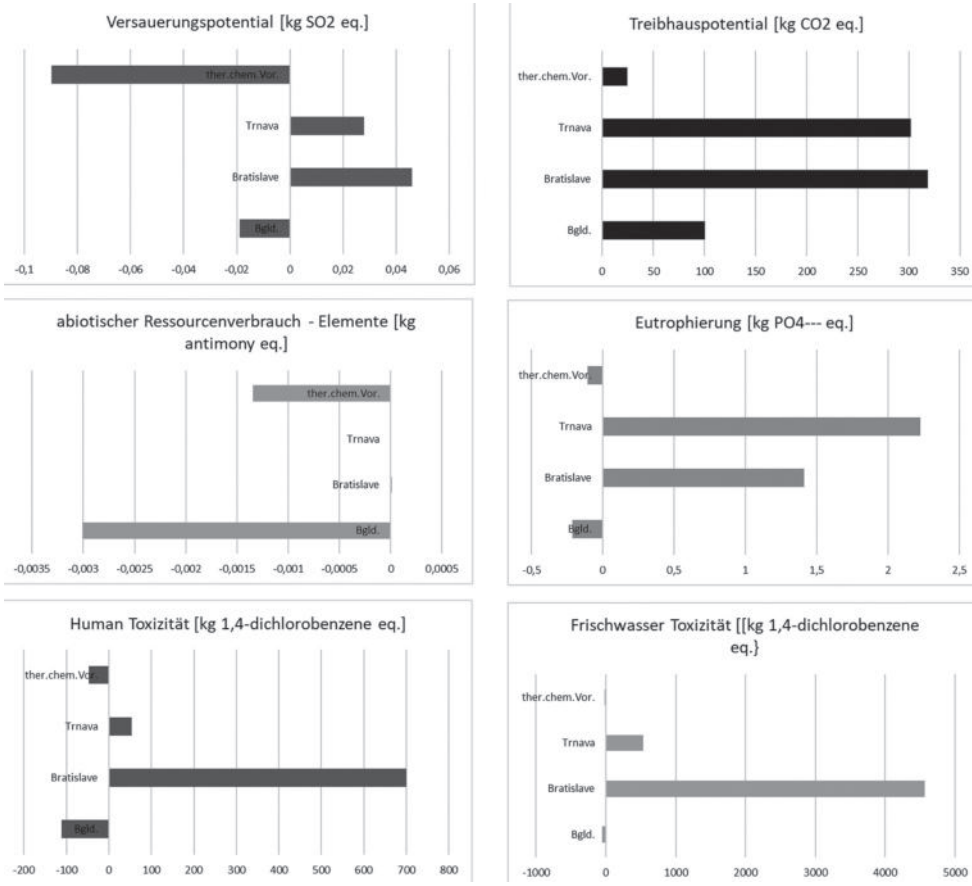


Abb. 3: Ergebnis der Wirkungsbilanz für ausgewählte Wirkungskategorien

2.4 SCHLUSSFOLGERUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Umweltauswirkungen der Abfallwirtschaft in den betrachteten Regionen Trnava, Bratislava und Burgenland deutlich unterschiedlich sind. Um die Umweltauswirkungen in den slowakischen Regionen zu verbessern, müssten in einem ersten Schritt die Verwertungsquoten erhöht werden, um die Masse des gemischten Siedlungsabfalls zu verringern. Diesbezüglich ist eine Verbesserung der getrennten Abfallsammlung erforderlich. Die Entsorgungswege des gemischten Siedlungsabfalls insbesondere die Deponierung des gemischten Siedlungsabfalls sollte umgestellt werden. Eine Möglichkeit wäre die Entsorgung über eine mechanisch biologische Abfallbehandlung. Es konnte auch gezeigt werden, dass die thermochemische Vorbehandlung als Ersatz für die biologische Stufe der MBA in manchen Bereichen eine Verbesserung der Umweltauswirkungen ermöglicht.

LITERATUR

BMNT (2019) Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2019, Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

ecoinvent (2020) https://www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-35/ecoinvent-35.html [Zugriff am 11 01 2020].

Europäische Gemeinschaft 2008) RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. [Online] Available at: https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/DE/TXT/?uri=celex:32008L0098 [Zugriff am 11 08 2020].

Pobožná, M. (2018) Odpady v Slovenskej republike za rok 2017, Bratislava: Štatistický úrad Slovenskej republiky

Slovake (2020) Slovake. [Online] Available at: https://slovake.eu/de/intro/slovakia/general [Zugriff am 14 07 2020]

Štatistický úrad SK (2020) DATAcube - Prehľad stavu a pohybu obyvateľstva - SRoblasť-kraj-okres, m-v [om7011rr]. [Online] Available at: http://datacube.statistics.sk/#!/view/sk/VBD_DEM/om7011rr/v_om7011rr_00_00_00_sk [Zugriff am 18 08 2020].

Statistik Austria (2020) Bevölkerung zu Jahresbeginn 2002-2020 nach Gemeinden (Bevölkerung zu Jahresbeginn 2002-2020 nach Gemeinden (Gebietsstand 2019) , Wien: Statistik Austria.

Dieses Projekt wird finanziert durch:



Kontaktdaten:
Christian Wartha
FH Burgenland Gmbh
Steinamangerstrasse 21
7423 Pinkafeld
Email: christian.wartha@fh-burgenland.at

Abfallrecht-Herausforderungen für Holzgasanlagen – Vergaserrückstand Quo Vadis?

A. M. Ragossnig
RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: Bemühungen hinsichtlich Diversifizierung und Entkarbonisierung des Energiemix haben in den letzten Jahrzehnten dazu geführt, dass Biomasse-basierte Energieversorgungslösungen zu einer wichtigen Säule der österreichischen Energieversorgung avanciert sind.

Der Lastverlauf im Energiebedarf in unseren Breiten stellt reine Wärme-geführte Biomasse-Energiesysteme vor die Herausforderung einer energieeffizienten ganzjährigen Versorgung der Abnehmer. Energietechnische Überlegungen haben daher in den letzten Jahren vermehrt zur Realisierung von Holzgasanlagen geführt. Verschiedenste verfahrenstechnische Anlagenkonzepte werden am Markt angeboten und wurden auch bereits realisiert.

Aufgrund der im Vergleich zu Biomasseaschen aus der Verbrennung grundsätzlich unterschiedlichen Qualität des festen Holzvergaserrückstands – insbesondere auch infolge des aufgrund der unvollständigen thermochemischen Konversion Prozess-bedingt zu erwartenden erhöhten Gehalts an organischen Schadstoffen sowie des aus Brandschutzüberlegungen relevanten verbleibenden Kohlenstoff- bzw. Restenergiegehalts und der ggf. durch das Verfahrenskonzept bedingten physikalischen Erscheinungsform (pulvrig / staubend, feucht / nass, rieselfähig / schlammig / pastös, …) bestehen für den Anlagenbetreiber Herausforderungen im Rückstandsmanagement, die neben – für den Betroffenen unmittelbar operativ wahrnehmbaren - reinen logistischen Herausforderungen vor allem auch (abfall-)rechtlicher Natur sind.

1. EINLEITUNG

1.1 ENERGIETECHNISCHE ASPEKTE

Durch die Vergasung des nachwachsenden Rohstoffes Holz (meist in Form von Holzhackschnitzel oder Pellets) entsteht Holzgas (bestehend aus Methan, Kohlenmonoxid und Wasserstoff), welches in Verbrennungskraftmaschinen als gasförmiger Kraftstoff für die Bereitstellung von Ökostrom dienen kann.

Besonders im Zusammenschluss mit einem Biomasseheizwerk macht sich die Technologie des flexiblen Holzvergasers bewährt. Aufgrund eines intelligenten Puffermanagementsystems besteht die Möglichkeit den Betrieb des Holzvergasers nicht nur Strom-geführt, sondern auch Wärme-geführt zu konzipieren. Insbesondere im Zeitraum heißer Sommermonate, in dem sich der Wärmebedarf der Verbraucher reduziert, ist der Holzvergaser in der Lage seine Leistung vollständig herunterzufahren oder zu reduzieren. Zudem ermöglicht der Einsatz eines Holzvergasers - anders als bei konventionellen Biomasseheizwerken – die kombinierte Bereitstellung von Wärmeenergie und elektrischem Strom, welcher wiederum in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden kann (Spanner Re² GmbH 2018).



Abb. 1: Holz-KWK-Anlage mit Grundlastauslegung (BMV OÖ 2014)

Abb. 1 zeigt den Jahres-Lastverlauf des Wärmebedarfs sowie des Verlaufs der Energie-Bereitstellung eines Biomassekessels bzw. einer Holz-KWK-Anlage mit Grundlastauslegung.

1.2 ASPEKTE DES STOFFSTROMMANAGEMENTS

Als Rückstand des Vergasungsprozesses fallen abhängig von der konkreten verfahrenstechnischen Ausführung Kondensat, Asche (Koks) und ggf. Späne an. Während letzteres im Prozess verbleibt, stellt sich beim flüssigen Rückstand – Kondensat - sehr rasch die Frage nach der Wasserrechts-konformen Einleitung in die Kanalisation. Dieser Aspekt soll in vorliegendem Beitrag nicht im Detail angesprochen werden. Beim festen Rückstand Asche (Koks) - in weiterer Folge „Holzvergaserrückstand" bezeichnet – ist der (Abfall-)rechtliche Rahmen eindeutig, findet in der Praxis jedoch oft (noch) nicht die erforderliche Beachtung.

Holzvergaserrückstände weisen Prozess-bedingt einen hohen Restkohlenstoffgehalt auf. Aufgrund der Vielfalt an verfahrenstechnischen Ausführungen hinsichtlich der Ausschleusung des Vergaser-Rückstands aus dem Prozess liegt dieser in unterschiedlicher physikalischer Form vor. Insbesondere aus Gründen des Brandschutzes werden auch verfahrenstechnische Lösungen am Markt angeboten, die den Austrag des Vergaser-Rückstands über ein Wasserbad realisieren.

Da die Natur der bei der Holzvergasung zurückbleibenden Rückstände sich grundsätzlich von jener der bei der Biomasseverbrennung entstehenden Aschen unterscheidet, ergeben sich hinsichtlich des Rückstandsmanagements daher erhebliche logistische aber auch abfallrechtliche Herausforderungen für Betreiber von Holzvergaseranlagen.

Aufgrund der Prozess-bedingt unvollständigen thermochemischen Umwandlung ist neben einer Anreicherung Brennstoff-bedingter anorganischer Schadstoffe auch vom Vorliegen organischer Schadstoffe im Holzvergaserrückstand auszugehen.

Aus genannten Gründen ist von einer Überschreitung erlaubter Schadstoffgehalte für die Verwendung des Holzvergaserrückstands als Kompostierungshilfsmittel entsprechend der österreichischen Kompostverordnung (BMLFUW 2001) oder als Pflanzenkohle entsprechend ÖNORM S2211 (Austrian Standards plus GmbH 2016) bzw. der entsprechenden Richtlinie der European Biochar Foundation (EBC 2013) auszugehen.

2. RELEVANTER (ABFALL-)RECHTLICHER RECHTSRAHMEN

Beim Rückstandsmanagement des Holzvergaserrückstands stellt sich die Frage der abfallrechtlichen Einstufung desselben. Zentrale Frage ist jene des Zutreffens des Abfallbegriffs, bejahenden Falls alle abfallrechtlichen Bestimmungen für das weitergehende Rückstandsmanagement (Sammeln und Behandeln) anzuwenden wären.

Für die vorliegende Fragestellung sind darüber hinaus die Rechtsgrundlagen für die Abgrenzung zwischen (Neben-)Produkt und Abfall sowie gegebenenfalls die jeweiligen Pflichten des Abfallbesitzers bzw. Inverkehrbringers relevant.

2.1 VORGABEN HINSICHTLICH DES ABFALLBEGRIFFS

Das Abfallwirtschaftsgesetz gibt in Österreich den rechtlichen Rahmen für das Zutreffen bzw. Enden des Abfallbegriffs vor. Dementsprechend trifft der Abfallbegriff entsprechend § 2 (1) AWG (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2002) in folgenden Fällen zu:

„ … bewegliche Sachen,
1. deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat [Anmerkung: subjektiver Abfallbegriff] *oder*
2. deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen." [Anmerkung: objektiver Abfallbegriff]

Die unter Ziffer 2 genannten „öffentlichen Interessen" werden in §1 (3) AWG (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2002) wie folgt definiert:

„§1 (3) Im öffentlichen Interesse ist die Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich, wenn andernfalls

- *die Gesundheit der Menschen gefährdet oder unzumutbare Belästigungen bewirkt werden können,*
- *Gefahren für Wasser, Luft, Boden, Tiere oder Pflanzen und deren natürlichen Lebensbedingungen verursacht werden können,*
- *die nachhaltige Nutzung von Wasser oder Boden beeinträchtigt werden kann,*
- *die Umwelt über das unvermeidliche Ausmaß hinaus verunreinigt werden kann,*
- *Brand- oder Explosionsgefahren herbeigeführt werden können,*
- *Geräusche oder Lärm im übermäßigen Ausmaß verursacht werden können,*
- *das Auftreten oder die Vermehrung von Krankheitserregern begünstigt werden können,*
- *die öffentliche Ordnung und Sicherheit gestört werden kann oder*
- *Orts- und Landschaftsbild sowie Kulturgüter erheblich beeinträchtigt werden können."*

Wenn die laut §2 (1) AWG Z1 (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2002) maßgebliche Entledigungsabsicht fehlt ist das Vorliegen des subjektiven Abfallbegriffs nicht gegeben. Sofern auch keine der oben genannten öffentlichen Interessen beeinträchtigt sind, ist auch im objektiven Sinne nicht vom Zutreffen des Abfallbegriffs auszugehen.

Sobald der Holzvergaserrückstand an einen externen Entsorger abgegeben wird ist jedenfalls vom Zutreffen des subjektiven Abfallbegriffs auszugehen. Sowohl der enthaltene Restkohlenstoff und Energiegehalt als auch die Gehalte an organischen Schadstoffen stellen hierbei in der Praxis eine große Herausforderung dar, da sie die für Biomasseaschen oft übliche Deponierung verhindern bzw. ggf. die Einstufung als gefährlicher Abfall bedingen.

Auch Lösungen, die eine energetische Verwertung des Restkohlenstoffgehalts im Vergaserrückstand im Biomassekessel am Standort des Holzvergasers – sozusagen Inhouse - vorsehen erfordern eine detaillierte Beachtung des abfallrechtlichen Rahmens um sicherzustellen, dass der objektive Abfallbegriff und somit die abfallrechtlichen Festlegungen hinsichtlich Sammlung und Behandlung nicht zutrifft.

2.2 ABGRENZUNG ABFALL ↔ NEBENPRODUKT

Die **Europäische Kommission** hat in ihrer Mitteilung an den Rat und das Europäische Parlament vom 12.03.2007 (Kommission der Europäischen Gemeinschaft 2007) für die Abgrenzung zwischen Abfall und Nicht-Abfall zur Anwendung kommende Grundsätze festgelegt.

Wesentliche Kriterien sind dabei laut Anhang II dieser Mitteilung (Kommission der Europäischen Gemeinschaft 2007) folgende:

- Ist der vorgesehene Verwendungszweck rechtmäßig?
- Wurde der Stoff absichtlich erzeugt? (Wurde der Produktionsprozess geändert, um den Stoff zu erzeugen?)
- Besteht Gewissheit über die Verwendung des Stoffs?
- Kann der Stoff ohne weitere Bearbeitung (als die normale Verarbeitung im Rahmen des Produktionsprozesses) verwendet werden?
- Wird der Stoff als integraler Bestandteil des Produktionsprozesses erzeugt?

Bei fehlenden genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen ist Frage 1 jedenfalls mit „Nein" zu beantworten, konsequenterweise ist der Holzvergaserrückstand rechtlich – jedenfalls im objektiven Sinn - als Abfall einzustufen.

Nachdem der Holzvergaserrückstand im Vergasungsprozess nicht absichtlich erzeugt wird sondern eine unvermeidbare Konsequenz der Holzvergasung ist (Frage 2), ist der Holzvergaserrückstand im Fall der Rechtsmäßigkeit des vorgesehenen Verwendungszwecks als Produktionsrückstand einzustufen.

Nur wenn Fragen 3 – 5 ebenfalls mit „ja" beantwortet werden können ist abfallrechtlich von einem Nebenprodukt und nicht vom Vorliegen der Abfalleigenschaft auszugehen.

In §2 (3a) legt das Österreichische Abfallwirtschaftsgesetz zum Begriff „Nebenprodukt" überdies fest (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2002), dass

„Ein Stoff oder Gegenstand, der das Ergebnis eines Herstellungsverfahrens ist, dessen Hauptziel nicht die Herstellung dieses Stoffes oder Gegenstands ist," nur dann *„ … als Nebenprodukt und nicht als Abfall gelten kann, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:"*

- *„es ist sicher, dass der Stoff oder Gegenstand weiterverwendet wird;*
- *der Stoff oder Gegenstand kann direkt ohne weitere Verarbeitung, die über die normalen industriellen Verfahren hinausgeht, verwendet werden;*
- *der Stoff oder Gegenstand wird als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses erzeugt und*
- *die weitere Verwendung ist zulässig, insbesondere ist der Stoff oder Gegenstand unbedenklich für den beabsichtigten sinnvollen Zweck einsetzbar, es werden keine Schutzgüter (vergleiche § 1 Abs. 3) durch die Verwendung beeinträchtigt und es werden alle einschlägigen Rechtsvorschriften eingehalten."*

Insbesondere letzter Punkt zielt auf den Schutz der öffentlichen Interessen ab und ist für konkrete Ansätze des Rückstandsmanagements fundiert zu adressieren.

Laut der Definition des **Bundesabfallwirtschaftsplans** (BAWP 2017) (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2017) liegt

„ … ein „Nebenprodukt" (kein Abfall) … vor, wenn ein Stoff oder Gegenstand, der nicht Haupterzeugnis eines Herstellungs- oder Gewinnungsverfahrens ist, aber als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses erzeugt wird und mit Gewissheit und ohne weitere Verarbeitung, die über normale industrielle Verfahren hinausgeht, weiterverwendet wird. Diese weitere Verwendung muss zulässig sein, der Stoff oder Gegenstand muss unbedenklich für den beabsichtigten sinnvollen Zweck einsetzbar sein und es dürfen keine Schutzgüter (im Sinne von § 1 Abs. 3 AWG 2002) bei der Verwendung beeinträchtigt werden."

Im Bundesabfallwirtschaftsplan wird in Hinblick auf die **EU-GH Judikatur klargestellt** (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2017):

„Der Begriff Abfall kann nicht eng ausgelegt werden. Ob ein bestimmter Stoff Abfall ist, ist anhand sämtlicher Umstände und unter Berücksichtigung der Zielsetzung der Richtlinie über Abfälle zu beurteilen."

Entsprechend der **Judikatur des Österreichischen VWGH** wurde festgestellt, dass ein Herstellungsprozess jedenfalls ein kontinuierlicher Prozess sein muss (Verwaltungsgerichtshof 2016). Entsprechend den Anwendungsbeispielen in der Mitteilung der Europäischen Kommission (Kommission der Europäischen Gemeinschaft 2007) scheint jedenfalls klar, dass auch thermische Prozesse zur Strom- und Wärmeproduktion als Herstellungsprozess angesehen werden können. Dies wird auch im Rahmen eines Feststellungsbescheids der Bezirkshauptmannschaft Gmunden für einen Rückstand aus dem Gewebefilters eines für die Wärme- und Stromproduktion genutzten Wirbelschichtkessels (Bezirkshauptmannschaft Gmunden 2017) so verstanden, der die Nebenprodukteigenschaft für die unter der Marke Cinerit® vermarktete Flugasche feststellte.

2.3 REACH VERORDNUNG

Sobald ein *„Stoff, Gemisch (Zubereitung) oder Erzeugnis"*, für das der Abfallbegriff nicht zutrifft, in Verkehr gebracht wird, unterliegt dies dem Regelungsbereich der EU-Verordnung zur Registrierung, Evaluierung und Autorisierung von Chemikalien (kurz: REACH) (Österreichischer Nationalrat 2020).

Wesentlich im vorliegenden Fall ist sowohl das Nichtzutreffen des Abfallbegriffs aus rechtlicher Sicht, da Abfälle aus dem Regelungsbereich der REACH Verordnung ausgenommen sind, als auch die Frage, ob ein Inverkehrbringen erfolgt.

Unter „Inverkehrbringen" versteht Artikel 3 Nr. 12 der REACH-Verordnung (Österreichischer Nationalrat 2020) die

„ … entgeltliche oder unentgeltliche Abgabe an Dritte oder Bereitstellung für Dritte. Die Einfuhr gilt als Inverkehrbringen."

Das heißt ein „Inverkehrbringen" im Sinne der REACH-Verordnung liegt unabhängig davon, ob ein Entgelt erzielt wird, erst dann vor, wenn eine Abgabe an Dritte erfolgt.

Sobald eine REACH Registrierung für einen Holzvergaserrückstand vorliegt ist somit ein Inverkehrbringen rechtlich möglich. Dementsprechend ist dann auch abfallrechtlich vom Nichtvorliegen einer Entledigungsabsicht und somit einer nicht gegebenen Abfalleigenschaft auszugehen.

3. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Die energietechnisch in den letzten Jahren verstärkt forcierte Systemlösung der Integration von Holzvergaseranlagen führt neben faktischen logistischen Problemen aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Vergaserrückstands insbesondere aufgrund des bestehenden (abfall-)rechtlichen Rechtsrahmens zu Herausforderungen im Rückstandsmanagement insbesondere des festen Holzvergaserrückstands.

Da die physikalischen Eigenschaften des Holzvergaserrückstands wie auch die Schadstoffgehalte nicht vergleichbar mit jenen üblicher Biomasseaschen sind, erfordert das Rückstandsmanagement für Holzvergaseranlagen große Aufmerksamkeit um rechtskonforme und wirtschaftlich tragbare Umsetzungen zu realisieren.

LITERATUR

Austrian Standards plus GmbH (2016) „ÖNORM S 2211:2016 11 01 Pflanzenkohle - Ausgangsmaterialien, Qualitätsanforderungen und Untersuchungsmethoden," Austrian Standards plus GmbH, 2016.

Bezirkshauptmannschaft Gmunden (2017) Feststellungsbescheid gemäß § 6 Abs. 1 Ziffer 1 AWG 2002 für CINERIT®. Gmunden, Österreich.

Biomassenverband Österreich (s. A.) Holzverstromung https://www.biomasseverband-ooe.at/fachinfolinks/holzverstromung.html (Zugriff: 25.09.2020).

Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW, 2001) „Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung),“ Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, Wien, idF BGBl. II Nr. 292/2001.

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2002) Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft idF BGBl. I Nr. 24/2020 (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002). Wien, Österreich.

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2017) Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 Teil 1. Wien, Österreich.

Burkhardt GmbH (2017) Serienreife und Wirtschaftlichkeit von Pellet Holzvergasern - Projekte in Österreich. Windischgarsten; Österreich.

European Biochar Certificate (EBC, 2013), Richtlinien für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle, Arbaz, Schweiz: European Biochar Foundation (EBC), Version 8.3G – Stand 1.09.2019.

Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2007) Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament zur Mitteilung zu Auslegungsfragen betreffend Abfall und Nebenprodukte. Brüssel, Belgien.

Österreichischer Nationalrat (2020) Bundesgesetz, mit dem ein Bundesgesetz zur Durchführung der REACH-Verordnung erlassen und das Chemikaliengesetz 1996 geändert wird idF BGBl. I Nr. 7/2012. Wien, Österreich.

Spanner Re2 GmbH (2018) Biomasseheizwerk profitiert von Holzvergaser Energieerzeugung. https://www.holz-kraft.com/de/aktuelles/blog/765-biomasseheizwerk-profitiert-von-energieerzeugung-waermegefuehrter-holzvergaser.html (Zugriff: 25.09.2020).

Verwaltungsgerichtshof (2016) Beschluss Ra 2016/05/0012. Wien, Österreich.

Kontaktdaten:
Arne Ragossnig
Bellegardegasse 17
1220 Wien
Email: ragossnig@umweltkonsulenten.at

Session 4c

Kreislaufwirtschaft

Das „Recht auf Reparatur“

Kuhlmann / FH Burgenland / AT

Die Gestaltung von temporären Unterkünften im Sinne einer Kreislaufwirtschaft

Scherhaufer, Zeilinger, Huber-Humer / Universität für Bodenkultur Wien / AT

Das „Recht auf Reparatur“

J. Kuhlmann
Fachhochschule Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: The Right to Repair (R2R) movement has been gaining momentum and has been spreading all around the globe. While there seems to be considerable interest of consumers to be able to repair or to commission repair of their products (Eurobarometer 2014), there are substantial legal and non-legal barriers.

In this paper three main legal obstacles to the establishment of a real right to repair, meaning an enforceable claim against the producer of a non-digital product, are considered; most importantly, the Sale of Goods Directive. It does not prioritise repair in relation to the other warranty remedies. In addition, there is a missing link between the requirements set out (for certain groups of goods) in the implementing regulations of the EU Eco-Design Directive and the requirements of conformity as defined in the Sale of Goods Directive. Consequently, although there is a legal obligation for producers to provide spare parts, manuals and services for a certain amount of time, there is no corresponding right for the consumer to benefit directly from these obligations.

Second, the Waste Framework Directive and its transposition into national law both define a waste hierarchy that put waste prevention on top. At the same time, their definition of waste is rather broad and qualifies things as waste that could easily be (re-)used after (and sometimes even before) repair. Hence, another legal obstacle remains comes with the waste definition and – based on that – waste qualification.

Finally, intellectual property law safeguards a producer's rights by protecting trademarks, copyrights, patents and design rights. Most repairs require disassembly and spare parts and so they bear a potential of trade secrets being disclosed or intellectual property rights infringed. These risks are probably the most deterring factor for a universal right to repair. There are only limited remedies in intellectual property law in favour of consumers or independent repairers.

If there were a right of repair embedded in consumer law – so the argument developed – the sheer number of claims from consumers against producers would pave the way to changes in the other relevant fields of law.

1. EINLEITUNG

Jeder Österreicher und jede Österreicherin produziert jedes Jahr eine beachtliche Menge Abfall 2018 waren es 579 kg pro Kopf (Eurostat 2020). Dieser Abfall wird nach EU-rechtlichen und österreichischen Vorgaben behandelt. Die oberste Priorität in der Abfallhierarchie gilt der Abfallvermeidung, gefolgt von Wiederverwendung (Art 1 Abs 4 ARRL und in dessen Umsetzung § 2 Abs 2 AWG 2002). Sowohl Abfallvermeidung im Sinne einer Weiterverwendung als auch Wiederverwendung setzen in vielen Fällen eine Reparatur voraus, deren Durchführung sich aber oftmals als schwierig oder unwirtschaftlich herausstellt. Auch wenn ein Großteil der Verbraucher (77 %) grundsätzlich eine Reparatur einem Neukauf vorziehen würden (European Commission 2014, 20), bestehen aktuell maßgebliche Beschränkungen. Dass diese grundsätzliche Bereitschaft jedoch oft durch ökonomische Abwägungen, fehlende Dienstleister und auch mangelnde Reparierbarkeit von Produkten unterlaufen wird, soll durch gesetzliche Maßnahmen und wirtschaftliche Anreize in Zukunft verhindert werden (Kieninger 2020, 266f).

Ausgehend von der Frage welche rechtlichen Rahmenbedingungen die Einführung eines Rechts auf Reparatur unterstützen bzw. behindern, wird in einem ersten Schritt das Verbraucherrecht analysiert, das bereits im Gewährleistungsrecht der Verbesserung (also Reparatur) den Vorrang gibt. Doch auch abfallrechtliche und immaterialgüterrechtliche Bestimmungen müssen in diesem Zusammenhang auf ihre Spielräume überprüft werden.

2. DAS „RECHT AUF REPARATUR" – EIN ANFANG!

2.1 DIE EU ALS TREIBENDE KRAFT

Im Rahmen des EU Kreislaufwirtschaftspakets wurde im März 2020 ein neuer Aktionsplan erlassen, der nun erstmals explizit ein „Recht auf Reparatur" vorsieht, das in Form von legislativen und nicht-legislativen Maßnahmen umgesetzt werden soll. Schon die Jahre und Initiativen davor hatten auf EU-Ebene derartige Tendenzen erkennen lassen, wenn auch nicht in dieser Klarheit (Kieninger 2020, 267f). Während sich die angestrebten Ziele auf Konsum und Verbrauch als Ganzes beziehen und somit horizontale Maßnahmen enthalten, wird insbesondere auf dem Elektronik- und IKT-Sektor der Schwerpunkt für die Umsetzung eines derartige Rechts gelegt (KOM [2020] 98 final).

So eingängig der Begriff „Recht auf Reparatur" ist, so komplex ist sein konkreter Inhalt und auch die Gemengelage der unterschiedlichen Interessen der verschiedensten Akteure – VerbraucherInnen, Unternehmen, aber auch der Staat sind von den Auswirkungen eine Umsetzung eines solchen Rechtes – je nach Ausprägung – mehr oder weniger stark betroffen. Zu Beginn steht daher eine kurze Darstellung des Inhalts sowie der unterschiedlichen Interessen, um dieses Rechtsinstrument in der Folge richtig einordnen zu können.

2.2 INHALT EINES „RECHTS AUF REPARATUR"

Der genaue Umfang eines „Rechts auf Reparatur" ist – je nach Quelle und dahinterliegender Interessenlage – unterschiedlich ausgeprägt. Klar ist jedoch, dass aus allen vorgelegten Vorschlägen kein subjektives Recht im klassischen Sinn abgeleitet werden kann. In erster Linie werden unter dem Schlagwort „Recht auf Reparatur" HerstellerInnen Pflichten auferlegt, einzelne VerbraucherInnen werden jedoch keine zusätzlichen Rechte zukommen, die sie im Rahmen ihres Kaufvertrags geltend machen können.

Als Grundsatz eines „Rechts auf Reparatur" gilt, dass jemand der ein Produkt besitzt, durch den HerstellerInnen nicht daran gehindert werden darf, es zu reparieren. Dieses Recht umfasst zwei Aspekte: Einerseits muss es den VerbraucherInnen mit den ihnen normalerweise zur Verfügung stehenden Mitteln ermöglicht werden, Reparaturen selbst durchzuführen bzw. diese auch bei unabhängigen Werkstätten zu beauftragen (Reparierbarkeit bzw. Reparierfähigkeit). Andererseits umfasst dieses Recht notwendigerweise auch ein Recht auf Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Diagnose- und Reparaturanleitungen (Oberpriller et al. 2019/20). Um diese Verpflichtungen umzusetzen, braucht es einschlägige rechtliche Vorgaben, die unterschiedliche Interessen berühren.

Durch ein Verbot der Behinderung von VerbraucherInnen oder Dritten Produkte bestimmter Hersteller zu reparieren, können Probleme in Bezug auf den Schutz von Immaterialgüterrechten und Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen entstehen. VerbraucherInnen sollen durch solche Regelungen besser gestellt werden, weil ihnen dadurch auch nach Ablauf der Gewährleistungsfristen erleichtert wird, die Lebenszeit eines Produkts zu verlängern. Der Umwelt, und damit auch der Gesellschaft als Ganzes, soll geholfen werden, indem Ressourcen länger genutzt werden und Abfall reduziert wird.

3. DAS „RECHT AUF REPARATUR" – SEIN ENDE?

3.1 RECHTLICHE HINDERNISSE BEI DER UMSETZUNG EINES „RECHTS AUF REPARATUR"

Bevor neue rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, lohnt es sich den Status quo zu erheben, um herauszufinden, welchem Ausmaß rechtliche Änderungen überhaupt notwendig sind. Wie bereits erwähnt, bestehen in der österreichischen Rechtsordnung (mehrheitlich EU-rechtlich vorgegebene) Bestimmungen, die dem „Recht auf Reparatur" im Wege stehen, diese insbesondere im Bereich des Verbraucher- und Abfallwirtschaftsrechts. Svensson et al. (2018, 5f) definieren in ihrer Arbeit eine Reihe weiterer rechtlicher Hindernisse, deren Grundlagen sich vor allem im Immaterialgüterrecht sowie in einschlägigen Kaufverträgen finden. Beldiman et al. (2020) ergänzen in ihrer Analyse auch noch Wettbewerbsrecht, das jedoch für diese kurze Darstellung auf Grund der starken Einzelfallbezogenheit ausgeklammert bleiben soll.

3.1.1 Verbraucherrecht

Als Teil der Europäischen Union ist Österreich in Bezug auf seine verbraucherrechtlichen Bestimmungen zu einem überwiegenden Teil von jenen Bestimmungen geprägt, die durch EU-Rechtsakte vorgegeben werden. Das betrifft insbesondere auch jene Normen, die regeln, wer den Mangel an einer Sache beheben muss und wie eine solche Gewährleistung aussehen muss (§§ 922ff ABGB). Aktuell besagt § 922 ABGB, dass jemand, der „einem anderen eine Sache gegen Entgelt überlässt, […] Gewähr [zu leisten hat], dass sie dem Vertrag entspricht“. Wie sich aus dem Wortlaut ergibt, ist diese Regelung nicht nur auf VerbraucherInnen anwendbar, soll aber im Rahmen dieses Beitrags nur in Bezug auf diese und damit einhergehenden Besonderheiten diskutiert werden (siehe auch Anwendungsbereich der VerbrauchsgüterkaufRL).

Das eben erwähnte Recht auf Gewährleistung, das auch tatsächlich als ein subjektives Recht der VerbraucherInnen ausgestaltet ist und diesen für einen bestimmten Zeitraum (siehe § 933 ABGB) zusteht, bedeutet jedoch nicht notwendigerweise ein Recht auf Reparatur. § 932 ABGB normiert, dass die primären Gewährleistungsbehelfe – also die bevorzugten Instrumente für die Behebung eines aufgetretenen Mangels – Austausch oder Verbesserung sind. Diese beiden sind vollkommen gleichwertig zu sehen und lassen VerbraucherInnen somit die Wahl, ob die mangelhafte Sache gegen eine mangelfreie ausgetauscht oder den Mangel durch eine Reparatur verbessert werden soll. Diese Wahlmöglichkeit wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass die Wahl keine unverhältnismäßigen Kosten beim Verkäufer verursachend darf (§ 932 Abs 2 ABGB in Umsetzung von Art 3 Abs 3 VerbrauchsgüterkaufRL). Diese Regelung wird auch nach Umsetzung der WarenkaufRL in ihrer aktuellen Form bestehen bleiben, da Art 13 Abs. 2 leg cit im Zusammenhang mit der Ausübung des Wahlrechts keine Systemänderung vorsieht.

Somit ist bereits auf der ersten Ebene, auf der VerkäuferInnen noch die primäre Pflicht zur Herstellung der Mangelfreiheit trifft, das „Recht auf Reparatur“ für VerbraucherInnen nicht generell durchsetzbar: selbst wenn die Wahl auf Verbesserung fiele, wird es in vielen Fällen schlichtweg ökonomisch unverhältnismäßig sein, eine Reparatur durchzuführen. Insofern greift auch die Erweiterung der objektiven Anforderungen an die Vertragsmäßigkeit um das Kriterium der Haltbarkeit (Art 7 Abs. 1 lit d WarenkaufRL) zu kurz, weil damit nicht das Grundsatzproblem gelöst wird, dass bei Unverhältnismäßigkeit idR dem Austausch der Vorrang vor der Reparatur gegeben werden wird.

Dieses Kriterium der Unverhältnismäßigkeit ist nur in Bezug auf wenige Produktkategorien durch einen Rückgriff auf die Durchführungsverordnungen zur ÖkodesignRL eingeschränkt. In diesen werden die HerstellerInnen zur mehrjährigen und zeitnahen Bereitstellung von Ersatzteilen sowie zur generellen Reparierbarkeit ihrer Produkte verpflichtet. Die Argumentation, dass eine Reparatur unverhältnismäßige Kosten verursacht, wäre unter diesen Rahmenbedingungen dann nur schwer zur führen (Kieninger 2020, 277).

Terryn (2019, 860f) wirft in diesem Zusammenhang eine Alternative auf, die auf Grund ihrer Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft hier nicht unerwähnt bleiben soll. Sie beschäftigt sich mit der Frage, ob ein gewährleistungsrechtlicher Austausch auch mit instandgesetzten und damit nicht neuen Produkten möglich wäre. In Österreich entsteht nach jedem Austausch bzw. jeder Reparatur eine neuerliche Gewährleistungspflicht, die sich inhaltlich nicht von der beim Erwerb des neuen Produkts unterscheidet (Lehfuss 2018). Die VerbraucherInnen werden insofern also nicht schlechter gestellt, da sie bei einer Mangelhaftigkeit des instandgesetzten Produktes ebenso auf Mangelfreiheit innerhalb der gesetzlichen Gewährleistungsfristen bestehen können.

Noch viel schwieriger stellt sich die Situation ab dem Zeitpunkt des Ablaufs der Gewährleistungsfrist dar, wenn für die Mangelhaftigkeit einer Sache nicht mehr einzustehen ist. Zwar legen die oben erwähnten Durchführungsverordnungen für einige Produkte, insbesondere Haushaltsgeräte wie Waschmaschine, Kühlgeräte und elektronische Displays, gewisse Regeln fest, die die Reparierbarkeit über einen längeren Zeitraum erleichtern sollen, doch werden diese Vorgaben nicht eingehalten, haben VerbraucherInnen kein subjektives Recht, also keinen durchsetzbaren Anspruch. Nur, wenn den VerbraucherInnen auch in ihren individuellen Kaufverträgen die Einhaltung dieser Regeln zugesichert wird, können bei Nicht-Erfüllung vertragsrechtliche Ansprüche geltend gemacht werden (Kieninger 2020, 272f).

3.1.2 Abfallwirtschaftsrecht

Wie bereits von Piska & Petschinka (2020) ausführlich ausgeführt, ist die Reparatur deshalb unter abfallwirtschaftsrechtlichen Gesichtspunkten zu betrachten, weil die Qualifikation einer Sache als Abfall weitreichende Konsequenzen mit sich zieht, die insbesondere durch die unklare Einordnung der abfallrechtlichen Maßnahme „Reparatur" Bedeutung für dieses Thema erlangt.

Das österreichische Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002) ordnet – ebenso wie dessen europarechtlichen Vorgaben in der Abfallrahmenrichtlinie (ARRL) – die Reparatur zwei unterschiedlichen Kategorien zu: einerseits den Maßnahmen der Abfallvermeidung und andererseits der Abfallbehandlung. Die Einordnung in die eine oder andere Gruppe ist jedoch insofern von Bedeutung, da Sachen, die als Abfall qualifiziert werden, nur mehr einer Abfallbehandlung zugeführt werden dürfen (eine Vermeidung ist dann ja auch nicht mehr möglich). Wird eine Sache im Rahmen einer Maßnahme der Abfallvermeidung repariert, ist diese konsequenterweise noch nicht als Abfall zu qualifizieren (siehe auch Art 3 Z 12 ARRL).

Ganz grundsätzlich sind Sachen dann Abfall, wenn „sich der Besitzer [ihrer] entledigen will oder entledigt hat oder 2. deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen" (§ 2 Abs 1 AWG 2002). Diese Definition enthält zwei sich ausschließende Anknüpfungspunkte, wobei der erste eine rein subjektive Komponente enthält und der zweite nach rein objektiven Kriterien zu beurteilen ist. Der Wortlaut der Bestimmung, insbesondere der subjektive Abfallbegriff, lässt jedoch eine sehr weite Auslegung zu und würde u.a. auch Spenden an Second-Hand-Einrichtungen als Abfall qualifizieren, da sich auch in diesem Fall der Besitzer der Sache entledigen will.

Im Rahmen der „Vorbereitung zur Wiederverwendung" (eine Maßnahme der Abfallbehandlung) wird der Abfall so verändert, – unter anderem durch die Maßnahme „Reparatur" – dass er seine Abfalleigenschaft verliert und ebenfalls wiederverwendet werden kann (§ 2 Abs 4 Z 6 iVm § 5 Abs 1 letzter Satz AWG 2002), aber erst nachdem bereits Abfall entstanden ist. Das oberste Ziel der europäischen sowie der österreichischen Abfallhierarchie ist aber die Abfallvermeidung, die insbesondere durch Reparatur erreicht werden kann. Die aktuelle Definition des Abfallbegriffs und dessen weite Auslegung stehen einem „Recht auf Reparatur" oder zumindest einer Priorisierung entgegen, da Sachen unnötig als Abfall qualifiziert werden, deren (Wieder)Verwendung aus objektiven Gesichtspunkten jedoch nichts im Weg stünde (Petschinka 2020).

3.1.3 Immaterialgüterrechte

Maßgeblichen Einfluss auf die Komplexität einer Reparatur hat auch das Design eines Produkts sowie seiner Einzelteile. Nicht selten sind selbst kleine sichtbaren Elemente eines Produkts so gestaltet, dass sie muster- oder markenrechtlichen Schutz genießen können. Gleichzeitig stecken in vielen Produkten auch Geschäftsgeheimnisse, die sich bei einer Reparatur den Ausführenden unweigerlich offenbaren würden („reverse engineering").

Die für diese Diskussion relevante Konsequenz daraus ist, dass Ersatzteile von alternativen Herstellern oft deshalb nicht erfolgreich sind, weil sie entweder die Immaterialgüterrechte des ursprünglichen Herstellers verletzen oder – wenn sie dies nicht tun – nicht dieselbe Funktionalität aufweisen. Ein aktueller Fall aus Norwegen (Henrik Huseby v Apple Inc) hat gezeigt, dass große Konzerne ihre Marken vollumfänglich schützen wollen und sie eine Reparatur unter Verwendung nicht autorisierter, instandgesetzter Originalteile mit ihrem Logo, wenn auch nicht für Verbraucher unmittelbar sichtbar, mit allen Mitteln unterbinden werden (Grinvald & Tur-Sinai 2019, 74f).

Der musterschutzrechtlichen Problematik wird bereits in der aktuellen Gesetzgebung versucht Rechnung zu tragen, indem Bestimmungen für Must-Fit- und Must-Match-Teile gelten (§ 2b MuSchG). Diese Regelung (die durch ihre europarechtliche Vorgabe innerhalb der gesamten EU gilt) legt fest, dass es keinen Musterschutz für „Erscheinungsmerkmalen eines Erzeugnisses [gibt], die ausschließlich durch dessen technische Funktion bedingt sind" oder „die zwangsläufig in ihrer genauen Form und ihren genauen Abmessungen nachgebildet werden müssen, damit das Erzeugnis, in das das Muster aufgenommen oder bei dem es verwendet wird, mit einem anderen Erzeugnis mechanisch zusammengebaut oder verbunden oder in diesem, an diesem oder um dieses herum angebracht werden kann, so dass beide Erzeugnisse ihre Funktion erfüllen."

4. „RECHT AUF REPARATUR“ – EIN FAZIT!

Reduziert man den Begriff „Recht auf Reparatur“ auf seinem ursprünglichen Bedeutungsinhalt, ist damit das Recht verbunden eine Sache an der in der Regel ein absolutes Recht, das Eigentumsrecht, besteht, eben nicht nur zu zerstören oder wegzuwerfen, sondern sie insbesondere auch zu reparieren bzw. reparieren zu lassen. Oft ist gerade dieses Recht durch vertragliche oder tatsächliche Beschränkungen stark eingeschränkt. Ein direkter Anspruch auf Reparatur besteht noch nicht einmal im Rahmen des Gewährleistungsrechts. Die Ankündigungen in EU-Positionspapieren oder dem aktuellen Regierungsprogramm (Bundeskanzleramt Österreich 2020) bleiben diesbezüglich entweder vage, undefiniert oder beschäftigen sich nur mit Begleitmaßnahmen. Für die Umsetzung eines echten „Rechts auf Reparatur“ müssten einzelne Grundzüge des Gewährleistungsrechts unter der Prämisse der Ressourcenschonung überarbeitet werden und Verbraucherrecht generell viel stärker im Rahmen der Bestrebungen zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft eingebunden werden. Je unmittelbarer der Anspruch der KonsumentInnen wird, desto eher könnten dadurch auch Änderungen in anderen Rechtsmaterien angestoßen werden.

LITERATUR

Beldiman D., Blanke-Roeser C., Tischner A. (2020) Spare Parts and Design Protection – Different Approaches to a Common Problem. Recent Developments from the EU and US Perspective. GRUR International, 69/7, 673-692.

Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002) BGBl. I Nr. 102/2002 idF BGBl. I Nr. 24/2020.

Bundesgesetz vom 7. Juni 1990 über den Schutz von Mustern (Musterschutzgesetz 1990 - MuSchG) BGBl. Nr. 497/1990 idF BGBl. I Nr. 37/2018.

Bundeskanzleramt Österreich (2020) Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020 – 2024.

Europäische Kommission (2014) Flash Eurobarometer 388 “Attitudes of Europeans towards Waste Management and Resource Efficiency”.

Europäische Kommission (2020) Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft – Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. KOM (2020) 98.

Eurostat (2020) Municipal waste by waste management operations – Kilograms per Capita.

Grinvald L.C., Tur-Sinai O. (2019) Intellectual Property Law and the Right to Repair. Fordham Law Review 88, 63-128.

Kieninger E.-M. (2020) Recht auf Reparatur („Right to Repair“) und Europäisches Vertragsrecht. Zeitschrift für Europäisches Privatrecht 2/2020, 264-280.

Lehfuss N. (2018) Der Verbesserungsverzug nach Verbesserungszusage im Gewährleistungsrecht. ÖJZ 2018/95, 701-708.

Oberpriller Q., Weber F., Iten R., Fasko R., Frei U. (2019/20) Beurteilung von ausgewählten Massnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft in der Nutzungsphase (https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wirtschaft-konsum/externe-studien-berichte/beurteilung-von-ausgewaehlten-massnahmen-zur-foerderung-der-kreislaufwirtschaft-in-der-nutzungsphase.pdf.download.pdf/Massnahmen-Foerderung-Kreislaufwirtschaft.pdf).

Petschinka P. (2020) Die Reparatur (des Abfallbegriffs) als notwendiger Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft. Recht der Umwelt – Umwelt &Technik 4/2020, 43-48.

Piska C., Petschinka P. (2020) Abfallbegriff 2.0: Schließt das „Right to Repair“ den Kreislauf? ecolex 342-343.

Richtlinie 1999/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 1999 zu bestimmten Aspekten des Verbrauchsgüterkaufs und der Garantien für Verbrauchsgüter, ABl L 1999/171, 12 (VerbrauchsgüterkaufRL).

Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, ABl L 2008/312, 3 (Abfallrahmenrichtlinie, ARRL).

Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte, ABl L 2009/285, 10 (ÖkodesignRL).

Richtlinie (EU) 2019/771 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Mai 2019 über bestimmte vertragsrechtliche Aspekte des Warenkaufs, zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/2394 und der Richtlinie 2009/22/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinie 1999/44/EG, ABl L 2019/136, 28 (Warenkaufrichtlinie, WKRL).

Svensson S., Richter J. L., Maitre-Ekern E., Pihlajarinne T., Maigret A., Dalhammar C. (2018) The Emerging 'Right to Repair' legislation in the EU and the U.S. Paper presented at Going Green CARE INNOVATION 2018 , Vienna, Austria.

Terryn E. (2019) A Right to Repair? Towards Sustainable Remedies in Consumer Law. European Review of Private Law 4-2019, 851-874.

Kontaktdaten:
Josefine Kuhlmann
Campus 1
7000 Eisenstadt
Email: josefine.kuhlmann@fh-burgenland.at

Die Gestaltung von temporären Unterkünften im Sinne einer Kreislaufwirtschaft

S. Scherhaufer, J. Zeilinger, M. Huber-Humer
Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfallwirtschaft, Wien, Österreich

ABSTRACT: Many cities are experiencing an increasing demand for temporary housing facilities, sometimes in situations of urgency and complexity. Sustainability considerations are not yet commonplace in temporary housing (Perrucci et al. 2016). Often, a linear design approach is prevalent: Repeatedly, the design and construction phase of temporary housing facilities is rushed and followed by a very short operation phase of only months or a few years. Once the end-of-life phase of temporary housing facilities is reached, they are being demolished and end up as construction waste. Bearing in mind that the building sector is a major contributor to release of emissions, energy and resource consumption, this linear design approach does not comply with sustainability considerations (Johnson 2007). Circularity by design should therefore be considered as an alternative approach to urban temporary housing, as it aims to preserve the function and value of products, components and materials at the highest possible level in order to extend the lifespan of products and reduce their environmental impact (EEA 2017). In an interdisciplinary research project, existing temporary housing concepts and prototypes will be investigated and evaluated. In addition to social and economic factors, ecological effects of different temporary forms of housing should be assessed by means of a life cycle assessment (LCA). The LCA shall serve as a basis for decision-making in order to show measures for the reduction of emissions and to identify resource-saving construction concepts for temporary housing forms. The system boundary of the analysis forms a „cradle-to-grave" approach, i.e. from the construction of the buildings, through several utilisation cycles to the dismantling of the buildings for proper recycling. Data are based on material lists of the different types of housing, energy and water consumption during use, as well as estimates of the costs of construction and transport. The main focus is on the assessment of reuse and circularity, as the housing types contain partly or completely reusable components. The manuscript shows methodological approaches to the assessment of circularity as well as environmental hotspots of sustainable solutions for temporary accommodations.

1. EINLEITUNG

In vielen Städten besteht ein zunehmender Bedarf an temporären und schnell zu errichtenden Unterkünften, um beispielsweise Flüchtlingen, Personen nach Großschadensfällen (z.B. nach Bränden) oder generell vulnerablen Personengruppen geeignete Wohnmöglichkeiten zu bieten. Überlegungen zur nachhaltigen Bauweise sind bei temporären Unterkünften meist nicht vordergründig (Perucci et al. 2016), da die Planungs- und Bauphase von Notunterkünften oftmals unter großem Zeitdruck durchgeführt wird, gefolgt von einer sehr kurzen Betriebsphase von nur Wochen, Monaten oder wenigen Jahren. Sobald das Ende der Nutzung der temporären Unterkünfte erreicht ist, werden sie abgerissen und entsorgt. Der Bausektor trägt generell wesentlich zum Energie- und Ressourcenverbrauch bei. Wenn Unterkünfte nur temporär genutzt werden und nach der Nutzungsphase aus den verschiedensten Gründen nicht wiederverwendet, sondern entsorgt werden, geht dieser lineare Designansatz nicht mit Nachhaltigkeitsüberlegungen einher (Johnson 2007). Eine nachhaltige Bauweise im Sinne einer Kreislaufwirtschaft sollte daher als alternativer Ansatz für temporäre Wohnformen forciert werden, um die Lebensdauer der Produkte zu verlängern und ihre Umweltauswirkungen zu verringern (EEA 2017).

In einem interdisziplinären Forschungsprojekt gefördert durch den WWTF werden bestehende temporäre Wohnkonzepte und Prototypen untersucht und bewertet. Eine Datenbank wurde eingerichtet, um

umfassende Informationen über NutzerInnengruppen, Standort und Merkmale der Wohneinheiten, beispielsweise hinsichtlich Wasser-, Abwasser-, Abfallmanagement und Energiesystemen, Umsetzung, Dauer sowie Überlegungen zum Lebenszyklus oder zur Wiederverwendbarkeit zu sammeln. Neben sozialen und ökonomischen Faktoren, sollen ökologische Auswirkungen unterschiedlicher temporärer Wohnformen mittels einer Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz) bewertet werden. Die Ökobilanz soll als Entscheidungsgrundlage dienen, um Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen aufzuzeigen und ressourcenschonende Bau- und Abbaukonzepte für temporäre Wohnformen zu identifizieren. Während die Methode zur Berechnung des Treibhausgaspotenzials durch Standards (ISO 2006a; ISO 2006b), Handbücher (European Commission 2010) oder dem „Product Environment Footprint (PEF)" (Manfredi et al. 2012) weitgehend etabliert ist, steckt die Messung der Kreislauffähigkeit (Circular Economy) noch in den Kinderschuhen.

Durch die Schaffung des Kreislaufwirtschaftspakets der EU im Jahr 2015 (COM (2015) 613 final), wird die Entwicklung einer stärker kreislauforientierten Wirtschaft immer bedeutsamer. Es soll damit eine „nachhaltige, CO_2-arme, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft" (Europäische Kommission 2015) in Europa geschaffen werden. Dazu sind nicht nur Maßnahmen zur Erreichung, Förderung und Unterstützung eines zirkulären Wirtschaftssystems (wie beispielsweise im Aktionsplan angeführt) von Nöten, sondern auch robuste und harmonisierte Methoden zur Beurteilung der Kreislaufwirtschaft. Dieser Beitrag konzentriert sich auf methodische Ansätze zur Bewertung der Zirkularität bei temporären Wohnformen. Weiters werden Hotspots von ökologischen Auswirkungen verschiedener Varianten von temporären Unterkünften und Möglichkeiten zur Emissionsreduktion aufgezeigt.

2. METHODE

2.1 ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

Übergeordnetes Ziel im Zuge des Forschungsprojektes ist es, die Nachhaltigkeit unterschiedlicher temporärer Wohnformen zu messen. Dabei wurden eine Reihe von Indikatoren (beispielsweise Treibhausgaspotential) zur Abschätzung einzelner Wirkungskategorien (Klimawandel) in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit identifiziert, um anschließend für eine Bewertung herangezogen zu werden. Dieser Konferenz-Beitrag befasst sich mit den Indikatoren ‚Treibhausgaspotential' sowie ‚Zirkularität' und geht auf mögliche Erkenntnisse bzw. Schlussfolgerungen bei der Bewertung dieser Indikatoren näher ein.

Die Bewertung erfolgt nach dem Ansatz einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) in der alle In- und Outputs eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges zusammengestellt und die potenziellen Umweltwirkungen beurteilt werden (ISO 2006a; ISO 2006b). Das Produktsystem, welches exemplarisch für diesen Konferenzbeitrag, herangezogen wird, betrifft ein temporäres Wohnkonzept, die vorwiegend aus Paletten besteht und in Folge als ‚Pallet Shelter' bezeichnet wird. Das Paletten-Gebäude wird bei temporärem Gebrauch errichtet, kann allerdings bei Nicht-Gebrauch wieder leicht demontiert bzw. abgebaut werden und an einem anderen Ort wieder aufgebaut werden. Ziel ist es, das Gebäude soweit möglich wiederzuverwenden, gewisse Teile müssen bei Standortwechsel voraussichtlich wieder neu bereitgestellt werden. Das „Pallet Shelter" ist eines von drei ausgewählten Designvorschlägen für temporäre Wohnformen, die im Zuge einer Lehrveranstaltung namens Design Studio „Pop-up Shelter" von JASEC TU Wien im Wintersemester 2019/20 basierend auf vordefinierten Rahmenbedingungen (Szenarien) ausgearbeitet wurden. In diesem Beispiel wurde eine temporäre Wohnmöglichkeit für den Anlassfall einer anhaltenden Hitzeperiode zur Überbrückung über mehrere Wochen für bestimmte vulnerable Gruppen, wie SeniorInnen und Jungfamilien, entwickelt.

Der Untersuchungsrahmen für die Bewertung ist in Abb. 1 dargestellt und richtet sich nach einem „cradle-to-grave" Ansatz, d.h. von der Errichtung der Gebäude, über mehrere Nutzungszyklen (x number of reuse) bis zur Zerlegung der Gebäude für ein fachgerechtes Recycling. Datengrundlage bilden unter anderem Materiallisten der unterschiedlichen temporären Wohnkonzepte, Energie- und Wasserverbrauch während der Nutzung, sowie Abschätzungen zum Aufwand bei der Errichtung und beim Transport. Die funktionelle Einheit ist 1 m^2 temporäre Wohnform (inkl. Außenbereiche, Gemeinschaftsräume) in einem

Lebenszyklus. Dabei ist der Lebenszyklus wie folgt definiert: Im Beispiel des „Pallet Shelters" schließt ein Lebenszyklus mit dem Abbau/Demontage der Wohneinheiten ab und mit dem (erneuten) Aufbau fängt der zweite Lebenszyklus an. Die Aufwendungen in den Prozessen dazwischen, d.h. die in jedem Lebenszyklus durchlaufen werden (Prozesse A4-C1b), werden aufaddiert, während die Prozesse up-stream (Herstellung der Bauteile A1-3) und down-stream (Verwertung/Entsorgung C2-4) aliquot den jeweiligen Lebenszyklen zugerechnet werden können.

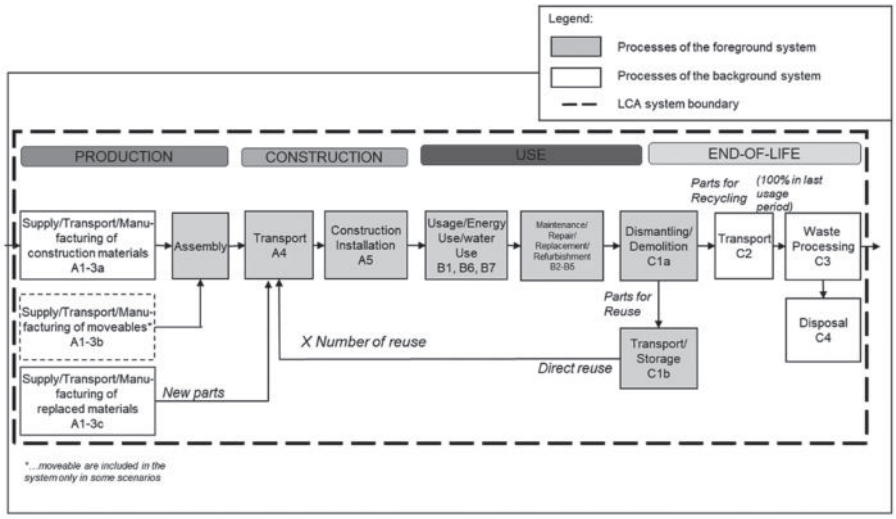


Abb. 1: Untersuchungsrahmen für das betrachtete Produktsystem „Pallet Shelter"

2.2 SACHBILANZ

In der Sachbilanz einer Ökobilanz werden alle Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges zusammengestellt und quantifiziert (ISO 2006a). Die Identifizierung aller In- und Outputs sowie die Bezeichnung der Prozesse (wie in Abb.1) erfolgte in Anlehnung an DIN EN 15804, welche Grundregeln für Umweltproduktdeklarationen für die Produktkategorie Bauprodukte anführt (DIN 2012).

Daten für Input und Outputs der Prozesse im Vordergrundsystem (in grau in Abb.1) stammen von Erhebungen, Berechnungen oder Abschätzungen im Projektkonsortium: z.B. manuelle Kalkulation des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase, Abschätzung der Transportdistanz von Produktherstellung zum Standort der Wohneinheit, Abschätzung bzw. Erhebung (durch Befragung von ähnlichen Bauvorhaben oder durch Literaturrecherche) zum Maschineneinsatz bei der Errichtung und Demontage, Erhebungen durch ExpertInnenbefragung zu re-use-fähigen Materialen/Bauteilen. Die Zusammensetzung der Wohnbauformen ist auf Basis von Bauteilen (z.B. Fenster, Tür) mit Angaben zum Material und zur Masse je Wohneinheit durch den Designvorschlag gegeben. Die Zusammensetzung der einzelnen Bauteile wiederum (d.s. Prozesse im Hintergrundsystem) werden aus LCA Datenbanken wie Ecoinvent 3.6 (Ecoinvent Centre 2019) und Gabi (Sphera 2020) entnommen. Auch die In- und Outputs der Prozesse des Abfallbewirtschaftungssystemen werden aus den LCA Datenbanken entnommen. Der Anteil der Bauteile für die Wiederverwendung, Verwertung und Entsorgung werden allerdings bestimmt und gegebenenfalls in mehreren Varianten festgelegt (z.B. durch Design for Reuse/ Design for Recycling).

2.3 WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

2.3.1 Beurteilung des Treibhausgaspotenzial

Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen wird das Software-Tool Gabi (Sphera 2020) eingesetzt. Die Wirkungsabschätzung erfolgt nach dem ‚Intergovernmental Panel on Climate Change' (IPCC). Die Charakterisierungsfaktoren des IPCC 2014 aus dem fünften Bewertungsbericht werden angewendet (z.B. CH_4: 28 mal CO_2, N_2O: 265 mal CO_2 globales Erwärmungspotential über einen Zeitraum von 100 Jahren). Die Treibhausgas (THG)-Emissionen werden in Kohlendioxidäquivalente (CO_2e) angeführt und werden sowohl für Energie- als auch Ressourcen aus den LCA Datenbanken entnommen.

2.3.2 Beurteilung der Zirkularität

Es gibt verschiedene Formen der Zirkularität, die in einer LCA unterschiedlich berücksichtigt werden müssen. Im Bezug auf temporäre Wohnformen sind die folgenden Möglichkeiten der Gestaltung zu bedenken:

- Einmalnutzung & Entsorgung
- Wiederholte Wiederverwendung von temporären Wohnformen bei gleichbleibender Funktion
- Wiederverwendung von temporären Wohnformen mit Funktionsänderung
- Teilweise Wiederverwendung, Renovierung, Reparierbarkeit und verschleißarme Wiederaufbereitung von temporären Wohnformen
- Aneignung von Bestandsgebäuden für temporäre Wohnzwecke
- Verstetigung von temporären Wohnformen

Die Beurteilung der Zirkularität mit Berechnungstools wie dem „Material Circularity Index" entwickelt von der Ellen MacArthur Foundation (2015) oder der „Circular Footprint Formula" in Zampori and Pant (2019) berücksichtigt Materialien oder Produkte für die Verwertung sowie für die Wiederverwendung. Die Formeln kombinieren zum einen die Emissionen bei der Herstellung des Primärmaterials und zum anderen die Emissionen bei der Verarbeitung des Sekundärmaterials unter Berücksichtigungen der unterschiedlichen Qualität des Sekundärmaterials und einer Vergleichsgröße (z.B. Masse, Energie, Nährwert). Diese „neu" entwickelten Formeln sollen daher bisher offene Probleme wie die Frage der Systemgrenze zwischen erstem und zweitem Lebenszyklus, Downcycling oder Doppelzählungen, lösen.

Weiters kann die Wiederverwendungsrate für einzelne Bauteile und für das Gesamtsystem angegeben werden. Die Wiederverwendungsrate bestimmt, wie oft ein Produkt genutzt wird und basiert auf dem Konzept der Nutzungsdauerverlängerung. Die Anzahl der Wiederverwendungszyklen (‚number of reuse') bestimmt daher wie oft ein Produkt während seiner gesamten Lebensdauer genutzt wird. Dabei ist es wichtig den ersten Lebenszyklus von dem zweiten und weiteren Lebenszyklen abzugrenzen.

Die Beurteilung der Zirkularität beeinflusst direkt die Menge an Emissionen und somit auch die Wirkungsabschätzung. In unserem Beispiel wird er aber nicht nur bei den Emissionen mitberücksichtigt, sondern auch als eigener Indikator geführt, um die Bedeutung der Wiederverwendung hervorzuheben.

2.4 EXEMPLARISCHES TEMPORÄRES WOHNMODELL

Da die im Forschungsprojekt entwickelten temporären Wohnkonzepte möglichst nachhaltig gestaltet werden sollen, werden in erster Linie wiederverwendbare und verwertbare Baumaterialien eingesetzt. Zudem soll auch der Betrieb so CO_2-arm wie möglich gestaltet werden (z.B. durch Einsatz erneuerbarer Energiesysteme). Darüber hinaus soll weiteres Optimierungspotenzial erkannt und Empfehlungen abgegeben werden. Um dieses Optimierungspotenzial feststellen zu können, werden bestimmte Varianten (Tab. 1) betrachtet und ihre Auswirkungen auf das THG-Potenzial und die Zirkularität beurteilt. Die Entwicklung der Varianten ist ein iterativer Prozess, welche nach der ersten Beurteilungsphase erweitert und adaptiert werden kann. Die Baseline bildet die Zusammensetzung der Wohnformen nach den ersten Designvorschlägen und -plänen. Jede Variante bringt unter anderem zusätzlichen Bedarf an Produkten und Materialien, die im Sinne einer Ökobilanz mitberücksichtigt werden müssen.

Tab. 1: Geplante Varianten zur Erhöhung der Nachhaltigkeit am Beispiel des „Pallet Shelters“

Bezeichnung	Beschreibung	Wirkungsweise
V0 - Baseline	Strom-/Wasseranschluss konventionell (Netz), Warmwasser (Strom)	
V1 – EE	beziehen sich auf die Bereitstellung von erneuerbaren Energie (EE)- Systemen	PV-Module, Solarmodule
V2 - Autarkes Wohnen	bezieht sich auf autarke Wohneinheiten	Trinkwasseraufbereitung/ Autarkes Abwassersystem
V3 – Wohlbefinden	bezieht sich auf ein gesteigertes Wohlbefinden	Beschattung, privater Freiraum
V4 – Shared living	bezieht sich auf das „Shared living“ Konzept d.s. geteilte Wohnnutzflächen/Einrichtungen	Waschmaschine, Computer
V5 - Reuse	Bezieht sich auf den Grad der Wiederverwendung	Vollständig/teilweise wiederverwendbar

3. ERGEBNISSE

Da die Berechnung der Indikatoren noch nicht abgeschlossen ist, können derzeit noch keine quantitativen Ergebnisse gezeigt werden. Alternativ werden Abschätzungen zu den Ergebnissen, mögliche Auswirkungen und Folgen der Varianten im Vergleich zur Baseline qualitativ festgehalten, wie in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Qualitative Abschätzung der Wirkungsindikatoren im Vergleich zur Baseline (V … Verschlechterung, B … Besserung, NB … nicht beurteilbar)

Indikatoren	V0	V1	V2	V3	V4	V5
THG bei Produktion und Errichtung	1	V	V	V	B	B
THG bei der Nutzung	1	B	B	B	B	B
THG bei Demontage/Abbau	1	V	V	V	NB	V
THG-Emissionen bei der Verwertung und Entsorgung	1	V	V	V	B	B
THG-Emissionen des Gesamtsystems	1	NB	NB	NB	B	B
Wiederverwendungspotenzial	1	B	B	NB	NB	B

Um einen optimalen Informationsgehalt der Ergebnisse zu generieren, werden nicht nur die Gesamtemissionen, sondern auch die Emissionen aus einzelnen Phasen im Untersuchungsrahmen gesondert erhoben. Es ist zu erwarten, dass durch den Einsatz von PV-Modulen zur Stromerzeugung im Gegensatz zum Strom aus dem Netz (Baseline), ein erhöhter Ressourceneinsatz bedingt ist und damit höhere Emissionen in der Produktionsphase. Insbesondere in der autarken Variante bedarf es zusätzlich noch einer Batterie zur Speicherung des produzierten Stroms, was einen erhöhten Ressourcenbedarf erfordert. In Bezug auf das „shared living“ Konzept ist jedoch eine Besserung zu erwarten, da durch die gemeinsame Nutzung von Geräten, Räumen, usw. die Effizienz erhöht werden kann, was zu verringerten Emissionen führt. Eine Reduktion der THG bei der Nutzung ist für die meisten Varianten zu erwarten. Zum einen, aufgrund der Nutzung von Strom aus erneuerbarer Energie; zum anderen durch die Errichtung von passiven Kühlelementen (z.B. Beschattungen), die zum Wohlbefinden beitragen, und wiederum zu einem vermindertem Energieverbrauch

bei der aktiven Kühlung (z.B. Ventilatoren) beiträgt. THG bei der Demontage und beim Abbau sowie bei der Verwertung und Entsorgung sind bei den meisten Varianten höher gegenüber der Baseline, da mehr Produkte/Materialien benutzt werden und damit demontiert werden müssen. Bei Variante 4 („shared living" Konzept) ist allerdings eine Besserung, d.h. eine Reduktion der THG bei der Verwertung und Entsorgung, zu erwarten, da eine effizientere Produktnutzung mit reduzierten aliquoten Emissionen einhergeht.

Eine qualitative Beurteilung der THG im Gesamtsystem kann noch nicht getroffen werden. Bisherige LCA-Studien haben gezeigt, dass der Großteil der Emissionen auf Produktion und Nutzungsphase fällt. Eine Emissionssteigerung bzw. -senkung in diesen Bereichen kann daher ausschlaggebend für das Gesamtergebnis sein. Beim Wiederverwendungspotenzial wird abgeschätzt, dass Produkten, wie PV Modulen etc., die in V1 und V2 eingesetzt werden, wiederverwendbar sind und damit die Rate erhöhen. In den Varianten V3 oder V4 allerdings ist das Wiederverwendungspotenzial nicht abschätzbar. Unklar ist, ob Beschattungselemente (z.B. Sonnensegel) wieder verwendbar sind und ob effizient genutzte Geräte, wie im shared living Konzept für mehrfache Wiederverwendungszyklen geeignet sind im Vergleich zur Baseline (wo sie nicht geteilt werden).

Wird die Variante V5 mit vollständig oder teilweise demontierbaren und wiederverwendeten Teilen der Wohnform betrachtet, wirkt sich das in den meisten Lebensabschnitten positiv aus, d.h. durch die Wiederwendung wird sowohl in der Produktionsphase, als auch in der Nutzungs- und Entsorgungsphase mit verminderten THG gerechnet. Anders stellt es sich bei der Demontage dar, da mit einem Mehraufwand bei der Demontage zugunsten einer ermöglichten Wiederverwendung (anstatt Demolition) zu rechnen ist. Die Gesamtemissionen werden dennoch in V5 als geringer erwartet als in der Baseline, da erwartungsgemäß der Anteil aus der Demontage im Vergleich zu anderen Phasen wie der Herstellung oder Nutzung eher gering ist. Das Wiederverwendungspotenzial wird naturgemäß erhöht, wenn mehr Teile wiederverwendet werden können.

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Temporäre Wohnformen sollen im Sinne der Kreislaufwirtschaft möglichst nachhaltig gestaltet werden; nicht nur im Hinblick auf die eingesetzten Baumaterialien und das Design (Design for Reuse, Design for Recycling), sondern auch bei der Nutzung der Wohnformen (z.B. durch Einsatz erneuerbarer Energiesysteme) sowie durch optimierte Nutzungskonzepte (z.B. smart living, shared living). Nachhaltiges Wohnen betrifft aber nicht nur die Umweltauswirkungen, sondern schließt vor allem auch soziale und ökonomische Auswirkungen mit ein. Eine Verbesserung der sozialen Auswirkungen (z.B. Erhöhung des Wohlfühlfaktors) kann allerdings mit einer Verschlechterung der ökologischen Auswirkungen einhergehen (z.B. durch erhöhten Ressourceneinsatz). Die Auswahl geeigneter Indikatoren zur Beurteilung ist daher von großer Bedeutung und soll sowohl den bestmöglichen Informationsgehalt als auch Objektivität gewährleisten.

Das THG und das Wiederverwendungspotential eignen sich gut zur Darstellung der ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit auch bei temporären Nutzungsformen. Eine Darstellung der Ergebnisse für einzelne Bereiche der Prozesskette erscheint sinnvoll, da dadurch Auswirkungen bei Änderungen im System (Varianten) aufgezeigt werden können und auch Erklärungen bzw. Interpretationshilfen für die Ergebnisse gegeben sind. Obwohl das Wiederverwendungs- und Verwertungspotenzial implizit im THG-Potenzial mitberücksichtigt wird, ist der Zusammenhang im Produktsystem nicht immer erkennbar. Deshalb ist es von Bedeutung, die Fähigkeit zur Kreislaufwirtschaft, wie in diesem Beispiel mittels des Wiederverwendungspotenzials, gesondert zu betrachten. Auch die Ausgestaltung von mehreren Varianten zur Wiederverwendung des gesamten Systems (Wiederverwendung mit gleicher Funktionsweise, anderer Funktionsweise etc.) muss methodisch kohärent gelöst werden, um eine Vergleichbarkeit der Varianten zu ermöglichen und um Second-Life-Ansätze beurteilen zu können. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass bestimmte Rahmenbedingungen (Transport wiederverwendbarer Teile, Aufwand bei der Demontage) die Ergebnisse beeinflussen können.

Eine vorausgehende qualitative Beurteilung zur Abschätzung der Auswirkungen kann dabei unterstützen, dass Abhängigkeiten in den jeweiligen Varianten in Bezug auf die Indikatoren schon in einem frühen Stadium der Ökobilanz erkannt werden. Denkfehler im Beurteilungssystem oder bei der Auswahl der Indikatoren sowie der Variantengestaltung können dadurch verhindert werden. Das Ausmaß der Auswirkungen bei Änderungen im Produktsystem (Varianten) kann allerdings nur quantitativ festgestellt werden.

Aufgrund der qualitativen Vorabbewertung kann schon festgehalten werden, dass mit einer Optimierung der ökologischen Nachhaltigkeit in der Nutzungs-/Betriebsphase nicht nur positive Effekte verbunden sind. Es ist dadurch oftmals ein höherer Ressourcenverbrauch zu erwarten, der sich in erhöhten THG widerspiegelt. Ein hohes Verbesserungspotenzial wird durch eine gesteigerte Produktnutzung (z.B. effizientere Nutzung durch „shared living") sowie einer Verlängerung der Produktnutzungsdauer (durch Wiederverwendung) erwartet. In weiterer Folge werden weitere Wirkungsindikatoren, wie z.B. Versauerungspotenzial analysiert und Auswirkungen innerhalb der Varianten überprüft.

5. DANKSAGUNG

Diese Forschung wird im Rahmen des vom WWTF geförderten Projekts „Urban pop-up housing environments and their potential as local innovation systems" in Zusammenarbeit mit Projektpartnern an der BOKU (ABF, SIG, ILAP, IRUB, IVET), dem Institut für Technikfolgenabschätzung (ÖAW) und alchemia-nova durchgeführt.

LITERATUR

DIN (2012) Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. English translation of DIN EN 15804:2012-04. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

Ecoinvent Centre (2019) Ecoinvent database v3.6.

EEA (2017) Circular by design. Products in the circular economy. EEA European Environment Agency Report No 6/2017. doi: 10.2800/860754.

Ellen MacArthur Foundation (2015) Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity - Methodology.

Europäische Kommission (2015) Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Brüssel

European Commission (2010) International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook. Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment models and indicators. Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg

ISO (2006a) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO (2006b) Environmental management -Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

Johnson, C. (2007) Strategic planning for post-disaster temporary housing. Disasters 31(4), 435-458.

Manfredi S, Allacker K, Chomkhamsri K, Pelletier N, de Souza DM (2012) Product Environmental Footprint (PEF) Guide. Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy

Perrucci, D.V., Vazquez, B.A. and Aktas, C.B., (2016) Sustainable Temporary Housing: Global Trends and Outlook. Procedia Engineering 145, 327–332.

Sphera (2020) Sphera's Life Cycle Assessment Software (GaBi Software)

Zampori L, Pant R (2019) Sugesstions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method vol EUR 29682 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:doi:10.2760/424613

Kontaktdaten:
DI (FH) Silvia Scherhaufer
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Abfallwirtschaft
Muthgasse 107/3. Stock
1190 Wien
Email: silvia.scherhaufer@boku.ac.at

Session 5c

Kunststoffrecycling

Technische Herausforderungen beim Kunststoffrecycling

Archodoulaki / TU Wien / AT

Beitrag von Lastverschiebung für die Integration Erneuerbarer Energieträger

Kraussler / 4ward Energy Research GmbH / A

Für und Wider Kunststoffpfand als Maßnahme zur Erhöhung der Recyclingquote

Hauer / Technisches Büro Hauer Umweltwirtschaft GmbH / AT

Technische Herausforderungen beim Kunststoffrecycling

V.M. Archodoulaki
TU Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Wien, Österreich

ABSTRACT: Trotz ihrer geringen Dichte zeigen Kunststoffe gute mechanische Eigenschaften und bieten große Designfreiheit sowie einfache und kostengünstige Herstellungsmöglichkeiten. Verpackungen aus Kunststoff sind aus unserem Leben als KonsumentInnen nicht mehr wegzudenken. Die hohe Schutzfunktion von *Kunststoffverpackungen* wird *besonders* bei Lebensmitteln deutlich, ein weiterer Vorteil ist der geringe Energieverbrauch beim Transport. Diese Fakten werden durch folgende Zahlen untermauert, 17 Masse-% der Verpackungsmaterialien bestehen aus Kunststoffen, die wiederum 50 % aller Konsumgüter verpacken (Biron 2013). Im Durchschnitt fällt dabei 1-3 % des Gesamtproduktgewichtes auf die Kunststoffverpackung. Besonders die sogenannten Thermoplaste finden in der Sparte Verpackungsmaterialien zu einem großen Teil – nämlich mehr als 40 % – ihre Anwendung. Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) dominieren und bilden fast die Hälfte des gesamten Kunststoffs-Gebrauchs in Europa und Weltweit (PlasticsEurope 2019). Durch Know-How, Kreativität und Technologie kann diese Werkstoffgruppe mittlerweile eine unglaubliche Erfolgsgeschichte aufweisen. Nachteilig ist allerdings, dass viele dieser Verpackungen aufgrund relativ kurzer Einsatzdauer ausschließlich auf den Haushaltsmüllbergen Europas enden und nicht in den Werkstoffkreislauf zurückgeführt werden. Im Vergleich dazu: Verpackungen aus Metall, Glas und Papier werden zum Großteil vom Restmüll getrennt und der Wiederverwertung zugeführt. Es können dadurch hohe Recyclingquoten ausgewiesen werden, die jedoch für Kunststoffe im Moment nicht erzielbar sind. Nur im Falle von Polyethylenterephthalat (PET) ist der hohe technologische Stand eines Closed-Loop-Recyclings erreichbar.

2018 wurden in Europa 219 Mio. Tonnen Siedlungsabfälle behandelt: die Menge der recycelten Abfälle stieg von 23,0 Mio. Tonnen (54 kg/Kopf) im Jahr 1995 auf 67 Mio. Tonnen (150 kg/Kopf) im Jahr 2018 mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von 5,4 %. Der Anteil der insgesamt recycelten Siedlungsabfälle stieg von 11 % auf 30 % (Eurostat 2020). Allerdings gibt es, aus Sicht des Fachverbandes Kunststoffrecycling im Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, Verbesserungspotential da die Hälfte der Kunststoffabfälle immer noch in der thermischen Verwertung landet (BVSE 2019). Die am 16.01.2018 angenommene erste europäische Strategie für Kunststoffe (EC 2018) ist Teil des Übergangs zu einer stärker kreislauforientierten Wirtschaft. Nach den neuen Plänen sollen ab 2030 alle Kunststoffverpackungen auf dem EU-Markt recylingfähig sein; der Verbrauch von Einwegkunststoffen wird reduziert und die absichtliche Verwendung von Mikroplastik beschränkt.

Kunststoff-Recycling-Prozesse werden prinzipiell in vier Kategorien unterteilt (Andrady 2009): Wiederverarbeitung für sortenreine Abfälle, mechanisches Recycling, chemisches Recycling und Verbrennung. Beim „mechanischen Recycling" werden die physikalischen Eigenschaften (wie Größe, Form) verändert. Die dazu erforderlichen Prozessschritte (des Extrudierens, Compoundierens, Regranulierens und dergleichen) können den Kunststoff thermo-mechanisch, scherinduziert und thermo-oxidativ schädigen. Generell können je nach Kunststoffart, Molmasseabbau (Kettenspaltung) oder Molmasseerhöhung (Vernetzung) oder beides eintreten. Durch die Spaltung der Polymerkette kommt es zu einem Verlust der Produktqualität bedingt durch ungünstige Entwicklung der mechanischen Eigenschaften. Das so entstehende, oftmals zweitklassige, Eigenschaftsprofil kann durch Herstellung von Kompositwerkstoffen und Einstellen der gewünschten mechanischen Eigenschaften abgefedert werden. Diese Strategie, sowie die Rückgewinnung von Betriebsstoffen oder Rohstoffen durch „chemisches Recycling" oder die Gewinnung der hohen gespeicherten chemischen Energie in den Kohlenwasserstoff-Verbindungen im Rahmen der „Energie-Rückgewinnung" stellen zwar sehr gängige Methoden im Bereich der Abfallwirtschaft dar, sollten jedoch immer am Ende eines sehr langen Produktlebenszyklus stehen.

An dieser Stelle sollen weitere Aspekte berücksichtigt werden: erstens, landen Leichtverpackungen (Weißblech, Aluminium, Kunststoffe) auf Grund ihres Gewichtes nicht immer im Müll wo sie hingehören sondern in der Umwelt. Zweitens, eine Studie aus 2012 in Deutschland zeigt, dass Leichtverpackungen generell im städtischen Bereich niedrigen Erfassungsquoten von 32-51 % erzielten. Als Ursache wird ein hygienisch bedingter Einfluss durch das Füllgut genannt der weitestgehend werkstoffinvariant ist: Die niedrigsten Erfassungsquoten gibt es generell für Verpackungen, die überdurchschnittlich oft für pastöse Lebensmittel verwendet werden und die nach dem Verbrauch entsprechend schwieriger zu entleeren sind (Dehoust & Christiani 2012). Drittens ist – aus der Sicht der Verfasserin – die Bereitschaft zur ordnungsgemäßen Entsorgung solcher Leichtverpackungen durch die BürgerInnen nicht immer vorhanden, da hier kein Erwerbs- sondern ein Entledigungsinteresse im Mittelpunkt steht. Dort sollten auch die Gesetzgeber ansetzten, indem beispielsweise für Plastiktragetaschen verpflichtende Kostenbeiträge vorgeschrieben werden anstatt diese zu verbieten und Symbolpolitik zu treiben. Neuerdings versuchen Verpackungshersteller, auf den Einsatz von Kunststoffen zu verzichten und bringen immer mehr Verpackungen auf den Markt, die **nur zu einem Teil** aus Papier und Pappe bestehen. Sie besitzen Barriereschichten aus Kunststoffen, die dazu führen, dass die tatsächliche Recyclingfähigkeit gegen Null tendiert. Diese Verpackungen werden in der Praxis also nicht recycelt, sondern gehen in die Verbrennung.

Die Herausforderung bei jeder Form von Recycling besteht darin, der Idee eines Kreislaufes gerecht zu werden. Die aus den Kunststoffabfällen wiedergewonnenen Stoffe sollen einen möglichst geringen Qualitätsverlust gegenüber dem Ausgangsmaterial haben. Die zahlreichen Additive und die Tatsache, dass die meisten Kunststoffe nicht sortenrein sind, stellen ein großes Problem dar. Zudem müssen sie sich auf dem Markt gegen die Konkurrenz günstig hergestellter neuer Kunststoffe behaupten. Dennoch liegt die größte Herausforderung in der Materialversorgung für Aufbereiter, da Wertstoffe und Kunststoffabfälle zugleich exportiert werden und in Teilen auch noch in der Abfallwirtschaft und Müllverbrennung enden. Die Erreichung ambitionierter Nachhaltigkeitsziele hängt von den Sortieranforderungen, der Veröffentlichung von erweiterten Abfalldaten, neuen Ökodesign-Richtlinien für Kunststoffverpackungen und Standardisierung der Methoden der Industrie ab. Ein politischer/regulatorischer Ansatz zur Förderung neuer, auf modernen Werkstoffen basierender Produkte ist es die Produkt- und Recyclingphase bereits beim Entwerfen eines neuen Produkts einzubeziehen (Stichwort: „Design for Recycling"). Außerdem müssen vermehrt Märkte und Produkte geschaffen werden, in denen Rezyklate überhaupt Anwendung finden können. Es ist wichtig in diesem Zusammenhang Strategien und Methoden zu entwickeln, welche die Rentabilität eines Produktes in der Nachgebrauchsphase steigern, d.h. durch die Erschließung neuer Wertschöpfungspotenziale die Erträge zu erhöhen und die Kosten zu senken (Stichwort: Upcycling).

Der vielleicht größte Hebel einer ernst zu nehmenden Kreislaufwirtschaft können soziale Normen also Gebräuche sein. Sie gelten allerdings als schwer steuerbar. Aber die Corona-Zeiten haben uns gezeigt, dass sich viele Menschen zu Verhaltensänderungen bewegen lassen. Es ist also notwendig einen Schritt zurückzutreten und einen Dialog mit verschiedenen TeilnehmerInnen - VertreterInnen der Gesellschaft, Wissenschaft und der Industrie - zu beginnen. Hier ist aus der Sicht der Verfasserin eine weitere Sensibilisierung der Bevölkerung notwendig: die Vermeidung (z.B. weniger To-Go Verzehr, weniger Versand etc.) anstatt einer nachträglichen Entsorgung sollte vorrangig angestrebt werden. VerbraucherInnen sollten besser informiert werden, sodass die ästhetischen Ansprüche und das Kaufverhalten verändert werden. Ein echter industrieller Wandel kann nur durch das starke Engagement innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette und dem Dialog mit der Gesellschaft erzielt werden.

LITERATUR

Andrady A.L., Neal M.A. (2009) Applications and societal benefits of plastics, Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 364 (1526), 1977-1984

Biron M. (2013) Thermoplastics and Thermoplastic Composites, Elsevier.

BVSE (2019) https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/02-Presse/03-Kunststoff/2020/0909-Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf Zugriff 23.09.2020

Dehoust G., Christiani J. (2012) Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe, Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nicht-verpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung, UBA-Texte 40/2012, Dessau-Roßlau

EC Europäische Kommission (2018), https://ec.europa.eu/germany/news/20180116-plastikstrategie_de Zugriff 23.09.2020

Eurostat (2020) https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Municipal_waste_landfilled,_incinerated,_recycled_and_composted,_EU-27,_1995-2018.png Zugriff 23.09.2020

PlasticsEurope (2019) https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/1804-plastics-facts-2019 Zugriff 23.09.2020

Kontaktdaten:
Vasiliki-Maria Archodoulaki
TU Wien, Technische Universität Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und -technologie
Getreidemarkt 9, 1060 Wien
Email: vasiliki-maria.archodoulaki@tuwien.ac.at

Für und Wider Kunststoffpfand als Maßnahme zur Erhöhung der Recyclingquote

W. Hauer
Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH, Korneuburg

1. EINLEITUNG

Mehrere Richtlinien der Europäischen Union werden bedeutende Veränderungen der Abfallwirtschaft, insbesondere im Umgang mit Kunststoff-Verpackungen erforderlich machen:

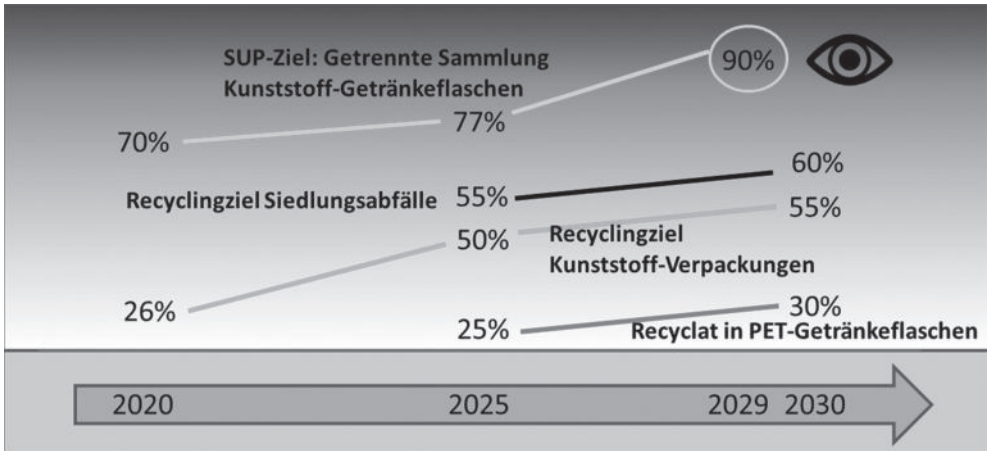


Abb. 1: Vorgaben bis zum Jahr 2030

Neben der Recyclingquote von 55 % für Kunststoff-Verpackungen gelten Recyclingquoten für Siedlungsabfälle insgesamt, Sammelziele für Kunststoff-Getränkeflaschen sowie Mindest-Recyclat-Einsatzquoten für PET-Getränkeflaschen.

Im vorliegenden Beitrag werden das Sammelziel für Kunststoff-Getränkeflaschen von 90 % sowie das Recyclingziel von 50 % bzw. 55 % für Kunststoff-Verpackungen betrachtet.

2. IST-SITUATION

Derzeit werden Kunststoff-Getränkeflaschen zu rund 70 % getrennt gesammelt. Ein Recycling von Kunststoff-Verpackungen erfolgt gemäß der von der EU-Kommission herausgegebenen Berechnungsmethode etwa 25 %. Hier stellt sich die große Herausforderung, diese Recyclingquote binnen vier Jahren bis 2025 zu verdoppeln.

Einen wesentlichen Beitrag zu einer Erhöhung der Recyclingquote stellen Getränkeflaschen dar. Getränkeflaschen haben mit einer In-Verkehr-Setzungsmenge von rund 49.000 t/a einen Anteil an Haushalts-Kunststoff-Verpackungen von 25 % - und stellen eine gut verwertbare Fraktion dar.

Von Seiten der EU-Kommission wurde zwischenzeitlich klargelegt, dass unter dem Begriff „getrennt gesammelt zum Zwecke des Recyclings“ der single-use-plastic-Richtlinie tatsächlich getrennt gesammelt gemeint ist und ein nachträgliches Sortieren aus gemischten Siedlungsabfällen (Restmüll) keine geeignete Maßnahme zur Zielerreichung darstellt.

3. VARIANTEN

In vier Varianten wurde untersucht, welche Beiträge diese für die beiden Ziele – 90 % getrennte Sammlung von 55 % Recyclingquote liefern.

Variante 1: Intensivierung der getrennten Sammlung und ergänzende Sortierung aus gemischten Siedlungsabfällen
Variante 2: Massive Intensivierung der getrennten Sammlung und ergänzende Sortierung aus gemischten Siedlungsabfällen (Vorschlag des größten Sammel- und Verwertungssystems, der ARA AG)
Variante 3: Pfand auf Gebinde kleiner 1,0 Liter, Intensivierung der getrennten Sammlung und ergänzende Sortierung aus gemischten Siedlungsabfällen
Variante 4: Pfand auf alle Kunststoffgetränkeflaschen

3.1 MASSNAHMEN ZUR SAMMLUNG VON ZUMINDEST 90 % KUNSTSTOFFGETRÄNKEFLASCHEN

Hinsichtlich der Mengenströme war davon auszugehen, dass mit getrennte Sammlung alleine eine Sammelquote von 90% nicht erreichbar ist (Varianten 1 bis 3). Bei einem Pfandsystem konnte von einer Erfassung von etwa 95 % ausgegangen werden.

Tab. 1: Variantenvergleich: Mengen, Quoten und Materialflüsse für Kunststoffgetränkeflaschen

	Ist Stand	V1-75 % Sammlung	V2 82 % Sammlung	V3 Pfand für <1,0-l	V4 Pfand
In Verkehr gesetzt	**49.000**	**49.000**	**49.000**	**49.000**	**49.000**
Getrennte Sammlung	34 200	36 800	40 200	28 100	
Pfandsammlung		-	-	13 200	46 600
Getrennt gesammelt	34 200	36 800	40 200	41 300	46 600
Aus Restmüll für 90 % Sammelquote		7 350	3 920	2 750	
zu sortierender Restmüll		*1,1 Millionen*	*0,8 Millionen*	*0,7 Millionen*	
∑ Getrennt gesammelt		44 100	44 100	44 100	46 000
Sammelquote	70 %	90 %	90 %	90 %	95 %

Hinsichtlich der Auswirkungen der Varianten ist zu erwarten, dass beim Pfand die höchsten Effekte gegen Littering erzielt werden und dass die höchste Materialqualität an Kunststoffgetränkeflaschen einem Recycling zur Verfügung steht.

Tab. 2: Übersicht über die Auswirkungen der vier untersuchten Varianten

Kriterium	V1-75 % Sammlung	V2 82 % Sammlung	V3 Pfand für <1,0-l	V4 Pfand
Getrennt gesammelte Kunststoff-getränkeflaschen (inkl. Restmüll-sortierung und/oder Pfand)	90 %	90 %	90 %	>95 %
Qualität der gesammelten Kunststoffgetränkeflaschen	Mäßig (15 % aus gemischten Abfällen)	Mäßig (8 % aus gemischten Abfällen)	Gut (5 % aus gemischten Abfällen)	Sehr gut
Effekte gegen Littering	gering	gering	Nur für Gebinde <1,0-l	Sehr hoch
Effekte auf bestehende LVP-Sammlung	Deutlicher Ausbau erforderlich	Massiver Ausbau erforderlich	Deutlicher Ausbau erforderlich	Wegfall von Kunststoffgetränkeflaschen schafft Volumen für sonstige LVP-Sammlung

3.2 MASSNAHMEN ZUM ERREICHEN VON RECYCLINGQUOTEN FÜR KUNSTSTOFF-VERPACKUNGEN (50 % BZW. 55 %)

Zum Erreichen des Zieles einer 50 %-Quote bzw. 55 %-Quote des Recyclings von Kunststoffverpackungen sind ein wesentlicher Ausbau und eine wesentliche Steigerung der getrennten Sammlung aller Kunststoff-verpackungen unabdingbar. In den vier Varianten wird von unterschiedlichen Erfordernissen ausgegangen, um das Ziel zu erreichen:

Die derzeitige Sammelquote für sonstige Kunststoffverpackungen (Nicht-Kunststoffgetränke-verpackungen) liegt bei knapp 60 %. Diese Quote muss jedenfalls auf über 70 % gesteigert werden. Die ARA AG geht in ihrem Maßnahmenkatalog von einer Steigerung auf 80 % aus. Dies wäre eine deutliche Steigerung gegenüber dem aktuellen Stand und scheint überaus schwierig zu erreichen.

Im Falle einer Pfandlösung könnte mit einer Sammelquote von rund 70 % für Nicht-Kunststoffgetränke-verpackungen das 50 %-Ziel ohne Sortierung und das 55 %-Ziel durch Sortierung von 370.000 Tonnen gemischten Siedlungsabfällen erreicht werden, um eine ausreichende Menge an Sekundär-Kunststoffen für das Recycling verfügbar zu machen.

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Ein Pfand auf Einweg-Kunststoff-Getränkeverpackungen erscheint als die einzige Maßnahme, mit der realistisch eine Sammelquote von 90 % erreicht und überschritten werden kann. Darüber hinaus trägt eine hohe Sammelquote von KSt-Getränkeflaschen wesentlich dazu bei, eine hohe Recyclingquote für KSt-Verpackungen insgesamt zu erreichen. Aufgrund der großen Menge an Flaschen trägt jeder Prozentpunkt gesteigerte Sammelmenge einen Viertel Prozentpunkt zur Steigerung der Recyclingquote alle KSt-Verpackungen bei. Das bedeutet, dass durch eine Steiegerung der Sammlung von derzeit 70 % auf 96 % bereits eine Steigerung der Recyclingquote von derzeit 25 % auf über 30 % erreicht werden kann – ohne weitere Maßnahmen.

LITERATUR

Allesch A., Beigl P., Happenhofer A., Hauer W., Huber-Humer M., Merstallinger M., Obersteiner G., Wellacher M. (2020) Möglichkeiten zur Umsetzung der EU-Vorgaben betreffend Getränkegebinde, Pfandsysteme und Mehrweg

Kontaktdaten:
Ing. Mag. Walter Hauer
Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH
Brückenstraße 6/9
2100 Korneuburg
Email: tbhauer@tbhauer.at

Session 6c

Klimaaktiv Gebäude – Technik & Praxisbeispiele

Smart Building & Mobility – Nutzung von E-Auto-Batterien als Energiespeicher für PV-Anlagen

Leindecker / FH OÖ Studienbetriebs GmbH / AT
Kugfarth / FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH / AT

Das Konzept der Intelligenzfähigkeit von Gebäuden – Entwicklungen und erste Umsetzungen

Knotzer / AEE INTEC / AT

Siedlungen von heute – Lebenswert und klimaverträglich

Gerade bei Wohnsiedlungen und Quartiere wird der Anspruch immer höher, innovative Lösungen in Sachen Klimaschutz in ein Gesamtkonzept zu integrieren. Die Siedlungen von morgen sollten so einiges können: Sie müssen nicht nur hochwertigen Wohnraum zu leistbaren Preisen schaffen, sondern auch nachhaltig und energieeffizient sein, eine gute Nachbarschaft ermöglichen und moderne Mobilitätslösungen bieten.

Der klimaaktiv Standard für Siedlungen und Quartiere gibt Gemeinden, Projektentwicklern und Bauträgern Orientierung bei der Planung, Errichtung und dem Betrieb von klimaverträglichen und lebenswerten Siedlungen und Quartieren. Handlungsmöglichkeiten in den Bereichen Management, Kommunikation, Städtebau, Gebäude, Versorgung und Mobilität werden aufgezeigt. Ein Rechenmodell für den Nachweis der Klimaverträglichkeit steht bereit.

Die Initiative klimaaktiv des Klimaschutzministeriums unterstützt mit Informationen, Beratungen und Prozessbegleitungen bis hin zur Auszeichnung erfolgreich geplanter und umgesetzter Projekte. Weitere Informationen unter: www.klimaaktiv.at/siedlungen

Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

klimaaktiv

Smart Building & Mobility – Nutzung von E-Auto-Batterien als Energiespeicher für PV-Anlagen

H.C. Leindecker
FH OÖ Studienbetriebs GmbH, Fakultät für Technik & Angewandte Naturwissenschaften, Wels
D. Kugfarth
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels

ABSTRACT: The global climate change and the continually growing world population require a timely rethinking concerning how we use our resources. The switch from fossil to renewable energy sources and the steady increase of energy efficiency in all sectors are essential parts of that process. By developing innovative and sustainable mobility concepts, the automotive industry could make an important contribution to reducing global CO_2 emissions. Unfortunately, the increasing number of electrically powered vehicles may cause new ecological difficulties due to the current lack of recyclability of batteries. The use of second-life electric car batteries as energy storage for photovoltaic systems could significantly extend their service life and thus contribute to an improved ecological balance of buildings and vehicles. Within the framework of an interdisciplinary project, students from the Upper Austria University of Applied Sciences Campus Wels conducted research on an exemplary optimization of a single-family house photovoltaic system. On the basis of extensive research on the subject of electromobility, photovoltaics and battery storage systems, the technical, ecological and economic feasibility of an electricity storage system consisting of second-life car batteries was examined. It has been shown, that these systems are associated with considerable difficulties particularly with regard to the availability of batteries, safety and warranty.

1. EINLEITUNG

Der globale Klimawandel und die beständig wachsende Weltbevölkerung fordern ein zeitnahes Umdenken in Bezug auf die Nutzung unserer Ressourcen. Der schrittweise Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger und die Steigerung der Energieeffizienz sind dabei ein wesentlicher Bestandteil. Die Automobilindustrie kann mit der Erforschung und Entwicklung neuer Antriebstechnologien und innovativer Mobilitätskonzepte einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der weltweiten CO_2-Emissionen leisten. Die verstärkte Markteinführung von Elektrofahrzeugen könnte allerdings, auf Grund der mangelnden Recyclingfähigkeit der verwendeten Batterien, mittelfristig zu neuen ökologischen Problemen führen. Die Nutzung von gebrauchten E-Auto-Batterien als Stromspeichersystem für Photovoltaik-Anlagen könnte deren Lebensdauer deutlich verlängern und somit zu einer wesentlich besseren Öko-Bilanzierung für Gebäude und Fahrzeuge beitragen. Im Rahmen eines fächerübergreifenden Projektes, forschten Studenten der FH OÖ (Campus Wels) an einer exemplarischen Optimierung der PV-Anlage eines Einfamilienhauses. Auf Basis umfangreicher Recherchen zum Thema Elektromobilität, Photovoltaik und Batteriespeichersysteme, sollte die technische, ökologische und wirtschaftliche Realisierbarkeit eines Stromspeichers in einem Gebäude, bestehend aus 2nd-Life Auto Batterien, geprüft werden (Leindecker 2020).

Der geringe Eigenverbrauchsanteil an selbstproduzierten PV-Strom und die gleichzeitig niedrigen Einspeisetarife führen in Österreich zu einem breiten Interesse für Stromspeichersysteme. Hierfür werden auf dem Markt verschiedenste technische Lösungen, meist Komplettsysteme, angeboten. Der Fokus in diesem Forschungsprojekt lag jedoch auf der Optimierung einer bestehenden PV-Anlage, was die Auswahl an möglichen Speichersystemen auf Grund der oftmals fehlenden Operabilität mit dem Wechselrichter deutlich einschränkt. Die Implementierung eines 2nd-Life Autobatteriespeichers ist – vom ökologischen Standpunkt betrachtet – die interessanteste Option. Die Lithium-Ionen Akkumulatoren der Elektrofahrzeuge haben derzeit eine geschätzte

Lebensdauer von 10 Jahren bzw. 4.000 Zyklen (siehe Abb. 1). Ab diesem Zeitpunkt beträgt die Batteriekapazität noch ca. 80 Prozent, was für die Nutzung als Speicherbatterie in einem Gebäude vollkommen ausreichend wäre. Die Lebensdauer der Batterien könnte damit um weitere 10 Jahre verlängert und dadurch die Öko-Bilanz für Gebäude und Elektrofahrzeug signifikant verbessert werden (vgl. TUM 2020).

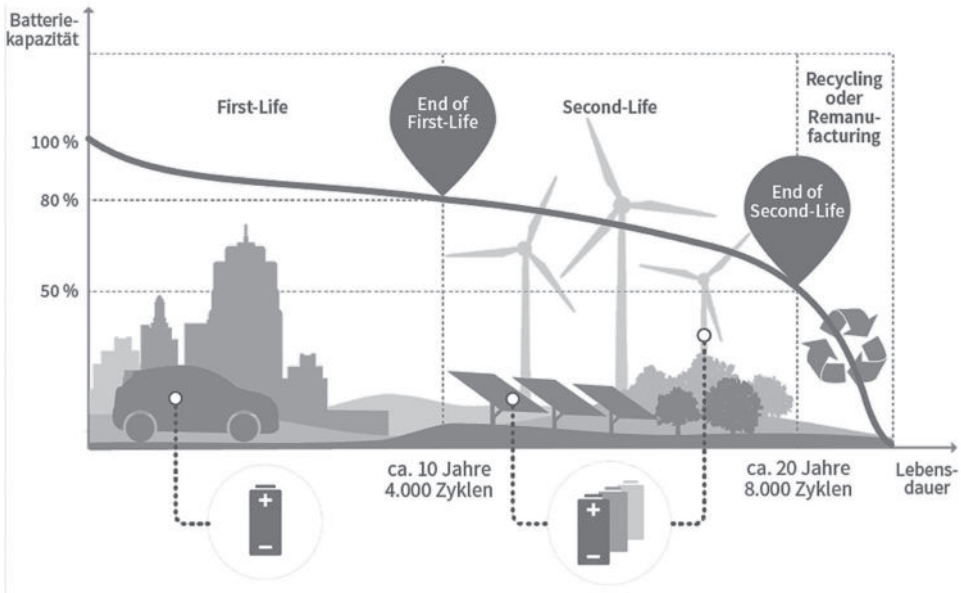


Abb. 1: First-Life und Second-Life einer E-Auto-Batterie (TUM 2020)

2. GRUNDLAGEN 2ND-LIFE BATTERIESPEICHERSYSTEME IN GEBÄUDEN

2.1 AKTUELLE SITUATION DER ELEKTROMOBILITÄT IN ÖSTERREICH

Gem. Statistik Austria stieg der Bestand an Elektrofahrzeugen in Österreich bis zum Jahr 2019 auf 29.523 Stück. Obwohl die Anzahl an Neuzulassungen stetig steigt, ist das ursprüngliche Ziel von 200.000 Fahrzeugen bis zum Jahr 2020 als unrealistisch zu bewerten. Auf Grund der immer höheren Reichweite, schnelleren Ladezeiten, einer verbesserten Infrastruktur und sinkenden Kosten für Elektrofahrzeuge steigt auch zunehmend deren Akzeptanz in der breiten Bevölkerung. Erhöhte Fördersätze für Elektrofahrzeuge auf Bundesebene sollen die Attraktivität zusätzlich erhöhen und zum Umstieg animieren (vgl. BEO 2020).

2.2. HERAUSFORDERUNGEN UND PROBLEMSTELLUNGEN

Der derzeitig geringe Bestand an Elektrofahrzeugen in Österreich bedeutet einen grundlegenden Mangel an gebrauchten E-Auto-Batterien auf dem freien Markt. Zudem ist es bei den Auto-herstellern gängige Praxis, die Batteriesysteme ihrer angebotenen Elektrofahrzeuge dem Kunden für eine bestimmte Laufzeit zu vermieten. Neben einer deutlichen Reduzierung des Kaufpreises bietet dieses Konzept weitere Vorteile in Bezug auf kostenlosen Akkutausch bei Problemen während der Laufzeit, freie Wartung sowie Rücknahme der Batterien. Durch das für die Kunden oftmals lukrative Mietmodell wird der Mangel an frei verfügbaren Batterien zusätzlich erhöht (Leindecker 2020).

Wie in den meisten technischen Anwendungsbereichen basieren die heutigen E-Auto-Batterien auf der Lithium-Ionen Technologie. Im Gegensatz zu den früheren Bleiakkumulatoren reagieren diese deutlich empfindlicher auf falsche Handhabung und benötigen daher ein Batteriemanagementsystem (BMS). Das

BMS übernimmt dabei die Lade- und Entladesteuerung, die Temperaturüberwachung sowie allgemeine Fehlerdiagnosen. Die Betriebsgrenzen werden dabei streng eingehalten, was neben einer höheren Sicherheit auch zu einer längeren Lebensdauer der Batterie führt. Die Eigenkonfiguration eines solchen BMS erfordert umfangreiche Kenntnisse im Bereich der Elektrotechnik und sollte keinesfalls von Laien durchgeführt werden, was das Potential für den Eigenbau aus technischer Sicht einschränkt (vgl. Becker 2019).

Die teils fehlende Operabilität von Batteriespeichersystemen mit bestehenden Wechselrichtern stellt eine zusätzliche technische Einschränkung dar, wobei von den Herstellern immer häufiger sogenannte Komplettlösungen angeboten werden. Zudem sollte vor der Installation eines Speichersystems aus 2nd-Life-Autobatterien unbedingt auf die Garantie und Gewährleistungsrichtlinien des Wechselrichterherstellers geachtet werden. Bevor eine PV-Anlage – mit oder ohne integriertem Batteriespeichersystem – an das öffentliche Netz angeschlossen wird, ist eine Freigabe des Netzbetreibers erforderlich. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Planung sowie der Anschluss an das öffentliche Verteilernetz der Batteriespeicheranlage von einem konzessionierten Elektrotechniker durchgeführt werden muss (Netz Oö 2020).

2.3. BEREITS UMGESETZTE PROJEKTE

Ein Beispiel für die Umsetzung von 2nd-Life-Batteriespeichersystemen ist das von der Deutschen Bundesregierung geförderte Projekt Effizienzhaus Plus in Berlin (siehe Abb. 2). Das Ziel dieses Projektes war es zu zeigen, dass eine moderne und energieeffiziente Bauweise keine Einschränkung in Bezug auf Wohnkomfort bedeuten muss. Neben dem Gebäude wurde ein Speichersystem, bestehend aus 70 gebrauchten Batterien (Ursprung: Mini Cooper E), mit einer Gesamtkapazität von 43,2 kWh installiert. Der elektrische Strom wird von einer PV-Anlage (171,2 m² Dünnschichtmodule) generiert und mit Hilfe des Heimspeichersystems hauptsächlich für den Energiebedarf des Gebäudes verwendet (Becker 2019).

Die Kosten für Effizienz-Plus-Häuser können auf Grund der individuellen Gestaltungs- und Ausstattungsmöglichkeiten stark variieren. Bereits fertiggestellte Projekte in Deutschland ergaben Bruttokosten im Bereich von 1.500 bis 3.000 Euro pro Quadratmeter (Nettogrundfläche). Die Kosten für das Pilotprojekt Energieeffizienzhaus in Berlin waren auf Grund seines Forschungscharakters wesentlich höher. Für das Batteriespeichersystem auf Basis von Lithium-Ionen Batterien ergaben sich Kosten von 1.300 Euro pro Kilowattstunde (BMI 2018).

In einem Gemeinschaftsprojekt zwischen dem japanischen Automobilhersteller Nissan und der Eaton Industries GmbH, einem auf Energiemanagement-Lösungen spezialisiertes Unternehmen mit Sitz in Irland, wurde ein Energiespeichersystem für Eigenheime entwickelt. Beim sogenannten *xStorage Home-System* werden gebrauchte Traktionsbatterien aus Nissan Elektrofahrzeugen in Kombination mit einer PV-Anlage als Komplettlösung angeboten. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass alle Komponenten aufeinander abgestimmt sind und somit Probleme wie fehlende Operabilität oder der Verfall von Garantieansprüchen ausgeschlossen sind. Die Kapazität der angebotenen Speichersysteme reichen von 4,2 kWh bis 10 kWh. Die Anschaffungskosten für das System mit 4,2 kWh Nennleistung liegen bei ca. € 4.000.- (Eaton 2020).



Abb. 2: Effizienzhaus Plus in Berlin mit Batteriespeicher im Außenbereich (FIBP 2020)

3. PROJEKTBESCHREIBUNG

3.1 BESCHREIBUNG DES BESTEHENDEN SYSTEMS

Das für die Optimierung ausgewählte Photovoltaik-System besteht aus 20 monokristallinen PV-Modulen mit einer Leistung von jeweils 300 W (insgesamt 6 kWp). Die Module, welche auf dem Flachdach des Einfamilienhauses aufgestellt wurden, besitzen eine Ost-West-Orientierung. Die Umwandlung von Gleichstrom auf Wechselstrom erfolgt über einen 5 kW Wechselrichter des österreichischen Herstellers Fronius, welcher auch die Möglichkeit für die spätere Implementierung eines Batteriespeichersystems bietet. Zum aktuellen Zeitpunkt ist kein Batteriespeichersystem vorhanden. Der im System installierte Ohmpilot ist im Wesentlichen ein Verbrauchsregler, welcher überschüssigen PV-Strom noch vor der Einspeisung in das Netz für die Warmwasseraufbereitung heranzieht und somit den Eigenverbrauchsanteil deutlich steigert. Der Eigenverbrauchsanteil des bestehenden PV-Systems liegt derzeit bei ca. 47 %, wobei bereits 20 % für den Ohmpiloten benötigt werden. Der Anteil am Direktverbrauch liegt demnach bei ca. 27 %. Die Auswertung des Systems und der Verbrauchsanteile erfolgte mit der Software SolarWeb (Fronius), welche per WLAN mit dem Wechselrichter verbunden ist (Leindecker 2020).

3.2 BESCHREIBUNG REFERENZSZENARIO MIT STANDARDBATTERIE

Um die Wirtschaftlichkeit und den technischen Aufwand eines E-Auto-Batteriespeichersystems bewerten und vergleichen zu können, wurde ein Referenzszenario mit einem konventionellen Stromspeichersystem geschaffen. Hierfür wurden drei – mit dem bereits installierten Wechselrichter kompatible – Stromspeicher analysiert. Die Wahl fiel auf ein DC/DC-System, bei welchem der Batteriespeicher direkt an den Wechselrichter angeschlossen wird (siehe Abb. 3). Der Vorteil dieser Verschaltung ist, dass kein zusätzlicher Batterie-Wechselrichter benötigt wird und somit neben geringeren Kosten und einer technisch einfacheren Umsetzung auch ein höherer Wirkungsgrad erzielt wird. Das Batteriespeichersystem (Modell: BYD Battery Box HVM) hat eine Kapazität von 8,28 kWh und würde den Eigenverbrauchsanteil von gegenwärtig 47 % auf bis zu 74 % steigern. Bei der Nutzung eines Elektrofahrzeuges und dem damit verbundenen höheren jährlichen Stromverbrauch (Annahme 2000 kWh pro Jahr zusätzlich) würde der Eigenverbrauchsanteil dieser Referenz-Anlage auf bis zu 87% steigen. Hierbei gilt es allerdings zu beachten, dass das Fahrzeug primär während der Nacht geladen wird und der Eigenverbrauchsanteil stark vom Nutzungsprofil des Gebäudes abhängt. Die ermittelten Investitionskosten dieses Stromspeichersystems belaufen sich unter Berücksichtigung der derzeitigen Fördersituation im Bundesland Oberösterreich auf ca. € 4.990.- (Leindecker 2020).

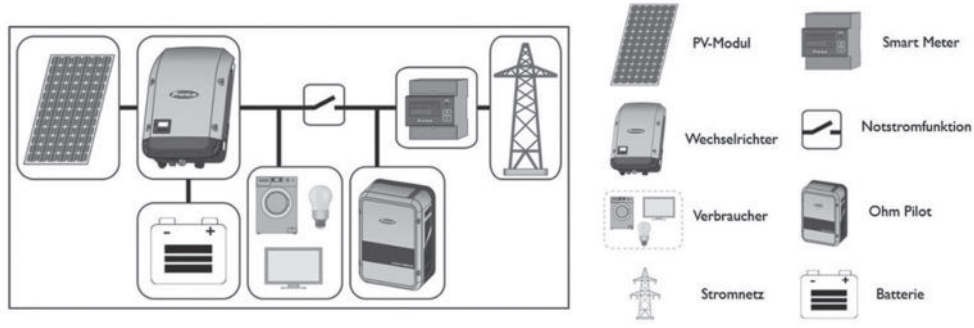


Abb. 3: Referenzszenario mit DC-Kopplung des Batteriesystems (Fronius 2020)

4. DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE

4.1. KAPAZITÄT UND KOSTEN FÜR DAS BATTERIESPEICHERSYSTEM

Im Folgenden werden verschiedene Speichergrößen - unter Berücksichtigung der Verwendung eines E-Autos - in Bezug auf die Eigenverbrauchsquote (EVQ) bewertet. Die Ausgangsvariante (kein Speicher, kein E-Auto) hat hierbei eine EVQ von 48 % (siehe Tab. 1). In Verbindung mit einem E-Auto und einem damit verbundenen höheren jährlichen Stromverbrauch (zusätzlich 2.000 kWh) würde die EVQ auf 56 % ansteigen. Würde ein Speicher mit 4 kWh installiert werden, steigt die EVQ ohne E-Auto auf 69 %, mit E-Auto auf 81 %. Die Installation eines 8 kWh Speichers ist zwar mit höheren Anschaffungskosten verbunden, würde jedoch die EVQ auf 74 % (ohne E-Auto) bzw. 87 % (mit E-Auto) erhöhen. Die Berechnung der Eigenverbrauchsanteile erfolgte mit einem Online-Rechner der PV-Austria (PV-Austria 2020).

Tab. 1: Eigenverbrauchsanteile in Abhängigkeit von Speichergröße und E-Auto (PV-Austria 2020)

Speichergröße / E-Auto	Eigenverbrauch Direkt (%)	Eigenverbrauch Akku (%)	Eigenverbrauch WW (%)	Einspeisung Netz (%)	Eigenverbrauch Quote (%)
0 kWh, Referenz	26,1	-	21,8	52,1	48
0 kWh, E-Auto	35,2	-	21,1	43,7	56
4 kWh	26,1	22,8	19,8	31,3	69
4 kWh, E-Auto	35,2	27,6	17,7	19,5	81
6 kWh	26,0	26,5	19,3	28,2	72
6 kWh, E-Auto	35,1	32,5	16,8	15,7	84
8 kWh	25,9	28,8	19,0	26,3	74
8 kWh, E-Auto	34,9	35,5	16,1	13,5	87

Die Kosten für gebrauchte E-Auto-Batterien schwanken sehr stark und liegen derzeit zwischen 200 €/kWh und 300 €/kWh. Ausgehend von einem Preis von 300 €/kWh und einer angenommenen Restkapazität von 80 %, würden sich die Kosten für einen 4 kWh Speicher auf ungefähr € 1.500, für einen 8 kWh Speicher auf € 3.000 (ohne Kosten für zusätzliches Material und Arbeitszeit) belaufen. Werden diese für beide Speicher pauschal mit € 1.500 angenommen, liegen die Gesamtkosten bei € 3.000 für den 4 kWh Speicher bzw. € 4.500 für den 8 kWh Speicher. Die Kosten liegen somit unter den Preisen für Komplettsysteme, allerdings sollte der hohe Arbeitsaufwand mit berücksichtigt werden.

4.2. EINFLUSS DES SPEICHERSYSTEMS AUF DEN ENERGIEAUSWEIS

Im Folgenden werden ausgewählte Batterie-Speichersysteme hinsichtlich deren energetischen Einfluss auf den Energieausweis betrachtet. Hierbei sollten zudem die Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Berechnungsgrundlagen gem. den OIB-Richtlinien 6 von 2015 und 2019 betrachtet werden. Die Berechnungen erfolgten mit der Energieausweissoftware GEQ wobei es zu berücksichtigten gilt, dass es sich hierbei um eine Testversion handelte und möglicherweise noch vereinzelnde Fehler auftreten können. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind Tab. 2 dargestellt. Hierbei fällt auf, dass der $HWB_{Ref,SK}$ in der Version OIB-RL 6 von 2019 ohne Veränderung an den Gebäudeeinstellungen um 3,2 kWh/(m²a) höher ausfällt als in der Version von 2015. Dies ist neben der höheren Soll-Innenraumtemperatur von 22 °C und angepassten Klimadatensätzen vor allem auf die vereinfachte Berücksichtigung (Default-Einstellung) der Verschattung

zurückzuführen (Leindecker 2020). Bei detaillierter Eingabe der Verschattung ist es möglich bessere Werte für den $HWB_{Ref,SK}$ zu erzielen.

Tab. 2: Ergebnisse der Energieausweisberechnung mit GEQ

Version	$HWB_{Ref,SK}$	$PEB_{n.ern.SK}$	$PEB_{ern.SK}$	EEB_{SK}	$CO_{2,SK}$	f_{GEE}
	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kg/(m²a)	(-)
OIB-RL 2015 ohne Speicher	46,2	41,4	52,0	63,5	8,4	0,40
OIB-RL 2019 ohne Speicher	49,4	28,0	60,6	68,2	6,0	0,46
OIB-RL 2019 6,0 kWh Speicher	49,4	27,3	60,2	67,5	5,8	0,46
OIB-RL 2019 8,3 kWh Speicher	49,4	27,3	60,2	67,5	5,8	0,46
OIB-RL 2019 11 kWh Speicher	49,4	27,3	60,2	67,5	5,8	0,46

Bei weiterer Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass der Primärenergiebedarf $PEB_{n.ern.SK}$ in der Berechnung gem. OIB-RL 6 von 2019 deutlich sinkt, dafür der $PEB_{ern.SK}$ leicht steigt. Insgesamt fällt der PEB_{SK} von ursprünglich 93,4 kWh/(m²a) auf 88,6 kWh/(m²a). Auch der $CO_{2,SK}$ fällt mit 6,0 kg/(m²a) deutlich geringer aus. Diese Verbesserung ist unter anderem auf die neuen Konversionsfaktoren für den Strom-Mix in Österreich zurückzuführen, welche durch den höheren Anteil an erneuerbaren Energien von 1,91 auf 1,63 (f_{PE}) bzw. von 276 g/kWh auf 227 g/kWh ($f_{CO2,eq.}$) gesenkt wurden (OIB 2015 und 2019).

Im Anschluss an die Auswertung der Unterschiede zwischen alter und neuer OIB-Richtlinie 6, sollte der Einfluss eines Batterie-Speichersystems betrachtet werden. Hierbei zeigte sich, dass bei der Installation eines 6,0 kWh Speichers der PEB_{SK} geringfügig um 1,1 kWh/(m²a) gesenkt werden könnte. Auch der EEB_{SK} sinkt um 0,7 kWh/(m²a) auf einen Wert von 67,5 kWh/(m²a). Der $CO_{s,SK}$ würde um 0,2 kg/(m²a) auf einen Wert von 5,8 kg/(m²a) sinken. Die Installation eines Speichers mit größerer Kapazität zeigt dagegen keine energetische Verbesserung im Energieausweis (Leindecker 2020).

4.3. FÖRDERSITUATION IN ÖSTERREICH

In Österreich wird die Installation eines PV-Speichers ab einer Mindestgröße von 0,5 kWh/kWp installierter Engpassleistung mit € 200.- pro kWh gefördert (max. 30 % der Investitionskosten). Es werden auch größer geplante Speicherprojekte gefördert, jedoch nur bis 50 kWh (PV-Austria 2020, online). Der Kauf eines Elektrofahrzeuges wird seitens des Bundes mit derzeit € 5.000.- gefördert. Für gebrauchte E-Auto-Batterien existiert keine zusätzliche Förderung in Österreich (DA 2020,).

Neben den bereits erwähnten technischen und sicherheitsrechtlichen Problemstellungen beim Eigenbau von PV-Speichersystemen, erhöht die aktuelle Fördersituation in Österreich die Attraktivität der wesentlich unkomplizierteren Komplettlösungen der Hersteller. Hierbei existiert auf dem Markt bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen wie z.B. das X-Storage System aus recycelten E-Autobatterien (Hersteller: Eaton) oder Speicherlösungen in Modulbauweise (BYD), welche je nach Bedarf in einem Bereich von 5,1 kWh bis 22,1 kWh erweitert werden können (Fronius 2020).

5. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Die umfangreichen Recherchen während des fächerübergreifenden Projektes zu Thema Stromspeichersysteme aus 2nd-Life-Autobatterien zeigten, dass deren Lebensdauer und die daraus resultierende Öko-Bilanz deutlich verbessert werden kann. Allerdings ist die Installation eines solchen Systems mit teils erheblichen technischen Schwierigkeiten verbunden. Neben der komplexen Programmierung eines Batteriemanagementsystems und strenger technischer Auflagen der Netzbetreiber, besteht zudem das Risiko eines Gewährleistungsverlustes für die Komponenten der bestehenden PV-Anlage. Die aktuelle Verfügbarkeit von gebrauchten E-Auto-Batterien auf dem freien Markt stellt eine weitere nicht unerhebliche Hürde für die Verwendung als PV-Speicher dar. Dies ist vor allem auf das Vermietungskonzept für Batterien von Elektrofahrzeugen durch die Automobilhersteller zurückzuführen. Die zukünftige Marktverfügbarkeit hängt daher sehr stark von der mittel- und langfristigen Entwicklung der Elektromobilität in Österreich ab.

Bei der Betrachtung der Auswirkung eines PV-Speichersystems auf den Primärenergiebedarf, den Endenergiebedarf sowie den CO_2-Emissionen im Energieausweis hat sich gezeigt, dass die Installation eine lediglich geringe Verbesserung bewirkt. Dies ist vor allem auf den hohen Anteil erneuerbarer Energien im Österreichischen Stromnetz und den damit verbundenen niedrigen Konversationsfaktoren zurückzuführen. Diese wurden mit der neuen OIB-Richtlinie 6 von 2019 im Vergleich zur Version von 2015 um 14,66 % (f_{PE}) bzw. um 17,75 % ($f_{CO2,eq.}$) deutlich gesenkt.

Zum aktuellen Zeitpunkt muss von einer Installation eines Batterie-Speichersystems, bestehend aus 2nd-Life-Autobatterien, aus technischer Sicht abgeraten werden. Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht empfehlen sich Komplettlösungen der PV-Industrie (Leindecker 2020).

LITERATUR

Becker J. (2019) Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien, Szenarien, Dienstleistungen und Entscheidungsunterstützung, Springer Vieweg Verlag Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-21020-5

BMI (2018) Wege zum Effizienzhaus Plus, Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude, Deutsches Bundesministerium für Inneres, für Bau und Heimat, 6. Auflage, Stand November 2018

BEO (2020, online) Bundesverband Elektromobilität Österreich, Zugriff am 20.07.2020, https://www.beoe.at

DA (2020, online) Digitales Amt, Zugriff am 20.07.2020, https://www.oesterreich.gv.at

Eaton (2020, online) Eaton Electric GmbH, Zugriff am 20.07.2020, https.//www.eaton.com

FIBP (2020, online) Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Zugriff am 20.07.2020, https://www.ibp.fraunhofer.de

Fronius (2020, online) Fronius International GmbH, Zugriff am 20.07.2020, https://www.fronius.com

Leindecker C. (2020) Smart Building & Mobility – Nutzung von E-Auto-Batterien als Energiespeicher für PV-Analgen. Fächerübergreifendes Projekt. Studierende: Haubenberger Tobias, Haunschmid Johannes, Kondler Thomas, Rebig Michael, Schwemberger Jakob, Unterlader Albert, Wilfingseder Thomas. Studiengang Angewandte Energietechnik. FH OÖ Campus Wels.

Netz Oö. (2020, online) Netz Oberösterreich GmbH, Ein Unternehmen der Energie AG Oberösterreich, Zugriff am 20.07.202, https://www.netzooe.at

OIB (2015) OIB-Richtlinie 6 Ausgabe März 2015, Energieeinsparung und Wärmeschutz, OIB-330.6-009/15, Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien

OIB (2019) OIB-Richtlinie 6 Ausgabe April 2019, Energieeinsparung und Wärmeschutz, OIB-330.6-026/19, Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien

PV-Austria (2020, online) Federal Association Photovoltaic Austria, Zugriff am 24.07.2020, https://www.pvaustria.at

TUM (2020, online) Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Zugriff am 20.07.2020, https://www.tum.de

Kontaktdaten Autor(en):
Prof. (FH) Arch. Dipl.-Ing. Dr. Herbert C. Leindecker
Stelzhamerstraße 23
4600 Wels
Email: herbert.leindecker@fh-wels.at

Das Konzept der Intelligenzfähigkeit von Gebäuden – Entwicklungen und erste Umsetzungen

A. Knotzer
AEE – Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Österreich

ABSTRACT: The concept of smart readiness in buildings - new policy developments and first implementation paths. The smart readiness indicator (SRI) of buildings was laid down in the latest amendment of the EPBD (EU 2018). The European Commission sees a high potential in new technologies and services resulting from more interconnected and intelligent devices that cover features for enhanced energy savings, functionalities and flexibility. On the basis of the 2016 released "Clean Energy for All Europeans" package of measures in the building sector, the European Commission intends to interlink intelligent technologies with a high proportion of renewable energies and energy efficiency.

The European SRI scheme, which will be in place in December 2020, is based on two studies of a consortium around VITO/Belgium, comprises three different possibilities of assessment, a „Simplified online quick scan", an „Expert SRI assessment" and an „In-use smart building performance" assessment. This SRI is based on information mainly on the technological readiness of buildings to interact with their occupants and the energy grids, and their capabilities for more efficient operation and better performance through ICT technologies, but not on the potential decrease of CO_2-emissions or primary energy caused by this smart use of technologies or services. The VITO consortium made a list of technologies and services being assessed by functionality levels, weighted against impact criteria, grouped and summarized to one value up to 100 %.

An Austrian SRI scheme is still under construction. One research study ‚SRI Austria' from 2019 suggested an indicator based on three pillars representing firstly data on load and potentially flexible building services like different storage possibilities and component heating, secondly a rating of technical readiness based on the methodology of the VITO-consortium and thirdly physical comfort assessment. The first pillar is weighted 50 %, the second 40 % and the third 10 % to result also in a value up to 100 % for the total SRI score. A SRI-rated building must have a high energetic standard, with specific limit values for primary energy demand (PED) and CO_2-emissions to be defined. The most important Austrian voluntary building certification system „klimaaktiv" lastly worked on a criterion" to better assess and reward different flexibility-technologies.

1. EINLEITUNG

Die EU-Gebäuderichtlinie sieht in den Änderungen von 2018 (EU 2018) einen Smart Readiness Indicator (SRI) vor, der zeigen soll, wie intelligent ein Gebäude in Bezug auf bestimmte (Geräte-)Ausstattungsmerkmale wie digitale Zähler, Automationssysteme, u.ä. ist. Die Europäische Kommission sieht ein hohes Potenzial für neue Technologien und Dienstleistungen, die sich aus stärker vernetzter und intelligenter Gebäudeausstattung ergeben, und die Funktionen für erhöhte Energieeinsparungen, NutzerInnenanpassungen und Flexibilität abdecken.

Der SRI soll eine Bewertung darstellen, die aus energiepolitischer und volkswirtschaftlicher Sicht für die Mitgliedsstaaten vorteilhaft ist. Er soll bevorzugt in den Energieausweis integriert werden, und die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien für energetisch sinnvolle Zwecke in Gebäuden bewerten.

Den EU-Mitgliedsstaaten wird es freigestellt, ob der Indikator in den Energieausweis oder andere Gebäude-bezogene Dokumente integriert werden soll. Den Mitgliedsstaaten steht es derzeit frei, diesen

„Intelligenzfähigkeitsindikator“, wie er ins Deutsche übersetzt heißt, derzeit weitgehend zu ignorieren oder ihn aktiv (mit) zu gestalten. Letzteres wird derzeit in einigen österreichischen Bundesländern erwogen, weil sie sich mit neuen Technologien wie z.B. PV-Speicherintegration, dezentraler Strom-Ladeinfrastruktur für elektrische Fahrzeuge, Regel- und Smart Home-Systemen und entsprechenden Geschäftsmodellen in nächster Zukunft beschäftigen müssen.

Die Methodik des SRI soll sich jedenfalls laut EPBD 2018 auf drei Hauptmerkmale eines Gebäudes stützen:

- „Fähigkeit, die Gesamtenergieeffizienz und den Betrieb des Gebäudes aufrechtzuerhalten, indem der Energieverbrauch, beispielsweise durch die Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, angepasst wird.
- Fähigkeit, den Betriebsmodus auf den Bedarf der Bewohner abzustimmen, wobei gebührend auf Benutzerfreundlichkeit, die Aufrechterhaltung eines gesunden Raumklimas und die Fähigkeit, den Energieverbrauch aufzuzeichnen, zu achten ist.
- Flexibilität des Gesamtenergiebedarfs eines Gebäudes, einschließlich seiner Fähigkeit, die Teilnahme an der aktiven und passiven sowie an der impliziten und expliziten Laststeuerung in Bezug auf das Netz zu ermöglichen, zum Beispiel durch Flexibilität und Kapazitäten zur Lastverschiebung.

Die Methode muss einfach, transparent und für Verbraucher, Eigentümer, Investoren und Marktteilnehmer im Bereich Laststeuerung leicht verständlich sein.“ (EU 2018)

2. SRI METHODIK DER EU

Die EU, DG Energy, hat im Sommer 2020 zwei Rechtsakte als Grundlage für den Beschluss der Einführung und Methodik eines SRI vorgelegt. Diese sollen im Dezember 2020 vom EU-Rat und dem EU-Parlament beschlossen werden. Somit würden die rechtlichen Vorgaben ab 2021 gültig werden. Was sieht dieser Vorschlag der EU vor?

Der vorliegende Vorschlag für den „Smart Readiness Indicator“ (SRI) wurde in 2 Studien von einem europäischen Konsortium rund um VITO/Belgien, in der zweiten bestehend aus VITO (Koordination), EnergyVille und Waide Strategic Efficiency, ausgearbeitet. Die 2. Studie wurde unter Beteiligung verschiedener Stakeholder in sogenannten ‚Topical Groups‘ erstellt und im Sommer 2020 fertig gestellt (Verbeke et al. 2020). Die an den Topical Groups beteiligten Personen wurden publik gemacht, in diesen Gruppen gab es regen Austausch in mehreren Online Meetings und persönlichen Zusammentreffen im Rahmen von 2 Stakeholdermeetings 2019 in Brüssel.

Die Grundlage für die nun vorliegende EU-Berechnungsmethodik bildet ein Technologie- und Dienstleistungskatalog, der hauptsächlich auf Normen, z.B. EN 15232, und ExpertInnenwissen basiert. Dieser wurde bereits Ende August 2018 als Ergebnis der 1. VITO-Studie (Verbeke et al. 2018) veröffentlicht. Dieser Katalog bildet die Grundlage für die Festlegung der in Gebäuden zu bewertenden Technologien und Dienstleistungen. Er wurde in der 2. VITO-Studie so verändert, dass daraus im Anhang des Endberichts eine Version für die vereinfachte SRI-Bewertung und eine für die erweiterte bzw. ExpertInnenbewertung entstanden ist.

Der EU-Vorschlag umfasst nämlich drei verschiedene Möglichkeiten, den SRI in Zukunft zu berechnen (siehe auch Abb. 1):

- Methode A „Simplified method“ (end-user checklist approach)
- Methode B „Expert SRI assessment“ (qualified technical expert approach)
- Methode C „In-use smart building performance“ (measured/metered data approach)

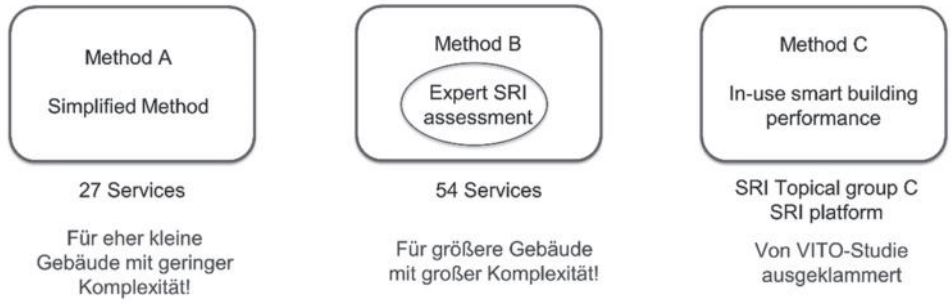


Abb. 1: Die drei Arten der SRI Bewertung aus der VITO-Studie.

Diese verschiedenen Ausprägungen des SRI wurden vor allem in der Topical Group B diskutiert, die sich dem methodischen Rahmen des SRI, einschließlich der Auswahl der Energiedienstleistungen, deren Funktionalitäten und der Definition der Gewichtungsfaktoren widmete. Topical Group A fokussierte auf den Nutzen, Markt und die konkrete Umsetzung des SRI. Die Topical Group C wurde im Herbst 2019, aus der Notwendigkeit, Methode C weiter zu verfolgen, gegründet und existiert noch immer – sie kümmert sich um die zukünftige Entwicklung des SRI, auf sie wird später noch eingegangen.

Der nun zum Beschluss durch die Mitgliedsstaaten vorliegende SRI-Vorschlag der EU sagt jedoch nichts über mögliche CO_2-Emissionsreduktion oder Primärenergiebedarf aus, die durch den Einsatz von intelligenten Technologien oder Dienstleistungen verursacht werden. In der vom VITO-Konsortium erstellten Liste bzw. im Katalog wird jede Technologie oder Dienstleistung nach Funktionalitätsstufen bewertet, nach Wirkungskriterien gewichtet, in Energieanwendungen gruppiert und zu einem Wert von bis zu 100 % zusammengefasst (Verbeke et al. 2020). Diese Bewertung erfolgt **in vier Schritten**:

A. Es gibt für jede Technologie oder Dienstleistung bzw. ‚Service' innerhalb von 9 Energieanwendungsbereichen bzw. ‚Domains' (Heizung, Kühlung, Warmwasser, Lüftung, Beleuchtung, dynamische Gebäudehülle, Elektrizität, E-Fahrzeugbeladung, Monitoring und Steuerung) des Katalogs mindestens 2 und maximal 5 Funktionalitätsstufen bzw. ‚functionality levels' von 0 bis 4. Die Festlegung welche Funktionalitätsstufe eines bestimmten Service in einem Gebäude angetroffen bzw. geplant wird, soll durch eine/n autorisierte AuditorIn bzw. ExpertIn für das ‚Expert Assessment' oder durch technisches Personal von Bauträgern und GebäudeeigentümerInnen im ‚Simplified Self-Check' entschieden werden.
B. Diese Festlegung der Funktionalitätsstufe für das jeweilige ‚Service' zieht eine vorgegebene Bewertung in Bezug auf die 7 Wirkungsbereiche oder ‚Impact Criteria' (Energieeinsparungen vor Ort, Wartung und Fehlervorhersage, Komfort, Behaglichkeit, Gesundheit und Wohlbefinden, Information für BewohnerInnen, Flexibilität bezüglich Netz und Speicherung) nach sich. Diese Bewertung besteht aus einer 7-Punkteskala (-3 bis +3), je nachdem ob die Wirkung der Funktionalität unterdurchschnittlich gering oder sehr hoch ist.
C. Zur prozentuellen Summenbewertung für einen dieser 7 Wirkungsbereiche wird die Summe der Punkte aus den bewerteten Services geteilt durch die Summe der maximal erreichbaren Punkte aus den bewerteten Services für das spezifische Gebäude. Dieser Schritt soll unterschiedliche Gewichtungen für einzelne ‚Services' und ‚Domains' möglich machen, auch wenn von Seiten der EU nun spezifische vorgegeben werden.
D. Die Gesamtbewertung aus den 7 Wirkungsbereichen wird aggregiert zu den drei EPBD-kompatiblen Wirkungsgruppen ‚Energieeinsparung und Betrieb', ‚Antwort auf NutzerInnenbedürfnisse' und ‚Energieflexibilität', und diese zu je einem Drittel auf einen Gesamt-SRI-Wert.

3. SRI ANSÄTZE FÜR ÖSTERREICH

Der österreichische Vorschlag eines SRI wurde in einer Studie ‚SRI Austria' (Knotzer et al. 2019) erarbeitet und beruht auf drei ‚Säulen' (Abb. 2) - angelehnt an die Hauptmerkmale eines SRI aus dem Anhang der EPBD 2018, deren Bewertungen ein Gebäude bestmöglich zu erfüllen hat, um einen hohen SRI Wert zu bekommen.

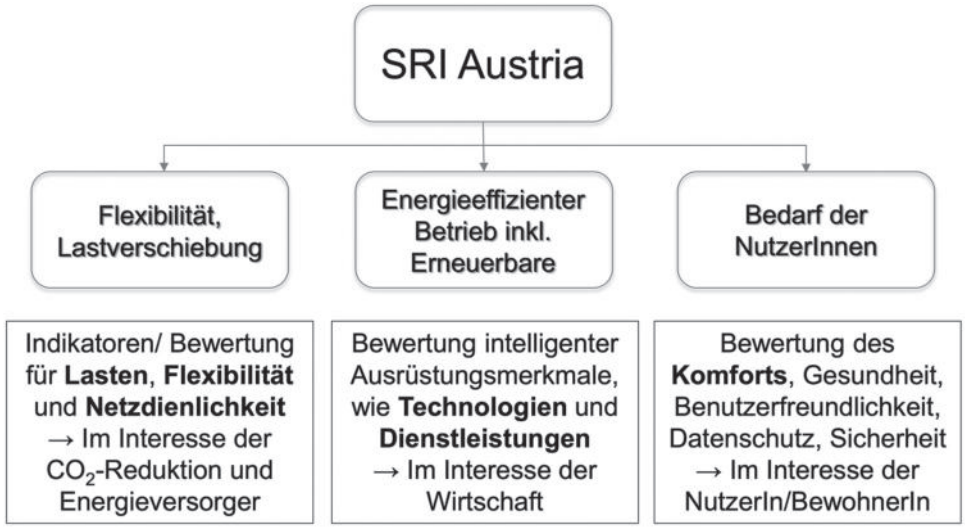


Abb. 2: Die drei Säulen als Basis für einen österreichischen SRI Vorschlag.

Die erste Säule ‚Flexibilität, Lastverschiebung" besteht aus drei Komponenten, die die Bewertung in dieser Säule bestimmen: Angaben und Indikatoren zu Lasten, Speichern und Aktivierung von Speichermasse im Gebäude. Tab. 1 gibt ein Beispiel zur möglichen Bewertung von Speichern im Gebäude.

Tab. 1: Beispiel zur gewichteten Bewertung von thermischen und Batterie-Speichern in einem Mehrfamilienwohnhaus.

Angabe der Speicher (Beispiel)	Werte kWh/m²BGF	Gewichtung %
Thermische Speicher vorhanden (ja/nein)	ja	
Einfamilienhaus 0,2 – 0,4 kWh/m²BGF	-	0
Einfamilienhaus und Nicht-Wohngebäude 0,05 – 0,15 kWh/m²BGF	0,05	10
Elektrische Speicher vorhanden (ja/nein)	ja	0
Einfamilienhaus 0,025 – 0,06 kWh/m²BGF	-	
Mehrfamilienhaus 0,01 – 0,03 kWh/m²BGF	0,01	30
Regelbare Schnittstelle zum Netz vorhanden (ja/nein)	ja	10
Gesamt		50 (von 100)

In der zweiten Säule ‚Energieeffizienter Betrieb inkl. Erneuerbare" wird die Methodik des VITO-Konsortiums weiterentwickelt, um für Österreich relevante Dienstleistungen und Technologien zur Sicherstellung des energieeffizienten Betriebs und des Einsatzes Erneuerbarer Energietechnologien für die wesentlichsten Energieanwendungen im Gebäude zu bewerten. Es werden vorrangig Dienstleistungen und Technologien mit Bestand hoch bewertet, die also nicht leicht und jederzeit nachgerüstet, entfernt oder verändert werden können, zum Beispiel thermische Speicher oder Bauteilaktivierung (Tab. 2).

Tab. 2: Einteilung intelligenter Technologien und Dienstleistungen nach Wertigkeit bzw. die Gewichtung derselben innerhalb der 2. Säule eines SRI für Österreich.

Smart Services	Langfristig verwendbar, langlebig, schwer änderbar, hohe Bedeutung für Flexibilität	Mittelfristig veränderbar, längere Nutzungsdauer, Potential zu langfristiger Verwendung	Kurzfristig veränderbar / austauschbar, kürzere Nutzungsdauer
Wertigkeit	Hoch (Gewichtung x1)	Mittel (Gewichtung x2/3)	Gering (Gewichtung x1/3)

Grundsätzlich ist das vorrangige Ziel der Bewertung in der dritten Säule, Akzeptanz für einen netzdienlichen und dabei soweit möglich auch sparsamen Betrieb des Gebäude-Energiesystems zu schaffen. NutzerInnen können in entsprechend ausgerüsteten Gebäuden je nach Nutzung ihres Flexibilitätspotentials verstärkt volatile erneuerbare Energien nutzen, bzw. CO_2-intensiven Netzenergiebezug reduzieren. Hoch bewertet werden könnten hier etwa flexiblere Komfort-Temperaturen, mit gemeinsam mit NutzerInnen definierten Ober- und Untergrenzen bei Ab- und Anwesenheit in Gebäuden.

Alle drei Säulen bewertet, ergeben sich SRI-Werte zwischen 0 und 100 %, wobei die Säulen untereinander wieder nach Wertigkeit beispielhaft wie in Tab. 3 gewichtet werden könnten.

Tab. 3: Beispiel für die Gewichtung der 3 Säulen

Gewichtung Gesamt-SRI	Säule 1	Säule 2	Säule 3
100 %	50 %	40 %	10 %

Diese Gesamtbewertung ist ein zusammenfassendes Endergebnis, das für Marketingzwecke nutzbar sein kann. Als zusätzliche Information für Kaufentscheidungen bzw. Anmietung, für Angebote von Energieversorgern oder -dienstleistern sowie mögliche Förderungen sind aber Einzelergebnisse je Säule weitaus interessanter.

4. ERSTE BEISPIELE IN DER UMSETZUNG

Die BMK-Klimaschutzinitiative ‚klimaaktiv' hat im Bereich ‚Bauen und Sanieren' mit der Erstellung von neuen Kriterien 2020 einen Punkt im Kapitel ‚Energie und Versorgung' mitaufgenommen, der die ‚Energieflexibilität', also die Säule 1 aus Kap. 3 betrifft. 80 Punkte können gesamt im 1.000 Punkte umfassenden Bewertungssystem von klimaaktiv Gebäuden in diesem Thema gesammelt werden.

Dabei werden folgende Punkte bewertet:

Thermische Flexibilität im Gebäude

- Aufheizverhalten im Sommer (Kühlungsflexibilität) max. 40 Punkte
  Die Bewertung erfolgt über die Stunden in der der lineare Trend der operativen Temperatur das Komfortband (22 – 26 °C) nicht verlässt (Zeit ohne aktive Kühlung, vergleiche Abb. 3):
  10 Punkte für mindestens 34 h
  20 Punkte für mindestens 44 h
  40 Punkte für mindestens 54 h

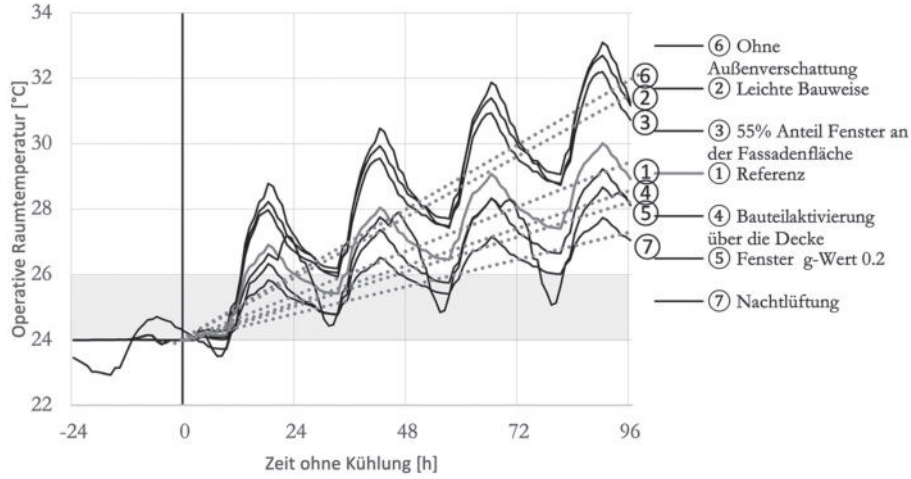


Abb. 3: Beispielergebnisse für das Auskühlverhalten eines Referenzgebäudes mit verschiedenen gesetzten technischen Maßnahmen; punktiert sind die linearen Trendlinien der Varianten (Weiss 2020)

- Auskühlverhalten im Winter (Heizungsflexibilität) max. 15 Punkte
  Die Bewertung erfolgt über die Stunden in der der lineare Trend der operativen Temperatur das Komfortband (24 – 22 °C) nicht verlässt:
  5 Punkte für mindestens 24 h
  10 Punkte für mindestens 36 h
  15 Punkte für mindestens 48 h
  Für Aufheiz-/Auskühlverhalten müssen dynamische Simulationen mit spezifischen Klimadatenvorgaben durchgeführt werden.
- Alternativ dazu für Wohngebäude
  Bewertung in zwei Heizlast-Klassen (PHPP-Nachweis):
  55 Punkte bei Heizlast < 10 Watt/m²WNF
  15 Punkte bei Heizlast < 25 Watt/m²WNF oder
  55 Punkte, wenn spezifische Kriterien der thermischen Bauteilaktivierung und im Betrieb einer Wärmepumpe bei Gebäuden mit Heizlast < 25 Watt/m²WNF erfüllt werden.

Zusätzliche thermische und elektrische Speicher (max. 30 Punkte)

- Thermische Speicher:
  Nichtwohngebäude: 0,05 - 0,15 kWh/m²BGF (15 - 30 Punkte)
  Mehrfamilienhaus: 0,05 - 0,15 kWh/m²BGF (15 - 30 Punkte) – entspricht 1 bis 4 Liter Speicherinhalt/m²BGF
  Einfamilienhaus: 0,2 - 0,4 kWh/m²BGF (15 - 30 Punkte) – entspricht 6 bis 12 Liter Speicherinhalt/m²BGF

Zwischenwerte werden interpoliert.

- Elektrische Speicher:
  Nichtwohngebäude: 0,01 - 0,03 kWh/m²BGF (15 - 30 Punkte)
  Mehrfamilienhaus: 0,01 - 0,03 kWh/m²BGF (15 - 30 Punkte)
  Einfamilienhaus: 0,025 - 0,06 kWh/m²BGF (15 - 30 Punkte)
  Zwischenwerte werden interpoliert.
- Ein innovatives Speicherkonzept ist vorhanden (30 Punkte)
- Generelle Voraussetzung für Punkte bei Speichern
  Eine externe Schaltung ist nur innerhalb definierter Betriebszustände möglich:
  Betriebszustand 1: externe Abschaltung /Sperrzeit innerhalb von Komfortbandbreiten möglich
  Betriebszustand 2: Normalbetrieb der Anlage – ohne externe Ansteuerung
  Betriebszustand 3: externe Einschaltung innerhalb von Komfortbandbreiten möglich

Zusätzliches Regelsystem zur weiteren Optimierung (max. 10 Punkte)
Können Wetterentwicklung und Schaltung nach netzdienlichen Parametern in der Regelungstechnik erfasst und verarbeitet werden, so können unabhängig von der Heizlast-Klasse Punkte lukriert werden.

- Berücksichtigung der Wetterentwicklung (10 Punkte)
- Schaltung zusätzlicher Verbraucher nach netzdienlichen Parametern (10 Punkte)
  Da dieses Energieflexibilitätskriterium ganz neu ist, werden hier vorerst Erfahrungen zur Weiterentwicklung gesammelt.

5. AUSBLICK

Ab 2021 wird die Testphase des SRI nach Inkrafttreten der EU-Verordnung auf Basis der EPBD 2018 in den interessierten Mitgliedsländern starten. Österreich hat sich hier schon im Vorfeld inhaltlich konstruktiv und klar positioniert, und wird zumindest in einigen Bundesländern, politisch gestützt, an der Testphase teilnehmen.

Unabhängig davon arbeitet zur Weiterentwicklung der Methodik des SRI, wie weiter oben schon erwähnt, derzeit eine ‚Topical Group C', ein Stakeholderforum mit ExpertInnenbeteiligung. Alle Elemente im Zusammenhang mit einer datengesteuerten Bewertung, z.B. methodische Anforderungen (Benchmarking der Intelligenz, Umgang mit qualitativen SRI-Einflüssen wie Wohlbefinden), technologische Anforderungen (Datenformate, Disaggregation von Daten zum Extrahieren der Smartness-Aspekte, erforderliche Steuerungsinfrastruktur usw.) und andere Aspekte wie Datenschutz und Cybersicherheit, werden in dieser Gruppe diskutiert. Eine sogenannte SRI Plattform soll in naher Zukunft durch diese Aktivitäten angestoßen, und die Testphase der vorliegenden SRI Methodik in den dafür optierenden Mitgliedsstaaten begleitet, diskutiert und dokumentiert werden.

6. DANKSAGUNG

Die inhaltliche Arbeit an der Studie ‚SRI Austria' wurde durch das BMK im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft finanziert, die Abstimmung mit europäischen und nationalen Stakeholdern und öffentlichen Stellen wird im Rahmen der Klimaschutzinitiative klimaaktiv Bauen und Sanieren ebenfalls durch das BMK finanziell unterstützt.

7. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

- Die Ziele zur Einführung des SRI für Gebäude sind in der EPBD 2018 formuliert.
- Die intelligente Anpassung der Gebäude an ein dekarbonisiertes Energiesystem, das in Zukunft aus Erneuerbaren Energieträgern gespeist werden wird, ist ein wichtiges übergeordnetes Ziel des SRI.
- Der SRI sollte die drei Hauptmerkmale im Anhang der EPBD 2018 adressieren, wovon die quantifizierbare Energieflexibilität bzw. Lastverschiebung die derzeit wichtigste darstellt.

- Die Wirkung von Technologien und Dienstleistungen sollte möglichst auf die für die Zielerreichung wesentlichen Wirkungsbereiche hin quantifiziert werden.
- Die Gewichtung derselben sollte in Abhängigkeit von den übergeordneten Zielgrößen wie CO_2-/Primärenergiebedarfs-Reduktion und langlebiger Nutzungsmöglichkeiten erfolgen.
- Die Berechnung des SRI soll mit wenigen zusätzlichen Eingaben zum Energieausweis möglich sein.
- Perspektivisch könnte der SRI im Sinne eines Korrekturfaktors die Ergebnisse des Energieausweises (EEB, PEB, CO_2) mitbestimmen.

Trotz fundierter Bewertungsgrundlagen für den SRI - zu viele unterschiedliche Faktoren und intransparente Wertigkeiten würden den Wert und den Nutzen des SRI stark verzerren. Auch daran ist in nächster Zukunft zu arbeiten, vor allem im Rahmen der Berechnungsmethodik der EU und als Ergebnis der Testphase dazu.

LITERATUR

EU (2018) Amtsblatt der Europäischen Union unter L 156/75 in deutscher Version als „RICHTLINIE (EU) 2018/844 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES, vom 30. Mai 2018, zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz

Knotzer A., Fechner J., Zelger T., Berger A. (2019) Smart Readiness Indikator - Bewertungsschema und Chancen für intelligente Gebäude, SRI Austria. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 8/2020, BMK. Gleisdorf und Wien 2019

Verbeke S., Ma Y., Van Tichelen P., Bogaert S., Gómez Oñate V., Waide P., Bettgenhäuser K., Ashok J., Hermelink A., Offermann M., Groezinger J., Uslar M., Schulte, J. (2018) Support for setting up a Smart Readiness Indicator for buildings and related impact assessment. Final report. August 2018, Brussels

Verbeke S., Aerts D., Reynders G., Ma Y., Waide P. (2020) Final report on the technical support to the development of a smart readiness indicator for buildings. Directorate-General for Energy, June 2020, Brussels. Die Studie steht auf https://smartreadinessindicator.eu/milestones-and-documents zum Download zur Verfügung.

Weiss T. (2020) Beispielergebnisse für das Auskühlverhalten eines Referenzgebäudes, unveröffentlichte Abbildung, AEE INTEC, Gleisdorf

Kontaktdaten:
Armin Knotzer
Feldgasse 19
8200 Gleisdorf
Email: a.knotzer@aee.at

Session 7c

Bewertung

CO_2-neutrale Gebäude & Quartiere – Chancen, Herausforderungen & Herangehensweise am Beispiel des Technologiezentrums Seestadt

Schulz, Haugeneder / ATP sustain GmbH / AT

Treibhausgasemissionen in der Betonstahlerzeugung

Truger, Scherz, Passer / TU Graz / AT
Fohringer / Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH / AT

Virtual Green World und Fair Construction Code

Lunzer / Dr. Lunzer Energie und Umwelt e.U. / AT
Osztovits / Bee Green World Ltd / LI

CO_2-neutrale Gebäude & Quartiere – Chancen, Herausforderungen & Herangehensweise am Beispiel des Technologiezentrums Seestadt

J. Schulz, M. Haugeneder
ATP sustain GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: The building and energy sector accounts for around 48 % of all greenhouse gas emissions in the EU, making it a major contributor to climate change. The Paris Agreement, adopted in 2015, sets the goal of reducing greenhouse gas emissions to the absolute minimum by 2050. As a result, the building sector must also be largely decarbonized by then, both in new construction and existing buildings.

Since the 1980s, countless systems and calculation methods have been developed with the aim of massively reducing the energy demand of buildings. It was only gradually that these measures were also taken into account in various building regulations. Looking at these requirements, the focus here in Austria primarily lies on the heating demand, in Germany on the primary energy demand. CO_2 emissions are only marginally considered and do not show a compelling correlation to the respective requirements. The different measures and legal requirements have developed continuously and have led to an unclear and inconsistent picture of the balance boundaries and methodology.

There are already approaches to this, such as DIN EN 15978, the framework for carbon neutral buildings and sites of DGNB, the Greenhouse Gas Protocol and the definition of Scope 1 - Scope 3 as well as national calculation methods. However, all of these have different approaches and therefore cannot be applied globally. In order to be able to assess measures in absolute terms and to enable realistic CO_2 pricing in the future, a uniform accounting methodology is necessary for new buildings as well as for existing buildings.

The example of "TZ Seestadt" can be used to show how balance boundaries can be defined and which optimization measures have been implemented in order to actually realize and operate a building in a CO_2-neutral way over its operating time. To this end, the highest demands on planning must be taken into account right from the start of the project, whereby life cycle-oriented measures must be worked out in close cooperation between architects, energy engineers, building physicists and material ecologists throughout all planning phases. In this way the environmental impact of a building can be reduced to a minimum. Such measures are based on the basic principles of efficiency to reduce energy demand, renewable energies to provide a local CO_2-neutral energy supply and CO_2 compensation to cover the residual emissions, caused, for example, by the use of electricity from the public grid.

1. EINLEITUNG

In Anbetracht des Pariser Klimaabkommens und des damit verbundenen Ziels der Klimaneutralität gilt es den Gebäudesektor bis 2050 zu dekarbonisieren. Betrachtet man die Treibhausgasemissionen gemäß Klimaschutzbericht 2020 für Österreich, so sind Gebäude für etwa 10 % aller Emissionen verantwortlich, wobei diese seit 2014 nach jährlichen Reduzierungen zuletzt wieder leicht gestiegen sind (Umweltbundesamt 2020).

Auch auf Seiten von BauherrInnen, NutzerInnen und InvestorInnen gewinnen CO_2-neutrale Immobilien immer mehr an Bedeutung – schließlich kann so der Mehrwert eines zukunftsfähiges Gebäude deutlich gesteigert werden. Zusätzlich erhöht die Einführung einer möglichen CO_2-Bepreisung, wie sie ab 2022 vorgesehen ist (BMF 2020), das Investitionsrisiko für nicht umweltfreundliche Technologien und Baustoffe, wodurch auch hier ein Trend zu alternativen Konzepten zu erwarten ist.

Um CO_2-neutrale Gebäude entwickeln zu können und nationale als auch globale Klimaschutzziele zu erfüllen, bedarf es einheitlicher Bilanzierungsmethoden und Herangehensweisen. Nachfolgendes Paper stellt einen Überblick dar.

2. HINTERGRUND

Treibhausgase werden weltweit durch unterschiedliche Verbrennungs- und Umwandlungsprozesse freigesetzt. Der Gebäudesektor spielt hierbei eine wesentliche Rolle, da neben den direkten und indirekten Emissionen der Energieversorgung speziell auch jene graue Emissionen berücksichtigt werden müssen, die durch die Herstellung von Baustoffen und -materialien emittiert werden.

Spricht man von Treibhausgasen wie CO_2, CH_4, N_2O oder fluorierten Gasen, so werden diese in Bilanzierungen i.d.R. als CO_2-Äquivalent zusammengefasst, um die Umweltauswirkungen gesamtheitlicher beurteilen zu können.

2.1 CO_2-EMISSIONEN VON GEBÄUDEN

Um CO_2-Emissionen von Gebäuden zu erfassen ist grundsätzlich zwischen direkten und indirekten, sowie grauen Emissionen zu unterscheiden. Direkte Emissionen fallen speziell durch Verbrennungsprozesse für Raumwärme und Warmwasser an, indirekte durch den Bezug von Strom aus dem öffentlichen Netz sowie durch Fern-/Nahwärmenutzung und Fernkälte (BMU 2019). Als Graue Emissionen werden all jene bezeichnet, die bei der Herstellung, Transport, Verarbeitung und Entsorgung von Baustoffen und Bauteilen entstehen (Viola & Habert. 2013).

Waren in der Vergangenheit aufgrund geringer Baustandards und hoher Energieverbräuche speziell direkte und indirekte Emissionen von Bedeutung, so stehen gegenteilig aufgrund höherer Baustandards und geringerer Energieverbräuche zukünftig graue Emissionen im Vordergrund (Püschel 2016).

Betrachtet man die direkten Emissionsquellen von Gebäuden, so entfallen etwa 60 % auf die Verbrennung von Gasen, 38 % auf Flüssigbrennstoffe (z.B. Heizöl) und etwa 2 % auf die Verbrennung von festen Brennstoffen. Der Großteil entfällt hierbei auf Kohlendioxid, gefolgt von Methan (BMU 2019). Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Anteil der Treibhausgase ist auf F-Gase zurückzuführen, die speziell auf den Einsatz von Kältemitteln zurückzuführen ist.

2.2 LEBENSZYKLUSPHASEN UND BILANZIERUNGSGRENZEN

Lebenszyklusanalysen helfen die Umweltauswirkungen von Gebäuden in Form von Treibhausgasen als CO_2-Äquivalent möglichst ganzheitlich zu erfassen. Um jene Analysen durchführen zu können sind zunächst die Lebenszyklusphasen und Bilanzierungsgrenzen eines Gebäudes zu betrachten.

2.2.1 Lebenszyklusphasen

Lebenszyklusphasen beschreiben einzelne Abschnitte des Lebenszyklus eines Gebäudes. Diese werden gemäß DIN EN 15978 wie in Abb. 1 dargestellt definiert.



Abb. 1: Lebenszyklusphasen von Gebäuden (erstellt nach DIN EN 15978:2012-10)

Die Herstellungsphase A1-A3 beinhaltet hierbei jene Emissionen, die auf die Herstellung der Baumaterialien und -stoffe zurückzuführen sind. Die Errichtungsphase A4-A5 umfasst den Transport der Baustoffe zum Baufeld sowie die Errichtung des Gebäudes. Die Nutzungsphase B1-B7 erfasst jene Emissionen, die auf den Betrieb des Gebäudes zurückzuführen sind (Nutzung, Instandhaltung, Instandsetzung, Austausch und Ersatz, Modernisierung, Energieeinsatz und Wassereinsatz). Um die Emissionen der Entsorgungsphase C1-C4 zu erfassen, wird der Abbruch des Gebäudes, der Abtransport von Baumaterialien und -schutt, die Abfallbehandlung und Deponierung betrachtet. Zu guter Letzt kann das Second Life D eines Gebäudes bzw. von Materialien bilanziert werden. Hierbei wird das Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotential erhoben, auf Basis welcher eine CO_2-Gutschrift errechnet werden kann.

Die Lebenszyklusemissionen werden in weiterer Folge auf den Betrachtungszeitraum (z.B. 30 Jahre) runtergebrochen, sodass man einen jährlichen CO_2-Foortprint erhält.

2.2.2 Bilanzierungsgrenzen der Nutzungsphase

Da die Nutzungsphase speziell bei bestehenden Gebäuden für den Großteil der Emissionen über den Lebenszyklus verantwortlich ist, gilt es hier die Bilanzierungsgrenzen näher zu beleuchten. Grundsätzlich gilt es hier zwischen Energieströmen zur Konditionierung des Gebäudes, Nutzerstrom sowie Nutzerprozessen (Maschinen, Druckluft, Gewerbekälte, …) zu unterscheiden.

Ansätze zur Bilanzierungsgrenze existieren seitens EN 15978:2012-10 sowie der DGNB 2020. Gemäß EN 15978:2012-10 liegen keine Details zur Erfassung der Energieströme vor. Die deutsche Gesellschaft empfiehlt die Bilanzierung der Energieströme auf Basis von Messdaten oder einer DIN 18599 Berechnung. Die in Tab.1 dargestellten Energieströme sind gemäß beider Systeme zu berücksichtigen:

Tab. 1: Vergleich der Bilanzierungsgrenzen gemäß DIN 15978 und DGNB 2020

Energiestrom	EN 15978	DGNB 2020
Heizung	x	x
Warmwasser	x	x
Kälte	x	x
Lüftung	x	x
Beleuchtung	x	x
Hilfsstrom	x	x
Nutzerstrom	-	x
Nutzerprozesse	-	-

Wie in Tab. 1 ersichtlich, erfassen sowohl DIN 15978 und DGNB 2020 die wesentlichen Energieströme zur Konditionierung des Gebäudes. DGNB 2020 empfiehlt zusätzlich die Erfassung des Nutzerstroms, wodurch sich die beiden Systeme unterscheiden. Nutzerprozesse werden bei beiden System nicht berücksichtigt. Diese können bspw. im Zuge einer Bilanzierung gemäß GHG (Greenhouse Gas Protocol) Scope 1-3 erfasst werden.

Ebenfalls nicht berücksichtigt werden Energieströme, die auf den Betrieb des Außenbereichs bzw. der Freiflächen (z.B. Außenbeleuchtung, Bewässerung, …) zurückzuführen sind, wobei bei bestehenden Gebäuden jene Verbräuche oftmals innerhalb der vorliegenden Verbrauchsdaten liegen.

3. DER WEG ZU CO_2-NEUTRALEN GEBÄUDEN – CO_2-STRATEGIE

Zur CO_2-Optimierung und in weiterer Folge der Erreichung der CO_2-Neutralität von Gebäuden ist zwischen Bestandsgebäuden und Neubauten zu unterscheiden, wobei sich der Optimierungsprozess selbst nur geringfügig unterscheidet. Nachfolgend wird auf den Optimierungsprozess in Bezug auf die Nutzungsphase eingegangen. Dieser basiert auf den Grundprinzipien der Energiebedarfsreduzierung (A & B Maßnahmen), der lokalen erneuerbaren Energiebereitstellung (C Maßnahmen) und optional der Kompensation (D Maßnahmen), wie in Abb. 2 dargestellt:

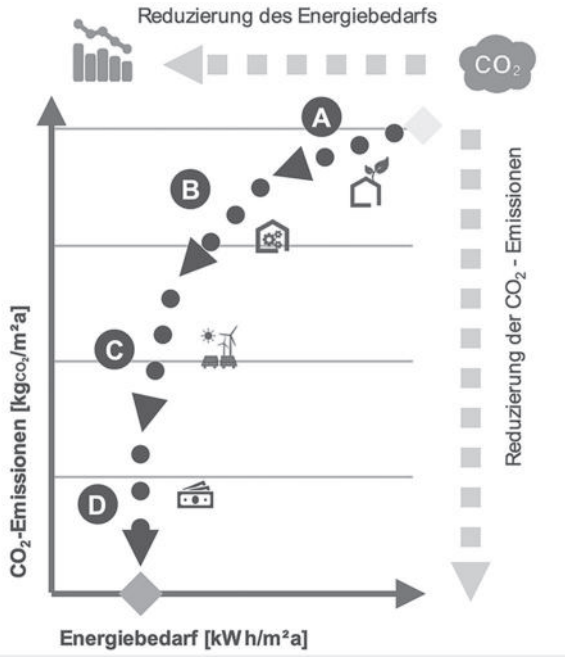


Abb. 2: CO_2-Strategie

A Maßnahmen umfassen passive Eingriffe in den Entwurf wie bspw. Optimierung der thermischen Hülle, Verschattung, Fensterflächenanteile, Begrünung, … und dienen in erster Linie der Energiebedarfsreduzierung

B Maßnahmen sind aktive Eingriffe in den Entwurf und umfassen bspw. effizientere Lüftungsanlage, Niedertemperatursysteme, hydraulischer Abgleich, Beleuchtung, … und haben gleichermaßen Einfluss auf die Reduzierung des Energiebedarfs sowie der CO_2-Emissionen

C Maßnahmen umfassen eine Energiebereitstellung auf Basis lokaler erneuerbarer Energien wie bspw. Photovoltaik, Solarthermie, Geothermie, Brunnenkühlung, Windkraft, … und haben großen Einfluss auf die Reduzierung der CO_2-Emissionen

D Maßnahmen dienen einzig der Kompensation der Restemissionen bspw. durch Grünstromeinkauf, Off-Site Erneuerbare (Investition in Windparks etc.), Aufforstung, Zertifikatshandel, … und sollten erst als letztmögliche Maßnahmen betrachtet werden

Die Energiebilanzierung, die die Grundlage zur Berechnung der CO_2-Emissionen bildet, hat den Endenergiebedarf der zuvor definierten Bilanzierungsgrenze zu erfassen. Dies sollte über eine thermische Gebäudesimulation erfolgen, um Nutzungsprofile und das dynamische Verhalten des Gebäudes abbilden zu können.

3.1 BESTANDSGEBÄUDE

Wie in vorangegangenem Kapitel bereits erläutert, hat bei Bestandsgebäuden der Fokus auf der Dekarbonisierung der Energiebereitstellung zu liegen. Hierbei wird gemäß DIN EN 15978 die Nutzungsphase (B) und insbesondere der Energieeinsatz (B6) betrachtet.

Im Gegensatz zu Neubauten bieten Bestandgebäude die Möglichkeit auf Basis von Messdaten den Status Quo der CO_2-Emissionen im Betrieb realitätsgetreu abbilden zu können. Speziell bei Vorhandensein eines Energiemonitorings lassen sich Energieströme detailliert erfassen und analysieren, welche wiederum als Grundlage zur Berechnung der CO_2-Emissionen dienen. Dies erfolgt über die Anwendung entsprechender CO_2-Konversionsfaktoren. Sollten keine detaillierten Messdaten vorliegen ist zur Analyse der Emissionen im Bestand ein Modell für eine Berechnung /Simulation des Energiebedarfs zu erstellen, das an die Verbrauchsdaten (auf Basis der Energieabrechnung) angepasst wird. Nach Analyse der einzelnen Energieströme kann der obenstehende Optimierungsprozess durchgeführt werden, wobei jede Maßnahme über die Simulation separat beurteilt wird. Bei positiver Auswirkung wird eine Umsetzung empfohlen.

3.2 NEUBAU

Bei Neubauten sind die grauen Emissionen im Gegensatz zu Bestandsgebäuden von Beginn an mitzuberücksichtigen. Die Deutsche Gesellschaft für nahhaltiges Bauen empfiehlt die Bilanzierungsgrenze hierbei auf die Bereiche Herstellung (A1-A3), Nutzungsphase (B2, B3 & B6), die Entsorgungsphase (C3 & C4), sowie das Second Life (D) zu erweitern (DGNB 2018). Aufgrund der komplexen Zusammenhänge werden derzeit somit noch nicht alle Lebenszyklusphasen berücksichtigt.

Zur CO_2-Optimierung des Gebäudes ist zunächst ein Referenzmodell „Baseline Gebäude“ zu erstellen, welches auf baurechtlichen Normen, Gesetzen und Richtlinien basiert. Dieses bildet die Ausgangsbasis des Energiebedarfs sowie der CO_2-Emissionen. Anschließend erfolgt der Optimierungsprozess auf Basis der A, B und C Maßnahmen, wobei euch hier jede Einzelmaßnahme separat betrachtet und analysiert wird. Bei positiver Auswirkung wird eine Umsetzung empfohlen.

4. PRAXISBEISPIEL – TECHNOLOGIEZENTRUM SEESTADT

Das Technologiezentrum Seestadt in Wien zeigt, welche Leistungen und Maßnahmen erforderlich sind, um ein CO_2-neutrales Gebäude im Betrieb (Konditionierung des Gebäudes sowie Nutzerstrom) als Neubau zu realisieren. Das Augenmerk wurde hierbei gänzlich auf die Nutzungsphase des Gebäudes und somit den Energieeinsatz B6 gelegt. Speziell an die Planung wurden hierbei von Beginn an höchste Anforderungen gestellt, wobei über sämtliche Planungsphasen hinweg planungsbegleitende Energiebilanzierungen durchgeführt wurden. Auf Basis jener Energiebilanzierungen lassen sich lebenszyklusorientierte Maßnahmen ausarbeiten, um die Umweltauswirkungen des Gebäudes auf ein Minimum zu reduzieren. Jene Maßnahmenbündel basieren auf den Grundprinzipien der Effizienz (A & B) zur Energiebedarfsreduzierung, erneuerbarer Energien (C) zur lokalen CO_2-neutralen Energieversorgung, sowie der CO_2-Kompensation (D) zur Abdeckung der Restemissionen speziell bedingt durch den Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz.

Durch eine Mischung aus aktiven und passiven Effizienzmaßnahmen (A & B Maßnahmen) ist der Energiebedarf als Ausgangsbasis grundsätzlich zu reduzieren. In Hinblick auf des TZ Seestadt zählt hierzu ein auf Energieverluste und -gewinne optimierter Fensterflächenanteil, sowie eine hochwärmegedämmte Gebäudehülle in nahezu Passivhausstandard. Ein begrüntes Dach trägt zur natürlichen Kühlung der Dachflächen bei und erhöht zusätzlich den thermischen Komfort im Außenbereich. Durch aktive Maßnahmen wie eine hocheffiziente Lüftungsanlage mit Wärme- und Feuchterückgewinnung, eine hocheffiziente Beleuchtung (LED in Kombination mit Präsenzmeldern), sowie eine hochinnovative sonnenstandgeführte Tageslichtlenkung kann der Energiebedarf zusätzlich minimiert werden. Abb. 3 zeigt die Auswirkungen jeder Einzelmaßnahme auf die CO_2-Emissionen des Gebäudes.

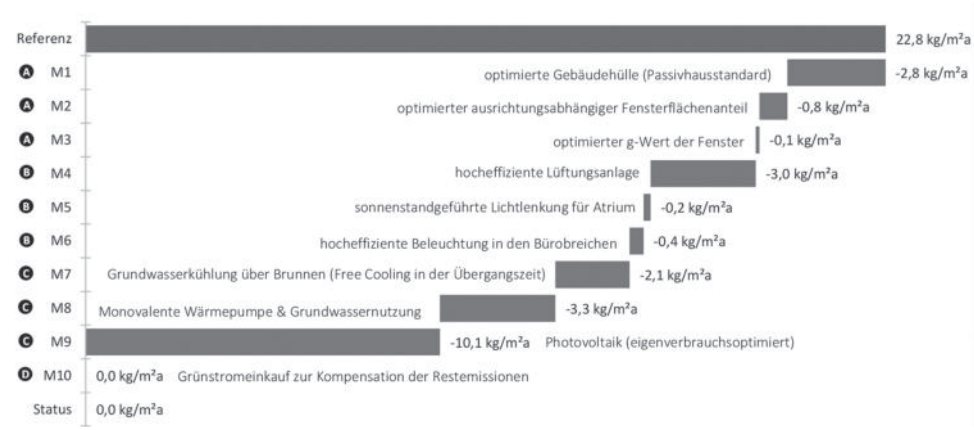


Abb. 3: Optimierungsmaßnahmen zur Erreichung eines CO_2-neutralen Betriebs (Energieeinsatz B6) des TZ Seestadt

Das Energieversorgungskonzept (C Maßnahmen) basiert zu 100 % auf erneuerbaren Energien und hilft die CO_2-Emissionen deutlich zu reduzieren. Zur Wärme- und Kältebereitstellung wird das Grundwasser in Kombination mit hocheffizienten Wärmepumpen über Brunnen thermisch genutzt. In der Übergangszeit kann das Brunnenwasser zur direkten freien Kühlung herangezogen werden. Eine Photovoltaikanlage (155 kWp) zur Unterstützung der Strombereitstellung hilft mit jeder erwirtschafteten Kilowattstunde Strom den CO_2-Footprint des Gebäudes zusätzlich zu reduzieren und fossile Kraftwerke im Stromnetz zu ersetzen. Wie in obenstehender Abb. ersichtlich, hat die PV-Anlage den größten Einfluss auf die CO_2-Emissionen und ermöglicht bilanziell einen CO_2-neutralen Betrieb des Gebäudes.

LITERATUR

BMF (2020) Blümel: Erste Sitzung der Task Force zur Ökosozialen Steuerreform. Bundesministerium für Finanzen, https://bit.ly/2E4750u; 16.09.2020

BMU (2019) Klimaschutz in Zahlen: der Sektor Gebäude. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit https://bit.ly/2FHdwY3; 17.09.2020

DGNB (2018) DGNB System Kriterienkatalog Gebäude Neubau – Version 2018

DGNB (2020) Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte. Stuttgart

DIN EN 15978:2012-10 (2012) Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011

Püschel D. (2016) Das Ganze im Blick? Über den Lebenszyklus eines Gebäudes. https://bit.ly/3mxUJz0; 17.09.2020

Umweltbundesamt (2020) Klimaschutzbericht 2020. Wien

Viola J., Habert G. (2013) Graue CO_2-Emissionen im Gebäude – wo sind sie hauptsächlich verortet? Ökobilanzanalyse mittels zweier verschiedener virtueller Blickwinkel auf die Konstruktionsweisen und Bauteile von vier unterschiedlichen Mehrfamilienhäusern. Bauingenieur 8(2013):342-348

Kontaktdaten:
Jakob Schulz
Hainburgerstraße 34/8
1030 Wien
Email: jakob.schulz@atp-sustain.ag

Treibhausgasemissionen in der Betonstahlerzeugung

B. Truger, M. Scherz, A. Passer
Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen - Technische Universität Graz, Graz, Österreich
H. Fohringer
Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH, Graz, Österreich

ABSTRACT: The steel industry is responsible for 7 % of global greenhouse gas (GHG) emissions. Considering rising production volumes per capita and the need to reduce overall GHG emissions to combat climate change, it becomes clear that the steel industry needs to transform to more sustainable processes (Ryberg et al. 2018). In this study, we conduct a life cycle assessment (LCA) in the form of an environmental product declaration (EPD) for an Austrian reinforcing steel producer, the steel and rolling mill Marienhütte. The reinforcing steel is made of 100 % recycled material in an electric arc furnace. The iron scrap is melted in the electric arc furnace and alloys are added. After the melting process in the furnace, the steel is cast into billets. The billets are then hot rolled at the same mill while still hot, saving heating energy. The reinforcing steel is rolled into rebars or coils.

The EPD follows the product category rules set by Bau-EPD GmbH, including a review by external experts. It includes the whole life cycle, from the product stage and construction process over the use phase and the end of life. The product stage includes the raw materials, transport and production of the reinforcing steel. For the construction process we consider transport and bending, while there are no notable emissions during the use phase of reinforcing steel. The end of life includes deconstruction, processing and transport. The foreground data were provided by the steel and rolling mill Marienhütte and complemented by background data from ecoinvent v 3.5. In order to publish the acquired data and further improve the ecoinvent database, the Austrian reinforcing steel dataset was also published through ecoinvent (going through another review process) and is available from version 3.7.

Results show that Austrian reinforcing steel has lower climate impacts than those stated in comparable studies by other producers. 42 % of the GHG emissions are due to the electricity used in the steel production and rolling process, considering the Austrian electricity mix including imports. Changing the electricity mix to 100 % renewable resources reveals a GHG reduction potential of almost 40 % of the reinforcing steel production stage. The electricity use is the biggest environmental hotspot in electric arc furnace reinforcing steel production, and shows that a large part of the GHG emissions could be avoided by using renewable electricity.

1. EINLEITUNG

Neben der prognostizierten steigenden Weltbevölkerung auf bis zu 9,7 Milliarden Menschen im Jahr 2050 (United Nations 2015) wird auch eine Erhöhung des Stahlanteils pro Kopf bis zum Jahr 2050 (11,8 Tonnen Stahl pro Kopf) erwartet. Dabei ist die Stahlproduktion für rund 7 % der weltweiten anthropogenen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verantwortlich (Ryberg et al. 2018).

In der Abschlusserklärung zur Sustainable Built Environment D-A-CH Conference 2019 (siehe https://gd.ccca.ac.at) in Graz forderten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die verbindliche Einführung konkreter Ziel- und Planungswerte zur Begrenzung der THG-Emissionen im Lebenszyklus von Gebäuden. In Europa können der Nutzung von Gebäuden ca. 40 % des Energieverbrauchs und ca. 36 % der CO_2-Emissionen zugeordnet werden; sie sind damit der größte Einzelverursacher für Energieaufwand und THG-Emissionen. Hinzu kommen noch Energieaufwand und Emissionen für die Herstellung von Bau-

produkten zur Errichtung und Instandhaltung von Gebäuden sowie baulichen Anlagen. Es besteht deshalb ein dringender Bedarf an Maßnahmen, die zur Reduktion des Energieaufwands und der THG-Emissionen sowohl in der bauproduktherstellenden Industrie als auch im Bau-, Facility Management- und Immobiliensektor beitragen.

Die Stahlindustrie stellt diesbezüglich einen großen Hebel dar, um den Entwicklungen des fortschreitenden Klimawandels entgegenzuwirken. Abhängig davon, ob die Stahlproduktion auf der Hochofenroute oder mit dem Elektrolichtbogenverfahren durchgeführt wird, kommt es zu unterschiedlich hohen THG-Emissionen (Ryberg et al. 2018). In Europa werden derzeit rund zwei Drittel des Stahls auf der Hochofenroute und ein Drittel mit dem Elektrolichtbogenverfahren produziert (Küster-Simic et al. 2017). Während bei der Hochofenroute das Ausgangsmaterial Eisenerz eingesetzt wird, wird bei dem Elektrolichtbogenverfahren Schrott verwendet.

Das Stahl- und Walzwerk Marienhütte ist das drittgrößte Stahlwerk in Österreich und der einzige Hersteller von Betonstahl in Österreich. Für die Erzeugung des Betonstahls wird dabei ausschließlich das Elektrolichtbogenverfahren verwendet.

Für diesen Produktionsweg wird Schrott in einem Elektrolichtbogenofen geschmolzen, um flüssigen Stahl zu erhalten. Veredelung zur Reduzierung des Schwefels, des Phosphors und anderer Begleitelemente, Legierung und eventuell Mikrolegierung werden eingesetzt, um dem Stahl seine geforderten Eigenschaften zu geben. Am Ende der Stahlherstellung wird der flüssige Stahl mit einer Stranggussanlage in ein halbfertiges Produkt umgewandelt oder in Sonderfällen in Kokillen zu Blöcken abgegossen. Das Halbprodukt wird heiß zum endgültigen Produktmaß ausgewalzt.

Um die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus (graue THG-Emissionen und betriebliche THG-Emissionen) zu ermitteln und somit Reduktionspotenziale für die zukünftige Stahlproduktion zu identifizieren, wurde eine ganzheitliche Ökobilanz erstellt und deren Ergebnisse bei Ecoinvent (Ecoinvent 2020) publiziert sowie im Rahmen einer Umweltproduktdeklaration (EPD, Environmental Product Declaration) für den Betonstahl des Stahl- und Walzwerks Marienhütte veröffentlicht.

2. METHODIK

Die EPD wurde in Übereinstimmung mit den Anforderungen der Ökobilanzregeln der Bau-EPD GmbH (PKR Teil A - Allgemeine Regeln für Ökobilanzen und Anforderungen an den Hintergrundbericht (Projektbericht), Version 2.4, 16.04.2018) (Bau-EPD GmbH 2013) und den korrespondierenden Produktkategorieregeln (PKR Teil B – Anforderungen an eine EPD für Betonstähle, PKR-Code: 2.16.2.1, Version 1, 29.03.2019) (Bau-EPD GmbH 2019) entsprechend der ÖNORM EN 15804:2012+A1:2013 (Österreichisches Normungsinstitut 2014) erstellt. Die Ökobilanz wurde ebenso bei ecoinvent v.3.7 eingereicht und geprüft.

2.1 DEKLARIERTE EINHEIT UND NUTZUNGSDAUER

In der zugrunde liegenden EPD des Artikels wird der Produktionsweg Elektrolichtbogenverfahren bilanziert, da dies der Produktionsweg des Stahl- und Walzwerks Marienhütte ist. Das Endprodukt stellt Betonstahl in Stäben und Ringen in den Stahlgüten B500 und B550 dar (Marienhütte 2020). Die deklarierte Einheit für Betonstähle ist 1 Tonne (t) Betonstahl mit einer Rohdichte von 7856 kg/m3.

Als Nutzungsdauer gilt die Zeitspanne vom Einbau des Produkts in das Bauwerk bis zur Entsorgung. Die Nutzungsdauer des Betonstahls ist von dem Beton bzw. von dem Gebäude abhängig, in welchem dieser eingebaut wird. Die Nutzungsdauer von Beton hängt unter anderem von den Expositionsklassen oder der Art des Gebäudes (z.B. Wohnbau oder Nicht-Wohnbau) ab. Die Lebensdauer von Gebäuden wurde mit 100 Jahren angenommen.

2.2 SYSTEMGRENZE SOWIE VORDER- UND HINTERGRUNDDATEN

Die Daten für die Produktion stammen aus den Aufzeichnungen des Stahl- und Walzwerks Marienhütte und wurden im Zuge von gemeinsamen Workshops sowie einer Werksbegehung ermittelt. Die Input- und

Outputdaten wurden vom Stahl- und Walzwerk Marienhütte zur Verfügung gestellt und auf Plausibilität überprüft, um eine gute Repräsentativität der Daten zu gewährleisten. Die Systemgrenze der EPD sowie die enthaltenen Lebenszyklusphasen sind in Abb. 1 dargestellt.

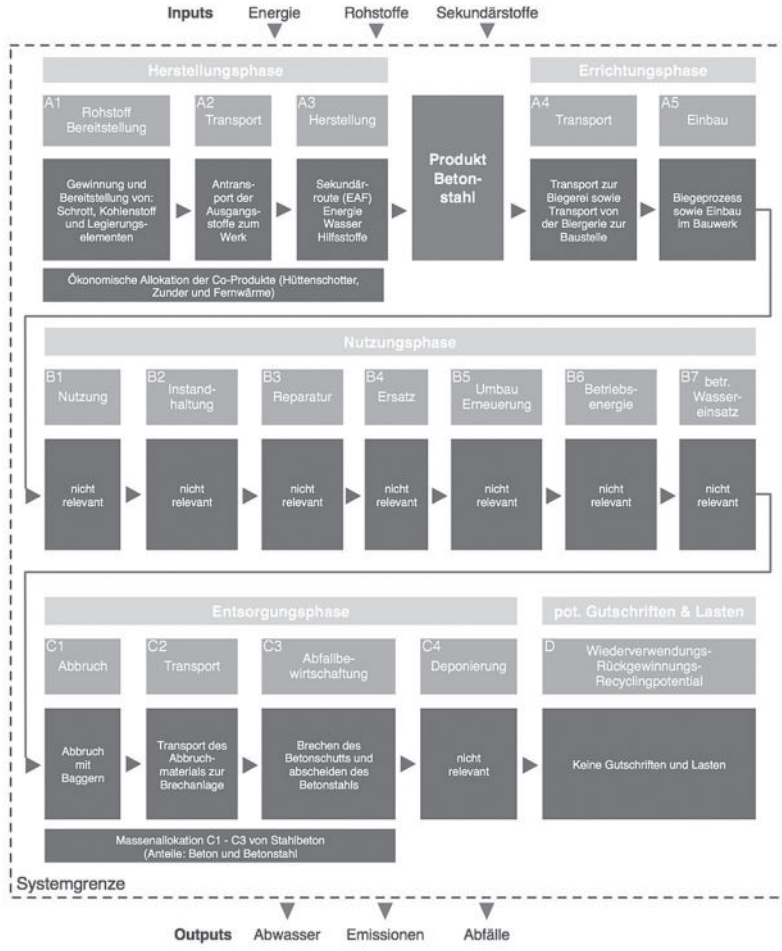


Abb. 1: Schematische Darstellung des Produktlebenszyklus sowie der Systemgrenze der EPD

2.2.1 Herstellungsphase

In der Herstellungsphase (Module A1-A3) sind sämtliche Stoff- und Energieströme (inklusive Energieexport), als auch anfallender Abfall und dessen Behandlung bzw. Beseitigung berücksichtigt. Die Module A1, A2 und A3 können in aggregierter Form ausgewertet und dargestellt werden.

Die Herstellungsphase beginnt mit der Erzeugung aller benötigten Primär- und Sekundärrohstoffe (z.B. Schrott, Kohlenstoff, Silizium, Mangan und Eisenbegleitelemente) für Betonstahl. Dabei werden bei der Produktion der notwendigen Rohstoffe alle Vorketten berücksichtigt. Für die Ökobilanzierung wurden die Datensätze mit den zur Verfügung gestellten Daten des Stahl- und Walzwerks Marienhütte modelliert. Konnten für Prozesse keine individuellen Daten angegeben werden, wurde auf entsprechende Datensätze zurückgegriffen.

2.2.2 Errichtungsphase

In der Errichtungsphase werden in Modul A4 die durchschnittlichen Transportkilometer vom Stahl- und Walzwerk Marienhütte bis zu den Biegereien erfasst sowie die Transporte von den Biegereien zur Baustelle mitberücksichtigt. Für Modul A4 wird die dabei die durchschnittliche Transportdistanz für die relevanten Transportmittel (Bahn und LKW) berechnet. In Modul A5 werden die Stoff- und Energieströme einer repräsentativen Biegerei erfasst.

Bei Einbau von Betonstählen ist auf die Einhaltung der Vorgaben aus Bewehrungsplänen zu achten. Um die unverarbeiteten Betonstähle zur Errichtung von Bauwerken einzubauen, müssen diese zumeist gebogen werden. Diese Weiterverarbeitung von Betonstählen kann in zwei Szenarien erfolgen:

- direkter Transport und Verarbeitung (biegen) auf der Baustelle mit nachfolgendem Einbau
- Transport zu einer Biegerei und Verarbeitung (biegen) in der Biegerei mit nachfolgendem Transport zur Baustelle und Einbau

Im Zuge der Ökobilanzierung wurde das Szenario 2 modelliert. Für die Modellierung von Szenario 2 wurde eine repräsentative Biegerei (diese Biegerei erhält nur Betonstahl des Stahl- und Walzwerks Marienhütte) gewählt.

2.2.3 Nutzungsphase

In der Nutzungsphase (Module B1 bis B7) treten in der Regel bei Betonstählen, die in Beton eingebettet sind, über den Zeitraum der Nutzung keine für die Ökobilanz relevanten Prozesse auf.

Bei ordnungsgemäßer Planung, sach- und fachgerechtem Einbau und normgemäßer Nutzung kommt es zu keiner Änderung der stofflichen Zusammensetzung über die gesamte Nutzungsdauer. Während der Nutzungsphase treten daher weder Material- und Energieaufwendungen auf, noch sind Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten notwendig.

2.2.4 Entsorgungsphase

In der Entsorgungsphase (Module C1-C4) können ausgebaute Betonstähle, die im Zuge von Betonrecycling gewonnen werden, einem Recyclingprozess zugeführt werden. Mit dem Rückbau des Bauwerks beginnt die Entsorgungsphase von Betonstählen. Der verwertungsorientierte Abbruch von Stahlbetonbauteilen erfolgt vorwiegend mit Baggern die mit Abbruchzangen ausgerüstet sind. Die Bauteile werden dabei durch sogenanntes Pressschneiden zerkleinert. Der Transport des Abbruches erfolgt entweder mit Baggern zu mobilen Brechanlagen die vor Ort das Material brechen und den enthaltenen Betonstahl abscheiden, oder mit LKWs zu stationären Brechanlagen. Die Stoff- und Energieströme für den Rückbau und das Brechen des Stahlbetons sowie der Transport des Betonstahls wurden anteilsmäßig berücksichtigt (100 kg Betonstahl pro m³ Beton). Die Entsorgungsphase für den Beton liegt nicht innerhalb des Systemgrenze und wurde daher abgeschnitten. Durch das vollständige Recycling des Produktes finden im Modul C4 (Deponierung) keine für die Ökobilanz relevanten Stoff- und Energieströme statt.

2.2.5 Potentielle Gutschriften und Lasten

Die Modellierung aller Prozesse wurde gemäß PKR-A durchgeführt. Gemäß Definition gehen Sekundär-/Recyclingprodukte (hier Stahlschrott) lastenfrei in das System ein und im Sinne einer konsistenten Modellierung dürfen keine weiteren potentiellen Gutschriften und Lasten (Modul D) deklariert werden. In der Praxis können alle hochwertigen Stahlgüten, welche über die Hochofenroute erzeugt werden, nicht über Schrott erzeugt werden. Daher müsste dieser Schrott (Automobil, Weißware (Haushaltsgeräte), Schienen etc.) deponiert werden oder wie in der Realität von Betonstahlerzeugern mit Elektrolichtbogenofen verwertet werden.

2.3 ABSCHNEIDEKRITERIEN UND ALLOKATIONEN

Für die Berechnung wurden alle relevanten Inputs wie Rohstoffe, Prozesswasser, Hilfsstoffe und Energien (Strom), die für die Produktion, Errichtung, Nutzung und Entsorgung notwendig sind, betrachtet. Abgegrenzt wurden lediglich Inputs, welche das Gesamtergebnis nicht maßgeblich beeinflussen. Auch die Transportdistanzen für den Antransport der verwendeten Ausgangsstoffe wurden mit Hilfe der Angaben des Stahl- und Walzwerks Marienhütte ermittelt und, eine ausreichende Datenlage vorausgesetzt, in der Ökobilanz berücksichtigt. Energie- und Massenflüsse, welche aus anderen Produktionslinien stammen oder in den Büroräumen (Heizung, Verpflegung) entstehen, wurden gemäß dem PKR-Dokument Teil B „Anforderungen an die EPD für Betonstähle" abgegrenzt.

Die Summe der vernachlässigten Prozesse übersteigt damit nicht den Betrag von 5 % der Charakterisierungsergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien, d.h. die Abschneidekriterien gemäß ÖN EN ISO 14044 (Österreichisches Normungsinstitut 2006a) und ÖNORM EN 15804:2012+A1:2013 (Österreichisches Normungsinstitut 2014) werden erfüllt.

Als Allokation wird laut ÖN EN ISO 14040 (Österreichisches Normungsinstitut 2006b) die Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Ökobilanzmoduls auf das untersuchte Produktsystem verstanden. Für Schlacke, Zunder und Fernwärme kommt nach ÖNORM EN 15804:2012+A1:2013 (Österreichisches Normungsinstitut 2014) eine ökonomische Allokation zur Anwendung. Die Lasten aus Granulation, Entwässerung und Transport dieser Produkte sind ihnen zu 100 % zuzurechnen. Abweichungen von dieser Regel sind hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit ÖNORM EN 15804:2012+A1:2013 (Österreichisches Normungsinstitut 2014) zu begründen. Eine Unterteilung des Stahlwerk-Prozesses in seine Nebenprodukte ist nicht möglich, da die Produktion von Zunder, Schlacke und Abwärme direkt mit der Stahlerzeugung verbunden ist. In diesem Fall ist auch eine physische Allokation nicht zielführend, da z.B. eine Tonne Betonstahl und eine Tonne Schlacke aufgrund ihres unterschiedlichen öknomischen Werts nicht gleichverantwortlich für die Umweltauswirkungen sind. Darüber hinaus wird Abwärme in Energie gemessen, die anderen Produkte jedoch in Masse. Aus diesen Gründen werden für die Nebenprodukte Schlacke, Zunder und Fernwärme eine ökonomische Allokation durchgeführt.

Eine weitere Allokation - eine Massenallokation - wird für das Modul C1 (Entsorgungsphase) durchgeführt. Dabei werden die Bestandteile von einem Kubikmeter Stahlbeton in die jeweiligen Anteile (Betonstahl und Beton) umgerechnet.

3. ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Ökobilanz werden in den folgenden Tabellen für alle betrachteten Module (A1-D) dargestellt. Die Berechnungen wurden anhand der empfohlenen Methoden (ÖNORM EN 15804:2012+A1:2013 (Österreichisches Normungsinstitut, 2014) und EF Method V1.07 / Global (2010)/ with tox categories) der Europäischen Plattform für Ökobilanzierung (EPLCA) durchgeführt. Die mit der Methode EF Method V1.07/Global (2010) with tox categories berechneten Indikatoren sind nicht in der EN 15804:2012+A1:2013 geregelt und stellen zusätzliche Informationen bereit. Bei diesen Indikatoren handelt es sich um zusätzliche Indikatoren, welche sich noch nicht etabliert haben.

3.1 ERGEBNISSE DER WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

Die Ergebnisse für Betonstahl in Stäben und für Betonstahl in Ringen werden als ident angenommen. Der minimale zusätzliche Energieaufwand (Spuleranlage) ist verschwindend klein und beeinflusst daher die Gesamtergebnisse nicht. Die Ergebnisse werden daher nur für ein Stahlprodukt gezeigt, welches repräsentativ für Stäbe und Ringe ist.

Die Herstellungsphase (A1-A3) hat mit rund 76 - 98 % den größten Anteil an den Umweltwirkungen. Die Auswirkungen der Errichtungsphase (A4-A5) liegen je nach Umweltindikator bei etwa 3 - 21 %. Während der Nutzungsphase (B1-B7) sind keine Prozess- und Energieströme für das deklarierte Produkt erforderlich, wodurch auch keine Umweltwirkungen entstehen. Der Abbruch und die

Wiederverwendung von Betonstahl (C1-C4) haben einen Anteil von ca. 1 - 5 % an den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung, wobei in C4 - aufgrund des vollständigen Recyclings des Produkts - keine Prozess- und Energieströme entstehen. In Modul D fallen keine Gutschriften oder Lasten an, da Stahlschrott bereits lastenfrei ins System übernommen wird und keine zusätzliche Gutschrift für Schrott am Ende des Lebenszyklus verrechnet werden kann. Die Ergebnisse für alle Lebenszyklusphasen sind in Abb. 2 dargestellt.

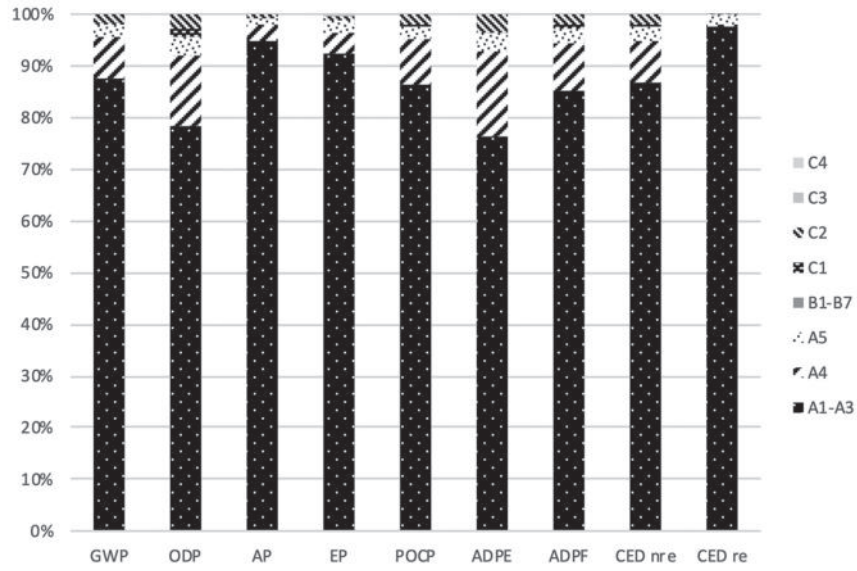


Abb. 2: Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen an der Gesamtbilanz

Weitere Ergebnisse können in der EPD (2020) eingesehen werden.

3.2 VERÖFFENTLICHUNG IN ECOINVENT 3.7

Die EPD und alle zugrunde liegenden Daten wurde von zwei unabhängigen ExpertInnen begutachtet und verifiziert. Der Hintergrundbericht einer EPD wird standardmäßig jedoch nicht veröffentlicht. Um die Inhalte der Ökobilanz transparent einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen, entschlossen sich die TU Graz gemeinsam mit der Marienhütte, alle umweltrelevanten Daten in der Datenbank ecoinvent zu veröffentlichen. Im Zuge der Aufnahme der österreichischen Betonstahlproduktion in ecoinvent wurden die Daten erneut von externen Personen begutachtet, um die Qualität der Ergebnisse entsprechend den Anforderungen sicher zu stellen. Die publizierten Datensätze enthalten alle relevanten Prozesse und Flüsse inklusive den Angaben zur Unsicherheitsverteilung und der Pedigree Matrix.

3.3 UMWELTPRODUKTDEKLARATION IM VERGLEICH MIT EINSCHLÄGIGER LITERATUR

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung wurden auch mit anderen publizierten Ergebnissen verglichen und gegenübergestellt. In Abb. 3 wird beispielhaft der Umweltindikator GWP (Global Warming Potential, Treibhausgaspotenzial) dargestellt.

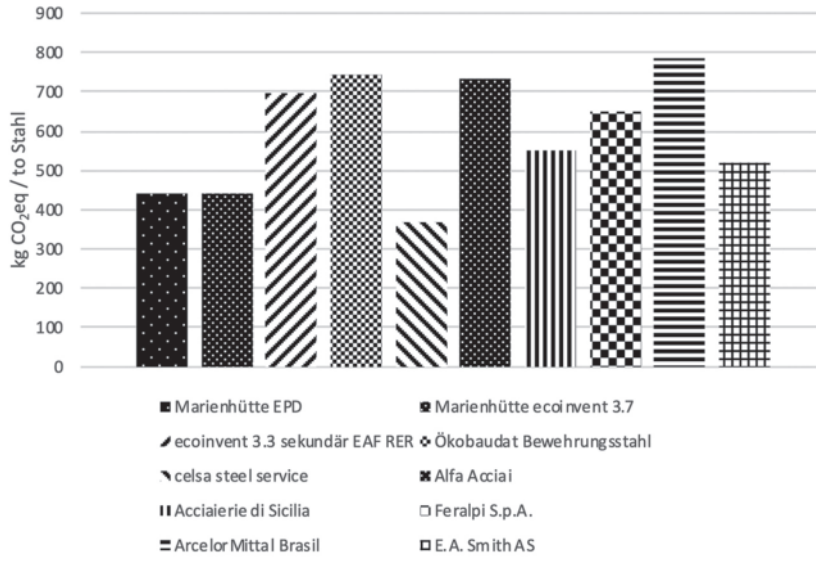


Abb. 3: Gegenüberstellung der EPD-Ergebnisse (GWP) mit anderen Datensätzen und EPDs von Mitbewerbern

Abb. 3 zeigt, dass die Höhe der THG-Emissionen aus Betonstahl des Stahl- und Walzwerks Marienhütte verglichen mit anderen Herstellern im unteren Mittelfeld liegt, und die Umweltwirkungen somit niedriger sind als der Durchschnitt anderer EPDs. Die Ursache der unterschiedlichen Ergebnisse ist schwer zu beurteilen, da die Hintergrunddaten zu EPDs meist nicht veröffentlicht werden. Die EPD von celsa steel service beispielsweise stammt jedoch aus Norwegen, daher kann angenommen werden, dass der norwegische Strommix aus Wasserkraft sich positiv im Ergebnis widerspiegelt. Ebenso sind die Ergebnisse der Marienhütte niedriger als der vergleichbare ecoinvent Datensatz, welcher ebenso europäische Stahlherstellung im Elektrolichtbogenverfahren beschreibt, jedoch 50 % höhere Emissionen aufweist.

3.4 VERGLEICH ÖSTERREICHISCHER STROMMIX UND ÖKOSTROM

Das Stahl- und Walzwerk Marienhütte verwendete im Basisjahr 2017 im gesamten Prozess Ökostrom. Im Zuge der Ökobilanzierung muss gemäß PKR jedoch der österreichische Strommix herangezogen werden, da laut PKR eine Bilanzierung mit Ökostrom nicht zulässig ist. In der Modellierung mit dem österreichischen Strommix ist dieser für rund 42 % der Emissionen in der Herstellungsphase (A1-A3) verantwortlich. In diesem Abschnitt wird die Wirkungsabschätzung bei der Modellierung mit dem österreichischen Strommix mit jener bei der Modellierung mit Ökostrom gegenübergestellt.

Der Energiebedarf der Herstellungsprozesse wird zum Großteil mit Elektrizität gedeckt. Für die Bilanzierung mittels Ökostroms wird aus Sicht des Ökobilanzierers Grüner Strom nach Richtlinie UZ46 (Österreichisches Umweltzeichen 2013) empfohlen. In dieser Richtlinie werden Herkunftsnachweise nach Ökostromgesetz (RIS 2012), zulässige Zusammensetzungen sowie zulässige Kraftwerke definiert.

In Abb. 4 wird die Herstellungsphase (A1-A3) von Betonstahl bei unterschiedlichen Strommixen (blaue Balken = österreichischer Strommix, rote Balken = Ökostrom nach UZ 46) gegenübergestellt.

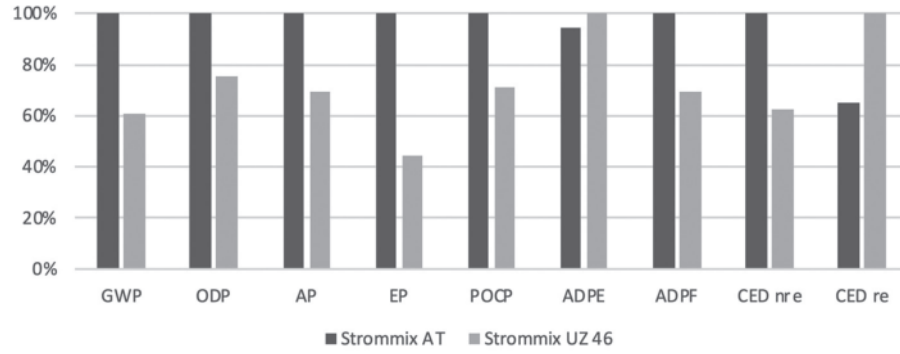


Abb. 4: Gegenüberstellung unterschiedlicher Strommixe in der Betonstahlherstellung (Module A1-A3)

Durch den hohen Strombedarf des Elektrolichtbogenverfahrens ergeben sich große Reduktionspotenziale. Im Hinblick auf die zu erwartende Dekarbonisierung des österreichischen Strommixes können potenzielle THG-Emissionsreduktionen dargestellt werden. Durch den Einsatz von Strom aus 100 % erneuerbaren Quellen können die THG-Emissionen in der Betonstahlerzeugung um 40 % vermindert werden. Bei einer möglichen Berücksichtigung im Rahmen von Umweltproduktdeklarationen müsste sichergestellt werden, dass der Einsatz von zertifiziertem Strom auch langfristig und nachweislich gesichert ist.

4. DISKUSSION UND AUSBLICK

Mit der Veröffentlichung einer EPD sowie der transparenten LCA-Daten bei ecoinvent wurde ein Beitrag zur Offenlegung der Produktionsdaten erreicht. Die ecoinvent Daten enthalten somit nicht nur generischen Betonstahl aus Europa, sondern Ökobilanzierer können sich auch die spezifischen Stahl- und Walzprozesse der Marienhütte und deren Umweltwirkungen im Detail ansehen und für künftige LCA-Studien verwenden.

Die Analyse der Ergebnisse einer EPD im Detail erlaubt es nicht nur, die Umweltauswirkungen von verschiedenen Produkten und Herstellungsprozessen zu vergleichen, sondern zeigt auch auf, welche Prozesse besonders hohe Umweltauswirkungen haben, die vermieden und damit optimiert werden könnten. Fast die Hälfte der Emissionen in der Betonstahlherstellung im Elektrolichtbogenverfahren sind auf den eingesetzten Strom zurückzuführen. Durch eine Änderung des Strommixes vom österreichischen Mix, welcher auch fossile Importe aus dem Ausland inkludiert, zu einem rein erneuerbaren Strommix können die THG-Emissionen des Gesamtprozesses erheblich reduziert werden. Die großen Auswirkungen des eingesetzten Strommixes erklären auch die unterschiedlichen THG-Bilanzen im Vergleich internationaler Studien.

Für eine ganzheitliche, sektorübergreifende Betrachtung (z.B. im Rahmen von Consequential-LCA-Studien) wäre es allerdings notwendig, mehr spezifische Daten transparent zu publizieren, um somit eine bessere Datengrundlage und -qualität für künftige Studien zu erreichen. Nur auf dieser Basis können die Wechselwirkungen unterschiedlicher Sektoren sowie Potentiale von THG-Emissionsminderungen gut abgeschätzt werden.

Ryberg et al. (2018) zeigen auf, dass die Stahlindustrie mit derzeitiger Technologie 50 % der für den Klimaschutz noch akzeptablen THG-Emissionen 2100 einnehmen würde, und somit kaum Spielraum für andere Sektoren lässt. Eine Dekarbonisierung der Stahlproduktion ist somit unumgänglich. Der Einsatz von Sekundärmaterial wie es das Stahl- und Walzwerk Marienhütte bereits umsetzt, ist ein wichtiger Schritt zur Emissionsreduktion. Ein weiterer Schritt, wie hier gezeigt, ist der Einsatz erneuerbarer Energieträger (allen voran Strom) in der Produktion.

ACKNOWLEDGEMENT

Wir möchten uns an dieser Stelle bei dem Stahl- und Walzwerk Marienhütte Graz für die gute Zusammenarbeit sowie die Bereitschaft zur Offenlegung aller Daten bedanken.



LITERATUR

Bau-EPD GmbH (2013) Ökobilanzregeln und Anforderungen an den Hintergrundbericht (PKR Teil A), 2013: Wien.

Bau-EPD GmbH (2019) Anforderungen an eine EPD für Betonstähle (PKR Teil B), 2019: Wien.

Ecoinvent (2020) lifecycle inventory database, ecoinvent 3.7., https://www.ecoinvent.org

EPD (2020) Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH – Betonstahl – Datenbank Ecoinvent, EPD-NR: BAU EPD-MARIENHUETTE-2020-1-Ecoinvent-Betonstahl, http://www.bau-epd.at/de/stahl-und-walzwerk-marienhuette-gmbh-betonstahl-datenbank-ecoinvent/

Küster-Simic A., Gül O., Lauenstein P. (2017) Branchenanalyse Stahlindustrie: Entwicklungstrends und Zukunftschancen. Study der Hans-Böckler-Stiftung 352. ISBN: 978-3-86593-260-0

Marienhütte (2020) Erzeugungsprogramm Stahlprodukte, Stahl- u. Walzwerk Marienhütte GmbH, Graz, https://www.marienhuette.at/produkte/erzeugungsprogramm/stahlprodukte

Österreichisches Normungsinstitut (2006a) ÖN EN ISO 14044: 2006 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, 2006: Wien.

Österreichisches Normungsinstitut (2006b) ÖN EN ISO 14040 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, 2006: Wien.

Österreichisches Normungsinstitut (2014) ÖNORM EN 15804:2012+A1:2013, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, 2014: Wien

Österreichisches Umweltzeichen, Grüner Strom - Richtlinie UZ 46, 2013

RIS (2012) Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (Ökostromgesetz 2012 – ÖSG 2012), 2012

Ryberg M.W., Wang P., Kara S., Hauschild M.Z. (2018) Prospective assessment of steel manufacturing relative to Planetary Boundaries: Calling for life cycle solution. 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 30 April – 2 May 2018, Copenhagen, Denmark. Procedia CIRP 69 (2018) 451 – 456

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015). World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.241.

https://gd.ccca.ac.at

Kontaktdaten:
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Passer, MSc.
Graz University of Technology
Waagner-Biro-Straße 100/XI
A-8020 Graz
URL: https://www.agnhb.tugraz.at

Virtual Green World und Fair Construction Code

H. Lunzer,
Dr. Lunzer Energie und Umwelt e.U., Pernersdorf, Austria
R. Osztovits
Bee Green World Ltd, Mauren, Liechtenstein

ABSTRACT: Presentation of the Virtual Green World (VR) and the Fair Construction Code (FCC) as a new type of residential construction. Taking advantage of the opportunities offered by digital change and making the planned residential property tangible even before the first stone has been laid. The innovative virtual reality technology creates a modern and environmentally friendly approach to traditional house construction: individual design ideas, a photo-realistic 3D tour and virtual test living are possible.

In the Bee Green World (2020) you will find a large number of model houses from which a digital prototype of the new dream house can be created - and that comfortably from the couch at home, which makes this type of house construction particularly energy-efficient and according to neo-ecological criteria. With virtual reality glasses you become an architect yourself and bring your new home to life. The pre-designed model houses can be changed and furnished according to taste - from the wall color to the bedside lamp. You experience a real sense of space and can precisely check the smallest details.

No previous knowledge is required to use the VR glasses and the planning tool - handling is simple and intuitive. Using augmented reality (Aukstakalnis 2017), aspects from BIM (Baldwin 2018; Pilling 2017), such as the digital construction diary and digital defect management, management plans and administration of the administrative specifications for house construction, the single-family house is transparently documented in the house construction phase.

Life cycle costs (Arnold et al. 2017; Kaiser et al. 2018) are managed for the usage time. Since the house construction of the future should no longer be carried out without meeting sustainability criteria, the Fair Construction Code and the assessment of the environmental impact according to LCA criteria serve as guidelines for VR planning and implementation in the real world. The following aspects are considered

- Fair to the environment
- Fair to the climate (as a particularly important detail aspect of the environment)
- Fair to the region
- Fair to health (of the residents of the property)
- Fair to future generations or social in aspects of coexistence.

If possible, measurable quality criteria, such as the greenhouse gases caused during the period of use and in the building materials, the water requirement and the flammability classes are the basis for assessment. The best detail parameter solutions on the market are rated with 100 % FCC compliance. But parameters such as unfulfilled health criteria for the building materials, increased environmental risks at the building site, waste disposal, etc. are evaluated and weighted using schemes.

The Fair Construction Code is presented in more detail in the e-book Lunzer & Osztovits (2020).

1. EINLEITUNG

Wir wollen den Hausbau mittels Virtual Reality – Lösungen innovativ gestalten. Gleichzeitig ist es uns wichtig, den Hausbau nachhaltig zu gestalten. Nach unserem Fair Construction Code (FCC) (Lunzer & Osztovits 2020) wollen wir die Bauobjekte bewerten. Da sich nachhaltiges Bauen (Friedrichsen 2018; Hodulak & Schramm 2019) aus vielen Aspekten zusammensetzt, wird mittels einer Matrix ein Gesamtwert ermittelt. Für eine Beurteilung der Immobilie sind sowohl der Gesamtwert als auch die Detailparameter von Bedeutung.

So werden Ressourcenschonung, Energiebedarf, Treibhausgase und Luftschadstoffe, Gesundheitsaspekte, Regionalität, CSR und Risikobewertung bewertet. Diese Bereiche setzen sich aus weiteren Unterkategorien zusammen, eine Abweichung vom Idealzustand bringt Abzüge in der Punktebewertung. Jeder Aspekt bringt bei Nachhaltigkeit 100 % und je nach Belastung von Umwelt, Gesundheit, Mitmenschen Abzüge, die bis Null gehen können. Die einzelnen Detailparameter setzen sich gewichtet zu einem Gesamtwert zusammen.

Nun nimmt man an, es gibt ja sicher genug Bewertungen aller Arten.

Etwa die LEED-Bewertung, die vom U.S. Green Building Council für ökologisches Bauen entwickelt wurde und in LEED international über die Grenzen hinaus Anwendung findet. (LEED 2020)

In den USA wird auch die Green Globes-Bewertung für nachhaltige Objekte durchgeführt. (Greenglobes 2020)

Beide Varianten sind in letzter Konsequenz extrem lange Checklisten. Ein Versuch den Lebenszyklus des Gebäudes damit zu beurteilen ist zwar vorhanden, jedoch nur bruchstückhaft. Es wird eine rein qualitative Beurteilung, nicht jedoch eine quantitative Beurteilung (auf Werte basierend) durchgeführt.

In Europa wird BREEAM (England) (BREEAM 2020) oder das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen bzw. Minergie in der Schweiz als Bewertungsverfahren angewandt.

Bewertungen nach Baubook-/IBO bringen teilweise sehr gute Vergleichsmöglichkeiten in Zahlen etwa zu Baustoffen und deren Belastung durch den Herstellungsprozess, wichtige Aspekte sind gut abgedeckt. Jedoch ist verglichen mit den beiden internationalen Varianten die Nachhaltigkeit noch in weiteren Aspekten ausbaubar. Weiters bietet klima.aktiv einen Gebäudestandard; TQB (Total Quality Building) der ÖGNB wiederum betrachtet viele Nachhaltigkeitsapekte. (Schuster et al. 2016)

Der FCC versucht nun eine Bewertung nach Werten, über den Lebenszyklus des Objektes in großer Vollständigkeit der unterschiedlichen Nachhaltigkeitskriterien durchzuführen.

Die Virtual Reality mit Hilfe eines (einfachen) digitalen Zwillings kombiniert mit dem FCC ermöglicht die Transparenz, in jeder Phase des Bestehens des Bauobjektes möglichst nachhaltig zu agieren. (Günthner & Borrmann 2011)

2. DER FAIR CONSTRUCTION CODE (FCC)

Der „Fair Construction Code“ dient der Errichtung von nachhaltigen Wohnobjekten beziehungsweise der Sanierung zum Erreichen dieses Standards. Er gibt also Ziele vor, und die Wohnobjekte können betreffend der Erreichung dieser Ziele beurteilt werden.

So soll die Errichtung des Gebäudes wenig Umweltbelastung durch die Baustoffwahl (Plüschel & Teller 2020) mit sich ziehen, das Wohnen in den „vier Wänden“ nicht krank machen, der Energiebedarf für den laufenden Betrieb des Objektes gering sein (Niedrig- bzw. Niedrigstenergiehaus), die Kosten über die Lebenszeit/Nutzungszeit des Objektes sollen günstig sein (Gondring & Wagner 2018), potentielle Risken für das Objekt mitbetrachtet werden, und eine lange Nutzungsdauer des Objektes soll angestrebt werden. Selbst hinsichtlich der Entsorgung des Objektes werden Überlegungen getroffen.

Fairness drückt eine Vorstellung von Gerechtigkeit aus. Fairness lässt sich im Deutschen mit akzeptierter Gerechtigkeit und Angemessenheit oder mit Anständigkeit gleichsetzen.

Wem gegenüber soll das Gebäude (beziehungsweise sollen wir als Planer, Erbauer oder Nutzer) fair sein?

- Fair zur Umwelt
- Fair zum Klima (als besonders wichtigem Detailaspekt der Umwelt)
- Fair zur Region
- Fair zur Gesundheit (der Bewohner des Objektes)
- Fair zukünftigen Generationen gegenüber beziehungsweise sozial in Aspekten des Zusammenlebens.

Unter dem letzten Punkt werden auch Aspekte wie Sicherheit, Langlebigkeit oder die induzierte Mobilität durch die Wahl des Standortes betrachtet.

Diese Erfüllung von Nachhaltigkeitskriterien wird in verschiedenen Phasen betrachtet. Etwa bei den Baumaterialien die Phase der Rohstoffgewinnung, der Herstellung des Produktes (Baumaterials), der Nutzungsphase (also dem Wohnen im Haus) und der Entsorgungsphase.

FCC:	Rohstoffgewinnung	Produktherstellung	Nutzungszeit	Entsorgung
Umwelt	Schäden an der Umwelt	Umweltschäden, Ressourcenverbrauch	Umweltschäden	Umweltschäden, Trennbarkeit, Recyclebarkeit
Gesundheit			Gesundheitsrisken	
Sozial		sozialer Missbrauch	Brennbarkeit, Wasserbedarf, Umweltrisken, Lebensdauer, Bodenverbrauch	
Klima		Treibhausgase, verursacht durch Baumaterialien	Treibhausgase, verursacht durch Heizen, Warmwasser, Kühlen, Strom, Mobilität	

Abb. 1: Betrachtete Bereiche beim FCC

Die Betrachtung der Bereiche und Phasen hinsichtlich der Nachhaltigkeit und die Darstellung von Detailaspekten, die in den jeweiligen Bereichen bewertet werden, dienen zur Feststellung eines Erfüllungsgrades des Fair-Construction Codes (FCC).

Ist das Konzept beziehungsweise die Vorgangsweise in einem Bereich schlecht, ist der FCC-Erfüllungsgrad mit 0 % zu bewerten, ist diese so nachhaltig, dass dies nach derzeitigem Stand als Vorbild gesehen werden kann, sind 100 % FCC-Erfüllungsgrad erreicht. Die Abstufungen dazwischen beruhen, wie in der Folge zu erklären ist, meist auf messbaren Parametern, in einigen Aspekten aber auch auf Eigenschaften oder Maßnahmenumsetzungen.

Tab. 1: Bewertungsbereiche und Ampelcode

85 -100 %	grün	super-ökologisch, nachhaltig
60 - 84 %	gelb	gut, aber noch verbesserbar
35 - 59 %	orange	Durchschnitt, derzeit noch Standard, zukünftig nicht mehr
0 - 34 %	rot	ungünstig

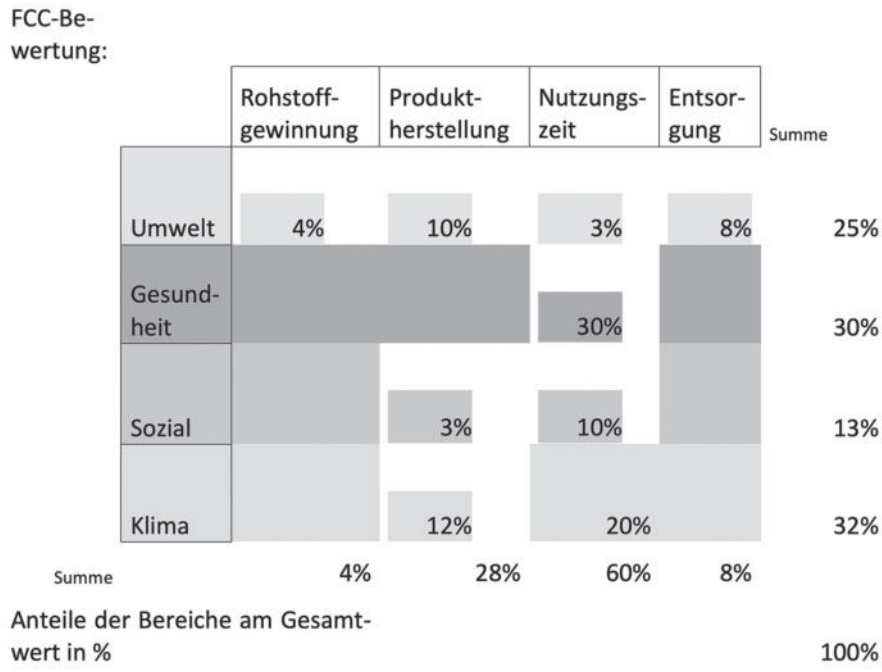


Abb. 2: Gewichtung der Bewertungsbereiche

In Umwelt werden nicht die Auswirkungen auf das Klima betrachtet. Wegen der Wichtigkeit des Klimawandels ist dies ein eigener Bewertungspunkt.

Die Baustoffherstellung wird nach mehreren Umweltparametern beurteilt:

- PENRT-Wert
- AP-Wert
- ODP-Abbau
- POCP-Bildung
- EP-Wert

Als Beispiel für die Berechnung sehen wir uns den PENRT-Wert, also die eingesetzte nicht erneuerbare Primärenergie an:

Für die Ermittlung von Minimal- und Maximalwert von Baukonstruktionen wurden die in der IBO-Baubook-Datenbank online dargestellten Passivhauskonstruktionsbeispiele miteinander verglichen (IBO 2020b). Sind keine spezifischen Daten eines genutzten Produkts vorhanden, werden die für den Baustoff typischen Werte verwendet.

Der Wert pro m³ Gebäudevolumen wird durch die voraussichtliche Lebensdauer dividiert, sodass ein Parameter pro m³ und Jahr entsteht.

Der Minimalwert des PENRT ist 2,769 kWh/(m³a), der Maximalwert 10,255 kWh/(m³a).

1 % Erfüllungsgrad des PENRT entspricht laut FCC 0,075 kWh/(m³a), das heißt, dass jeweils für 0,075 kWh/(m³a), die über den Minimalwert (= 100 % Erfüllungsgrad) an nichterneuerbarem Primärenergiebedarf hinaus zur Herstellung der Baustoffe benötigt werden, vom idealen 100 %-Wert jeweils ein Prozent abgezogen wird.

Während die Minimalwerte des PENRT bei Leicht- und Massivbauweise noch relativ gleichwertig sind, wenn nur das Gebäudevolumen berücksichtigt wird, fällt die Berechnung bei Heranziehung der Lebensdauer des Objektes (gewichtet über alle Bauteile gerechnet) eindeutig zu Gunsten der Massivbauweise aus:

Tab. 2: Ermittlung des Bewertungswertes für PENRT in kWh/(m³a)

Bauweise	PENRT kWh/m³	Lebensdauer ds a	PENRT kWh/(m³a)
Leichtbauweise Minimalwert	178,56	40	4,464
Leichtbauweise Maximalwert	410,20	40	10,255
Massivbauweise Minimalwert	178,59	64,5	2,769
Massivbauweise Maximalwert	488,24	64,5	7,570

Analog werden andere Parameter, wie kg CO_2-Äquivalent/(m³a) bei den verursachten Treibhausgasen durch die eingesetzten Baustoffe errechnet.

Die Treibhausgase werden für den Einsatz von Baustoffen und die durch die Nutzung des Objektes getrennt beurteilt. Bei der Nutzung werden erstmals aus den Daten von Baubook (IBO 2020a), dem Energieausweis und durch Eingaben von Benutzerdaten die verursachten Treibhausgase durch Raumheizung, Warmwasser, Klimatisierung und dem Strombedarf ermittelt, wobei eine Eigenerzeugung etwa durch PV den Emissionswert natürlich mindert.

Eine Risikobeurteilung des Bauplatzes, die Brennbarkeit der Baustoffe, der Wasserbedarf, die Flächenversieglung bzw. Maßnahmen, diese auszugleichen sind Aspekte im Sozialbereich während der Nutzungszeit.

Gesundheitliche Aspekte sind das Emittieren von Luftschadstoffen aus den Baustoffen, Schwermetallgehalte, kanzerogene Stoffe, mutagene oder Reproduktionsstörende Stoffe u.a.m. Diese sollten möglichst nicht durch die Wahl der Baustoffe die Bewohner bzw. die Umwelt gefährden.

Nach der Erstbewertung aus Daten zu Energieausweis, baubook-Materialdaten, Simulation von Energie und Wasserbedarf, können durch Monitoring letztere Daten durch Monitoring der Realität angepasst werden, wodurch man die Bewertung in der Zeit aktualisieren kann.

3. VIRTUAL GREEN WORLD (VIRTUAL REALITY)

In der BEE-Green World (2020) findet man eine Vielzahl an Musterhäusern, aus dem ein digitaler Prototyp vom neuen Traumhaus erschaffen wird - und das bequem von der heimischen Couch aus, was diese Art des Hausbaus besonders energieeffizient und nach neo-ökologischen Kriterien gestaltet. Mit Virtual-Reality-Brillen wird man selbst zum Architekten und erweckt das neue Eigenheim zum Leben. Die vordesignten

Musterhäuser, können nach Geschmack verändert und eingerichtet werden - von der Wandfarbe bis zur Nachttischlampe. Sie erleben ein reales Raumempfinden und können kleinste Details präzise prüfen.

Für den Umgang mit den VR-Brillen und dem Planungstool braucht es keinerlei Vorkenntnisse - die Handhabung ist simpel und intuitiv. Durch Augmented Reality, Aspekten aus BIM, wie etwa dem digitalen Bautagebuch und der digitalen Mängelverwaltung und deren Abarbeitung, Leitungspläne und Verwaltung der administrativen Vorgaben zum Hausbau wird in der Phase des Hausbaues das Einfamilienhaus transparent dokumentiert.

Life Cycle Costs werden für die Nutzungszeit verwaltet. Auch die Lebensdauer von Anlagen und Bauteilen, Wartungspläne und deren Durchführung werden verwaltet.

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Da der Hausbau der Zukunft ohne Erfüllung von Nachhaltigkeitskriterien nicht mehr ausgeführt werden sollte, dient der Fair Construction Code und die Bewertung hinsichtlich der Umweltauswirkungen nach LCA-Kriterien (Schmid & Pröll 2019) als Vorgabe bei der VR-Planung und der Ausführung in der Realwelt. Für den Nutzer bedeutet dies ein Transparentes Gebäude, dass er Probewohnen kann, noch bevor er es gebaut hat, und kann so das Haus bekommen, dass er sich vorstellt. Gewerke können mit dem Hausbauer, Planer, ja sogar mit Behörden das Haus virtuell begehen und Unklarheiten beseitigen. Durch den digitalen Zwilling, der hinterlegten Schriftstücke, Baumaterialen, dem FCC-Erfüllungsgrad hinsichtlich Nachhaltigkeitskriterien, Life Cycle Daten und Kosten wird das Gebäude auch für andere, die es etwa nachnutzen, finanzieren, versichern transparent.

LITERATUR

Arnold, D., Rottke N. B., Winter R. (Hrsg.) (2017) Wohnimmobilien. Lebenszyklus, Strategie, Transaktion, Springer Gabler, Wiesbaden 2017

Aukstakalnis St. (2017) Practical Augmented Reality: A Guide to the Technologies, Applications, and Human Factors for AR and VR, Addison-Wesley, Boston

Baldwin, M. (2018) Der BIM-Manager. Praktische Anleitung für das BIM-Projektmanagement, Hrsg: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, Wien, Zürich 2018

BEE-Green World (2020) Bee Green World Inc. San Francisco, USA (Link: https://bee-greenworld.com/home/).

BREEAM (2020) -Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology; https://www.breeam.com/

Friedrichsen, St. (2018) Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen: Kriterien für Neubau und Bauen im Bestand, Springer Vieweg, Berlin, 2. Aufl.

Greenglobes (2020) Greenglobes Building Certifikation, Green Building Initiative, Inc., https://www.greenglobes.com/

Gondring, Hanspeter / Thomas Wagner: Facility Management. Handbuch für Studium und Praxis, Vahlen, München, 3., vollst. überarb. Aufl 2018

Günthnter W. A. & Borrmann A. (Hrsg.) (2011) Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen. Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

Hodulak M., Schramm U. (2019) Nutzerorientierte Bedarfsplanung: Prozessqualität für nachhaltige Gebäude, Springer Vieweg, Berlin, 2., überarb. u. aktualisierte Aufl.

IBO (2020a) IBO-Baubook-Datenbank online Deklarationszentrale – Produktdatenbank. (Link: https://www.baubook.info/zentrale/).

IBO (2020b) IBO-Baubook-Datenbank online Passivhaus Bauteilkatalog Konstruktionsbeispiele. (Link: https://www.baubook.at/phbtk/index_BTR.php?SW=19).

Kaiser Ch., Nusser J., Schrammel F. (Hrsg.) (2018) Praxishandbuch Facility Management, Springer Vieweg, Wiesbaden
LEED (2020) LEED rating System, https://www.usgbc.org/leed
Lunzer H., Osztovits R. (2020): Der Fair Construction Code. E-Book in Herausgabe, vmtl. 2020
Pilling A. (2017) BIM – Das digitale Miteinander: Planen, Bauen und Betreiben in neuen Dimensionen, Hrsg: DIN Deutsches Institut für Normung e.V, Beuth, Berlin, Wien, Zürich 2017
Püschel D., Teller M. (2020) Umweltgerechte Baustoffe: Graue Energie und Nachhaltigkeit von Gebäuden, Fraunhofer IRB, Stuttgart
Schmid E., Pröll T. (Hrsg.) (2019) Umwelt- und Bioressourcenmanagement für eine nachhaltige Zukunftsgestaltung, Springer Spektrum, Berlin
Schuster M., Maier Ph., Bargmann E., Bader H. (2016) Klima.aktiv, Gebäudebewertungssysteme im Vergleich, Vers. 10/2016; BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien,

Kontaktdaten:
Lunzer Horst
Dr. Lunzer Energie und Umwelt e.U.
Email: office@drlunzer.eu

Rudolf Osztovits
BeeGW Ltd.
Ziel 43
9493 Mauren, Liechtenstein
info@bee-greenworld.com

Session 8c

Hygiene – Luft/Wasser

Ultra Feinstaub: Allgemein und Strategien zur Vermeidung in Bezug auf COVID 19

Braunegg / ConsultAIR GmbH / AT

Hygienezustand großer Klimaanlagen - ausgewählte Beispiele aus der Praxis

Twrdik, Tappler, Damberger / IBO Innenraumanalytik OG / AT

Ultra Feinstaub: Allgemein und Strategien zur Vermeidung in Bezug auf COVID 19

Braunegg, Christof
ConsultAIR GmbH, Wien, Österreich

ABSTRACT: Ultra-fine dust is the smallest part of fine dust, which is the light dust carried by the air into every corner of our lives. Ultra-fine dust (UFP) consists of a wide variety of organic and inorganic substances - CORONA viruses (COVID-19 / SARS-CoV-2) also belong to the UFP.

The ultra-fine dust makes up 90 % of the total dust in terms of quantity, is so small that it cannot be seen, is odorless, but very dangerous for our health. In European cities we breathe in more than 1.2 million fine dust particles per minute! More than hundred world-wide studies document the health hazard by ultra-fine dust for humans up to heart attacks and dementia and Alzheimer diseases. Currently, there are more than 400 studies on particle toxicology, and more are being published every month. (Riediker et al. 2019)

The latest findings show that the ultra-fine dust does not only reach the whole body via the lungs and the bloodstream and even the brain, but also gets directly into the brain via the olfactory nerves.

Ultra-fine dust is produced by nature and by humans by modern machines and processes and is classified in a study from March 2019 according to WHO criteria as more harmful to health than tobacco smoking!

There are technical solutions on the market that measurably reduce the ultra-fine dust content in the air by up to 90 %. Bacteria and viruses (in particular corona viruses/COVID 19) are removed from the air stream in a stable, permanent and safe manner. This minimizes the risk of infection by droplet infection in the air (secondary transmission paths) and reduces the number of bacteria and viruses deposited on surfaces.

Furthermore, these systems increase human performance by 10 to over 50 %, as proven by studies.

The technical solutions for the reduction of UFP in indoor air also allow an increased use of recirculated air in ventilation and air-conditioning equipment where this is permitted. This allows for great energy saving potentials at high (summer) and low (winter) outdoor temperatures, while at the same time greatly improving the indoor air compared to conventional systems.

1. EINLEITUNG

Ultra-Feinstaub ist der kleinste Teil des Feinstaubes, also des leichten Staubes, der von der Luft in jeden Winkel unseres Lebens getragen wird. Ultra-Feinstaub (UFP) besteht aus verschiedensten organischen und anorganischen Substanzen – auch CORONA Viren (COVID-19 / SARS-CoV-2) zählen zu den UFP.

Der Ultra-Feinstaub macht mengenmäßig 90 % des gesamten Staubes aus, ist so klein das er nicht gesehen werden kann, ist geruchslos, aber sehr gefährlich für unsere Gesundheit. In europäischen Städten atmen wir mehr als 1,2 Millionen Feinstaubteile pro Minute ein! Bis dato belegen mehr als vierhundert weltweite Studien die Gesundheitsgefährdung durch Ultrafeinstaub für den Menschen bis hin zu Herzinfarkten und Demenz- und Alzheimererkrankungen - und es werden monatlich mehr. (Riediker et al. 2019)

Neueste Erkenntnisse zeigen, dass der Ultra-Feinstaub nicht nur über die Lunge und die Blutbahnen in den ganzen Körper bis in das Gehirn, sondern sogar über die Riechnerven direkt in das Gehirn oder über die Mutter in den menschlichen Fötus gelangen. Ultra-Feinstaub wird von der Natur aber hauptsächlich vom Menschen über moderne Maschinen und Prozesse produziert und wird in einer Studie vom März 2019 nach WHO Kriterien als gesundheitsschädlicher als das Tabakrauchen eingestuft!

Am Markt existieren technische Lösungen, die den Ultra-Feinstaub Gehalt in der Luft messbar um bis zu 90 % senken. So werden auch Bakterien und Viren (im konkreten auch Corona Viren/COVID 19) stabil, dauerhaft und sicher aus dem Luftstrom entfernt. Dadurch wird die Ansteckungsgefahr durch Tröpfcheninfektion in der Luft (sekundäre Übertragungswege) minimiert, und die abgelagerten Bakterien und Viren auf Flächen werden reduziert.

Gleichzeitig bewirken diese Systeme eine von Studien belegte Leistungssteigerung des Menschen von 10 bis über 50 %.

Die technischen Lösungen zur Reduktion von UFP in der Raumluft ermöglichen auch eine verstärkte Nutzung von Umluft in raumlufttechnischen Geräten wo dies zulässig ist. Damit ließe sich bei hohen (Sommer) und tiefen (Winter) Außentemperaturen große Energieeinsparungspotentiale heben bei gleichzeitig starker Verbesserung der Raumluft gegenüber herkömmlichen Systemen.

2. ULTRA-FEINSTAUB - DAS PROBLEM

2.1 WAS IST ULTRA-FEINSTAUB?

Die Ultra-Feinstäube sind besonders kleine Teile und werden – wie alle Feinstäube – von der Luft getragen und mit der Luft in Räumen und in der freien Umgebung verteilt. Ultra-Feinstäube - kurz UFP genannt - bestehen aus verschiedensten organischen und anorganischen Substanzen wie zum Beispiel metallische Stoffe und Mikroorganismen wie Bakterien, Viren und Sporen und flüchtige organische Substanzen (VOC). Auch CORONA Viren (COVID-19 / SARS-CoV-2) zählen zu den UFP.

Von UFP spricht man ab einer Partikelgröße von ca. 0,1 µm Durchmesser– als Vergleich ein Haar hat ca. 70 µm im Querschnitt – also einem Siebenhundertstel eines Haardurchmessers.

Viele Partikel ab ca. 2,5 µm sind für den Menschen gefährlich und haben diverse gesundheitliche Schädigungen zur Folge. Allgemein kann gesagt werden: je kleiner desto gefährlicher. Partikel mit 0,3 µm dringen tief in die Lunge ein und ab Partikelgröße 0,1 µm gelangen Partikel in die Blutbahn und in das Innere des Körpers.

UFP (Durchmesser 0,1 µm und kleiner) machen nur ca. 10 % der Masse am gesamten luftgetragenen Staub aus (10 µm und kleiner), aber machen über 90 % der Anzahl aus. Eine Million Partikel UFP mit einem Durchmesser von 50 nm (=0,05 µm) haben dieselbe Masse wie ein einziges Partikel von 5 µm, aber die hundertfache Oberfläche! Das kleinste 1 % der Masse des luftgetragenen Staubes stellt 80 % der Oberfläche aller Feinstäube.

2.2 WO IST DER ULTRA-FEINSTAUB?

UFP sind ein Bestandteil des Staubes in der Luft; wir sprechen von luftgetragen Partikeln, d.h. diese werden mit der Luft transportiert und sind nicht schwer genug, um rasch zu Boden zu fallen. Ab ca. 10 µm und kleiner spricht man von Feinstaub, der im Allgemeinen leicht genug ist, um mit der Luft getragen zu werden. Zum Vergleich verhalten sich zwei Feinstaubpartikel mit derselben Dichte von 1 kg/dm³ (Dichte von Wasser) die ca. 1,5 m über dem Fußboden schweben wie folgt: Das Partikel mit einem Durchmesser von 5 µm braucht ca. 33 Minuten um zu Boden zu fallen, das andere Partikel mit 0,5 µm braucht ca. 41 Stunden (=Sedimentationszeit).

UFP ist unsichtbar, weil sehr klein und geruchslos, daher für den Menschen unbemerkt. UFP wird von der Natur und vom Menschen produziert. UFP entsteht durch Asphalt (Khare et al., 2020), moderne Maschinen (z.B. Benzin und Dieselmotore, Flugzeugtriebwerke) oder sonstigen Techniken (z.B. Bremstechnologie) unter großem Druck und Hitze (Umweltbundesamt 2018; Rönkkö et al. 2017). Ein Dieselmotor von vor 30 Jahren hat weit weniger UFP ausgestoßen als ein moderner Diesel Motor, weil die Drücke und Temperaturen im Motor von heute viel höher sind.

Im innerstädtischen Bereich messen wir 40.000 und mehr luftgetragene Partikel pro Liter Luft. Im Schnitt atmet der Mensch 2 Liter pro Atemzug und macht in ruhiger, sitzender Haltung 14 Atemzüge in der Minute, wir atmen also ca. 30 Liter Luft in der Minute, also im innerstädtischen Bereich atmen wir pro Minute 1,2 mio. Partikel und mehr!

Die in herkömmlichen Lüftungsanlagen eingesetzten klassischen Fein- und Feinststaubfilter sind aus physikalischen Gründen ungeeignet zur Ausfilterung von Partikel mit einer Partikelgröße von 0,2 µm oder kleiner.

Weltweit gibt es nur noch wenige Gegenden, die nicht mit UFP belastet sind. Generell ist in allen Gegenden wo der Mensch lebt ein erhöhter Anteil an UFP, im innerstädtischen Bereich jedenfalls in einer gesundheitsschädlichen Anzahl, oftmals auch in ländlichen Bereichen.

2.3 WIE GEFÄHRLICH IST FEINSTAUB?

Wissenschaftlich erwiesen sind die gesundheitlichen Auswirkungen des UFP der über die Blutbahn im Körper verteilt wird. Diverse Entzündungsprozesse an Gefäßwänden, Arterienverkalkung, Blutgerinnsel, Herz-Kreislauferkrankungen, Lungenerkrankungen, Herzinfarkte und Entwicklungsstörungen bei Kindern sind nur einige Auswirkungen. Auch der Zusammenhang mit Demenz- und Alzheimererkrankungen ist nachgewiesen. Magnetit gelangt als Nanopartikel über die Luft in die Blutbahn und verbindet sich im Körper mit den körpereigenen Peptiden Amyloid 40 und 42 zu Fibrillen die sich im Gehirn ablagern. (Teller et al. 2015)

Neueste Erkenntnisse zeigen, dass der Ultra-Feinstaub nicht nur über die Lunge in das Gehirn, sondern sogar über die Riechnerven direkt in das Gehirn gelangen und auch der ungeborene Fötus betroffen ist (Bové 2019). Eine Studie vom März 2019 belegt, dass Ultra-Feinstaub nach WHO Kriterien gesundheitsschädlicher ist als das Tabakrauchen! (Lelieveld et al. 2019)

Aktuelle Studien aus China und den USA aus dem Jahre 2020 weisen einen direkten Zusammenhang zwischen der Luftverschmutzung und der COVID 19 Mortalitätsrate (Wu et al. 2020). Zum Bespiel war eines der Ergebnisse, dass ein Anstieg von nur 1µg/m³ bei PM2,5 [Partikeln] mit einem 15 %igen Anstieg der Covid-19 Todesrate assoziiert ist.

2.4 DAS PROBLEM MIT DEN GESETZLICHEN RICHTWERTEN FÜR UFP

In Österreich werden Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte für UFP im Immissionsschutzgesetz Luft kurz IG-L festgelegt. Das Gesetz ist letztendlich eine Umsetzung der Richtlinie 2008/50/EG der europäischen Union über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Im IG-L ist unter § 3a festgelegt, dass bei PM 2,5 (also UFP mit Durchmesser von max. 2,5 µm) der Wert von 20 µg/m³ Luft nicht überschritten werden soll.

Diese Regelung greift zu kurz weil UFP Grenzwerte Massenangaben (µg) sind - wie oben erwähnt - nicht aussagekräftig genug. In der Gruppe der PM2,5 Partikel sind alle Partikel erfasst bis zu einem Durchmesser von 2,5 µm also auch alle Partikel kleiner als 2,5 µm. Der Grenzwert von 20 µg pro m³ Luft für PM2,5 entsprechen zum Beispiel 2,4 mio. Partikel der Größe 2,5 µm (bei einer Dichte von 1kg/dm³) oder aber 38 Mrd. (!) Partikel der Größe 0,1 µ- also das 15.600 fache!

2.5 ES FEHLEN DIE NEGATIVEN IONEN

Das Verhältnis von UFP und negativ geladenen Ionen ist eine Konstante die der französische Mathematiker Bricard als das „Gesetz von Bricard" aufgestellt hat, d.h. entweder viele Ionen und wenig UFP oder umgekehrt. Negativ geladene Ionen in der Atemluft sind wichtig für den menschlichen Organismus und fördern das Wohlbefinden (Hutter et al. 2011). Wenn der Anteil an UFP in der Luft hoch ist und damit der Anteil der Ionen gering ist, ist die Luft auch ungesund.

Herkömmliche Lüftungsanlagen reduzieren sogar die in der Außenluft vorhandenen negativen Ionen durch die Erdung der metallischen Luftleitungen und Komponenten des Lüftungssystems, die aus Kunststoffen bestehen.

3. AKTIVIERUNG DER LUFT – DIE LÖSUNG

Geeignete Systeme verbessern mit einfachen natürlichen Mitteln die Raumluft – selbst im innerstädtischen Bereich. Die Luft wird aktiviert und erhält so eine natürliche Qualität und ist nahezu keim- und geruchsfrei. Der Anteil der UFP kann messbar um bis zu 90 % gesenkt werden und die gesunden Negativen Ionen können in der Raumluft erhöht werden. Langfristige gesundheitsschädigende Auswirkungen durch UFP können reduziert werden.

Gleichzeitig wird die Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit des Menschen erhöht. Verschiedenste Studien dazu sprechen von Leistungssteigerungen von 10 bis über 50 % - je nachdem was und wie der Studienfokus und die Messmethodik sind.

Geeignete Systeme arbeiten mit Ozon und negative geladenen Ionen um die Luft zu aktivieren. Die Herstellung, die Menge und die Einbringung des Ozons und der Ionen ist abhängig von der Lüftungsanlage, der Räumlichkeiten und der Nutzung.

3.1 WAS IST GESUNDE LUFT?

Jeder kennt das Gefühl nach einer langen Autofahrt in einer ländlichen Gegend auszusteigen und einmal tief durchzuatmen. Man hat sofort das Gefühl sich wohler, frischer und fitter zu fühlen. Ländliche Luft ist gesünder, weil im Normalfall der Anteil der UFP viel geringer ist als im städtischen Beriech. Gleichzeitig ist der Anteil an sogenannten negativ geladenen Ionen im ländlichen Bereich viel höher.

3.2 AKTIVIERUNG DER LUFT DURCH IONEN

Ionen aktivieren die Luft, reduzieren den Ultrafeinstaubgehalt in der Luft und machen diese wieder natürlich und frisch. Die Behaglichkeit und Leistungsfähigkeit des Menschen werden gesteigert.

Ionen und Ozon reduzieren Gerüche und Mikroorganismen und flüchtige organische Substanzen in der Luft werden abgebaut. Die Atemluft wird hygienisch, sauber und gesund.

3.3 LEISTUNGSSTEIGERUNG UND EINSPARUNGSEFFEKTE

Eine Investition in luftverbessernde Maßnahmen zur Senkung der UFP lohnt sich in wenigen Monaten nur aus dem Aspekt der Leistungssteigerung heraus. Der positive Effekt auf die kognitiven und physischen Leistungen des Menschen durch die Ionisation der Raumluft sind in vielfachen Studien nachgewiesen. (Hutter et al. 2011)

Weitere medizinisch nachgewiesene langfristige gesundheitsverbessernde Aspekte (vgl. Flory et al. 2010; Küster & Dittmar 1940; Moser et al. 2004) sind noch gar nicht berücksichtigt aber letztendlich für Arbeitgeber und Arbeitsnehmer ein weiterer großer Vorteil.

4. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Seit mehr als einem Jahrzehnt haben sich Luftaktivierungsanlagen bewährt. So zum Beispiel wird seit 2006 bei 21 OP-Anlagen im größten Spital der Niederlande (Eindhoven) durch jährliche Kontrollmessungen durch das zuständige Hygieneinstitut die dauerhafte Vorbeugung gegen Aerosolinfektion überprüft. Die Ergebnisse bestätigen, dass keine Keimbelastung und keine Aerosolbelastung in den Räumen vorliegen. (Bolst 2007)

Durch den Einbau eines Systems zur geregelten Aktivierung der Raumluft in eine bestehende oder neue Lüftungsanlage wird Folgendes erreicht:

- Ultrafeinste Partikel (auch Viren) < 0,3 µm werden stabil, dauerhaft und sicher bis zu 98 % aus dem Luftstrom entfernt
- Damit verbunden Reduzierung der Ansteckungsgefahr durch Tröpfcheninfektion in den Räumen
- Abbau der auf Flächen abgelagerten Bakterien und Viren (COVID-19) durch nahezu rückstandsfreie Oxidation zu vorrangig CO_2 und H_2O
- Die abgelagerten Partikel werden analog der Natur nahezu rückstandsfrei oxidiert, dabei wird nicht nur das COVID-19 Virus angegriffen, sondern alle oxidierbaren organischen schädlichen Verbindungen – so auch MRSA-Keime, Pilze etc.
- Durch Anreicherung der Raumluft mit natürlichen negativen Ionen werden Leistungssteigerungen beim Menschen erreicht und das menschliche Wohlbefinden und Regenerationsvermögen erhöht.

LITERATUR

Bolst D. K. (2007) IWK Institut für Wärme-, Klima- & Verfahrenstechnik e.V. Bochum; Langzeitmessung Ionisations- und Ozonanlage zum Abbau von Bakterien, Viren und Aerosolen; Eindhoven, Städt. Krankenhaus/ Catharina Ziekenhuis, NL.

Bové, H. B. (2019) Ambient black carbon particles reach the fetal side of human placenta. Retrieved from https://doi.org/10.1038/s41467-019-11654-3

Lelieveld J. & Klingmüller K., Pozzer A., Pöschl U., Fnais M., Daiber A., Munzel Th. (2019) Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. European heart journal. 40. 1590-1596. 10.1093/eurheartj/ehz135

Flory R., Ametepe J., Bowers B. (2010) A randomized, placebo-controlled trial of bright light and high-density negative air ions for treatment of Seasonal Affective Disorder. Psychiatry Research, Volume 177, Issues 1–2, 15 May 2010, Pages 101-108, https://doi.org/10.1016/j.psychres.2008.08.011

Umweltbundesamt (2018). Health Effects of Ultrafine Particles. Umwelt & Gesundheit 05/2018, Umweltbundesamt, Bundesamt. Retrieved from https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uba_ufp_health_effects_haupt_final.pdf

Hutter H.-P, Kundi M., Wallner P. (2011). Luftionen in Innenräumen: Einfluss auf Wohlbefinden, Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Institut für Umwelthygiene, Medizinische Universität Wien.

Khare P., Machesky J., Soto R., Megan He M., Presto A., Gentner D. R. (2020). Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors. Science Advances; (6) p 1-14. Retrieved from https://advances.sciencemag.org/content/6/36/eabb9785.full

Küster E., Dittmar C. (1940). Experimentelle Untersuchungen über therapeutische Beeinflussung von Impf- und Spontantumoren durch Behandlung der Versuchstiere mit unipolar negativ hochionisierter Luft. Zeitschrift für Krebsforschung 50: 457–464. https://doi.org/10.1007/BF01620208.

Moser M., Auerbach D., Frohmann E., Grote V., Lackner H., Messerschmidt D., Muhry F., Zeiringer C. (2004): Wasserfallelektrizität – Wirkung von Luftionen auf die Gesundheit. In: WasserVoigt B. (Hrsg.), Wasser – Schatz der Zukunft. Impulse für eine nachhaltige Wasserkultur. 1, 172; Oekom. Verlag München

Riediker M., Zink D., Kreyling W. et al. Particle toxicology and health - where are we? Part Fibre Toxicol 16, 19 (2019). https://doi.org/10.1186/s12989-019-0302-8

Rönkkö T., Kuuluvainena H., Karjalainena P., Keskinen J. et al. (2017). Traffic is a major source of atmospheric nanocluster aerosol. PNAS Early Edition, January (16) Retrieved from www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1700830114

Teller S., Tahirbegi I., Mir M. et al. (2015) Magnetite-Amyloid-β deteriorates activity and functional organization in an in vitro model for Alzheimer's disease. Scientific Reports (5) 17261. https://doi.org/10.1038/srep17261

Wu X., Nethery R.C., Sabath B., Braun D., Dominici F. (2020) Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study (Updated April 24, 2020) medRxiv 2020.04.05.20054502; doi: https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502

Kontaktdaten:
Christof Braunegg
c/o ConsultAIR G.m.b.H.
Email: office@consultair.at

Hygienezustand großer Klimaanlagen - ausgewählte Beispiele aus der Praxis

F. Twrdik, P. Tappler, B. Damberger
IBO Innenraumanalytik OG, Österreich

1. EINLEITUNG

Die Hygiene bei raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) gewinnt in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung. Zur Sicherstellung eines hygienisch einwandfreien Betriebs von RLT-Anlagen existieren eine Reihe von nationalen Normen und internationalen technischen Richtlinien, die allerdings nicht bei jedem Bauprojekt oder bei Betrieb und Instandhaltung der Lüftungsanlagen Berücksichtigung finden. Verunsicherung der Raumnutzer oder Konflikte der involvierten Parteien sind vielfach die Folge.

In dieser Arbeit werden die Lösungsstrategien zur Bearbeitung zweier unterschiedlicher Fragestellungen auf dem Gebiet der RLT-Hygiene erläutert. Ein Projekt betrifft einen neu errichteten Bürogebäude-Komplex, beim anderen handelt es sich um ein ca. 20 Jahre altes Bürohochhaus, beide Objekte sind jeweils mit Vollklimaanlagen ausgestattet. In beiden Fällen mussten die Untersuchungen bei Vollbetrieb und normaler Nutzung der Gebäude durchgeführt werden. Die beiden Projekte unterscheiden sich sehr wohl in der Dimension der Objektgröße, allerdings kaum in der Komplexität der Fragestellung.Eine Herausforderung bei der Beurteilung war in einem der Fälle auch die Einschätzung bezüglich der Nutzungsmöglichkeiten unter Pandemiebedingungen (SARS-CoV-2).

2. UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Bei sämtlichen analytischen Prüfungen wurde nach Möglichkeit auf genormte Untersuchungsmethoden zurückgegriffen.

2.1 PRÜFUNG VON LUFTLEITENDEN OBERFLÄCHEN

2.1.1 Prüfung des hygienisch-mikrobiologischen Zustandes

Zur Überprüfung des hygienisch-mikrobiologischen Zustandes von luftleitenden Oberflächen und Luftleitungskanälen wurde durch Prüfung der Konzentration an Pilzen/der Gesamtkoloniezahl (Schimmelpilze, Hefen und Bakterien) mittels Abdruckverfahren durchgeführt. Dieses Verfahren ist in der technischen Richtlinie VDI 6022-1 festgelegt. Für den Abdruck werden Rodac-Platten mit einer Fläche von 25 cm² eingesetzt. Verwendet wurden DG18-Nährmedien (Bebrütung 72 Stunden bei 25 °C) für die Prüfung der Konzentration an Pilzen und Hefen und CASO-Nährmedien (Bebrütung 48 Stunden bei 30 °C) für die Prüfung der Konzentration an Bakterien. Sind auf einer Platte am Ende der Bebrütungsdauer keine Kolonien makroskopisch sichtbar, wird als Zählwert „n.n." (nicht nachweisbar) angegeben. Befinden sich auf den Nährmedien mehr als 200 Kolonien, dann ist das Ergebnis nicht mehr quantifizierbar und es wird der Zählwert „> 200" angegeben. Makroskopische Kolonien von Pilzen auf den CASO-Nährmedien werden entsprechend den Vorgaben der VDI 6022-1 nicht gewertet. Der Beurteilungswert ist die Summe der gebildeten makroskopischen Kolonien an Pilzen und Hefen (DG18) und Bakterien (CASO) je 25 cm² Fläche. Ist die Summe größer als 200 Kolonien, wird als Beurteilungswert „> 200" angegeben. Der Beurteilungswert „n.n." (nicht nachweisbar) wird angegeben, wenn makroskopische Kolonien weder an Pilzen und Hefen (DG18) noch an Bakterien (CASO) innerhalb der Bebrütungsdauer gebildet wurden.

2.1.2 Prüfung der Staubflächendichte (akzeptabler Sauberkeitsgrad)
Zur Überprüfung der Einhaltung der Sauberkeit-Qualitätsklasse (akzeptabler Sauberkeitsgrad) von luftleitenden Oberflächen und Luftleitungskanälen eignet sich die Prüfung der Staubflächendichte, wie sie in der ÖNORM EN 15780 beschrieben ist. Die durchgeführten Probenahmen orientieren sich an den Vorgaben der ÖNORM EN 15780 und VDI 6022-1. Mittels Magnetschablonen wurden an jeder Messstelle 2 Positionen zu je 200 cm² unter Anwendung des Wischverfahrens mit Lösemittel beprobt. Dabei wurde jede Position nochmals in 2 Probenahmepunkte zu je 100 cm² unterteilt. Das bedeutet, dass an jeder Messstelle 4 unabhängige Flächen zu je 100 cm² in das berechnete Ergebnis einfließen. Dies steht im Einklang mit den Forderungen der VDI 6022-1, in der es heißt: „Die Bestimmung der Staubflächendichte erfolgt als Dreifachbestimmung jeweils im Bereich des Kanalbodens am Kanalanfang, jedoch erst nach einer Entfernung von mindestens der Länge des fünffachen hydraulischen Durchmessers zu Einbauten und Strömungshindernissen. Wenn die Einhaltung dieses Abstands nicht möglich ist, ist ersatzweise eine Vierfachbestimmung und eine anschließende arithmetische Mittelung der Messergebnisse zulässig.“ Im Labor erfolgte nach forcierter Trocknung und Equilibrierung bei konstanter Luftfeuchtigkeit im Exsikkator die Differenzwägung. Als Beurteilungswert gilt der Mittelwert der beiden ebenfalls gemittelten Positionen. Die Bestimmungsgrenze liegt bei 0,1 g/m².

2.2 MIKROBIOLOGISCHE PRÜFUNG VON WASSER-ANSAMMLUNGEN (SEMIQUANTITA-TIV)

Die mikrobiologische Prüfung von Flüssigkeits-Ansammlungen auf luftleitenden Oberflächen oder in Komponenten der RLT-Geräte erfolgte mittels Nährbodenträger (Envirocheck Contact YM(R)) durch Eintauchen in die zu prüfende Flüssigkeit, sodass beide Agarflächen (CASO = Caseinpepton-Sojamehlpepton-Agar, BCA = Bengalrot-Chloramphenicol-Agar) vollständig benetzt werden. Die Nährbodenträger wurden anschließend für 24-48 Stunden (CASO) bzw. 5-7 Tage (BCA) bei 30 °C bebrütet. Die Auswertung erfolgte semi-quantitativ durch Auszählung der gebildeten, makroskopisch sichtbaren Kolonien und Einordnung in Größenordnungsklassen. Als Beurteilungswert wird die Summe der beiden Einzelwerte (Keimzahl Bakterien und Keimzahl Pilze und Hefen) angegeben.

2.3 PRÜFUNG DES HYGIENISCH-MIKROBIOLOGISCHEN ZUSTANDES DER ZULUFT

Die Probenahme erfolgte bei Normalbetrieb der raumlufttechnischen Anlagen in Anlehnung an ÖNORM ISO 16000-18. Als Vergleichswerte dienten aktuelle Messungen der Außenluft. Als Probenahmegerät wurde ein Luftkeimsammler [MAS-100, Fa. Merck] eingesetzt, der nach dem Impaktionsverfahren zur Bestimmung von vitalen Hefe- und Schimmelpilzen arbeitet. Die nominale Luftstrom-Rate beträgt 100 Liter pro Minute (±2,5 %). Als Nährmedien wurden Dichloran-Glycerin (DG18)-Agar zur Isolierung und Zählung von kultivierbaren Schimmelpilzen sowie Malzextrakt-Agar mit Chloramphenicol und Gentamicin verwendet. Zur Bestimmung der Konzentration an koloniebildenden Einheiten kultivierbarer mesophiler Pilze in der Zu- oder Außenluft (im Folgenden vereinfachend auch als Sporenkonzentration bezeichnet) wurden pro Messpunkt drei Einzelbeprobungen mit je 100 Liter Sammelvolumen durchgeführt. Nach der Probenahme wurden die Nährmedien 3 bis 7 Tage bei 25 °C (±1 °C) bebrütet. Zur Bestimmung der Sporenkonzentration von vitalen thermophilen Pilzen wurden Einzelbeprobungen von je 200 Liter Volumen durchgeführt. Die Auszählung erfolgte nach Bebrütung der Luftkeimindikatoren über 48 bis 72 Stunden bei 36 °C (±1 °C). Die Pilzsporenkonzentration wurde durch Auszählung der bei der Bebrütung gebildeten makroskopisch sichtbaren Kolonien bestimmt. Als Ergebnis wird die auf Basis der ausgezählten Kolonien errechnete Konzentration in koloniebildenden Einheiten pro Kubikmeter Luft (KBE/m³) angegeben. Das Ergebnis wurde auf maximal zwei signifikante Stellen gerundet. Die errechneten Zahlenwerte werden bis maximal 4.000 KBE/m³ angeführt, bei höheren Ergebnissen erfolgt die Angabe „> 4.000“.

2.4 PRÜFUNG DER KONZENTRATION AN FEINSTPARTIKEL IN DER ZULUFT

Die Messung der Konzentration an Feinstpartikeln (FP) in der Zuluft erfolgte durch Ansaugen der Zuluft direkt bei einem Zuluft-Durchlass. Als Referenzwerte wurden die Raumluft in Raummitte sowie die Außenluft herangezogen. Die Probenahme erfolgte durch Ansaugen der Luft mit einer mobilen Sonde mit einer Flussrate von ca. 0,7 Liter pro Minute. Die Anzahlkonzentration der Feinstpartikel wird mit einem Partikelzähler [P-TRAK Ultrafine Particle Counter Modell 8525; Fa. TSI] bestimmt. Erfasst werden Feinstpartikel im Größenbereich von 0,02 bis 1 Mikrometer (µm) entsprechend 20 bis 1.000 Nanometer (nm). Der Messbereich beträgt 0 bis 500.000 Partikel pro Kubikzentimeter [1/cm³]. Die Messdaten werden über einen internen Daten-Logger gespeichert und mittels Software ausgelesen und ausgewertet.

2.5 UNTERSUCHUNG DES LUFTWECHSELS UND DES ZULUFTVOLUMENSTROMS

2.5.1 Tracergas-Methode zur Untersuchung des Luftwechsels

Die Bestimmung des Luftwechsels erfolgte laut VDI 4300 Blatt 7 nach der Konzentrations-Abklingmethode. Es wurde der Raumluft das Tracergas SF_6 (Schwefelhexafluorid) in geeigneter Konzentration beigemischt und mit einem Ventilator gleichmäßig verteilt. Die Konzentration des Tracergases SF6 wurde mit Hilfe eines Detektors mit dem Funktionsprinzip der photoakustischen Infrarotspektroskopie mit selektivem Filter [Bruel & Kjaer Single Gas Monitor] gemessen und aufgezeichnet. Es wurde die Abnahme der Tracergaskonzentration über einen Zeitraum von etwa 0,5 Stunden gemessen und aufgezeichnet.

Es bestehen folgende Beziehungen:

$$h = \frac{\ln c_1 - \ln c_2}{t_2 - t_1} \qquad h = \frac{V}{V_R}$$

h	Luftwechselzahl (h-1)		
c_1	Tracergaskonzentration zum Zeitpunkt t1 (ppm)	t_1	Zeitpunkt 1 (h)
c_2	Tracergaskonzentration zum Zeitpunkt t2 (ppm)	t_2	Zeitpunkt 2 (h)
V	Luftvolumenstrom (m³/h)	V_R	Raumvolumen (m³)

Aus der gemessenen Luftwechselzahl und dem errechneten Raumvolumen kann das zugeführte Luftvolumen pro Zeiteinheit analog zu obenstehender Formel berechnet werden. In den Ergebnistabellen wird der solcherart errechnete Volumenstrom als „Luftaustausch-Volumenstrom" bezeichnet. Das in Innenräume einströmende Luftvolumen besteht üblicherweise nicht zu 100 % aus durch die raumlufttechnische Anlage aufbereiteter Außenluft, da in der Regel ein Luftaustausch mit anderen Räumen des Gebäudes besteht. Die mittels Tracergas-Methode bestimmte Luftwechselzahl berücksichtigt auch aus anderen Bereichen zu- bzw. abströmende Luft. Das Raumvolumen V_R wurde aus den gemessenen Raummaßen (Länge × Breite × Höhe) unter Berücksichtigung der Einbauten berechnet.

In den Liftkabinen war aus technischen Gründen die Luftwechsel-Bestimmung nach der beschriebenen Tracergas-Methode nicht möglich. Die Luftwechselzahl wurde aus dem gemessenen Abluft-Volumenstrom des in der Lift-Decke eingebauten Abluft-Ventilators sowie der Kubatur des Lift-Innenraums errechnet.

2.5.2 Methodik der Messung des Luftvolumenstroms an Luft-Durchlässen

Die Messung des Volumenstroms an Abluftdurchlässen der untersuchten Räume erfolgte mit einem Volumenstrommessgerät [FlowFinder Mk-2; Fa. Acin]. Das Messgerät arbeitet nach dem Nulldruckkompensationsverfahren, welches den Gerätewiderstand mittels integrierten Ventilators kompensiert. Für die Messungen am Luftdurchlass in Liftkabinen wurde zusätzlich ein Volumenstrommessgerät [testo 417; Fa. testo] eingesetzt, das nach dem Anemometer-Messprinzip arbeitet.

2.6 METHODIK DER LECKAGEPRÜFUNGEN MITTELS TRACERGAS-TECHNIK

2.6.1 Allgemeine Vorgangsweise bei der gewählten Tracergas-Technik

Zur Bestimmung von Luftströmungen (interzonaler Massentransfer) wird an einem Quellpunkt ein Tracergas (SF_6 – Schwefelhexafluorid) in geeigneter Konzentration beigemengt. Die Zudosierung erfolgt kontinuierlich mit konstanter Flussrate. Die Konzentration des Tracergases wird an den interessierenden Stellen mit Hilfe eines Detektors mit dem Funktionsprinzip der photoakustischen Infrarotspektroskopie mit selektivem Filter [Bruel & Kjaer Gas Monitor 1302] gemessen und aufgezeichnet. Der Nachweis von Tracergas in Bereichen, in welche kein Tracergas zudosiert wurde, deutet auf einen Gasdurchgang zwischen dem Bereich der Zudosierung und dem überprüften Bereich hin. Eindeutige Undichtheiten sind anzunehmen, wenn die Nachweisgrenze des SF_6-Detektors statistisch signifikant überschritten wurde.

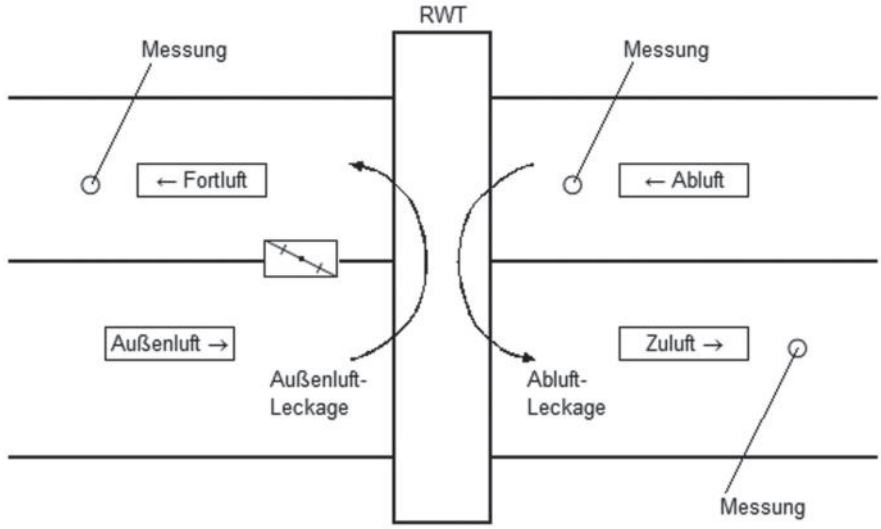


Abb. 1: Messprinzip-Schema am Beispiel RLT-Anlage mit Rotationswärmetauscher (RWT)

2.6.2 Luftübertritt von Abluft in die Zuluft (Abluft-Leckage)

Zur Bestimmung des Ausmaßes von Luftübertritt von Abluft in die Zuluft („Abluft-Leckage“) wurde folgende Vorgangsweise gewählt. Das Ausmaß dieser Leckage ist vor allem hygienerelevant.

- Tracergas-Zudosierung in die Abluft:
  Über einen definierten Zeitraum wurde mit einer konstanten Flussrate von 2 l/min SF_6 über einen Abluft-Durchlass in einem möglichst weit vom Zentralgerät entfernten Raum zudosiert. Diese Vorgangsweise wurde gewählt, damit sich das Tracergas möglichst gut bis zum Abluft-Messpunkt unmittelbar vor dem RLT-Zentralgerät homogenisiert.
- Messung der Tracergas-Konzentration in der Abluft:
  Über eine Sondenöffnung im Abluft-Lüftungskanal unmittelbar vor dem Zentralgerät wurde mittels einer Membranpumpe Abluft aus dem Luftstrom in Gassammelbehälter gesammelt. Die Messung der Tracergas-Konzentration erfolgte im Anschluss mittels SF_6-Detektor.
- Messung der Tracergas-Konzentration in der Zuluft:
  Die Messung erfolgte kontinuierlich unmittelbar an einem Zuluftdurchlass in einem weit vom Zudosier-Raum entfernten Raum über mehrere Minuten vor der Zudosierung, während dieser und mehrere Minuten danach.

2.6.3 Luftübertritt von Außenluft in die Fortluft (Außenluft-Leckage)
Zur Bestimmung des Ausmaßes von Luftübertritt von Außenluft in die Fortluft („Außenluft-Leckage") wurde folgende Vorgangsweise gewählt. Das Ausmaß dieser Leckage ist vor allem energierelevant.

- Tracergas Zudosierung in die Abluft:
  Über etwa 30 Minuten wurde mit einer konstanten Flussrate von 250 ml/min SF_6 über einen Abluft-Durchlass in einem weit vom Zentralgerät entfernten Raum zudosiert. Diese Vorgangsweise wurde gewählt, damit sich das SF_6 möglichst gut bis zum Abluft-Messpunkt unmittelbar vor dem RLT-Zentralgerät homogenisiert.
- Messung der Tracergas-Konzentration in der Abluft:
  Die Messung der SF_6-Konzentration erfolgte über eine Sondenöffnung im Abluft-Lüftungskanal unmittelbar vor dem Zentralgerät mittels SF_6-Detektor.
- Messung der Tracergas-Konzentration in der Fortluft:
  Die Messung der SF_6-Konzentration erfolgte über Sondenöffnungen im Fortluft-Lüftungskanal nach dem Zentralgerät mittels SF_6-Detektor. Die Messung wurde an mehreren Messpositionen im Lüftungs-Querschnitt vorgenommen, um einen möglichen Fehler durch eine unvollständige Homogenisierung auszuschließen.

3. RLT-HYGIENE IN EINEM NEU ERRICHTETEN BÜROGEBÄUDE-KOMPLEX

3.1 AUFGABENSTELLUNG

Zur unabhängigen Klärung strittiger Fragen wurde eine Zustandsfeststellung beauftragt, ob und zu welchem Prozentsatz die gesamte raumlufttechnische Anlage des Objekts den anerkannten Regeln der Technik sowie explizit genannten Normen entspricht. Zwischen dem Bauträger und dem Nutzer des Objekts wurde diesbezüglich ein Vertrag abgefasst, in dem die Komponenten der Lüftungsanlage (im Sinne des Vertrages) detailliert genannt wurden. Im gegenständlichen Fall waren das die Außenluftansaugung, die zentralen Lüftungsgeräte, das gesamte Luftverteilnetz und die Luftauslässe aller versorgten Räume. Vertragsgemäß waren nicht die aktuellen, sondern die zu einem vorgegebenen Stichtag (Planungsphase) gültigen Versionen folgender Normen und technischen Richtlinien zur Beurteilung heranzuziehen:

- ÖNORM H 6021 (2003)
- ÖNORM H 6030 (nur für Küchen zutreffend -> 2017 zurückgezogen)
- ÖNORM EN 15780 (2011)
- VDI 6022 (2011)

Es wurde ein Konzept vorgeschlagen, um durch objektivierende genormte Messungen und den Vergleich mit den Richt- und Referenzwerten der genannten Normen eine eindeutige Klassifizierung für jeden untersuchten Probenahmepunkt zu erhalten. Ziel war es, dass zu jeder untersuchten RLT-Komponente eine eindeutige Zuordnung in folgende Kategorien erfolgt: „entspricht den Anforderungen RLT-Anlage" oder „entspricht nicht den Anforderungen RLT-Anlage". Daraus können Prozentsätze abgeleitet werden. Es mussten dazu folgende Punkte festgelegt werden, wobei entscheidend wichtig war, dass die offenen Fragen vor Beginn der Untersuchungen im Konsens mit den Parteien – die naturgemäß unterschiedliche Interessen verfolgten – geklärt wurden:

- WAS wird geprüft?
- WO wird geprüft?
- WIE wird geprüft?
- WIEVIEL wird geprüft?
- WELCHE Beurteilungsgrenzwerte werden herangezogen?

3.2 STANDARDISIERTER UNTERSUCHUNGSUMFANG

Ein einheitlicher und für alle Anlagenteile gleichermaßen umzusetzender Untersuchungsumfang wurde festgelegt. Dieser standardisierte Untersuchungsumfang basiert auf einer Sichtinspektion und der Durchführung von genormten analytischen Prüfungen.

3.2.1 Lüftungsgeräte (RLT-Zentralgeräte)

Die Art und die Anzahl der zu prüfenden Anlagekomponenten wurden standardisiert und waren – sofern die entsprechenden Komponenten vorhanden waren – bei allen RLT-Geräten gleichartig untersucht.

Tab. 1: Zu prüfende Anlagenkomponenten der RLT-Zentralgeräte

Anlagenkomponente	Standardisierter Prüfungsumfang	
	hygienisch-mikrobiolog. Zustand	Staubflächen-dichte
Filterkammer	x	-
Wärmerückgewinnung (Wärmetauscher anströmseitig)	x	-
Wärmerückgewinnung (Kammer)	x	x
Zuluft-Ventilatorkammer	x	-
Kühlregister (Wärmetauscher anströmseitig)	x	-
Kühlregister (Kondensatsammelwanne)	x	-
Heizregister (Wärmetauscher anströmseitig)	x	-
Befeuchterwanne	x	-
Hybridbefeuchter (Keramikfüllkörper abströmseitig)	x	-
Leerteil nach Befeuchter	-	x
Zuluftschalldämpfer	x	-

In der Tabelle bedeutet: x Prüfung hat zu erfolgen, - Prüfung erfolgt nicht

3.2.2 Luftverteilnetz

Es erfolgte die Prüfung an jeweils einem Prüfpunkt in der Zuluft-Leitung nach jedem RLT-Zentralgerät. In den Zuluftschächten und Zuluftleitungen wurde ein Raster an zufälligen Prüfpunkten über die Schächte und Geschoße gelegt.

Zuluftschächte: Abströmseitig nach den im UG befindlichen RLT-Zentralgeräten wird die Zuluft mittels senkrechter Schächte in die darüberliegenden Geschoße geleitet. Das Prüfraster für die 23 Schächte wurde so definiert, dass alle Schächte und alle Stockwerke mittels gleichmäßig verteilter Stichproben überprüft werden konnten.

Zuluftleitungen: Pro RLT-Anlage wurde ein Prüfpunkt im Zuluftverteilsystem jedes zweiten Stockwerks festgelegt. Das bedeutet, dass im Versorgungsbereich jedes RLT-Zentralgeräts ein zufällig ausgewählter Messpunkt für jeweils 2 versorgte Stockwerke zu untersuchen war, sodass 50 % der Nutzungsbereiche auch tatsächlich geprüft werden.

Die genaue Lage der festgelegten Prüfpunkte im jeweiligen Bereich wurde aufgrund der Zugänglichkeit festgelegt und in den Plänen verzeichnet. Die Probenahmepunkte des Prüfschemas wurden in eine kompakte Matrix übertragen. Darin sind sämtliche Nutzungseinheiten, in denen die nach Schema ausgewählten

Prüfpunkte vorhanden sind, markiert. Die zu prüfende Stelle im Zuluftsystem ist mit den Plankoordinaten bezeichnet. Ebenso ist das jeweilige Stockwerk angeführt, in dem der Zuluftschacht zu prüfen ist.

Bei Anwendung des Prüfrasters und unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verhältnisse vor Ort folgte für die Anzahl der zu prüfenden Positionen für das Zuluft-Verteilsystem ein Ausmaß, das in der nachfolgenden Tab. 2 wiedergegeben wird.

Tab 2: Anzahl der zu prüfenden Positionen für das Zuluft-Verteilsystem

Anlagenkomponente	Anzahl der Prüfpunkte	Standardisierter Prüfungsumfang	
		hygienisch-mikrobiolog. Zustand	Staubflächendichte
Zuluftleitung bei Revisionsöffnungen nach jedem RLT-Zentralgerät	23	x	x
Prüfposition in der vertikalen Luftleitung bei jedem Zuluft-Schacht	17	x	x
Prüfpunkte im Zuluft-Verteilsystem der einzelnen Nutzungseinheiten.	66	x	x

In der Tabelle bedeutet: x Prüfung hat zu erfolgen

3.3 BEURTEILUNGSGRENZWERTE

Um den „Anforderungen RLT-Anlage“ zu entsprechen, darf der Beurteilungswert der Staubflächendichte den Wert von 3,0 g/m² nicht überschreiten. Der Wert von 3,0 g/m² entspricht der oberen Grenze für eine mittlere Sauberkeitsqualitätsklasse für Zuluftleitungen von in Betrieb befindlichen Anlagen entsprechend den Vorgaben der ÖNORM EN 15780 (2011).

Für die Klassifizierung des hygienisch-mikrobiologischen Zustandes einer geprüften luftleitenden Oberfläche folgt für den Beurteilungswert eine Maximalanzahl von 100 KBE pro 25 cm². Dies bedeutet, dass eine geprüfte Fläche den „Anforderungen RLT-Anlage“ nicht entspricht, wenn der hygienisch mikrobiologische Zustand als „unzureichend“ (nach VDI 6022-1 (2011), mehr als 100 KBE/25 cm²) zu klassifizieren wäre.

Zur mikrobiologischen Beurteilung von Befeuchterwasser in raumlufttechnischen Anlagen sieht die heranzuziehende ÖNORM H 6021 (2003) nur die Notwendigkeit von regelmäßigen Prüfungen vor, jedoch gibt sie keine Grenz- oder Richtwerte an. Für orientierende Untersuchungen mit Dip-Slides, wie sie im Rahmen der gegenständlichen Arbeit durchgeführt wurden, sind allerdings in der VDI 6022-1 (2011) Abschnitt 8.3.2 Tabelle 8 Richtwerte für Befeuchterwasser angeführt. Die technische Regel gibt an, dass bei Überschreitung eines derartigen Richtwertes ein „kritischer Befund“ vorliegt. Daraus wird abgeleitet, dass Befeuchterwasser den Richtwert von 1000 KBE pro Milliliter (10^3 KBE/ml) für die Gesamtkoloniezahl einhalten muss, um den „Anforderungen RLT-Anlage“ zu entsprechen.

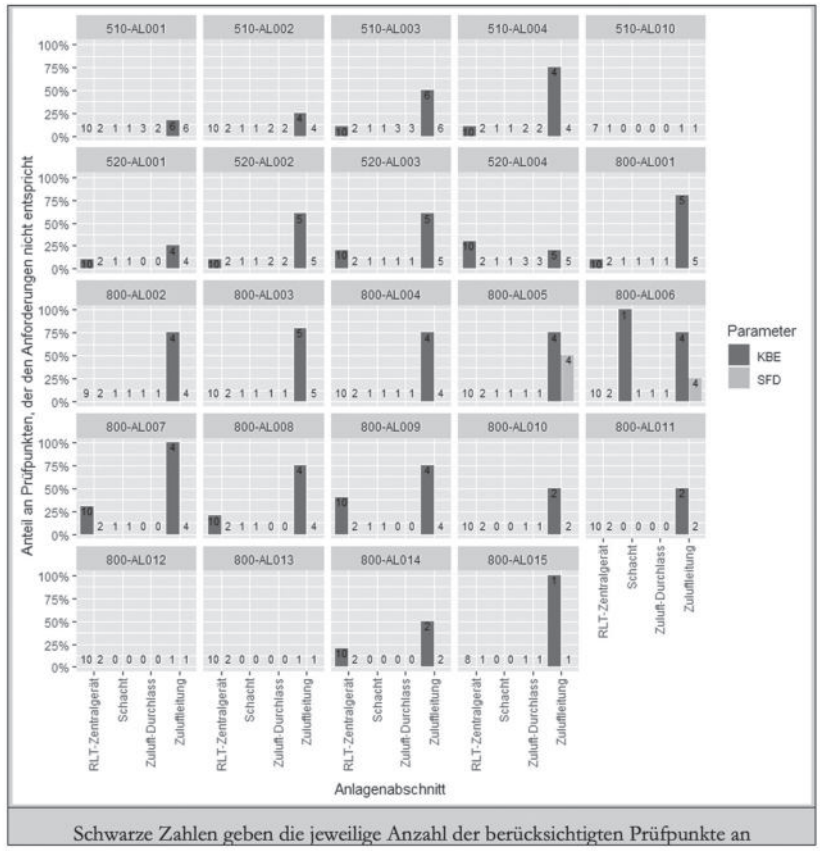
Tab. 3: Zusammenfassung der festgelegten Beurteilungsgrenzwerte

Betriebszustand der Anlage	**in Betrieb** befindliche Anlage	
Sauberkeitsqualitätsklasse	**mittel** nach ÖNORM EN 15780 (2011)	
Analytisch/objektiv nachprüfbare Beurteilungsparameter	Zur Überprüfung der Einhaltung einer definierten Sauberkeits-Qualitätsklasse bzw. des akzeptablen Sauberkeitsgrads eignet sich die messtechnische Prüfung der Staubflächendichte	Zur Überprüfung des hygienisch mikrobiologischen Zustandes eignet sich die Prüfung der Oberflächenkonzentration an Pilzen/ Gesamtkoloniezahl (Schimmelpilze, Hefen und Bakterien) mittels Abdruckverfahren
Beurteilungsgrenzwerte		
Parameter	Messpunkt	
	entspricht den „Anforderungen RLT-Anlage“	**entspricht nicht** den „Anforderungen RLT-Anlage“
Sauberkeitsgrad (Staubflächendichte) nach ÖNORM EN 15780 (2011)	≤ 3,0 g/m²	> 3,0 g/m²
hygienisch mikrobiologischer Zustand nach VDI 6022-1 (2011)	≤ 100 KBE/25 cm² (nicht unzureichend)	> 100 KBE/25 cm² (unzureichend)
Gesamtkoloniezahl Befeuchterwasser nach VDI 6022-1 (2011)	≤ 10^3 KBE/ml	> 10^3 KBE/ml

3.4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Bei sämtlichen im Rahmen der Sichtinspektionen aufgefundenen Auffälligkeiten handelt es sich um kleinere oder größere Mängel, die jedenfalls zu beheben waren, um den hygienisch einwandfreien Betrieb der Gesamtanlage zu gewährleisten. Daher waren diese nicht für die Ermittlung der in der Aufgabenstellung definierten Prozentsätze aufzunehmen. Die Prozentsätze, mit denen geprüfte Anlagenkomponenten den vertraglich definierten „Anforderungen RLT-Anlage“ entsprechen oder auch nicht entsprechen, waren daher ausschließlich über die Ergebnisse der standardisierten analytischen Prüfungen zu ermitteln. Beispielhaft wird auf die Ergebnisdarstellung von Abb. 2 verwiesen, in der der disaggregierte Anteil an Prüfpunkten je RLT-Anlage angegeben wird, der den „Anforderungen RLT-Anlage“ entspricht. Die roten Balken geben den Prozentsatz der Prüfungen des hygienisch-mikrobiologischen Oberflächenzustandes an, zu dem der Beurteilungsgrenzwert überschritten wird, die blauen Balken zeigen das analoge Ergebnis der Staubflächendichte-Prüfungen für jeden der 4 Anlagenabschnitte (RLT Zentralgeräte, Schächte, Zuluft-Durchlässe und Zuluftleitungen) der geprüften 23 RLT-Anlagen.

Tab. 4: Prozentueller Anteil an Prüfpunkten je Anlage, der den „Anforderungen RLT-Anlage“ nicht entspricht, unterteilt nach Anlagenabschnitt



Die maximal mögliche Aggregierung der Ergebnisse der überprüften 23 RLT-Anlagen mit über 400 mikrobiologischen Einzelanalysen (KBE) und rund 170 Untersuchungen der Staubflächendichte (SFD) ist die Gebäude-übergreifenden Darstellung. Dafür wurde die Methode der Kreisdiagramme gewählt. In der Gebäude-übergreifenden Darstellung wird klar ersichtlich, dass vor allem die geprüften Zuluftleitungen den „Anforderungen RLT-Anlage“ hinsichtlich des hygienisch-mikrobiologischen Zustandes zu einem relevanten Anteil nicht entsprechen. Die RLT-Zentralgeräte und die Schächte entsprechen zum überwiegenden Teil den „Anforderungen RLT-Anlage“ in Bezug auf den hygienisch-mikrobiologischen Zustand und die Staubflächendichte. Die RLT-Zentralgeräte mit ihren an jeweils standardmäßig 10 geprüften Geräte-Komponenten entsprachen in Bezug auf den hygienisch-mikrobiologischen Zustand der luftleitenden Oberflächen zu jeweils ca. 90 % den vertragsrelevanten „Anforderungen RLT-Anlage“ bzw. zu jeweils 100 % in Bezug auf die Staubflächendichte. Es waren keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Geräten erkennbar. Die geprüften Zuluft-Durchlässe entsprachen vollständig sowohl hinsichtlich der Mikrobiologie als auch der Staubflächendichte den vertraglich vorgegebenen Anforderungen. Betrachtet man nur den Parameter Staubflächendichte, so entsprach dieser in allen Anlagenabschnitten fast vollständig den „Anforderungen RLT-Anlage“. Lediglich an drei der 87 geprüften Zuluftleitungen wurde der Beurteilungsgrenzwert der Staubflächendichte von 3,0 g/m² überschritten.

Die graphische Darstellung der Prozentsätze in Form von Kreisdiagrammen, zu denen der angeführte Anlagenabschnitt den „Anforderungen RLT-Anlage“ hinsichtlich des hygienisch-mikrobiologischen Zustandes und der Staubflächendichte entspricht (grün markiert) bzw. nicht entspricht (rot markiert), ist für die Gesamtheit der durchgeführten analytischen Prüfungen nachfolgend abgebildet.

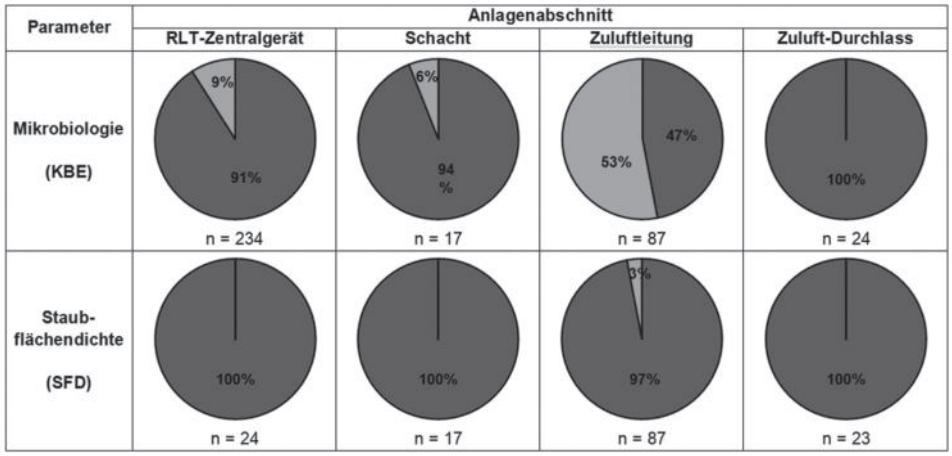


Abb. 2: Graphische Darstellung der Prozentsätze – Gebäude-übergreifende Zusammenfassung

4. RLT-HYGIENE IN EINEM 20 JAHRE ALTEN BÜROHOCHHAUS

4.1 AUFGABENSTELLUNG

Basis für dieses Projekt war eine Fragenliste mit insgesamt 19 Fragen, die zum einen von den Nutzern des Objektes zusammengestellt wurden und zum anderen rein technischer Natur waren. Die Fragen fallen in den Bereich der RLT-Hygiene aber auch in den Bereich der Betriebsführung. Nachfolgend werden einige Aspekte dieser Fragenliste sinngemäß zusammengefasst:

- Entspricht die Klimaanlage hinsichtlich Hygiene dem Stand der Technik?
- Wie ist die derzeitige Lüftungssituation in unterschiedlichen Räumen zu bewerten?
- Gibt es Bedenken hinsichtlich einer Covid-19 Ansteckungsgefahr?
- Soll trotz Klimaanlage zusätzlich gelüftet werden?
- Wie ist die Lüftungssituation in den Liften?

4.2 UNTERSUCHUNGSKONZEPT

Nach Sichtung der vorhandenen fachspezifischen Unterlagen und einem gemeinsamen Lokalaugenschein mit Vertretern der Objektnutzer und dem Auftraggeber wurde ein Untersuchungskonzept erarbeitet, welches dreiteilig aufgebaut ist.

- A – Luftwechsel-Bestimmung mittels Tracergasmethode in repräsentativ ausgewählten Räumen
- B – Hygieneprüfung von 6 RLT-Zentralgeräten nach standardisiertem Umfang mit Sichtinspektion und Prüfung des hygienisch-mikrobiologischen Zustandes
- C – Prüfung auf Übertritt von Abluft in die Zuluft bei 6 Lüftungsanlagen unter Verwendung eines inerten Tracergases

4.3 STANDARDISIERTER UNTERSUCHUNGSUMFANG

Basis der Untersuchungen bildet ein Untersuchungskonzept mit standardisiertem Umfang, bei dem die festgelegten Methoden bei allen 3 Leistungspaketen in der im Vorfeld festgelegten Anzahl und an den repräsentativ ausgewählten Untersuchungspunkten umgesetzt werden.

4.3.1 A – Luftwechsel-Bestimmung mittels Tracergasmethode in repräsentativ ausgewählten Räumen

Zur Untersuchung des tatsächlichen Luftwechsels wurden aus den 23 Stockwerken nach technischen Kriterien repräsentative Räume ausgewählt.

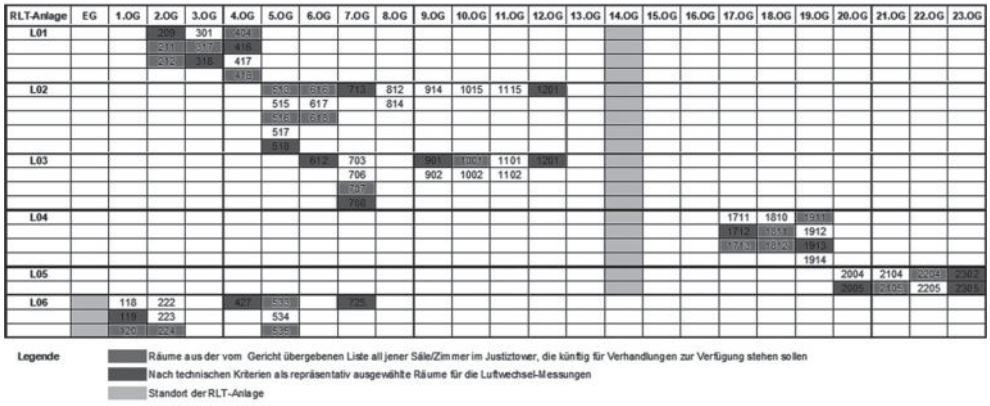


Abb. 3: Luftwechsel Bestimmung – Festgelegte Untersuchungsräume – Leistungspaket A

Zu jedem der 6 RLT-Zentralgeräte wurden 2 bis 3 angeschlossene Räume festgelegt, die von der jeweiligen RLT-Anlage be- und entlüftet werden. Nach Möglichkeit wurde bei jeder Lüftungsanlage ein anlagennaher und ein anlagenferner Raum ausgewählt, um für die einzelnen raumlufttechnischen Anlagen repräsentative Aussagen treffen zu können. Weiters wurde danach getrachtet, möglichst viele Stockwerke, die in unterschiedlicher räumlicher Entfernung zur Haustechnikebene im 14.OG liegen, abzubilden. Der Untersuchungsumfang beinhaltet die messtechnische Bestimmung des tatsächlichen Luftwechsels und des daraus ableitbaren Luftaustausch-Volumenstroms mit folgenden Randparametern:

- Bestimmung des Luftwechsels mittels Tracergasmethode in repräsentativen Räumen bei Normalbetrieb der raumlufttechnischen Anlage und vollständig geschlossenen Fenstern.
- Bestimmung des Abluft-Volumenstroms durch Volumenstrommessungen an allen im Raum vorhandenen Abluftdurchlässen.
- Bestimmung des Luftwechsels mittels Tracergasmethode in ausgewählten Räumen bei Normalbetrieb der raumlufttechnischen Anlage und der maximalen Anzahl an Fenstern in Kippstellung zur Simulation von zusätzlicher Fensterlüftung.

4.3.2 B – Hygieneprüfung der RLT-Zentralgeräte nach standardisiertem Umfang

Im Rahmen der Hygieneprüfung waren 6 RLT-Zentralgeräte und die von diesen raumlufttechnischen Anlagen aufbereitete Zuluft für die Überprüfung relevant. Die Prüfungen des hygienisch-mikrobiologischen Zustands der luftleitenden Oberflächen von hygienisch relevanten Anlagekomponenten wurden standardisiert. Die grundsätzlich zu prüfenden Komponenten werden in nachfolgender Tab. 5 dargestellt. Eine ergänzende Sichtinspektion erfolgte für alle hygiene-relevanten Komponenten der RLT-Zentralgeräte. Weiters wurden stichprobenartig Zuluft- und Abluftdurchlässe inspiziert.

Tab. 5: Art und Anzahl der zu prüfenden Anlagenkomponenten der RLT-Zentralgeräte

Anlagenkomponente	Prüfung des hygienisch-mikrobiologischen Zustandes
Filterkammer (Boden)	x
Wärmerückgewinnung (Wärmetauscher anströmseitig)	x
Heizregister (Wärmetauscher anströmseitig)	x
Befeuchter (Boden vor Befeuchterwassersammelwanne)	x
Kühlregister (Wärmetauscher anströmseitig)	x
Kühlregister (Kondensatsammelwanne)	x
Nachheizregister (Wärmetauscher abströmseitig)	x
Zuluft-Ventilatorkammer (Boden)	x
Zuluft-Schalldämpfer	x

In der Tabelle bedeutet: x Prüfung hat zu erfolgen

Es erfolgte weiters die Untersuchung der Zuluft jeder der 6 RLT-Anlagen auf die Konzentration an aerogenen Schimmelpilzsporen und ultrafeinen Partikeln (Feinstpartikeln).

4.3.3 C – Prüfung auf Übertritt von Abluft in die Zuluft bei den Lüftungsanlagen unter Verwendung eines inerten Tracergases

Mittels einer modifizierten Tracergas-Methode wurden Umluft-Anteile sowie die Leckluftraten der Rotationswärmetauscher messtechnisch ermittelt. Dazu wird ein ungiftiges Tracergas der Abluft in einem an die jeweilige RLT-Anlage angeschlossenen Abluftraum mit konstanter Flussrate in den Luftstrom beigemengt. Die Tracergas-Messungen zur Quantifizierung der Leckluftraten bzw. Umluftanteile (d.h. von der Abluft oder Fortluft in die Zuluft übertretende Volumenströme) erfolgten an folgenden Positionen:

- In der Abluftleitung direkt vor dem RLT-Zentralgerät.
- In der Fortluftleitung direkt nach dem RLT-Zentralgerät (in Strömungsrichtung gesehen nach der Umluftklappe).
- Direkt im Zuluftstrom beim Zuluftdurchlass in einem belüfteten Raum.

4.4 BEURTEILUNGSGRUNDLAGEN

4.4.1 Technische Beurteilungsgrundlagen

4.4.1.1 Allgemeine Anforderungen für RLT-Anlagen

In der aktuellen ÖNORM H 6021 (2016) über Reinhaltung und Reinigung von lüftungstechnischen Anlagen als nationale Ergänzung zur ÖNORM EN 15780 sind vor allem die national gültigen Anforderungen an die Hygiene von raumlufttechnischen Anlagen festgeschrieben. Die Norm beschreibt den national gültigen Stand der Technik der baulichen, technischen und organisatorischen Anforderungen hinsichtlich der Ausführung, des Betreibens und der Instandhaltung von raumlufttechnischen Anlagen. Zur Beurteilung der Ausführung von raumlufttechnischen Anlagen kann weiters auf die VDI-Richtlinienreihe 6022 zugegriffen werden.

Filter: Unter den wesentlichen Maßnahmen für die Reinhaltung von RLT-Anlagen wird in der ÖNORM H 6021 ausgeführt, dass das Zuluft- und Abluftsystem durch geeignete Filter vor Verunreinigung zu schützen ist. Bei zwei Filterstufen ist die 1. Filterstufe als erster Bauteil und die 2. Filterstufe als

letzter Bauteil nach dem letzten luftbehandelnden Bauteil des RLT-Zentralgeräts und vor dem Zuluft-Leitungssystem anzuordnen. Insbesondere in den Fällen, in denen nach der zentralen Luftaufbereitung ein Kühler, ein adiabater Befeuchter oder ein riemengetriebener Ventilator angeordnet sind, muss ein Filter nach dem letzten Nachbehandlungsgerät eingebaut werden. Nach Heizregistern, Dampfluftbefeuchtern oder direkt betriebenen Ventilatoren sind in der Regel keine zusätzlichen Filter erforderlich.

Abwasser- und Kondensatabläufe: Ein direkter Anschluss an das Abwassernetz ist aus hygienischen Gründen nicht zulässig.

Luftbefeuchter: In der ÖNORM H 6021 wird ausgeführt, dass wegen der geringen mikrobiologisch-hygienischen Risiken bei Dampf-Luftbefeuchtern diese Art der Befeuchtung in RLT-Anlagen allen anderen vorzuziehen ist. Der Wasserdampf darf keine gesundheitsschädigenden Stoffe, wie etwa Biozide oder Desinfektionsmittel, enthalten. Zur Vermeidung von Kondensation ist die Einhaltung der Mindestbefeuchtungsstrecke zu berücksichtigen, in der keinerlei Bauteile, Krümmer oder Einbauten installiert werden dürfen. Weiters wird in der Norm ausgeführt, dass nach Möglichkeit bestehende Verdunstungs-Luftbefeuchter mit Umlaufwasser-Betrieb auf Frischwasserbetrieb umzubauen sind.

Schalldämpfer: Schalldämpferkulissen sind regelmäßig auf den einwandfreien Zustand hinsichtlich der Oberfläche zu kontrollieren. Dazu müssen diese durch geeignete Wartungsöffnungen zugänglich sein. In der ÖNORM H 6021 wird verlangt, dass die Kulissenoberflächen reinigbar sein und eine hohe mechanische Belastbarkeit haben müssen.

Ventilatoren: Zur Reduktion oder Vermeidung von Riemenabrieb wird der Einsatz von Flachriemen oder Direktantrieben empfohlen.

4.4.1.2 Beurteilungsgrundlagen für Keime an Oberflächen in raumlufttechnischen Anlagen

Grenz- oder Richtwerte für die Belastung von luftleitenden Oberflächen durch Mikroorganismen sind in Österreich nicht vorhanden, den diesbezüglichen Stand der Technik gibt die deutsche VDI-Richtlinienreihe 6022 vor. Die Richtlinie VDI 6022 Blatt 1 (2016) fordert Abdruckproben von Oberflächen im Rahmen von Hygieneinspektionen und gibt Erfahrungswerte und Maßnahmen bei Oberflächenuntersuchungen an. In der technischen Richtlinie VDI 6022 Blatt 1 (2018) über Hygiene-Anforderungen an raumlufttechnische Anlagen heißt es sinngemäß: RLT-Anlagen müssen in allen luftführenden Bereichen so betrieben und instand gehalten werden, dass eine zusätzliche Belastung durch Schadgase sowie anorganische und organische Verunreinigungen sicher vermieden wird. Eine Vermehrung von Mikroorganismen in der Anlage muss vermieden werden.

Tab. 6: Erfahrungswerte und Maßnahmen bei Oberflächenuntersuchungen nach VDI 6022-1

Konzentration Ergebnis der Untersuchung [KBE/25 cm²]	Hygienisch-mikrobiologischer Zustand der Fläche	Mögliche Handlungsempfehlung[a]
< 25	gut oder sehr gut	Kein Handeln erforderlich.
25 ... 100	grenzwertig	Ursachen sind zu suchen und zu beseitigen. Diese Elemente sollen gründlich gereinigt oder demnächst ausgewechselt werden. Aufnahme in den Wartungsplan.
> 100	unzureichend	Ursachen sind zu suchen und zu beseitigen. Diese Elemente sollen dringend gründlich gereinigt oder ausgetauscht werden. Sofortiges Handeln erforderlich.

[a] Die im Einzelfall zu empfehlenden Maßnahmen sind im Zusammenhang mit dem gesamten Hygienezustand der untersuchten Anlage zu bewerten.

4.4.2 Ausgewählte Richtlinien zur aktuellen Covid-19 Problematik

4.4.2.1 Kultur in Zeiten der COVID19-Epidemie in Österreich: Leitfaden für den Kulturbetrieb

In diesem österreichischen Leitfaden für den Kulturbetrieb des Zentrums für Public Health der Medizinischen Universität Wien werden Empfehlungen und Maßnahmen für Veranstaltungen in Innenräumen ausgesprochen, da davon auszugehen ist, dass die Verdünnung des Atemaerosols im Innenraum, insbesondere bei geringem Luftwechsel, langsamer erfolgt als im Freien. Neben den allgemeinen Begleitmaßnahmen (Begrenzung der maximalen Besucheranzahl, Mund-Nasenschutz und Hygienevorschriften), werden folgende Punkte in Hinblick auf Lüftungsmaßnahmen und Innenraumklima ausgeführt:

- Der Luftwechsel, insbesondere das personenbezogene Zu- bzw. Abluftvolumen, haben Einfluss auf das Infektionsrisiko.
- Der Gesamtvolumenstrom raumlufttechnischer Anlagen ist im Betrieb auch mit reduzierter Besucherbelastung einzuhalten.
- In jedem Fall ist dem jeweiligen Raum pro im Raum anwesender Person und Stunde ein Außenluftvolumen von mindestens 35 m^3 zuzuführen, dies entspricht den in der österreichischen Arbeitsstättenverordnung definierten Anforderungen an Arbeitsplätze für Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung.
- Umluftanlagen oder raumbezogene Klimageräte, bei denen die Luft mit Ventilatoren in einem Gebäude bzw. innerhalb des Raumes im Kreis transportiert wird, sind zu vermeiden.

4.4.2.2 REHVA COVID-19 Leitfaden

Dieser internationale Leitfaden der Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA) fasst Ratschläge für den Betrieb und die Nutzung der Gebäudetechnik zur Verhinderung der Ausbreitung des Coronavirus am Arbeitsplatz zusammen. Es werden zwei Expositionsmechanismen über die Luft beschrieben. Zum einen die Kontaktübertragung durch große Tröpfchen (> 10 µm), welche durch Husten und Niesen gebildet werden und Personen im Umkreis von etwa 1-2 m direkt infizieren können bzw. auf Oberflächen fallen, von wo sie durch Oberflächenkontakt eine Infektion auslösen können. Zum anderen die Luftübertragung durch kleine Partikel (< 5 µm), die stundenlang in der Luft bleiben und über weite Strecken transportiert werden können und durch Husten, Niesen und Sprechen erzeugt werden. Es wird ausgeführt, dass SARS-CoV-2 wahrscheinlich bis zu 3 Stunden in der Raumluft und auf Raumoberflächen 2-3 Tage bei üblichen Raumbedingungen aktiv (infektiös) bleibt. Auf Basis dieser Übertragungswege wurden folgende praktische Empfehlungen für den Betrieb der Gebäudetechnik ausgesprochen:

- Sichere Belüftung von Räumen mit Außenluft.
- Belüftung des Gebäudes mit Nenn-Volumenstrom mind. 2 Stunden vor der Nutzungszeit und Belüftung mit reduziertem Volumenstrom etwa 2 Stunden nach der Nutzungszeit.
- Belüftung mit niedriger Lüftungsrate auch nachts und am Wochenende.
- Regelmäßige Belüftung mit Fenstern sicherstellen.
- Umschalten von Lüftungsgeräten mit Umluft auf 100 % Außenluft.
- Überprüfung der Wärmerückgewinnungsanlagen, um sicherzustellen, dass die Leckraten im Bereich von 1-2 % liegen.
- Änderungen der normalen Kanalreinigungs- und Wartungsverfahren sind nicht erforderlich.
- Austausch der zentralen Außen- und Abluftfilter gemäß dem Wartungsplan mit üblichen Schutzmaßnahmen einschließlich Atemschutz.

4.5 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.5.1 Lüftungssituation in den Büroräumen

Die in den ausgewählten Räumen bei geschlossenen Fenstern gemessene tatsächliche Luftwechselzahl bewegte sich im Bereich von 1,9 h^{-1} bis 4,1 h^{-1}. Im Mittel lag die Luftwechselzahl bei 2,7 h^{-1}. Das bedeutet, dass in den überprüften Räumen bei geschlossenen Fenstern im Durchschnitt das 2,7-fache des Raumvolu-

mens durch die Wirkung der Lüftungsanlage ausgetauscht wird. Anders stellt sich die Situation dar, wenn zusätzlich bei Betrieb der Lüftungsanlage alle öffenbaren Fenster gekippt werden. Hierzu wurden insgesamt sieben Räume untersucht, die sich in den Ebenen 1.OG, 4.OG, 7.OG, 9.OG, 17.OG und 23.OG befinden. Das Kippen der Fenster bewirkte in diesen Räumen eine signifikante Erhöhung des Luftwechsels. Der Änderungsfaktor lag bei durchschnittlich 2,3, wobei die ermittelten Werte zwischen 1,3 und 4,1 lagen. Das bedeutet, dass durch das Kippen der Fenster der Luftwechsel durchschnittlich um das 2,3-fache erhöht wurde.

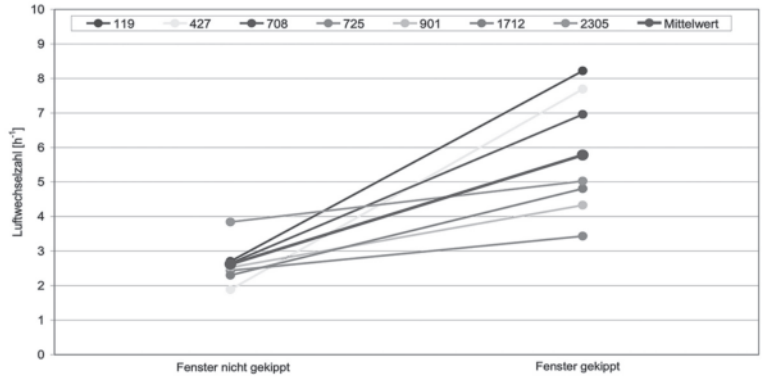


Abb. 4: Mittlere Luftwechselzahl bei geschlossenen und gekippten Fenstern

Die denkbare Annahme, dass die Wirkung der Fensterlüftung umso ausgeprägter ist, je weiter oben sich der Raum im Büroturm befindet, bestätigte sich nicht. Vielmehr zeigte sich ein klarer Hinweis darauf, dass die Wirkung der zusätzlichen Fensterlüftung umso größer ausfällt, je höher die Temperaturdifferenz zwischen der Außen- und der Innenraumluft ist. Die Temperaturabhängigkeit des Luftwechsel-Änderungsfaktors zeigt sich beispielsweise auch im weit unten liegenden Raum im 1.OG, in welchem bei einer Temperaturdifferenz zwischen Außen und Innen von ca. 11 °C eine Verdreifachung des Luftwechsels (Luftwechsel-Änderungsfaktor bei Kipplüftung = 3,0) feststellbar war.

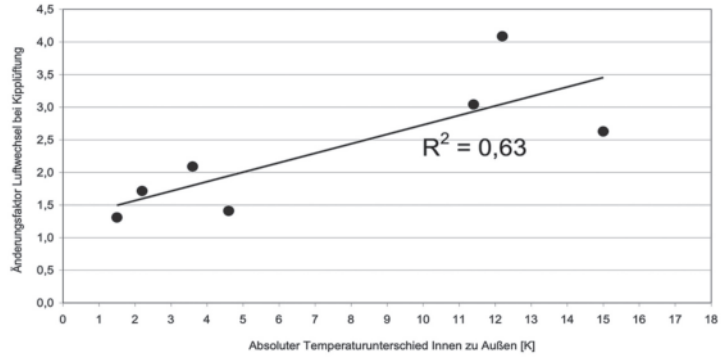


Abb. 5: Luftwechsel-Änderungsfaktor bei Kipplüftung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Außen und Innen

Zusammenfassend kann daher in Bezug auf die Möglichkeit der zusätzlichen Kipplüftung festgestellt werden, dass in allen diesbezüglich untersuchten Räumen durch Kippen der Fenster eine signifikante Erhöhung des Luftaustausch-Volumenstroms bzw. des Luftwechsels erzielt werden konnte, wobei davon auszugehen ist, dass die Erhöhung des Luftwechsels zusätzlich zur Wirkung der Lüftungsanlage wesentlich durch die Temperaturdifferenz zwischen Außen und Innen beeinflusst wird. Im Rahmen der Detailauswertung wurde auch geprüft, ob die Lage des Raums im Objekt, also ob sich der Raum in einem unteren oder oberen Stockwerk befindet oder ob der Raum nahe oder fern zum zentralen Haustechnik-Versorgungsschacht lokalisiert ist, einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Luftwechselzahl hat. Hier zeigte sich jedoch keine signifikante Abhängigkeit.

Betrachtet man den abgeleiteten personenbezogenen Luftaustausch-Volumenstrom, der bei vollständig geschlossenen Fenstern allein durch die Lüftungsanlage bewirkt wird und setzt eine Belegung durch fünf Personen voraus (Minimalsituation), liegt dieser Wert in allen geprüften Räumen über dem in den Beurteilungsgrundlagen genannten Referenzwert von 35 m³ pro Stunde und Person.

4.5.2 Lüftungssituation in den Liftkabinen

Durch Volumenstrommessungen wurde der Luftwechsel in den Liftkabinen bestimmt, der sich bei geschlossener Lifttüre und eingeschaltetem Lüftungs-Ventilator einstellt. Der Abluftventilator befindet sich im Kabinendach und entlüftet die Kabinen in den Aufzugschacht. Das bedeutet, dass die bei geschlossener Lifttüre in die Aufzugskabinen einströmende Luft nicht Außenluftqualität besitzt. Bei den untersuchten Aufzügen war festzustellen, dass der Lüftungs-Volumenstrom bei Fahrt wesentlich niedriger ist als im stationären Zustand, wobei es unerheblich ist, ob die Fahrt nach oben oder nach unten stattfindet. Im stationären Zustand lagen die Messwerte im Bereich von etwa 25 m³/h bis 50 m³/h, bei Fahrt reduzierten sich die Werte auf etwa die Hälfte (10 m³/h bis 20 m³/h). Diese Werte sind als relativ niedrig anzusehen und können daher keinen effizienten und wirkungsvollen Beitrag zur Be- und Entlüftung der Liftkabinen liefern. Dies kann unter anderem dadurch veranschaulicht werden, indem man die Zeit betrachtet, die theoretisch notwendig wäre, um bei idealer Luftdurchströmung der Liftkabinen einen praktisch vollständigen Luftaustausch herzustellen. Diese Zeit liegt im stationären Zustand und bei geschlossener Türe im Bereich von bis zu 40 Minuten. Bewegt sich der Lift zwischen den Geschoßen, vergrößert sich diese Luftaustausch-Zeit auf bis zu rund eineinhalb Stunden. Aus den Ergebnissen kann daher abgeleitet werden, dass ein Luftaustausch in den Liftkabinen beispielsweise durch dauerhaft geöffnete Türen im stationären Zustand in den Stockwerken wirkungsvoller ist, als mit dem eingebauten Lüftungsventilator bei geschlossener Türe zu erwarten wäre.

4.5.3 Sichtinspektion der RLT-Zentralgeräte

Im Rahmen der Sichtinspektion der RLT-Zentralgeräte war feststellbar, dass die überprüften Klimaanlagen nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Ausschlaggebend für diese Einstufung sind folgende RLT-Komponenten, deren Ausführungsform nicht mehr den aktuell gültigen Normen entspricht:

- die bestehenden Luftbefeuchter
- die einstufige Filtration der Zuluft
- die Ventilatoren mit Keilriemenantrieb
- fehlende Wartungsöffnungen

Es kann allerdings angenommen werden, dass die Klimaanlagen zum Zeitpunkt ihrer Planung vor mehr als 20 Jahren den damaligen allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprochen haben.

4.5.4 Hygienisch-mikrobiologischer Zustand der RLT-Anlagenkomponenten

Insgesamt erfolgten rund 40 Oberflächenprüfungen an den sechs untersuchten RLT-Zentralgeräten, wobei bei 70 % der hygienisch-mikrobiologische Zustand der überprüften luftleitenden Flächen als „gut oder

sehr gut“ zu beurteilen waren. Die Beurteilung erfolgt entsprechend den Erfahrungswerten und Maßnahmen nach VDI 6022-1. An keiner einzigen Stelle war in Hinblick auf die vorliegenden Konzentrationen von Pilzen, Hefen und Bakterien ein „unzureichender“ Zustand nach VDI 6022-1 gegeben. Das bedeutet zusammenfassend, dass aufgrund der Ergebnisse der mikrobiologischen Oberflächenprüfungen kein Handlungsbedarf abzuleiten war.

4.5.5 Hygienisch-mikrobiologischer Zustand und Konzentration an Feinstpartikeln in der Zuluft

Ein in Bezug auf die Hygieneanforderungen unauffälliges Ergebnis erbrachte die Untersuchung der Zuluftqualität auf die Konzentration von aerogenen Schimmelpilzsporen. Die gemessenen Konzentrationen mesophiler und thermophiler Pilze in der von den RLT-Anlagen aufbereiteten Zuluft lagen deutlich unter den aktuellen Referenzwerten der Außenluft. Das bedeutet, dass in den RLT-Anlagen eine wirkungsvolle Filtration und damit Reduktion der in der Außenluft vorhandenen Pilzsporen erfolgte. Bei der Prüfung der Konzentration an Feinstpartikeln in der Zuluft wurden Partikel im Größenbereich von 0,02 bis 1 Mikrometer (µm), entsprechend 20 bis 1.000 Nanometer (nm), erfasst. Bei allen sechs überprüften RLT-Anlagen lag die Konzentration an Feinstpartikeln in der aufbereiteten Zuluft etwa um den Faktor 2 niedriger als die Referenzkonzentration in der Außenluft. Dies ist als klarer Hinweis darauf zu werten, dass die Lüftungsanlagen einen Beitrag zur Reduktion der Feinstaubbelastung im Vergleich zur Außenluft bewirken und die Anlagen selbst keine Quellen von Feinstpartikeln darstellen.

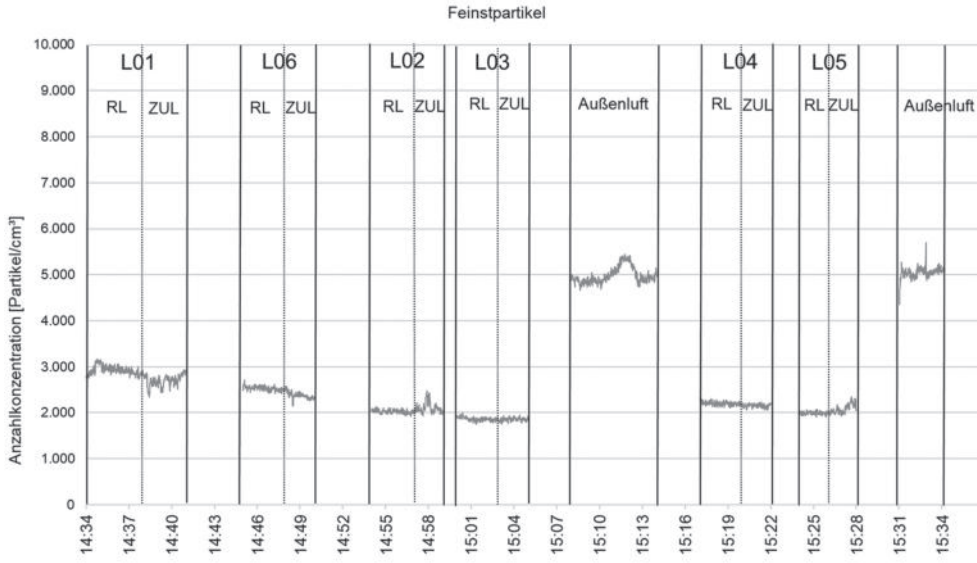


Abb. 6: Verlauf der Konzentration an Feinstpartikeln (RL = Raumluft, ZUL = Zuluft)

4.5.6 Leckageprüfungen an den RLT-Anlagen

Bei den Leckageprüfungen wurde mittels Tracergasmethode an den RLT-Zentralgeräten die Abluft-Leckage geprüft, d.h. es wurde ermittelt, welcher Anteil des Abluft-Volumenstroms in die Zuluft übertritt. Ein Überströmen von Abluft (aus den belüfteten Räumen) in die Zuluft, die den Räumen zugeführt wird, ist theoretisch sowohl am Rotationswärmetauscher als auch über möglicherweise nicht hermetisch dicht schließende Umluftklappen möglich.

Die Abluft-Leckage ist besonders hygienerelevant, da eine eventuelle Kontamination der Abluft mit Keimen (darunter vor allem SARS-CoV-2) dadurch nicht vollständig nach außen abgeführt wird, sondern ein Teil erneut in die Zuluft der Räume gelangt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass die Abluft-Leckrate bei allen Anlagen in einem niedrigen Bereich von weniger als 2 % lag (Mittelwert 0,5 %). Es tritt demnach nur sehr geringfügig Abluft in die Zuluft über. Die größte Abluft-Leckrate wurde mit 1,7 % festgestellt, was einem Volumenstrom von 250 m³/h entspricht. Die niedrigste Abluft-Leckrate wurde mit 0,1 % ermittelt, was dem unbedeutenden Volumenstrom von 10 m³/h entspricht. In Bezug auf die unerwünschte Übertragung von Abluft in die Zuluft kann zusammengefasst werden, dass die festgestellten Abluft-Leckraten im Bereich üblicher funktionsbedingter Leckraten von gut eingestellten Rotationswärmetauschern liegen. Die Ergebnisse bestätigen auch, dass die vorhandenen Umluftklappen ausreichend dicht schließen und kein relevanter Umluft-Anteil vorhanden ist. Der im REHVA-Covid-19 Leitfaden genannte Zielwert von 1-2 % wird eingehalten. Auch unter Berücksichtigung der COVID19-Problematik ist daher kein Handlungsbedarf zur Reduktion der Abluft-Leckagen gegeben.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von zwei ausgewählten Beispielen aus der Praxis werden optimierte Vorgangsweisen zur Prüfung der relevanten Hygieneparameter von Klimaanlagen in großen Bürogebäuden vorgestellt. Beschrieben wird die Hygieneprüfung in einem neu errichteten Bürogebäude-Komplex mit mehr als 20 RLT-Zentralgeräten und in einem etwa 20 Jahre alten Bürohochhaus. Herausfordernd war die Entwicklung einer an die jeweilige Fragestellung angepassten Untersuchungsstrategie. Zur Abbildung des Sauberkeitsgrades und des hygienisch-mikrobiologischen Zustandes der luftleitenden Flächen des Zuluft-Verteilsystems mit einer Gesamtlänge von mehreren 10.000 m wurde ein Prüfraster ausgearbeitet, um das Ziel von repräsentativen Ergebnissen zum RLT-hygienischen Zustand der Gesamtanlage zu erreichen.

Bei dem etwa 20 Jahre alten Bürohochhaus stand bei der Projekt-Fragestellung die Covid-19-Problematik im Vordergrund. Es werden daher insbesondere jene Parameter und deren messtechnische Prüfung erläutert, die zur Optimierung des Betriebs von Klimaanlagen in Hinblick auf die möglichst sichere Vermeidung von Infektionen über virenbelastete, anthropogen erzeugte Aerosole von Relevanz sind. Dies beinhaltet Luftwechsel-Messungen einerseits durch Volumenstrommessungen, andererseits durch Anwendung der genormten Tracergas-Konzentrationsabkling-Methode. Relevant sind diese Parameter sowohl in den genutzten Räumen als auch in den zahlreichen Fahrstühlen des Bürohochhauses.

Eine Tracergas-Methode zur messtechnischen Überprüfung der Übertragungsrate von Abluft in die Zuluft (Abluftleckage) bei den realisierten Wärmetauscher-Konzepten wird vorgestellt. Zur Bestimmung von Luftströmungen (interzonaler Massentransfer) wird dazu an einem Quellpunkt das Tracergas SF_6 eingesetzt. Durch Modifikationen am Prüfaufbau konnten ausreichend niedrige Nachweisgrenzen erzielt werden, um die in Corona-Zeiten wichtige Vermeidung von Umluft nachzuweisen.

LITERATUR

EN ISO 16266 (05-2008) Wasserbeschaffenheit – Nachweis und Zählung von Pseudomonas aeruginosa – Membranfiltrationsverfahren

Leitfaden für den Kulturbetrieb (2020) Zentrum für Public Health der Medizinischen Universität Wien, Abteilung für Umwelthygiene und Umweltmedizin: Kultur in Zeiten der COVID19-Epidemie in Österreich (13.05.2020)

ÖNORM EN ISO 6222 (07-1999) Wasserbeschaffenheit – Quantitative Bestimmung der kultivierbaren Mikroorganismen – Bestimmung der Koloniezahl durch Einimpfen in ein Nähragarmedium

ÖNORM EN ISO 11731-2 (11-2008) Wasserbeschaffenheit – Nachweis und Zählung von Legionellen. Teil 2: Direktes Membranfiltrationsverfahren mit niedriger Bakterienzahl

ÖNORM EN 15780 (2011) Lüftung von Gebäuden - Luftleitungen - Sauberkeit von Lüftungsanlagen, Ausgabe: 2011-12-01
ÖNORM H 6021 (2003) Lüftungstechnische Anlagen, Reinhaltung und Reinigung, Ausgabe: 2003-09-01
ÖNORM H 6021 (2016) Lüftungstechnische Anlagen - Reinhaltung und Reinigung - Nationale Ergänzungen zu ÖNORM EN 15780, Ausgabe: 2016 08 15
ÖNORM H 6030 Lüftungstechnische Anlagen für Küchen (2017 zurückgezogen)
ÖNORM ISO 16000-18: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen - Probenahme durch Impaktion (ISO 16000-18:2011 + Cor 1:2011), 2015-06-01
REHVA COVID-19 (2020) Leitfaden: Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA) (03.04.2020)
TWV (2020) Verordnung des Bundesministers für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TWV), Fassung vom 26.06.2020
VDI 4300 Blatt 7 (2001) Messen von Innenraumluftverunreinigungen - Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. 2001-07
VDI 6022-1 (2011) VDI-Richtlinie Raumlufttechnik, Raumluftqualität - Hygieneanforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln), Ausgabe Juli 2011
VDI 6022-1 (2018) Raumlufttechnik, Raumluftqualität, Hygiene-Anforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und Geräte (VDI Lüftungsregeln), Ausgabe Jänner 2018

Kontaktdaten:
DI Felix Twrdik
Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger
IBO Innenraumanalytik OG
Stutterheimstraße 16-18/2
1150 Wien
Email: f.twrdik@innenrumanalytik.atww

Session 2d

PV adapt

Using FusiX platform for Intelligent Energy Management Systems' development

Georgoutsos, Soulioti / EMTech GmbH / DE
Alifragkis, Livanos / EMTech Space P.C. / GR

An Integrated Framework for Building's Energy Management based on Deep Learning

Meintanis, Monios, Livieris, Kampourakis, Fourakis, Kyriakoulis, Kokkorikos, Chondronasios / Core-Innovation / GR

Complex glass façade modelling for Model Predictive Control of thermal loads: impact of the solar load identification on the state-space model accuracy

Veynandt, Heschl, Klanatsky, Plank / FH Burgenland / AT

Using FusiX platform for Intelligent Energy Management Systems' development

V. Georgoutsos, G. Soulioti
EMTech GmbH, Darmstadt, Germany
V. Alifragkis, N. Livanos
EMTech Space P.C., Athens, Greece

ABSTRACT: A novel Decision Support System (DSS) development framework, named FusiX, with integrated simulation support, Graphical User Interface (GUI) support and data fusion engine, is developed to meet the needs of the modern building energy management sector. Its main objective is to facilitate and streamline the development and the expansion of a complete DSS. FusiX constitutes a versatile base on which Intelligent Energy Management Systems (IEMS) can be built, allowing a system engineer to incorporate different data resources into a single intelligent system. Its data fusion engine can process heterogeneous data from historic, real time sensed data, simulated and predicted data independently from their location (local or remote). The software system is extended with a web-based GUI for efficient administration, exposing all real-time measurements and available commands to authorized users, supporting user alerting, as well as providing means to produce and export business and technical reports.

Keywords: Decision Support Systems, Intelligent Energy Management Systems, energy saving, interoperability, SCADA, distributed nodes, virtual assistance

1. INTRODUCTION

1.1 REAL CHALLENGES OF MODERN ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS

Saving energy in business, public sector and buildings is a common concern for modern communities and gives ground to the term "energy management" to flourish rapidly.

Today we have to deal with a multifaceted problem in order to bring a positive impact not only for the environment, but also for the beneficiary user. In the complex situation of building energy management one should take into account multiple parameters to efficiently optimize the problem; from current weather conditions and predictions, to system elements (renewable sources, thermal storages, Heating Ventilation and Air Conditioning - HVAC, batteries, etc.), thermal comfort, energy prices, and net metering. To address all these parameters efficiently, an automated intelligent system is required to process them rapidly and dynamically.

Crucial factor in this point are the user's demands, which differ from time to time, day by day and always imply a new undetermined variable at the problem's solution. The user must always be in focus of this optimization attempt and in order to keep him motivated, we need a win-win formula that impacts positively not only the environment, but also brings them greater living comfort with decreased costs. In other words, having to optimize the operation of household equipment, energy costs, living conditions, domestic energy production/consumption, etc. is a great challenge by itself. On top of this, we also need to consider the always changing weather conditions, building's behavior and of course user's interventions. This concludes to the necessity of modern energy management systems, which stand out for the intelligence they provide to user's decision making capabilities, and the way they handle complex problems, adapting seamlessly to the constantly changing needs and variable conditions.

1.2 IEMS DRIVING FACTORS

To tackle the challenges listed above, we need an out of the box solution, which accommodates the key factors that characterize a modern IEMS. These can be listed as:

- Heterogeneous data aggregation
- Interoperability
- Weather/Energy Load Prediction algorithms
- User behavior patterns
- Criteria-based Optimization (energy/cost efficiency, user comfort)
- User engagement/interaction
- Building simulations

Every feature of the above can be thought as a single unit, which demands great effort and time to be developed. But what if these features could be consolidated under a common platform which is able to orchestrate them for a common goal? This is where FusiX platform offers its versatile approach, abstracting information of the connected sources, optimizing and finally presenting the relative results to the end user.

Even though, fully automated systems with full control over a building exist, these systems impose investments in expensive equipment for accurate measurement and control (smart sensors, temperature, air quality, etc.) or even renovation of some very old buildings. The real game changer in this area, is the final user engagement in a way they form an integral part of the solution. It is believed that an automated user-driven IEMS which provides the user the knowledge required to solve the problem and optimize specific criteria (e.g. economy versus thermal comfort) will highlight the user as an efficient contributor in terms of expenses. So raising their energy awareness can prove extremely vital for the sustainability of the energy saving attempt.

To address the aforementioned challenges, a FusiX-based IEMS was built during the PVadapt H2020 project. In section 2 the market leading products in this area are discussed. In section 3 the features that distinguish FusiX DSS platform as a great candidate for IEMS deployment are presented in detail, while in section 4 iReact-NG and PVadapt use cases are presented.

2. CURRENT TOOLS AND METHODS

Several tools are oriented to the monitoring, managing and optimizing energy consumption and provide a stable base for the next steps of Energy Management Systems evolution. The leading companies in the market are present with the following products:

- Schneider Electric EcoStruxure™ Building is a platform of interoperable and scalable applications, designed to provide management on building assets and prognoses maintenance needs. (Schneider 2020)
- Honeywell EBI-600 provides its user the tools to run smarter buildings focused on comfort, enhanced security and decreased expenses. EBI is an open, scalable solution that works with a wide range of third-party equipment and software. (Honeywell 2020)
- Trend IQVISION SUPERVISOR is a building monitoring and management solution capable of integrating Trend controllers, third party devices and internet protocols into a centralized software platform that is designed to manage buildings at an enterprise level. IQVISION serves real-time graphical information to standard web-browser clients and also provides server-level functions such as: centralized data logging, archiving, alarming, trending, master scheduling, system-wide database management, and integration with enterprise software applications. (Trend 2020)
- Siemens Synco™ is a building automation and control system for small and medium-size buildings offering monitoring and control for HVAC systems, supporting this way the entire lifecycle of the building. (Siemens 2020)
- Cylon Controls offer a variety of connected Building Energy Management Solutions scalable for automation and energy control of any size commercial or industrial building. With an interoperable open

protocol solution aims to decrease buildings efficiency by monitoring and regulating consumption every 15 minutes. (Cylon 2020)

Some of the tools mentioned above are mainly management systems at the building's level, regulating assets like lights, HVAC, elevators, security systems etc. and others are mainly modelling tools, which try to identify a building's behavior and optimize through the operation of the next 24 hours. However, the main focus of all of them is the centralized collection and visualization of the energy data and then the presentation of user friendly notifications in case of unexpected behavior or in case of users misbehave in relation to the energy consumption.

In order to improve the capabilities and deal with the inefficiencies of the above solutions, FusiX provides the base to consolidate heterogeneous sources in a decentralized way, building powerful decision support systems for energy management, which can cover a very wide range of needs.

3. FUSIX DSS DEVELOPMENT FRAMEWORK

FusiX is a customizable platform used in the development of DSSs. Its main goal is to abstract and virtualize data sources as well as every application-related piece of data generated or consumed by the system. This is achieved by abstracting the data using an expandable meta-model which can be tailored for the needs of the corresponding application. This corresponds to the application's information model which is, in fact, a conceptual and formal description of the nature of the data managed by the system. Format- or protocol-specific data are converted to information model data and can be then handled in a format- or protocol-independent manner.

FusiX follows a decentralized architecture where the FusiX system is comprised by interconnected FusiX Nodes (Fig. 1). These nodes are generally deployed on servers, smart devices or embedded hardware in order to interface with the services, sensors, or actuators of each system. The nodes are connected in a macro-network so that each node can communicate with the other connected nodes and seamlessly use the operations it provides. The operations of each node are defined in high-level scripts which are launched as independent agents. Agents either connect FusiX with external devices/sensors/services or perform some kind of processing on the data.

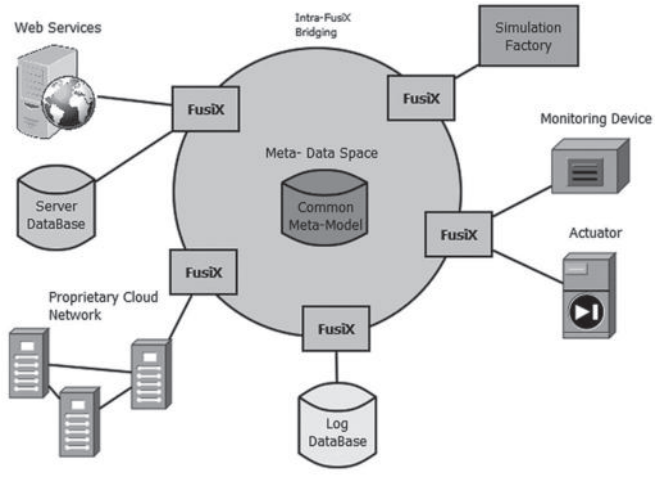


Fig. 1: FusiX High Level Architecture

Moreover, FusiX provides natively some of the most common services that the DSS usually needs. These services include scheduling and synchronization mechanisms, data storage, a web-based GUI interface and

a cetralized logger service. It also provides a fully functional simulation environment to be used for predictions or system optimizations and allows a system engineer to incorporate different resources into a single intelligent system quickly and efficiently. In this way, it enables the rapid development and deployment of applications that access, process and integrate data from various local or remote resources. It performs these operations by providing three conceptual components:

- Fully customizable computational nodes, called Agents, which perform any kind of operation such as connecting to external resources or implementing user functionalities, timekeeping, etc.
- The Information Model, is a meta-model structure that allows for high-level seamless and complex querying for system resources regardless of their actual location.
- A scalable and robust virtual environment for the agents to execute on and communicate efficiently.

To support the building of DSS applications, FusiX provides a variety of external components that are bundled together within the framework:

- A Graphical User Interface (GUI) builder and a web interface for this GUI
- Database Storage facilities and appropriate virtual interfaces
- A Parallel Discrete Event Scheduler
- A complete real-time Simulation Framework
- An Information Model layer to abstract data points and functionality, it order to allow reuse

It can be seen that, the objective of FusiX is to enable a system engineer of any discipline, given the descriptive information model and some basic infrastructure and data handling mechanisms, to build an arbitrarily complex data-processing system and rapidly prototype any functionality using high-level scripts in an implementation-independent manner and all this into a virtualized environment. FusiX is tailorable to serve any application that requires real-time control and monitoring, data aggregation and prediction functionalities.

Last but not least, FusiX is extensible and scalable. Extensible by incorporating additional data sources and providing the required adapter agents along with their information model. And scalable by distributing the system to several computational nodes, each communicating in a peer-2-peer manner inside the cloud.

FusiX is already used in a market-ready product (iReact-NG) and three ongoing H2020 project (PV-adapt, E-DYCE and PRELUDE).

4. FUSIX-BASED INTELLIGENT ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS

The profound usability of FusiX platform, gave birth to several real applications that are already deployed or under construction. It is worth to mention that already 150 power distribution substations of the Greek Transmission System Operator are under supervision of a decision support system, named iReact-NG, built on FusiX.

4.1 IREACT-NG USE CASE

Using the FusiX technology, an integrated software for reactive-load management in power distribution substations, called iReact-NG, has been developed. It is a complete information fusion environment, able to acquire and aggregate real-time information coming from all distributed automation units and sensors (SCADA), analyze and use historical data and service data analytics (Historian), as well as perform real-time simulations (Fig. 2). This complicated simulation framework is called “Smart-Grid Parallel Universe” which consists of a realization of a simultaneous simulation execution of “identical” smart-grid topologies under investigation, fused with data-bases maintaining historical knowledge, real-time measurements, and introduction of contingency events. FusiX’s intelligent processes gather information and perform itera-

tive calculations, in order to spawn smart-grids' "Big-Bangs", creating new simulations of parallel universe instances, or even terminate other parallel universe instances that seem improbable to occur in the future. With iReact-NG the feasibility of controlling large data, supervising locations over cloud and managing different topologies from a single computer, is proven.

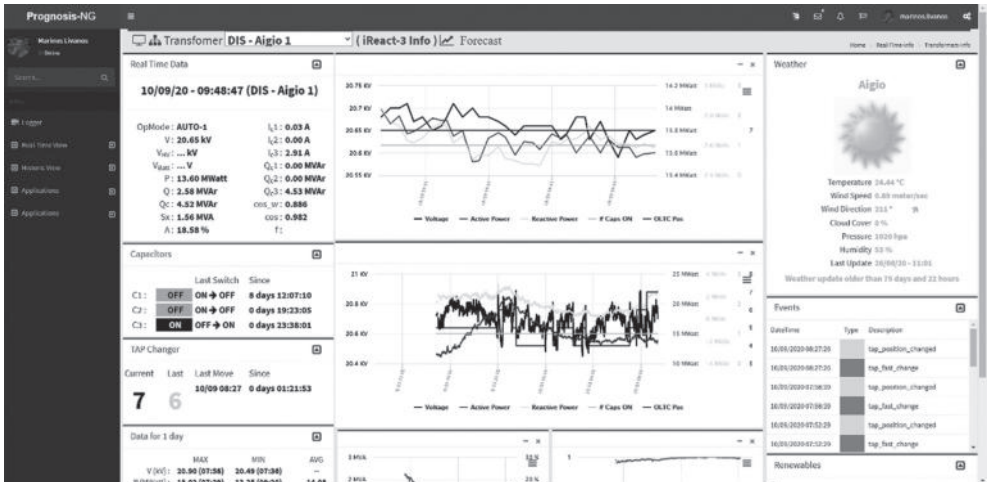


Fig. 2: i-React-NG SCADA main dashboard

4.2 PVADAPT USE CASE

PVadapt is an ongoing H2020 project, aiming to create an adaptable and multifunctional Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system, as well as an Intelligent Energy Management System (IEMS) for optimized building energy production/consumption, and minimized dependency on the electricity grid, while satisfying the users' comfort constraints. For the deployment of these BIPVs, several demo sites are selected to accommodate those installations, which will also be equipped with a Smart Envelope System that manages the buildings assets.

4.2.1 Smart Envelope System

Under the Smart Envelope System, a DSS for intelligent energy management featuring grid connectivity, load prediction and shifting, and predictive algorithms is being developed, based on FusiX. This IEMS will integrate heterogeneous send parameters, spanning from weather conditions and solar radiation to electrical power and water/air quality. It is also required to control the flow of energy between the energy consumption components and storage components and/or the power grid. The system is also capable to monitor the real-time power pricing and manage the storage and production components accordingly, in order to maximize profit or minimize the operational daily costs. A model predictive control algorithm is also integrated to describe building's behavior in order to identify future heating or cooling needs. (Veynandt et al. 2020) Additionally, the system analyses values of energy production, predicted production, equipment characteristics and past observations, and based on machine learning regression algorithms it allows the early detection of downward trends and malfunctions in support of the system's predictive maintenance (Meintanis et al., 2020).

4.2.2 Tailoring per demo-site

This multi-module system uses FusiX as an integration service to bring together the various tools and services, provided from the PVadapt partners, in a unified application and also to provide the corresponding GUI. In the context of the project a specific application per demo site is deployed, including all the control algorithms and modules related to the specific site.

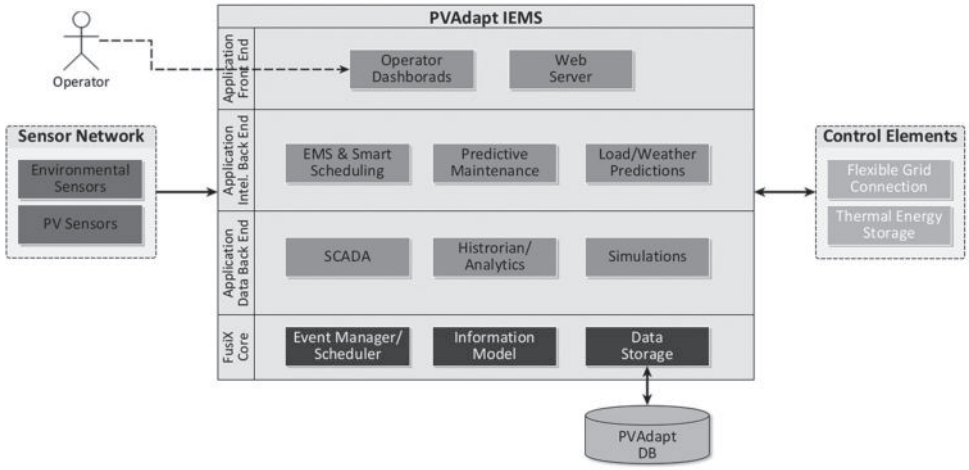


Fig. 3: PVadapt application main architecture

As Fig. 3 above depicts, the software provides:

- All the necessary bridges with the external services and sensor networks
- Appropriate storage mechanism to store data moving through the application
- Detailed Information Model holding all data specific information for each application
- Appropriate mechanisms to allow alert definition and execution depending on threshold violations and other constraints of the system's input and output data
- Customizable front end with appropriate user friendly interface for user interaction

New services and external tools can be easily integrated in this platform, enhancing adaptability to new technological challenges or alternating customer needs.

4.2.3 User Interface

Particular weight has been also given to the construction of a user interface that promotes the consistent participation of the user. Energy awareness is a key point in the effort of energy saving, so it has to be dealt exceptionally in order to be engaged and active. To facilitate the different user needs and expectations, several user groups have been defined:

- **System Administrators**. Users responsible for handling the IEMS application itself. They require a way to measure the performance and generally control the application itself in terms of scaling, security management and user management.
- **Professionals**. Users with the technical know-how to control the IEMS application and understand advanced metrics. As such technical oriented data is provided to them along with appropriate Key Performance Indicators (KPIs).
- **End-Users**. Final consumers not concerned with system's operation. As such, simpler metrics and KPIs are presented to them with no or very limited control functionality.
- **Business Analysts**. Personnel of organizations with main interest on economical and higher level analytics. Example users: Energy Providers, Large/Office building administrators.

The application is conceptually segmented to certain groups of pages so that the groups of users can interact with more than one group of pages (Fig. 4).

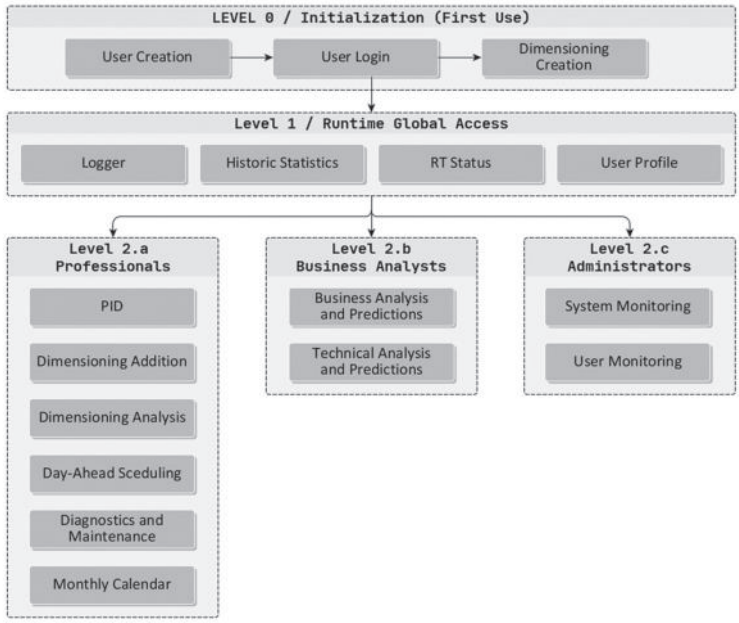


Fig. 4: Schematic representation of the GUI segmentation

Every single page of the above is further tailored according to the user accessing them. For example, while a main dashboard may be available to all users as a landing page, different users will see and access different features of this page. This clustering is oriented towards the desired awareness we want to achieve at the user end. The main groups of PVadapt pages are:

- **Dimensioning**. Page(s) that concern the configuration of a building in terms of main properties (ex. Location, Surface Area, Orientation, etc.)
- **SCADA**. Page(s) that concern the visualization of real time information to the users and the facilitation of control facilities.
- **Analytics**. Page(s) that concern higher level and historic visualization of gathered information. This includes simulations and predictions.
- **Administrative**. Page(s) that concern the control of the application itself.

Last but not least, like every modern software application, a consolidated mobile application is developed in order to provide the user with quick view, statistics and critical alerts.

4.2.4 Dimensioning Tool

In the context of PVadapt a Sizing Tool (Fig. 5) for PVs or photovoltaic thermal collectors (PVTs) and Green Walls (GWs) is also being developed.



Fig. 5: Investment proposition based on area selection on a virtual map

Users such as individuals or professionals will be able to conduct in depth calculations and derive scalable propositions for green energy production, in terms of electricity or a combination of electricity and thermal energy. Should the filtering of grey water be the case, the alternative of GW installations is also examined. An overview of the amount of grey water, that can be filtered per square meter of GW, can be easily calculated, as well as the derived liters of low quality water for laundry, flushing or irrigation activities.

The suggestions are able to consolidate the needs of the customer/investor, based on several parameters, having as a goal to return a plan expressed on financial indicators for better understanding of the user. Such indicators are the payback period of the initial investment as well as the expected revenue in the lifetime of the PVs, PVTs or GWs accordingly.

4.2.5 SCADA

The SCADA system of the PVadapt application concerns the real-time monitoring and control of the building site under observation. The SCADA is tailored for each building to support the available sensors and control options. The agent-based approach provided by the underlying FusiX platform allows for this tailoring to take place mostly based on text-based configuration with no change of source code elements. Apart from configurable sensors and control elements, it is also possible to tailor more generic settings such as refresh rate and caching window.

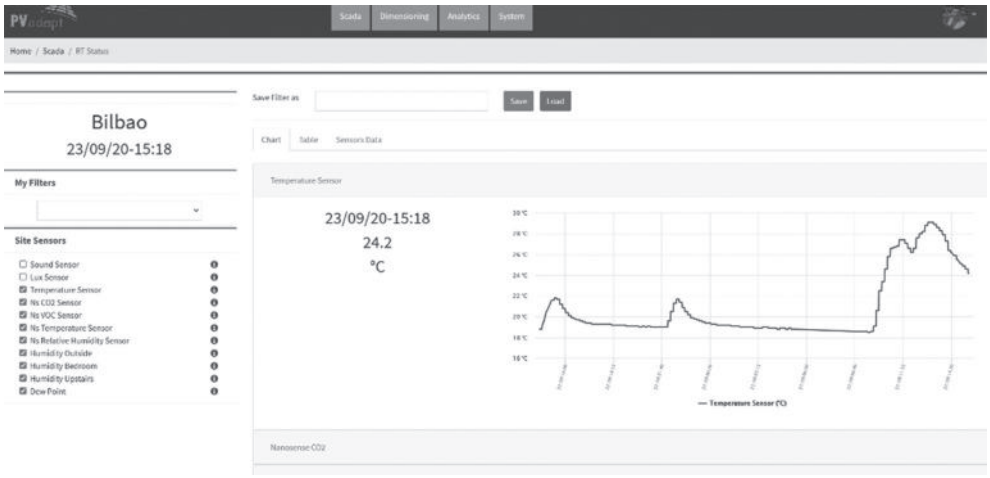


Fig. 6: SCADA view (simple user)

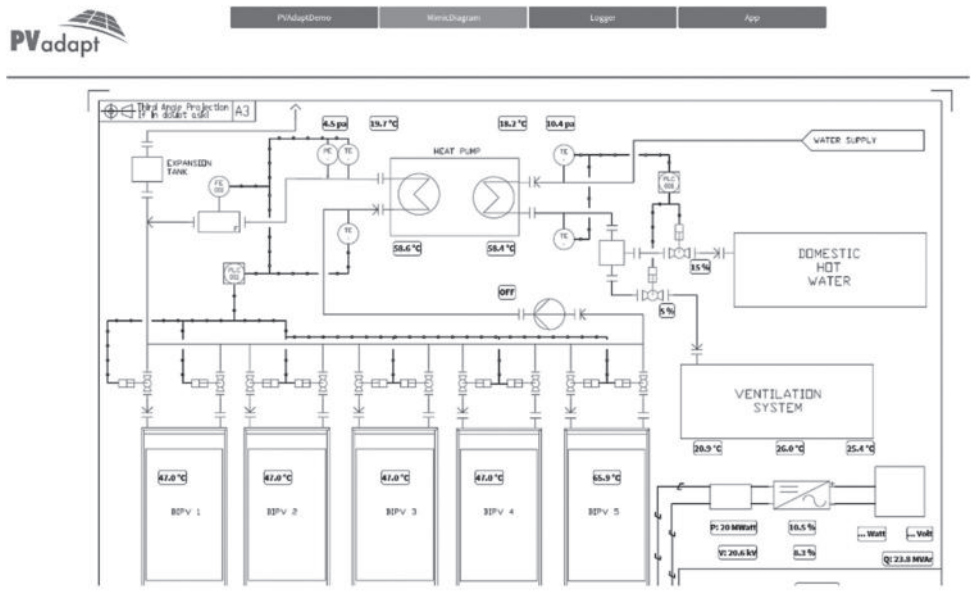


Fig. 7: SCADA views (building administrator)

In terms of user-interface, and based on the principles previously defined in section 4.2.3, users are provided information relevant to them based on their classification. For example a simple end-user will view a high-level representation of the building's status (Fig. 6) without the ability to perform control actions. An expert user on the other hand will be able to interact with the building's P&ID diagram in order to both view and control the building operations from a schematic representation (Fig. 7).

4.2.6 Analytics

The analytics components of the PVadapt application concerns aggregation of data and predictions. Specifically, data gathered from external sources (sensor networks, weather service, etc.) can be aggregated in a number of ways to provide valuable insights in terms of the site's operation and performance. For example, useful aggregate events can be produced for a building's maintenance needs based on tracking and comparing the nominal and actual curves of PV elements or batteries and cross-referencing them against weather information.

Predictions are produced by specialized algorithms and estimate key values of the system. In the current context, predictions can also be based on dimensioning profiles, discussed earlier, to provide appropriate user groups sufficient information on extending a building's configuration. Fig. 8 demonstrates a simple mockup of a 24 h window prediction for insolation and temperatures.

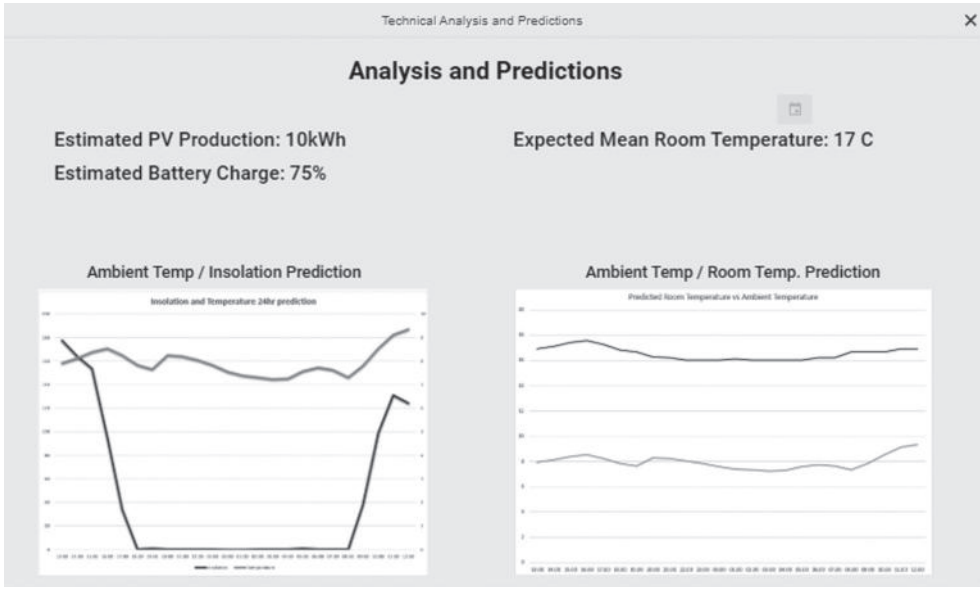


Fig. 8: Current status analysis and prediction

5. CONCLUSIONS

To sum up, modern Energy Management Systems have to deal with numerous challenges to efficiently optimize both economic and environmental criteria, as well as to satisfy the user comfort. These challenges span from handling different technological systems, such as renewable resources and legacy systems, to predicting weather conditions and load energy production/consumption. The end user behavior patterns, their motivation and long-term engagement to contribute in this optimization effort has been also discussed. In order to support the users in their decision making process, an Intelligent DSS has to be provided. In this paper, the FusiX-based DSS platform for IEMS was presented, along with two real cases of its usage (iReact-NG and PVadapt). The FusiX-based DSSs feature many characteristics that are vital for the development of such systems such as: application abstracted information model, agent-based decentralized architecture, data sources infusion and storage, data and simulation analytics, alerting system and a web-based user interface.

Finally, the inclusion of new technologies, such as vehicles connected to grid or dynamic energy certifications for buildings, as well as the application's gamification for longer-term engagement of the user are

some of the future steps for FusiX-based applications. Last but not least, the system will be able to communicate with multiple smart buildings, thus further optimizing their energy usage/production and/or storage capabilities, forming this way large communities of smart buildings, which have common management point.

6. REFERENCE

Cylon (2020) Cylon Controls Ltd (ABB) Available online: https://www.cylon.com/ (accessed on 24/09/2020)

Honeywell (2020) Honeywell Building Technologies EBI-600 (2020) Available online: https://buildings.honeywell.com/en-us/solutions/optimization/building-management-systems/ebi-600 (accessed on 24/09/2020)

Meintanis I., Livieris I., Monios N., Kampourakis M., Fourakis S., Kyriakoulis N., Kokkorikos S., Chondronasios A. (2020) An Integrated Framework for Building's Energy Management based on Deep Learning. Enova - International Conference 2020, 26-27 November 2020, Fachhochschule, Pinkafeld, Austria.

Schneider (2020) Schneider Electric EcoStruxureTM Building Energy Management Solutions. Available online: https://www.se.com/ww/en/work/solutions/building-management/#Featured%20Solutions (accessed on 24/09/2020)

Siemens (2020) Siemens AG SyncoTM. Available online: https://new.siemens.com/global/en/products/buildings/automation/synco.html (accessed on 24/09/2020)

Trend (2020) Trend Control Systems Ltd. IQVISION SUPERVISOR Available online: https://partners.trendcontrols.com/trendproducts/cd/en/ecatdata/pg_gr-iqv.html (accessed on 24/09/2020)

Veynandt F., Heschl C., Klanatsky P., Plank H. (2020) Complex glass façade modelling for Model Predictive Control of thermal loads: impact of the solar load identification on the state-space model accuracy. International Conference enova2020, 26-27 November 2020, Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria.

7. ACKNOWLEDGMENT

This work has received funding from the Innovation and Networks Executive Agency (INEA), European Commission H2020 project PVadapt under Grant Agreement n° 818342 (http://www.pvadapt.com). iReact-NG has been co-financed by the European Regional Development Fund of the European Union and Greek national funds through the Operational Program Competitiveness, Entrepreneurship and Innovation, under the call RESEARCH –CREATE –INNOVATE (project code:T1EDK-00244).

An Integrated Framework for Building's Energy Management based on Deep Learning

I. Meintanis, N. Monios, I.E. Livieris, M. Kampourakis, S. Fourakis, N. Kyriakoulis, S. Kokkorikos & A. Chondronasios
Core-Innovation, Kallirois 85, 11745, Athens, Greece

ABSTRACT: Forecasting the building energy consumption constitutes a significant factor for a wide variety of applications including planning, management and optimization. Nowadays, research is focused towards the development of more efficient and sustainable energy management systems which focus on minimising energy waste. These systems are based on intelligent models, which provide accurate predictions of future energy demand/load, both at aggregate and individual site level. In this work, we present a holistic integrated solution for the buildings' energy management systems using deep learning methods. The proposed solution is based on efficient deep-learning forecasting models for short-term local weather parameters and energy load consumption. The developed forecasting models are integrated into the smart energy management system of the building for taking the proper decisions to ensure efficient utilization of energy resources.

1. INTRODUCTION

Nowadays, the economic growth and the increase of human population lead to acceleration of rate energy consumption while building energy consumption accounts for a significant proportion. Worldwide, the building sector is the largest primary energy consumer as well as the largest contributor to the greenhouse gas emission (Pérez-Lombard et al. 2008). For example, in the US and China statistical data reveal that buildings are responsible for more than 40 % of global energy use and one-third of global greenhouse gas emissions (Timoshenko & Berman 2017). To this end, the improvement in the efficiency of building operational performance and its enhancement could save significant amounts of energy, increase indoor comfort, reduce greenhouse gas emissions and reduce stress on the electric grid.

The process of better understanding and improving buildings' energy performance is a critical and significant step towards sustainable mitigation of global climate change. Therefore, the development of an efficient building energy monitoring system is considered essential for improving building operations in order to reduce energy waste and ultimately increase efficiency. Essentially, these systems will provide a deep insight in identifying retrofit opportunities for existing buildings and provide guidelines to improve the design of new buildings. Nevertheless, energy load monitoring and analysis is generally considered as a significantly challenging and complex problem since it is affected by several factors which are characterized by spatio-temporal variability. Buildings' energy monitoring and analysis has a long history in industrial and scientific community. During the last two decades, the advances in digital technology and storage capabilities lead to the enrichment and the accumulation of a large amount of building operational time-series data. This new data-driven era enabled the development of advanced deep learning models for predicting buildings' energy and state.

The main reason for this considerable popularity is their remarkable ability to support decision-making considerations such as ways of reducing energy waste and cost. Additionally, since energy consumption can be considered as a time series problem, deep learning methods constitute the appropriate methodology for dealing with the noisy, highly non-linear and usually chaotic nature of time-series data (Livieris et al. 2020). Li et al. (2017) attempted to exploit the advantages of stacked autoencoders (SAEs) and Extreme Learning Machine (ELM) for the development of a building energy consumption prediction model. More specifically, SAE were utilized to extract the building energy consumption features, while the ELM was used as a predictor for obtaining accurate predictions. Their preliminary experimental analysis presented some prom-

ising results. Mocanu et al. (2016) proposed a forecasting model based on Factored Conditional Restricted Boltzmann Machine. They utilized four-year data of one-minute resolution electric power consumption, which were collected from a residential customer. Their experimental results revealed the effectiveness and forecasting accuracy of their proposed model. Fan et al. (2019) investigated the performance of fully connected autoencoders, convolutional autoencoders and generative adversarial networks in automatically deriving high-quality features for building energy predictions. Their motivation was based on the forecasting ability of a prediction model could be improved though feature engineering. Their experiments highlighted the efficacy of their approach and showed that the derived features were able to provide useful information from the original data. Independently, Wang et al. (2015) and Deb et al. (2016) conducted some excellent surveys in which they comprehensively presented buildings' energy prediction models based on data mining methodologies. Furthermore, they highlighted the significance of energy monitoring for planning and energy optimization of buildings and campuses and they attempted to provide a deep insight by identify the factors which affect it. Along this line, Mason and Grijalva (2019) presented a comprehensive review focusing on the application of newly proposed reinforcement deep learning to developing autonomous building energy management systems.

The software architectural style selected for the deployment of the prediction tools is based on microservices. Such Service-Oriented Architecture (SOA) offers great abilities in a Continuous Integration (CI) / Continuous Delivery (CD) environment, such as: (i) deployment, (ii) increased modifications, and (iii) strong resilience to architectural erosion. Unlike traditional monolithic application architecture, where all the functionality is into a single process and it is scaled by replicating the application on multiple servers, the utilized microservices architecture puts each element of functionality into a separate service and it is scaled by distributing the services across servers, replicating as needed. The advantages of such architecture are the shorter deployment times, simpler deployment procedures, zero-downtime releases and easier modifiability (as defined by Chen 2018, Chen & Ba 2014) which translates to shorter cycle times for small incremental functional and quality changes.

In this work, we propose a new and complete framework for building's energy monitoring based on deep learning methodologies. The proposed framework is based on efficient prediction models which forecast key short-term weather parameters (temperature and insolation) as well as energy load demand. The rationale behind our approach is that short-term weather forecasting and analysis constitute a key role for estimating the future energy demand and hence the efficient management of energy resources, respectively. The developed forecasting models are going to be integrated into the smart energy management system of the ENERGETIKUM demo-site building for taking the proper decisions to ensure efficient utilization of energy resources. Our aim is that the proposed approach could be used as a reference for efficient decision-making in the context of PVadapt Project, but also can be adapted to new use-cases (pilot buildings) as well.

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2, presents the proposed weather and energy load foresting models including the data preparation and pre-processing for each model as well as the detailed experimental analysis and the evaluation of proposed models. Section 3 presents the microservices architecture used for gathering data from online services and sub-systems and preparing them for feeding the models in order to get real-time predictions. Finally, Section 5 presents our conclusion and the findings of this work.

2. PROPOSED WEATHER AND ENERGY LOAD FORECASTING MODELS

In this section, we present the two forecasting models for the prediction of short-term local weather conditions and energy load based on deep learning methodologies.

For determining the network structure and hyper-parameters for both prediction models, we conducted an exhaustive experimentation, namely utilize different number of the LSTM and dense layers, different number of neurons in each layer, etc. The selected loss function was Mean Square Error (MSE) while the Adaptive Moment Estimation (ADAM) algorithm (Kingma & Ba 2014) was used as the optimizer together with schemes for adapting the learning rate through the epochs of training. Finally, the implementation code was written in Python 3.7 while using the Tensorflow-Keras backend (Chollet 2018).

2.1 WEATHER FORECASTING MODEL

2.1.1 Modelling

For the prediction of short-term weather conditions (temperature and insolation), we developed a forecasting model based on Deep Recurrent Neural Networks (RNNs), which was trained with historical (local) weather data and provide hourly temperature and insolation predictions for the next 24 hours. More specifically, the historical data concerns Burgenland location in Austria and were collected by online weather service (www.meteo.com), covering the period from Jan-01, 1985 to Dec-31, 2018. This results in more than 300,000 hourly observations of weather variables including: temperature (°C), relative humidity (%), pressure (hPa), cloud coverage (%), shortwave radiation (W/m²), sunshine duration (min.), total precipitation (mm), and wind speed (m/s). The data were divided into approximately 80 % samples for training and the rest 20 % for testing the generalization performance of the model. More specifically, the training samples cover the period from Jan-01, 1985 to 31-Dec 2012, whereas the testing set consist of observations from the last 6 years of the given dataset. Finally, the data were pre-processed to eliminate outliers and fill any bad values.

The architecture of the forecasting model consists of:

- LSTM layers with 50 units using ReLU as activation function.
- Pooling layers (for downscaling feature maps).
- Two fully connected layers of 64 and 32 neurons, respectively using ReLU as activation function.
- Output layer of 48 neurons with a linear activation.

Finally, weight regularization (L2) was added to our model in order to reduce the difference between the bias error and the validation/testing error, and hence the model was able to better generalize in unseen data. The model output consists of 24 nodes, i.e. one node for each hour to predict ahead, for each target variable (temperature and insolation).

2.1.2 Numerical experiments

For evaluating the prediction efficiency of the forecasting weather model, we plot the distribution of prediction errors, i.e. true(i) - prediction(i) for each test observation(i) (Fig. 1). Clearly, the prediction error is considerably low regarding both target values; thus, we can easily conclude that the model's prediction and generalisation performance are considered successful. Fig. 2, show snapshots of temperature and insolation predictions for 24 hours ahead. The interpretation of the results reveal that the model provides accurate predictions for both target variables (temperature – left plot, insolation – right plot), although temperature predictions show a slightly higher error than insolation.

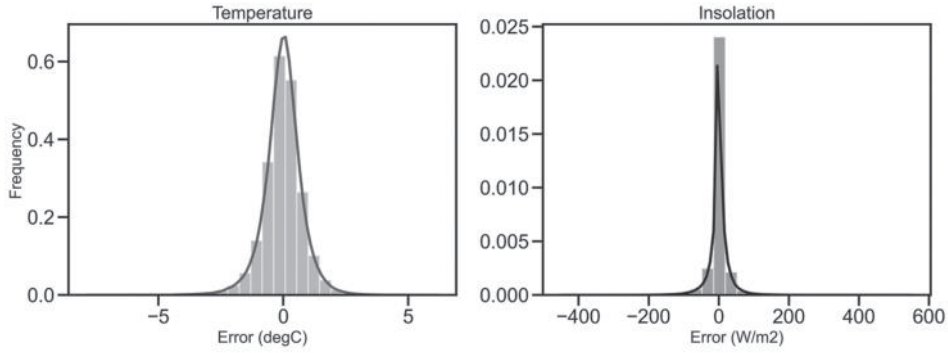


Fig. 1: Prediction error distributions for the weather model in test set.

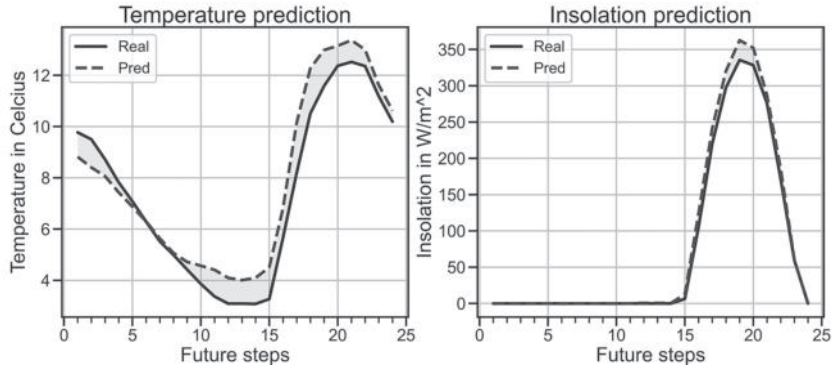


Fig. 2: Temperature and insolation predictions for a random 24-hour interval in UASB building.

2.2 ENERGY LOAD FORECAST

In the sequel, we present the development of short-term load forecasting model for a single lab building (ENERGETIKUM, UASB) that is served as demo-site in the context of PVadapt project.

2.2.1 Modelling

The collected data concern historical energy observations from the living lab ENERGETIKUM, referring to the electrical indoor consumption and covering a period of 2 years (from Mar-2018 to Mar-2020). The sampling rate of the energy meter is approx. 10 seconds, however in order to synchronize it with the weather forecast system (Section 3.1) we resampled the raw data into hourly observations. This results in 24 data points per day, or 8760 data points within a year. Fig. 3, presents a snapshot of the yearly electrical load profile of the living lab ENERGETIKUM (from Mar-2018 to Mar-2019) and the corresponding outside temperature for the same period.

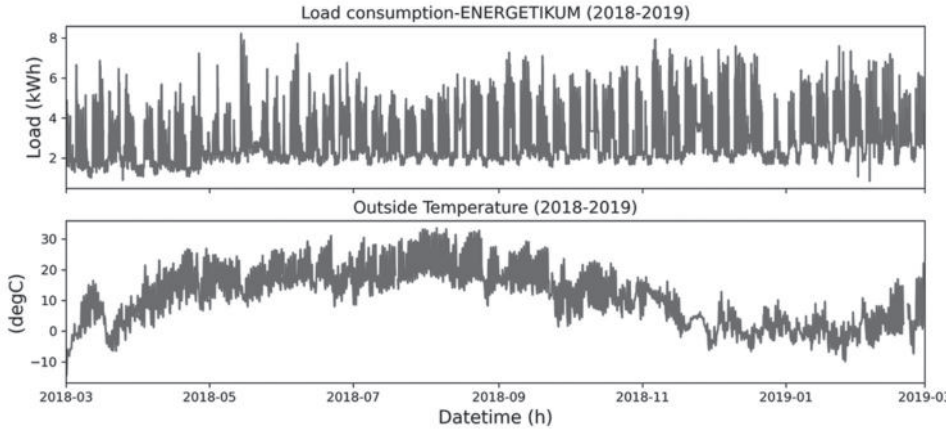


Fig. 3: Electrical load consumption of Lining Lab ENERGETIKUM based on historical measurement data.

Specifically, the input variables of the model are: i) total electrical load (kWh), ii) outside temperature (°C), iii) solar irradiation (W/m²), iv) datetime inputs (hour of day, weekday etc.) and v) holidays and weekends indicators. To capture the daily and weekly patterns of the electricity demand, the input layer's time step was set to 96 hours.

The architecture of the energy load forecasting model consists of:

- Two RNN layers with 50 units each, using sigmoid-type activation function for the input, forget, and output gates, whereas for the activation gate a hyperbolic tangent function was used.
- A fully connected layer of 32 neurons, using ReLU as activation function.
- Output layers of 48 neurons with a linear activation

The performance of the proposed model for forecasting short-term electricity demand (24 hours ahead) was tested using the last 3 months of the available historical observations.

2.2.2 Numerical experiments

Fig. 4, presents a graphical comparison of the true electricity demand during Jan-2020 and the electricity demand forecasted by the proposed RNN model. For better visualization weekly and 3-day periods are presented in Fig. 5 and Fig. 6, respectively.

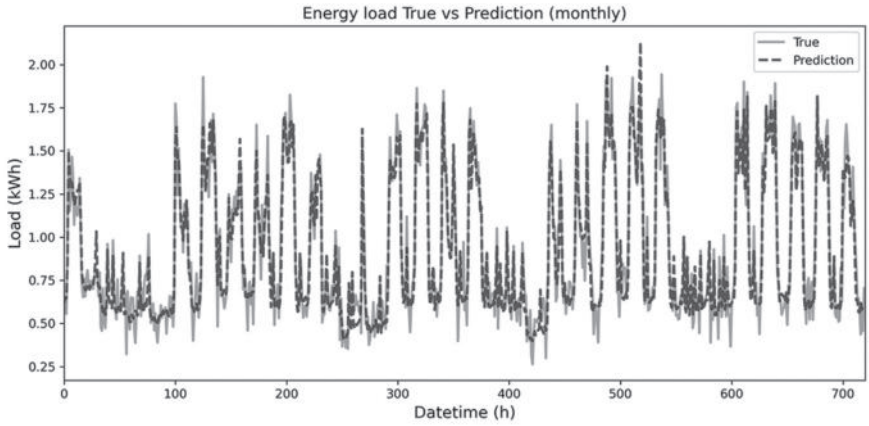


Fig. 4: True consumption vs. model predictions for whole month (January 2020).

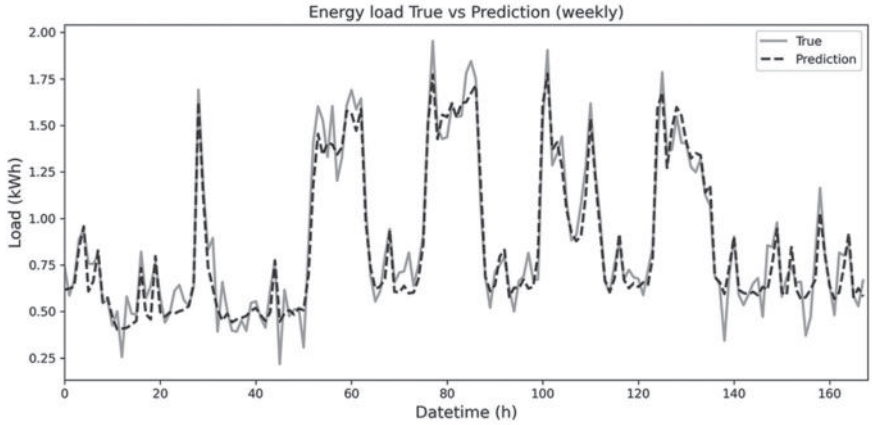


Fig. 5: True consumption vs. model predictions for a week in January 2020.

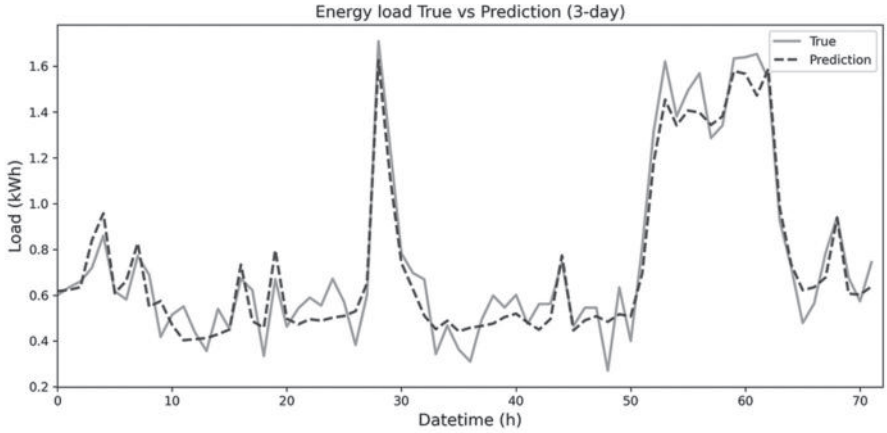


Fig. 6: True consumption vs. model predictions for 3-days in January 2020.

The interpretation of Fig. 5 shows that the electricity demand exhibits rapid fluctuations daily and follows a weekly pattern with very low consumption in the weekends. This can be also verified from Fig. 6 where we can see that between hours ~60 – 110 (~48 hours) the load consumption is at lowest levels. From the model evaluation analysis, we deduct that the proposed forecasting model exhibited few deviations, especially when we have rapid fluctuations within the day, however, it appears that captures the short-term load consumption pattern with high accuracy.

Fig. 7, presents the forecast error distribution for the whole test set, i.e. the deviation between the actual and forecasted values. As it can be observed the majority of the error values are within +/- 0.2 kWh with very few error points with amplitude ~0.7-0.9 kWh.

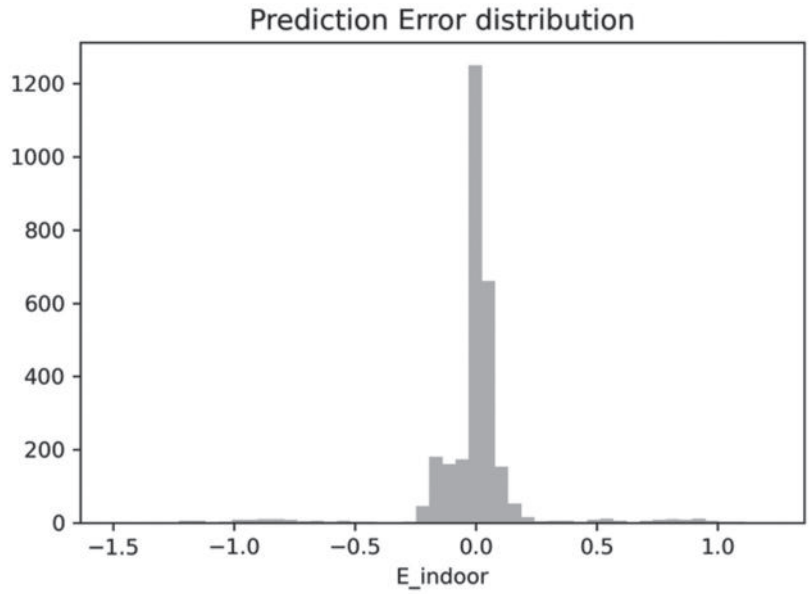


Fig. 7: Forecast error distribution for the validation/test sets.

4. INTEGRATION & DEPLOYMENT FOR REAL-TIME INFERENCE

In the context of this work, the microservices architecture was used in order to gather data taken from online services and sub-systems, prepare them for feeding the models, cast predictions or detect anomalies, transmit the predictions to remote servers or to the cloud, and store them in an external database for future calibration. Fig. 8, presents the utilized microservices architecture.

The Data Receiver block is a containerized (Docker) application that is responsible for receiving data from an external database via a Publish-Subscribe (e.g. MQTT, Orion context broker, etc.) method or from an online service via REST API using HTTPS protocol. In the case of the Publish-Subscribe method, the endpoint of the Data Receiver is hidden behind a proxy, in order to secure it. Upon received, the data are stored to a docker-based local database. Periodically, every 1 hour, the Data Preprocessing block, which again is a Docker-based application, queries the database for all the data that have been received for the past one hour. The queried data pass through statistical processes for filtering and in order to fill possible missing values (using extrapolation) and are then stored as timestamped data frames to the database.

The Model Input/Output Forwarder block also works periodically. This block is again a Docker-based application. Its purpose is to query the database for the processed timestamped data and send them to the appropriate ML models, which are hosted as servables in a TensorFlow Serving container. The communication between the two blocks is achieved through REST API. Once the outputs of the ML models have returned to the Forwarder, they can be transmitted to remote servers or services via REST API. The outputs are also saved to the database for future use.

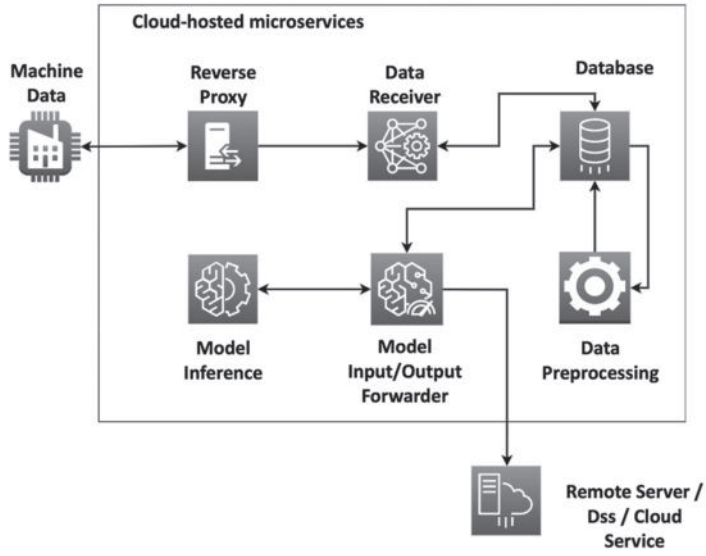


Fig. 8: Microservices-based cloud implementation.

5. CONCLUSIONS

In this work, a new holistic integrated solution for the buildings' energy management systems using deep learning methods was presented. The proposed approach is based on efficient deep-learning forecasting models for short-term local weather parameters, energy load demand and energy generation from PV arrays. The developed models were integrated via a micro-services architecture with the smart energy management system of the demo-site building for supporting the decision-making.

It is worth mentioning that short-term weather forecasting is a crucial contributing factor for estimating future energy demand in buildings, while forecasting short-term electricity demand in residential buildings is considered essential for efficient power-system planning and energy management. To this end, the proposed forecasting tools constitute necessary components for planning in energy system and play a significant role in the operational decision making.

Our main objective and expectation is that the proposed approach could be adapted also outside of the scope of PVadapt Project, as a reference for efficient decision-making and provide better services by offering customized assistance according to predicted energy performance.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has received funding from the Innovation and Networks Executive Agency (INEA), European Commission H2020 under Grant Agreement No.: 818342, PVadapt project (www.pvadapt.com).

REFERENCE

Chen L. (2018) Microservices: Architecting for Continuous Delivery and DevOps, IEEE International Conference on Software Architecture.

Chen L., Babar M.A. (2014) Towards an Evidence-Based Understanding of Emergence of Architecture through Continuous Refactoring in Agile Software Development, in Software Architecture (WICSA) IEEE/IFIP Conference, pp. 195-204

Chollet F. (2018) Deep Learning mit Python und Keras: Das Praxis-Handbuch vom Entwickler der Keras-Bibliothek. MITP-Verlags GmbH & Co. KG.

Deb C., Zhang F., Yang J., Lee S. E., Shah K. W. (2017) A review on time series forecasting techniques for building energy consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 902-924.

Fan C., Sun Y., Zhao Y., Song M., Wang J. (2019). Deep learning-based feature engineering methods for improved building energy prediction. Applied Energy, 240, 35-45.

Kingma D. P., Ba J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980.

Li C., Ding Z., Zhao D., Yi J., Zhang G. (2017) Building energy consumption prediction: An extreme deep learning approach. Energies, 10(10), 1525.

Livieris I. E., Stavroyianni S., Pintela E., Pintela P. (2020) A novel validation framework to enhance deep learning models in time-series forecasting. Neural Computing and Applications, 1-19.

Mas K., Grijal S. (2019) A review of reinforcement learning for autonomous building energy management. Computers & Electrical Engineering, 78, 300-312.

Moca E., Nguy P. H., Gibes M., Kli W. L. (2016) Deep learning for estimating building energy consumption. Sustainable Energy, Grids and Networks, 6, 91-99.

Pérez-Lombar L., Orti J., Po C. (2008) A review on buildings energy consumption information. Energy and buildings, 40(3), 394-398.

Timoshen A., Berm M. (2017) The United Nations Environment Programme and the United Nations Development Programme. In Greening international institutions (pp. 38-54). Routledge.

Wan Z., Srinivasa R. S. (2015) A review of artificial intelligence-based building energy prediction with a focus on ensemble prediction models. In 2015 Winter Simulation Conference (WSC) (pp. 3438-3448). IEEE.

Complex glass façade modelling for Model Predictive Control of thermal loads: impact of the solar load identification on the state-space model accuracy

F. Veynandt, C. Heschl, P. Klanatsky, H. Plank
Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT: Above and beyond improving the efficiency of the building envelope and the energy supply system, the demand-side flexibility in terms of load shifting and peak reduction are vital factors in further increasing the share of volatile renewable energy sources. The thermal activation of building components, like floors and ceilings, enables the cost-effective potential for short-term energy storage to fulfil these requirements. In order to exploit the storage capabilities of active building systems, a reliable model predicted control (MPC) approach is required. However, primarily if a large glass façade element is utilised, the appropriate modelling of solar loads is critical for an effective MPC operation. Hence, based on a dynamic building simulation tool, a characteristic map for the solar load prediction of a glass façade system in combination of external venetian blinds was generated to enhance the state-space model approach for the MPC algorithm. The comparison with a conventional state-space model approach shows the integration of a detailed characteristic map can only marginally improve the prediction accuracy. The additional information required from the glass façade manufacturer and the associated simulation effort is not of substantial value. In contrast, the conventional grey box model enables an entirely data-driven parameter identification, without the manufacturers' data. Furthermore, the MPC optimisation procedure, searching for the best control strategy, can be more efficient (solver-based optimisation), with shorter computing turnaround times.

1. INTRODUCTION

Due to the increasing solar and wind energy production, new control and sector coupling strategies are required to align the load profiles with the volatile energy yields. Given this, Model Predictive Control (MPC) can enhance buildings' efficiency (Serale et al. 2018). A promising solution is to use an MPC approach together with Thermally Activated Building System (TABS) (Arteconi et al. 2014). Such system solutions offer high energy efficiency and demand-side flexibility for heating and cooling. However, applying MPC requires an accurate state-space model and the successful operation of TABS needs slowly load disturbances. Especially in the case of large glass façade elements, the thermal balance is strongly affected, and stable operation is still a challenge (Wang et al. 2019). Hence, within the PVadapt project, an adaptive MPC algorithm for space heating and cooling is developed, focusing on the solar load identification. The adaptive MPC uses a grey-box model that represents the building zone with a simplified resistances and capacities network. This is a state-space model, with data-driven calibration, regularly updated with up to date historical data –therefore "adaptive". The details on the state-space model development are to be revealed in a separate publication.

In this paper, the focus is on the glass façade model. In the conventional state-space model, the glass façade is modelled with two parameters: a constant Solar Heat Gain Coefficient and the fraction of the shaded area (shutters height). In constructions with complex glass façades, the solar gains are especially time dependant, from the sun position as well as glass properties and shading settings. These dynamics are questionably well represented in the *simple glass façade model* using only two parameters.

The development of a *detailed glass façade model* is presented in this article. A characteristic map is generated by extracting information from a white-box model –detailed, dynamic model. This characteristic map gives for any possible configuration of the façade –a multi-dimensional combination of parameters– the solar transmittance of the façade. By integrating this map in the state-space model, the solar gains can be evaluated precisely, according to essentially the solar irradiance and the shading settings. This "characteristic map-based" method is applied to a thermal zone in a reference building: the living laboratory ENERGETIKUM. Section 2 covers the white-box model development in software IDA ICE, and section 3 shows the characteristic map generation. The conclusion brings the results in the perspective of their further application in MPC algorithms.

2. WHITE-BOX MODEL

2.1 SIMULATION TOOL IDA ICE

IDA ICE is a high-quality software for dynamic multi-zone simulation of buildings' energy and comfort. It uses a powerful equation-based modelling, with the NMF language, similar to Modelica (EQUA).

2.2 BUILDING MODEL

2.2.1 Selected zone in the living-laboratory ENERGETIKUM

The living-lab ENERGETIKUM is an office building equipped with comprehensive measurement technology to monitor the building's behaviour in detail. Several technologies are also integrated into the building's: heating, cooling, ventilation, shading, as well as energy production and storage. This offers numerous opportunities for investigating and learning the technologies and the building operation itself.

One thermal zone is modelled in details in IDA ICE: the corner office in the upper floor (room 12), as illustrated in Fig. 1. The model parameters (from plans and documentation) and input variables (from measurements) are detailed in the following.

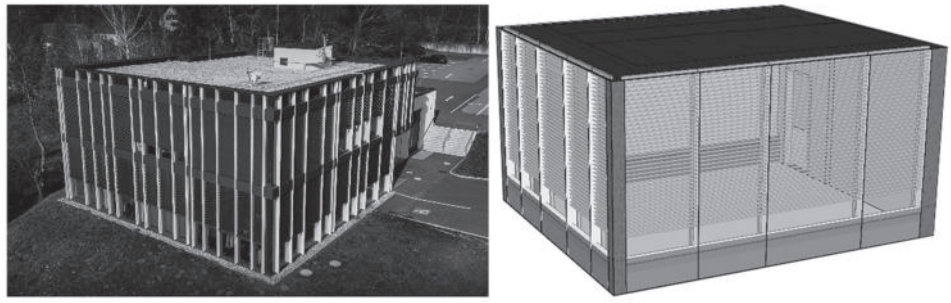


Fig. 1: Photo of the living-lab ENERGETIKUM (left) and 3D-view of the model of room 12 in IDA ICE simulation software (right).

2.2.2 Model parameters

The building is located at a latitude of N 47.3620° and a longitude of E 16.1279°. The South façade is oriented 17° to the East. Horizon height is negligible in the energy balance and ignored. An average ground reflection of 0.2 (albedo for vegetation and parking) is used.

The detailed constructions are defined in the model layer-by-layer with their thickness and material properties. The corresponding U-values are 0.133 W/(m²K) for the ceiling (external), 0.667 W/(m²K) for the floor (internal), 0.190 W/(m²K) for external walls and 0.315 W/(m²K) for internal walls. The frames of the glazed elements are modelled, including thermal properties, geometry, and optical properties to account for reflections.

The glass façade with triple glazing is critical to the model which is the primary motivation for developing the white-box model. From the overall properties of each pane, the optical properties of the glazing give a wrong overall Solar Heat Gain Coefficient (g-value) of 45.8 %. To correctly model the glazing with its actual g-value of 0.5, the spectral properties of each pane are required –and were kindly provided by the manufacturer *AGC Interpane*. The detailed and overall properties of the glazing (VSG Warmglas iplus neutral 3E) are presented in Table 1. Each pane is of float glass annealed, separated by a 14 mm wide gap filled with 90 % argon. The first and third panes have a low emittance coating on the inner side. The security glass includes a 0.76 mm polyvinyl butyral plastic layer between two 6 mm glass panes. With the selective coatings, the glazing achieves a relatively low g-value of 0.5 and U-value of 0.6 W/(m²K), compared to its 70 % visible transmittance.

External venetian blinds ensure the shading of the façade. The slats are defined in terms of geometry (80 mm slat width, 62 mm spacing between slats and 85 mm distance from the axis to the glass) and optical properties (using a similar material from the database: 3.7 % reflectance and 0.28 % transmittance). The position of the shading is measured (see next section).

Several parameters are not easily set from the building documentation and have an important influence on the thermal behaviour of the building. These parameters are tuned in the calibration procedure, within their expected range [given in square brackets]:

- three thermal bridges: ○ between external wall and internal slab, [0.15 0.23] W/(Km); ○ between roof and external wall, [0.15 0.23] W/(Km); ○ at external window perimeter, [0.15 0.23] W/(Km),
- internal mass equivalent to a surface of 5 cm thick wood plate, [30 70] m²
- air infiltration rate, [0.4 1.6] ACH (air change per hour),
- floor heating circuit: depth under the surface [0.02 0.1] m and heat transfer coefficient from the water in the pipe to the surrounding construction material [15 60] W/(m²K)
- ceiling cooling circuit: similarly depth [0.01 0.1] m and heat transfer coefficient [30 90] W/(m²K) and correction heat transfer from the supply line [5 25] Wm/K.

Table 1: Detailed and overall optical properties of the security glass in ENERGETIKUM

Glazing pane	Thickness mm	τ_v %	ρ_v %	ρ'_v %	τ_e %	ρ_e %	ρ'_e %	ϵ_n %
iplus 1.1	8	88	5	6	62	26	20	3
Planibel clearlite	6	90	8	8	85	8	8	89
Stratobel iplus 1.1 66.2	12.76	87	5	6	56	26	16	3

Overall glazing	Thickness mm	U-value W/(m²K)	g %	τ_v %	τ_e %
AGC Interpane	54.76	0.6	50	70	38
IDA ICE no spectral data	54.76	0.614	45.8	69.6	32.4
IDA ICE with spectral data	51.3	0.631	51.3	69.5	37.7

Notation in the table: τ_v: transmittance of visible light; ρ_v: reflectance of visible light on the coated side; ρ'_v: reflectance of visible light on the other side; τ_e: transmittance of shortwave irradiance; ρ_e: reflectance of shortwave irradiance on the coated side; ρ'_e: reflectance of shortwave irradiance on the other side; ϵ_n: emittance of longwave irradiance on the coated side; U-value: heat transfer coefficient of glazing; g: total energy transmission factor of the glazing (also called Solar Heat Gain Coefficient)

2.2.3 Measurement data

The measurement data are collected with the UTC time zone as a time reference. The accuracy of the overall energy balance is ensured through a careful resampling from the minute server data to hourly data set for IDA ICE simulation. A year of data (366 days) is used, from 27th July 2018 to 27th July 2019. The measured variables are fed to the simulation model through input files (.prn format).

The climate is determined from measurement data of the weather station at ENERGETIKUM: outside air temperature, relative humidity, solar irradiance (direct normal and diffuse horizontal), wind speed (vector components towards East and South).

Internal gains come from lighting, equipment and occupancy. The measured lighting power and equipment power are considered to 100 % as heat contributions to the room. Occupancy is estimated to one occupant, whenever the measured CO_2 concentration in the room rises over 500 ppm. The influence of the neighbouring rooms is modelled by imposing the measured temperature in these rooms to the corresponding zones: room below, room East, room North and corridor.

The shading's impact to the solar load properties depend on many parameters, especially the sun position and the slat angle (Carli Inc. 2006). IDA ICE includes its own physical model to pre-compute these properties at each simulation start. The shutters position in height (%) and the slat angle (°) are converted from the measured variables (control system of the building) to the IDA ICE variables with precisely adjusted functions (no direct proportionality).

Heating and cooling are provided via hydraulic circuits: one in the floor for heating (45 W/m² design power with 5 °C temperature difference) and three in the ceiling for cooling (80 W/m² with 3 °C difference). Modelling the three cooling circuits separately, with their exact geometrical implementation improves the model fit. For each circuit, the measured supply temperature and mass flow are fed into the simulation. For the cooling circuits, a correction of the supply temperature has been included to account for the heat transfer between the sensor and the room (several meters away). The return temperature is then a result of the thermal balance in the zone, represented by the physical model. The fit with the measured return temperature is a quality indicator of the model calibration.

The ventilation of the room is set from the measured air mass flow and supply temperature. The return temperature is calculated through the model.

For the calibration process, three measured variables are involved: the room temperature –akin to the operative room temperature– and the return temperatures from the heating and cooling circuits.

Several additional variables can be inserted in the simulation, to compare in IDA ICE, the simulation output with measurements: inner glass surface temperatures, solar irradiance, as well as longwave radiations, outside and inside, on South and West facades.

2.3 CALIBRATION

2.3.1 Method

Initially, parametric runs help understand the dynamics of the model and identify relevant calibration parameters (as presented in section 2.2.2). Partial optimisations with one control variable have been carried out, before the final optimisation on three control variables (as mentioned in section 2.2.3). Out of these variables, the objective function combines four minimisation criteria of standard deviations: σ_{Top} on operative temperature, $\sigma_{\dot{Q}Hf}$ on heating load (from floor circuit), $\sigma_{\dot{Q}Cf}$ on cooling load (from floor circuit) and $\sigma_{\dot{Q}Cc}$ on cooling load (from ceiling circuits). The overall objective function blends these criteria as follow: $\sigma_{HCT} = 0.1\,\sigma_{\dot{Q}Hf} + 0.1\,\sigma_{\dot{Q}Cf} + 0.1\,\sigma_{\dot{Q}Cc} + 2\,\sigma_{Top}$

$\sigma_{\dot{Q}Hf}$, $\sigma_{\dot{Q}Cf}$ and $\sigma_{\dot{Q}Cc}$ are in the order of magnitude of 30-60 W, while σ_{Top} is in the range 0.4-0.7 °C. The weighing coefficients put the priority on fitting the heating and cooling loads while keeping consistent temperatures.

The optimisation procedure uses GenOpt as a genetic algorithm to calibrate the model.

2.3.2 Results

Fig. 2 shows the error distribution on the three control variables obtained after calibration. The deviation from the measurements is below 1 °C in 96 % of the hours on room operative temperature; below 14 % in 80 % of the hours on the heating load and below 22 % in 80 % of the hours on the cooling load. The calibration remains valid for other periods (tested in the entirety of the year 2019).

The model represents the detailed thermal balance of the building zone. This enables a detailed analysis of different aspects of the buildings. In particular, the focus is set on the glass façade with movable shutters. The results show, the irradiance inside is mostly correctly estimated in terms of the order of magnitude, but with a systematic underestimation by around 20 %, independent of the shading settings. The inside glass surface temperature is also underestimated by 0.5 °C to 1 °C on average. These slight deviations could be linked to local effects on the sensors, in comparison to the average on the façade, calculated from the model. The white-box model development enabled to identify the most significant influencing factors, including especially the use of spectral data for the triple glazing facade. The performance of this white-box model is therefore acceptable for enhancing the grey-box model, as exposed in the following.

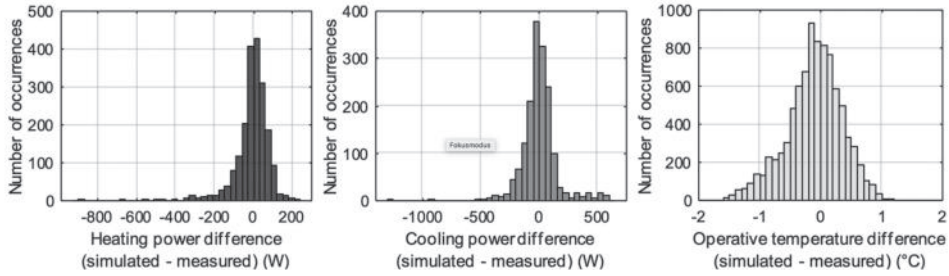


Fig. 2: Absolute error distribution in yearly frequency (number of occurrences on an hourly basis), between simulation and measurement of (left) heating load, (centre) cooling load and (right) operative temperature from measured room temperature.

3. CHARACTERISTIC MAP

3.1 APPROACH

3.1.1 Characteristic map definition

Out of the white-box model, it is possible to know the heat balance of the glass façade for any configuration of sun position and shading settings. The solar transmittance of the façade tells on the direct contribution of solar irradiance to the thermal balance. For a complete thermal balance of the façade, conduction, convection and longwave radiative heat transfer have to be considered. These contributions on the heat balance are already well represented, in the grey-box model, by a thermal resistance between the zone (inside) and the ambient (outside). Therefore, for the solar gains modelling according to the shading system, the solar transmittance is a relevant representative parameter. As simple equations cannot a priori describe the complexity of the façade with the shading system, a database is used to have information on all possible configurations. This gives a multi-dimensional characteristic diagram or characteristic map of the solar transmittance of the complex glass façade. The grey-box model can then use the data from this characteristic map via an interpolation function or machine learning algorithms.

3.1.2 Input and output variables

Five variables influence the transmission of the façade. The sun position is characterised by the azimuth angle Φ (°), relative to the façade, and the elevation angle α (°). The shading settings are the slat orientation angle λ (°) and the relative shutters height h as shaded share in % of glazing surface. The transmittance has two components: direct

and diffuse transmittance. Therefore, the share of direct and diffuse irradiance is also an essential factor. The fraction of direct irradiance outside f_{Bo} in % of global irradiance is introduced, as an additional parameter.

For a straightforward use in the grey-box model, the characteristic map is split into two matrices with one output variable each: the global transmittance τ_{Gs} of the glazing with shading and the global transmittance τ_G of the glazing alone (without shading).

The transmittance with shading is applied to the shaded part h, while the transmittance without shading is applied to the rest of the glazing surface (1-*h*). This reduces the number of parameters in the matrix to four input variables for the case with shading $(\Phi,\alpha,\lambda,f_{Bo})$ and three for the case without shading (Φ,α,f_{Bo}) and one output variable each (τ_{Gs} or τ_G).

3.2 GENERATION

The characteristic map is generated by using simulation from the white box model. Several approaches have been tested, using the entire model or a sub-model and using measurement data or virtual data. The entire model with measurement data has the disadvantage to cover only cases that have occurred in the past. Unusual shading events are not well represented. Virtual data, scanning all possible sun positions and shading settings, solves this issue, leaving no gap in the characteristic map. In the following, the focus is set on virtual data applied to the entire model and to a sub-model.

3.2.1 Simulation with the entire white-box model

With the entire model, the results are gathered over a yearly simulation, with a 10 minutes time step, to ensure a fine resolution over all possible sun positions. Input files are defined to vary daily the slat angle in 10° steps from 80° to -90° in a loop. So every 18 days, all sun positions from the current season are evaluated with all slat angles: this is less than 7° maximum variation of sun elevation. One simulation runs with shading fully drawn, one without shading.

Out of IDA ICE results, the transmittance can be calculated from the thermal balance, by logging four output variables: I_{Bo} and I_{Do} respectively direct and diffuse irradiance outside, I_{Bi} and I_{Di} resp. direct and diffuse irradiance inside. The irradiance inside is needed for both cases: with shading (I_{Bis} and I_{Dis}) and without shading (I_{Bi} and I_{Di}). The characteristic map can be defined precisely for each façade, with different orientations (South and West).

3.2.2 Simulation with a sub-model

The sub-model keeps only the model of one window, with its glazing and shading system, extracted from the entire model. With this sub-model, input files are defined to scan all combinations in sorted order. The characteristics of the glazing with shading and without shading are valid for any orientation.

As explained in the post-processing section (3.3), sorted parameter values in the input files and consequently in the output files simplify the access to information through interpolation. The drawback is the loss of specificities from the entire building zone (façade orientation with landscape and external shading objects, influence from furniture).

3.3 POST-PROCESSING

The obtained data is exported from IDA ICE output file (Excel format) and post-processed in MATLAB (into a matrix) to be used in the grey-box model.

The variables of the characteristic map are converted, if necessary, or calculated from the simulation results. The sun position (Φ,α) is kept as is. The shading settings (h,λ) are converted back to the corresponding variables in ENERGETIKUM control system. The direct irradiance share f_{Bo} is calculated as follows:

$$f_{Bo} = \frac{I_{Bo}}{I_{Bo} + I_{Do}}$$

The overall transmittance with shading and without shading (independent of the slat angle) and are:

$$\tau_{Gs}(\Phi, \alpha, \lambda, f_{Bo}) = \frac{I_{Bis} + I_{Dis}}{I_{Bo} + I_{Do}} \quad \text{and} \quad \tau_G(\Phi, \alpha, f_{Bo}) = \frac{I_{Gi}}{I_{Go}} = \frac{I_{Bi} + I_{Di}}{I_{Bo} + I_{Do}}$$

In the end, the characteristic map information is contained in two matrices:

- glazing with shading: $[\Phi, \alpha, \lambda, f_{Bo}, \tau_{Gs}]$
- glazing (no shading): $[\Phi, \alpha, f_{Bo}, \tau_G]$

From the sub-model approach, the data is sorted. In this case, an N-dimensional interpolation algorithm (e.g. MATLAB function interpn) gives fast access to the relevant transmittance information.

The data generated with the entire model and the yearly simulation is not sorted and requires an alternative method. Pre-defined interpolation functions are generated (e.g. MATLAB function scatteredInterpolant, limited to 3-dimensional interpolation). To solve the case with the shading (4-dimensional), a step by step interpolation is implemented. In the grey-box model, the relevant pre-defined interpolation functions (3 dimensions) are called, and a complementary interpolation (fourth dimension) is performed in a second step. This method provides an interesting and relatively efficient workaround for a characteristic map with non-sorted data (Zalewski 2020).

3.4 RESULTS

Fig. 3 and Fig. 4 illustrate the characteristic map from the sub-model with respectively the global transmittance without shading τ_G and with shading τ_{Gs} Relative azimuth of incident direct solar irradiance on façade Φ goes from -90° to +90° through 0° (perpendicular to façade) growing in the sun path direction. Elevation of incident direct solar irradiance α goes from 0° horizontal to 90° vertical. The slat angle λ is defined in 10° steps from 80° to -90° (-90° vertical upside out, 0 horizontal, +90° vertical upside in). The fraction f_{Bo} of outside direct solar irradiance on the facade goes from 0.01 to 0.99.

The transmittance of the non-shaded glazing evidently depends only on the sun position and the share of direct irradiance. With shading, the transmittance also depends on the slat angle. For sun elevation similar to the slat angle, the transmittance is close to the case without shading, because the sun rays are parallel to the slats and enter the room.

If applied to the state-space model, the effect of the *detailed façade model* –based on the characteristic map– can be observed in Fig. 5. The histograms show the frequency distribution of the temperature deviation, between the measurements and the model predictions, from two variants: the original state-space model with *simple façade model* in comparison to the state-space model with *detailed façade model*. The *simple façade model* obtains less than 0.5 °C deviation in 88 % of the time steps, compared to 90 % with the *detailed façade model*. The improvement of the overall performance of the model is very modest. This indicates that the *simple façade model* gives outstanding results in this building. This is probably reflecting the slat angle settings, which always block direct irradiance. So the assumption, in the *simple façade model*, of 0 % shading transmittance, is acceptable. The conclusion could be different with other shading control strategies.

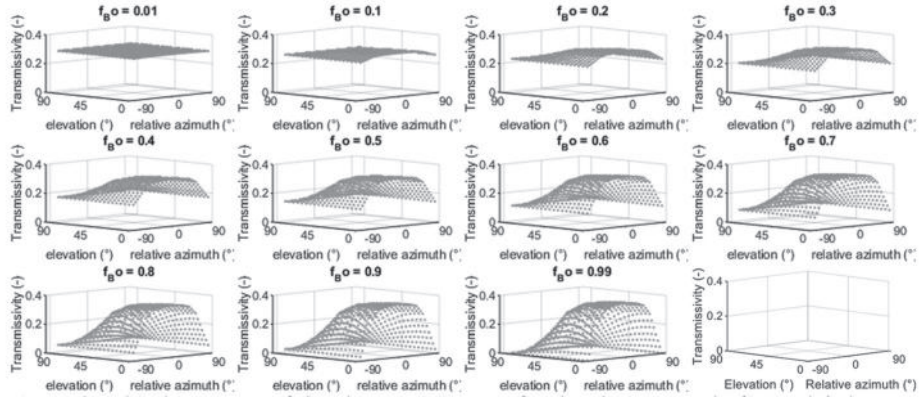


Fig. 3: Graphical overview of the characteristic map for the glazing (no shading): global transmittance τ_G in function of sun position (x and y-axis) with the fraction f_{Bo} varying through the diagrams.

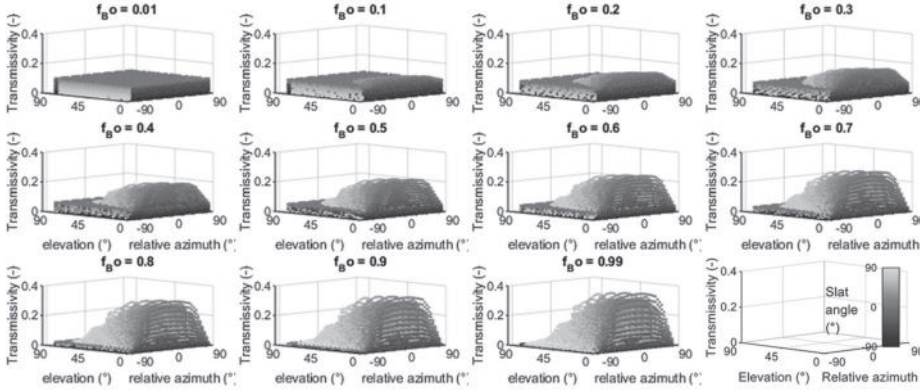


Fig. 4: Graphical overview of the characteristic map for the glazing with shutters: global transmittance τ_{Gs} in function of sun position (x and y-axis) and slat angle (colour scale) with the fraction f_{Bo} varying through the diagrams.

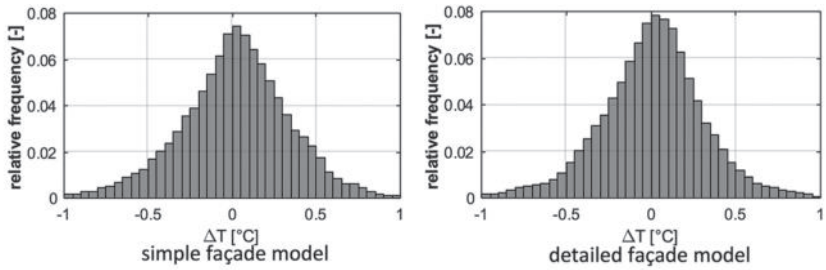


Fig. 5: Comparison of state-space model variants, with simple façade model and with detailed façade model (with the characteristic map): relative frequency distribution of the temperature deviation ΔT between the 24-hour forecast and the corresponding experimental data.

4. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

With careful calibration, the white-box model offers a detailed physical representation of the reference building zone, with acceptable uncertainties. The characteristic map, derived from the white-box model, provides a *detailed façade model*, which can be integrated into the state-space model.

The results on the reference building show the detailed façade models only rises by 2 % the accuracy of the temperature prediction used in the MPC algorithm. This validates the use of the conventional grey-box model with its *simple façade model*, even in the case of complex glass facades. This opens exciting perspectives.

The characteristic map approach requires precise information on the facade for the detailed window and external shading model, even without developing an entire white-box model. Additional simulation effort is also needed because the optimisation setup must be problem-based (representing the objective and constraints symbolically). The required translation from problem form to matrix form leads to longer solving times.

The advantage of the conventional state-space model is that less information on the building is required, enabling an entirely data-driven parameter identification. As the structure of the model is more straightforward without the characteristic map, the state-space model can be transformed into a standardised matrix form. The solver-based optimisation problem setup is then possible (representing the objective and constraints as functions or matrices). This enables the use of well-established parameter identification and optimisation algorithms, based on more efficient solvers with shorter computational times.

Mind that the performance of the *simple façade model* might not be as good in all buildings. The characteristic map approach could still be helpful in some cases. It could, for example, help to model other variables, like longwave emissions or daylight illuminance levels.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has received funding from the Innovation and Networks Executive Agency (INEA), European Commission H2020 project PVadapt under Grant Agreement number 818342 (www.pvadapt.com).

REFERENCE

Arteconi, A., Costola, D., Hoes, P., & Hensen, J. L. M. (2014) Analysis of control strategies for thermally activated building systems under demand side management mechanisms. Energy and Buildings, 80, p. 384-393. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.053

Carli Inc. (2006) Calculation of optical properties for a venetian blind type of shading device. https://windows.lbl.gov/sites/all/files/Downloads/venetian-technical-document.pdf

EQUA, IDA Indoor Climate and Energy. Available: https://www.equa.se/en/ida-ice

Wang H., Olesen, B.W., Ongun B. K. (July 2019) Effect of glazing ratio on thermal comfort and heating/cooling energy use. Conference: ISHVAC 2019 Harbin, China.

Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D., & Bemporad, A. (2018) Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities. Energies, 11, S.631. doi:10.3390/en11030631

Zalewski M. (2020) Kennfeldgenerierung zur grey-box Modellverbesserung: Auswertungsverfahren für detaillierte Transmissionswerte bei Dreifachverglasung mit Verschattung. Master thesis at Fachhochschule Burgenland (in German).

Contact:
François Veynandt
Steinamangerstraße 21
A-7423 Pinkafeld
Email: francois.veynandt@fh-burgenland.at

Session 5d

Efficiency Enhancement of Energy Systems

Experimental evaluation of wall heating and cooling system with thermally insulating core

Šimko, Krajčík, Petráš, Szabó / Slovak University of Technology Bratislava / SK

Designing a radiant wall cooling system with pipes located in inner plaster – first results

Junasová, Krajčík, Šimko / Slovak University of Technology Bratislava / SK
Šikula / Brno University of Technology / CZ

Recuperation of waste heat produced by public pools and low-enthalpy energy utilization

Predajnianska, Takács / Slovak University of Technology Bratislava / SK

Experimental evaluation of wall heating and cooling system with thermally insulating core

M. Šimko, M. Krajčík, D. Petráš, D. Szabó
Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

ABSTRACT: The performance of a radiant wall system with pipes attached to a thermally insulating core has been tested. The potential benefits of such a system include the possibility of operation both as cooling and heating, easy installation in existing buildings, and low space requirements. Laboratory measurements of a wall fragment located between two climate chambers were done for mild simulated climatic conditions. Wall surface temperature and thermal output were measured in heating and cooling mode. A hotbox attached to the inner wall surface allowed precise control of the test conditions. The fragment consisted of bricks made of porous concrete and a densely spaced pipe register attached to the bricks and located in a plaster. The thermal response curves indicated a fast thermal response of the system. The heat flux per m² of the active surface area and 1 K of the temperature difference between water and room air was up to 5 W/(m²K). The results suggest that a larger area of the active surface is needed for cooling than for heating because of the limited permissible range of surface temperatures. In winter, the active surface area of only several m² may be needed to heat up the space.

1. INTRODUCTION

One of the trends in the design of cooling and heating of living spaces is the use of radiant heating and cooling systems (Wu et al. 2018; Šimko & Petráš 2019). An important advantage of the radiant systems is their suitability for integration with renewable energy sources (Romani et al. 2016; Wang et al. 2010). For example, in well-insulated buildings under moderate climatic conditions, only a relatively small fragment of the wall may be enough to create thermal comfort (Harmati et al. 2016). Wall systems are suitable for building retrofit because they do not reduce the story height and can be easily attached to existing walls. Compared to floor heating, wall cooling can lead to a more homogeneous distribution of room temperature and reduce the risk of thermal discomfort due to cold floors (Tomasi et al. 2013). Radiant walls are more efficient in terms of heat and cool emission than heated ceilings and cooled floors, respectively. They have higher cooling capacity per surface area than floors and higher heating capacity than floors and ceilings due to a wider range of permissible surface temperatures (Babiak et al. 2013). The number of research studies conducted to study the thermal performance of radiant wall heating and cooling systems is limited. Mikeska & Svendsen (2013) studied the heat transfer in a wall heating and cooling system with capillary mats located underneath the surface and insulated from the bearing structure. Šimko et al. (2018) emphasize the importance of pipe location within the wall on the thermal output. Embedding the pipes in thermal insulation reduced the heating capacity by 50 % as compared to a system with pipes embedded in the thermal core and by 63 % as compared to a system with pipes located underneath the surface. For wall cooling, Krajčík & Šikula (2020) pointed out that systems with pipes underneath the surface require a smaller surface area or higher temperature of cooling water because of their greater output as compared to systems with pipes embedded in the thermal core. The thermal output of systems with pipes underneath the surface has not been thoroughly investigated by laboratory measurements. The present paper, therefore, reports experimental tests of a radiant wall system with the pipes attached to thermally insulating bricks made of aerated concrete. Temperature profile within the bricks, surface temperature, and thermal output are investigated for one representative case for the system operated in heating mode and one for the system operated in cooling mode.

2. EXPERIMENTAL DESIGN AND METHODS

Experimental measurements were performed on a wall fragment, which represents an external wall consisting of aerated concrete bricks 200 mm thick and thermal in-sulation 100 mm thick. The pipe register was located in the interior plaster.

2.1 CLIMATIC CHAMBER AND LOCATION OF THE FRAGMENT

The experimental fragment was built into a wall that divided two climatic cham-bers with controlled air temperature and humidity. One chamber simulated the indoor environment, while the other simulated the outdoor climatic conditions (Fig. 1). The required air temperature in both climatic chambers was achieved by the HVAC technology of the climatic chambers. The required air temperature on the interior side of the fragment was achieved by attaching a hotbox to the wall.

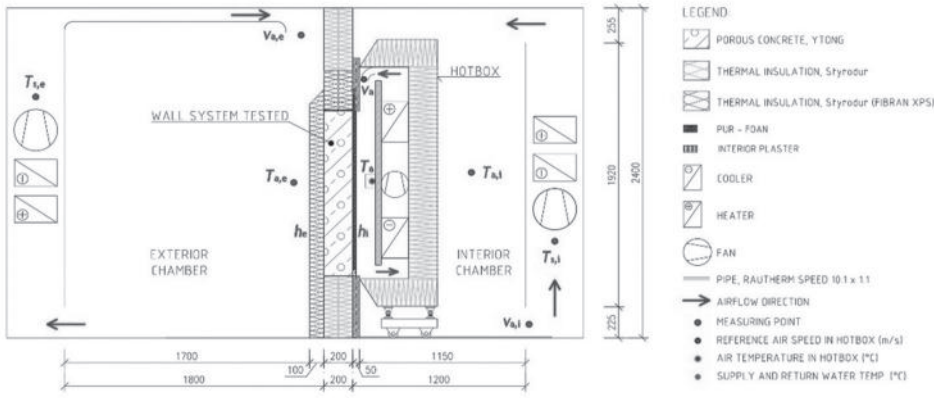


Fig. 1: Cross-section of the climate chamber with hotbox and the wall fragment

2.2 WALL FRAGMENT AND MEASURING INSTRUMENTS

Fig. 2 shows the physical model of the wall fragment with the pipes located in inner plaster. Numbers 1 to 5 represent the individual material layers. The thermophysical properties of the wall materials are shown in Tab. 1.

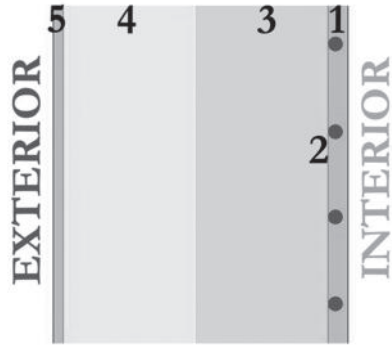


Fig. 2: Material layers of the wall fragment

Tab. 1: Material properties of the wall fragment

No.	Material	Thickness	Density	Heat conductivity	Specific heat capacity
		d	ρ	λ	c
		m	kg/m³	W/(mK)	J/(kgK)
(1)	Inner plaster	0.025	1 300	0.7	840
(2)	Pipes ø 10.1 x 1.1		1 200	0.35	1 000
(3)	Aerated bricks	0.2	600	0.19	1 000
(4)	TI - Styrodur	0.1	17	0.035	1 270
(5)	Outer plaster	0.01	1 600	0.8	840

The wall fragment consisted of bricks made of aerated concrete, external thermal insulation and an inner thermally active plaster containing the pipes. Fig. 3 and Fig. 4 show the construction of the wall fragment between the two experimental chambers.



Fig. 3: Construction of the wall fragment – view from exterior chamber



Fig. 4: Construction of the surface layer – view from interior chamber

The temperature of the wall fragment was monitored using PT100 resistance thermometers at selected locations along the fragment (Fig. 5). The dimensions of the wall fragment were 1.2 m x 1.2 m and the thickness of the bricks was 0.2 m. Although the thickness was relatively low, a previous theoretical study

(Krajčík & Šikula 2020) has shown that for this type of wall, the thickness of the concrete has little effect on the heat output in the range of 200 to 400 mm. It has also been shown that the heat flux and temperature distribution are similar regardless of the location of the wall (external or internal). The supply and return water temperatures were also measured. The temperature sensors are classified into accuracy class 1 and the accuracy was variable in the range ±(0.15 + 0.002 * T) where T is the temperature measured. In points A to D, the temperature was recorded at four depths to obtain cross-sectional temperature profiles. The heat flux was monitored by a thermopile sensor with an accuracy level in the range of ±5 % of the measured value. The sensor was placed on the surface in the middle of the fragment as recommended by Lakatos (2016).

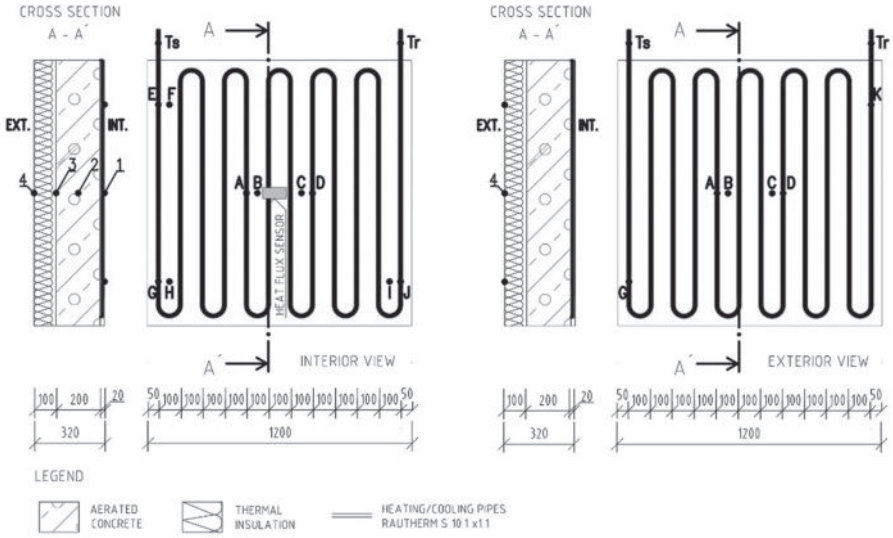


Fig. 5: Fragment dimensions and location of sensors

3. EXPERIMENTAL TESTING OF THE RADIANT WALL SYSTEM

The radiant wall system was tested in both cooling and heating mode in laboratory conditions. Fig. 6 shows thermal images of the experimental fragment in the heating and the cooling mode. Tab. 2 shows the main results for the wall cooling (**C**) and heating (**H**) system. The results refer to one hour when the system was in steady state. For the cooling mode (**C**), the results refer to the one hour on 25 February 2020 from 6:48 to 7:48 pm. For the heating mode (**H**), the results refer to the one hour on 7 March 2020 from 10:00 to 11:00 am.

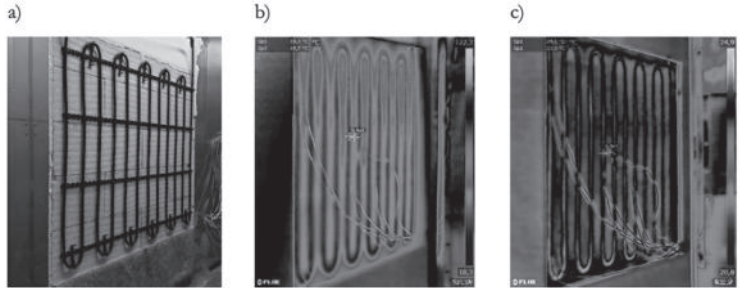


Fig. 6: Wall fragment: a) photo, b) IR image cooling mode, c) IR image heating mode.

Tab. 2: Parameters measured during one hour under steady-state conditions (mean ± SD)

	Controlled variables			Measured - Hotbox		Measured - Wall fragment		
	T_s	$T_{a,e}$	T_a	v_a	T_{surf}	$T_{a,A-D}$	$T_{surf,A-D}$	q_i
Case	(°C)	(°C)	(°C)	(m/s)	(°C)	(°C)	(°C)	(W/m²)
C cooling	17.9 ±0.0	40.0 ±0.0	26.0 ±0.0	0.90 ±0.00	20.6 ±0.0	26.3 ±0.0	20.5 ±0.0	-38.3 ±0.2
H heating	29.1 ±0.3	4.0 ±0.2	20.0 ±0.0	0.90 ±0.00	25.5 ±0.0	19.5 ±0.0	25.8 ±0.0	44.6 ±0.6

Key: T_s – temperature of supply water, $T_{a,e}$ – air temperature in exterior chamber, T_a – air temperature in hotbox, v_a – air velocity in hotbox, T_{surf} – average surface temperature measured at points A to J, $T_{a,A-D}$ – air temperature measured near the centre of the wall fragment, $T_{surf,A-D}$ – average surface temperature at points A to D, q_i – heat flux measured by the heat flux sensor in the centre of the wall fragment.

3.1 TESTING IN COOLING MODE

The air temperature in the outdoor chamber was $T_{a,e}$ = 40 °C at the air velocity $v_{a,e}$ = 2 m/s at the reference point and the air temperature in the hotbox (HB) was T_a = 26 °C at the air velocity v_a = 0.9 m/s at the reference point. The supply water temperature was T_s = 18 °C. The experimental tests were initiated on 24 February 2020 at 10:24 am when the cooling system was turned on. The experimental measurements of the cooling system were turned off on 25 February 2020 at 7:48 pm. The values of heat flux reported (q_i) were measured by the heat flux sensor. The surface temperature measured at the points A-1, B-1, C-1, D-1 is shown in Fig. 7 together with the supply and return water temperature *(T_s, T_r)*. The figure suggests that the system has a fast thermal response. For the system operated in cooling mode, the heat flux reached -38.3 W per m² of the cooling area. This equals to about 4.7 W/m² per 1 K temperature difference between water and room temperature. The surface temperature was lowest at points A-1 and D-1 at the pipe, equal to about 19.8 °C which was well above the condensation limit. This means that the cooling output could be increased by further reducing the surface temperature down to the condensation limit. Assuming a typical cooling load of 3 kW for a typical office, a considerable cooling wall surface area (theoretically about 78 m²) may be needed to cover the load.

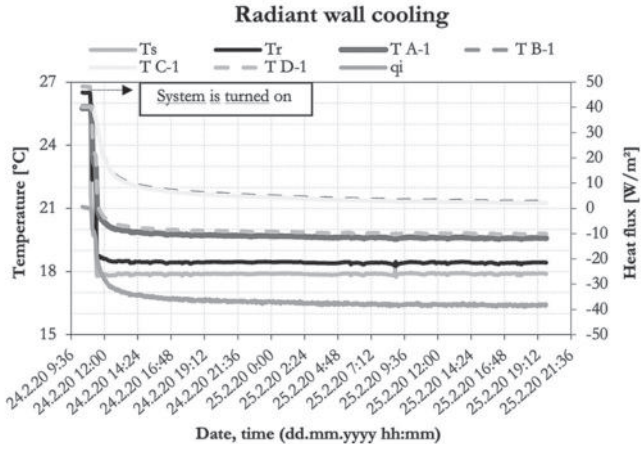


Fig. 7: Surface and water temperature and heat flux for radiant cooling at $T_{a,e}$ = 40 °C.

3.2 TESTING IN HEATING MODE

The air temperature in the outdoor chamber was T_e = 4 °C at the air velocity $v_{a,e}$ = 2 m/s at the reference point and the air temperature in the hotbox (HB) was T_a = 20 °C at air velocity *va* = 0.9 m/s at the reference point. The supply water temperature was T_s = 29 °C. The measurements were initiated on 6 March 2020 at 11:58 am when the heating system was turned on. On 7 March 2020 at 11:17 am the heating system was turned off. The values of heat flux reported *(q_i)* were measured by the heat flux sensor. The surface temperature measured at the points A-1, B-1, C-1, D-1 is shown in Fig. 8 together with the supply and return water temperature *(T_s, T_r)*. The figure indicates a fast thermal response of the system operated as heating. For the system operated in heating mode, the heat flux attained a value of 44.6 W per m² of the heating area. The surface temperature was highest at points A-1 and D-1 at the pipe, and the specific heat flux per 1 K temperature difference between water and room was about 4.9 W/(m².K). The output could be enhanced by increasing the surface temperature up to the 40 °C that is allowable for radiant wall systems. Assuming a typical cooling load of 0.5 kW for a well-insulated office in a severe climate, the required area of the heating surface is relatively low (theoretically about 11 m²).

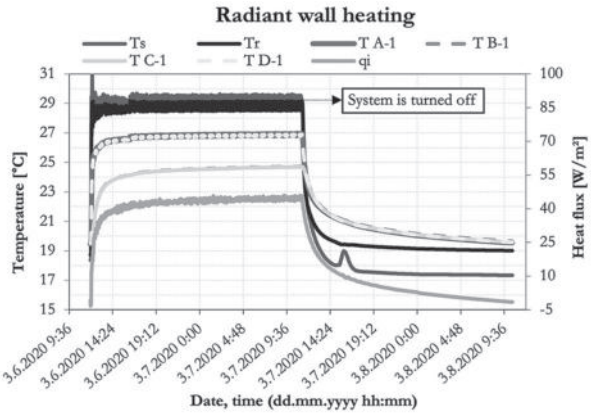


Fig. 8: Surface and water temperatures and heat flux for radiant heating at $T_{a,e}$ = 4 °C.

4. CONCLUSION

A radiant wall system with pipes attached to a thermally insulating core made of aerated concrete was experimentally tested. The radiant wall system was tested in heating and cooling mode under average simulated climatic conditions in two climate chambers. The monitored parameters were heat flux, surface temperature of the wall fragment, and supply and return water temperature. The results indicate a fast thermal response of the wall system. Although the air velocity in the centre of the wall fragment was not directly measured, preliminary CFD simulations indicate that the air velocity in the centre of the fragment where the heat flux was measured corresponds to realistic air flow conditions. In both heating and cooling mode, the specific heat flux was close to 5 W per 1 m² of the active surface and 1 K difference between water and air temperature. The results obtained in cooling mode suggest that a larger area of the active surface was needed for cooling than for heating. This was caused by the assumed peak load for cooling (3 kW) larger than that for heating (0.5 kW) and by the temperature difference between water and room slightly lower for cooling than for heating.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Slovak Research and Development Agency under contract No. APVV-16-0126 and by the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic grant VEGA 1/0847/18. We thank PAVJAN, s.r.o. for assistance with constructing the wall fragment, Regulaterm, s.r.o. for help with constructing the heat/cool source and the control system, and REHAU, s.r.o. for help with installing the thermally active layer.

REFERENCE

Babiak J., Olesen B.W. & Petráš D. (2013) Low temperature heating and high temperature cooling. Rehva Guidebook No 7. Rehva, 108.

Harmati N., Folić R.J., Magyar Z.F., Dražić J.J. & Kurtović-Folić N.L. (2016) Building envelope influence on the annual energy performance in office buildings. Thermal Science 20, 679–693.

Krajčík M. & O. Šikula O. (2020) The possibilities and limitations of using radiant wall cooling in new and retrofitted existing buildings. Applied Thermal Engineering 164, 114490.

Lakatos Á. (2016) Comprehensive thermal transmittance investigations carried out on opaque aerogel insulation blanket. Materials and Structures 50.

Mikeska T. & Svendsen S. (2013) Study of thermal performance of capillary micro tubes integrated into the building sandwich element made of high performance concrete. Applied Thermal Engineering 52, 576–584.

Romaní J., Pérez G. & de Gracia A. (2016) Experimental evaluation of a cooling radiant wall coupled to a ground heat exchanger. Energy and Buildings 129, 484–490.

Šimko M. & Petráš D. (2019) Energy benefits of low-exergy wall system operated as thermal barrier. AEE World Proceedings, Washington, 4253–4257.

Šimko M., Krajčík M., Šikula O., Šimko P. & Kalús D. (2018) Insulation panels for active control of heat transfer in walls operated as space heating or as a thermal barrier: Numerical simulations and experiments. Energy and Buildings 158, 135–146.

Tomasi R., Krajčík M., Simone A. & Olesen B.W. (2013) Experimental evaluation of air distribution in mechanically ventilated residential rooms: Thermal comfort and ventilation effectiveness. Energy and Buildings 60, 28–37.

Wang X., Zheng M., Zhang W., Zhang S. & Yang T. (2010) Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas. Energy and Buildings 42, 2104–2110.

Wu X., Fang L., Olesen B.W., Zhao J. & Wang F. (2018) Comparison of indoor air distribution and thermal environment for different combinations of radiant heating systems with mechanical ventilation systems. Building Services Engineering Resarch and Technology 39, 81-97.

Contact information:
Martin Šimko
Radlinského 11
810 05 Bratislava
Email: mrtnsimko1@gmail.com

Designing a radiant wall cooling system with pipes located in inner plaster – first results

B. Junasová, M. Krajčík, M. Šimko
Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Radlinského 11, 81005 Bratislava, Slovakia
O. Šikula
Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veveří 331/95, 60200 Brno, Czechia

ABSTRACT: We evaluate the performance of a radiant wall system that involves pipes attached to a thermally insulating core made of aerated concrete. The potential benefits of such a system include the possibility of operation as cooling in summer and heating in winter, easy installation in new as well as existing buildings, minor space requirements, and eliminating the need to reduce the story height when installed in existing buildings. Standard thickness of the inner plaster (2.5 cm) and a thick plaster (5 cm) have been considered. The purpose of using the thick plaster was to lower the risk of damage to the pipes in case an intervention is made to the wall over the active surface. A lower thickness of the inner plaster led to a more efficient cool transfer to the room and consequently higher cooling output. However, the cooling output was not enough regardless of the plaster thickness. An area of the active surface of 45 m² was needed for the standard plaster thickness of 2.5 cm, whereas 50 m² was needed when a thicker plaster of 5 cm was used.

1. INTRODUCTION

The trends in global temperature, population, urbanization, and economic development are causing a gradual increase in energy consumption for space cooling. It is expected that the resulting increase in cooling capacity will put pressure on the energy infrastructure and increase environmental impacts. The installation of radiant cooling systems can help alleviate these effects because they are suitable for combination with renewable energy sources such as heat pumps and solar thermal collectors. Radiant walls are potentially feasible systems for new and retrofitted existing buildings, which could be preferable to the more common radiant floors and ceilings due to the benefits such as (1) additional installation of a radiant wall system does not reduce the story height, (2) comfortable thermal environment, and (3) higher sensible heating and cooling capacity than floors. Radiant walls have certain specifics related to construction and operation. They can be installed on the outer side of existing buildings in the form of, e.g., insulation panels (Šimko et al. 2018; Kalús et al. 2011). In such a case, they are subject to daily and seasonal weather variations.

In the present study, we specifically investigate one type of wall cooling system with pipes embedded in inner plaster, attached to a thermally insulating thermal core made of aerated concrete bricks. Such a system is easy to install even in existing buildings and is therefore suitable for building renovation. The research aims to find the optimal design of the system under various boundary conditions. In the present study, the focus is on the feasibility of the application of the wall cooling system in a typical office. The potential problem of this type of wall system is the risk of damaging the pipes when interventions are made to the wall over the area containing pipes. Therefore, we also consider the possibility to increase the thickness of the inner plaster to reduce the risk of damage in case that interventions should be made in the wall.

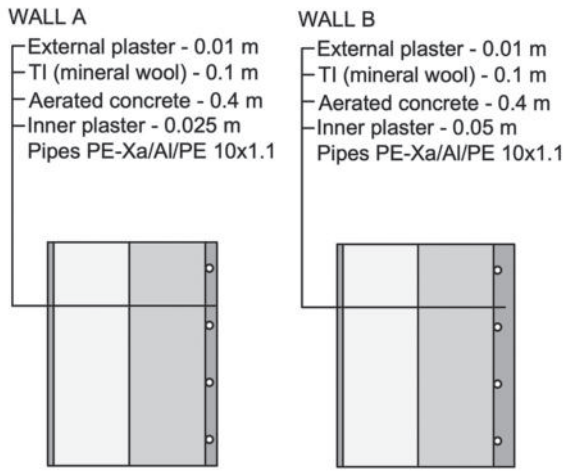


Fig. 1: Wall cooling systems studied.

2. PHYSICAL MODEL AND CALCULATION METHODS

The results were obtained by solving the equations of two-dimensional heat transfer by conduction, using CalA software (Šikula 2011; Krajčík & Šikula 2020; Plasek & Šikula 2014), which has been verified following EN ISO 10211. The heat flux and temperature distribution were calculated for a characteristic fragment of a radiant wall (Fig. 1). Stationary simulations of heat transfer have been performed. The thermophysical properties of the individual material layers used in the calculation model are specified in Tab. 1. In this study, the bearing structure was made of aerated concrete. In all the simulations the thermo-physical properties of materials were considered constant, isotropic, and temperature independent.

Tab. 1: Thermo-physical properties of material layers.

No.	Material	Thickness D m	Volumetric weight ρ kg/m^3	Thermal conductivity λ W/(mK)	Specific heat capacity c J/(kgK))
1	Inner plaster	0.01	1300	0.49	840
2	Insulation	0.1	17	0.035	1270
3	Aerated concrete	0.4	475	0.15	1000
4	Plaster containing the pipes	0.025	1300	0.49	840
5	Plastic pipe ø 10	0.011	1200	0.35	1000

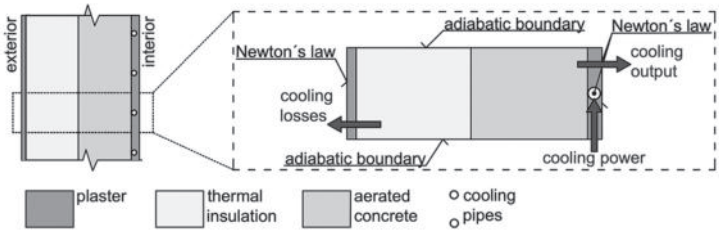


Fig. 2: Boundary conditions defining specific heat flux on a wall surface.

3. BOUNDARY CONDITIONS AND CLIMATIC DATA

The room temperature was 26 °C. The mean temperature of cooling water was varied to observe the effect of water temperature on the cooling output. The combined effect of ambient temperature and solar radiation impinging on the wall was approximated by sol-air temperature ($T_{\text{sol-air}}$). The sol-air temperature can be interpreted as the outside air temperature which, in the absence of solar radiation, would give the same temperature distribution and rate of heat transfer through a wall as exists due to the combined effects of the actual outdoor temperature distribution plus the incident solar radiation (Ding et al. 2018). It is calculated as follows (ASHRAE 2017):

$$T_{\text{sol-air}} = T_{\text{amb}} + \frac{\alpha . I_{\text{g}}}{h_{\text{e}}} - \frac{\varepsilon . \Delta R}{h_{\text{e}}} \tag{1}$$

where T_{amb} is the ambient temperature (°C); α is the absorptance of surface for solar radiation (-); I_{g} is the total solar radiation incident on surface (W/m²); h_{e} is the coefficient of heat transfer by long-wave radiation and convection at outer surface (W/(m²K)); ε is the hemispherical emittance of surface (-); ΔR is difference between long-wave radiation incident on surface from sky and surroundings and radiation emitted by blackbody at outdoor air temperature (W/m²). The correction term for the vertical surfaces $\varepsilon.\Delta R$ is 0 °C under the assumption that the long-wave radiation emitted by the warm surfaces of terrestrial objects at high solar radiation compensates to some extent for the sky´s low emittance (Bliss 1961). Examples of the combinations of ambient temperature (T_{amb}), solar irradiation on the wall surface (I_{g}), and sol-air temperature ($T_{\text{sol-air}}$) are shown in Fig. 3.

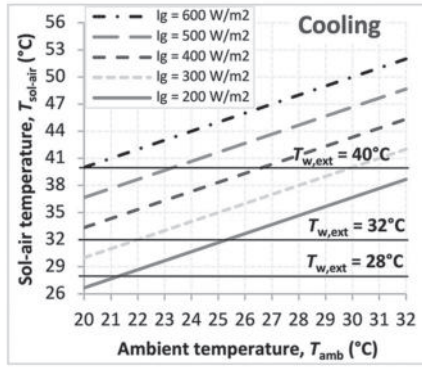


Fig 3: Combinations of ambient temperature, solar irradiation on the wall, and sol-air temperature.

The hourly and average values of ambient air temperature, the intensity of solar radiation and sol-air temperature for a design day, realistic for the region of the Czech Republic and Slovakia, are shown in Fig. 4. In the subsequent calculations, a sol-air temperature of 45 °C was used.

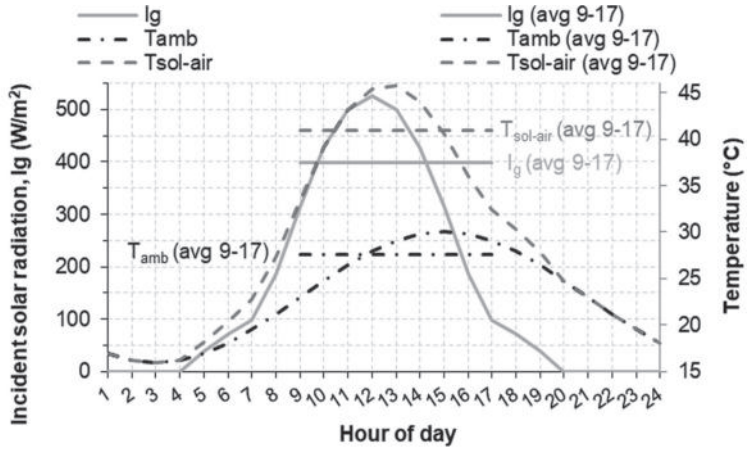


Fig. 4: Temperature distribution within wall fragments of Wall B.

The detailed temperature fields in Fig. 5 and 6 help understand the temperature distribution within the wall fragment. In both cases, the thermally insulating core prevents cool losses to the exterior and direct the cool distribution to the interior. However, for Wall A, the temperature at the surface and consequently the cooling output is higher than for Wall B due to the location of the pipes closer to the surface.



Fig. 5: Temperature distribution within wall fragments of Wall A.



Fig. 6: Temperature distribution within wall fragments of Wall B.

4. WATER TEMPERATURE AND COOLING OUTPUT

Figs. 7 and 8 show the cooling output of the two wall systems at the room temperature of 26 °C. For radiant heating and cooling systems, the cooling output is controlled by the "self-control" effect meaning that a small decrease in room temperature will significantly decrease the temperature difference between wall and space and thus the cooling output of the wall (Olesen 2002). The investigated system Wall A with a water temperature in the pipes of 18 °C has a cooling capacity of 295.5 W at a cooling area of 15 m². For Wall B, the cooling capacity at a water temperature in the pipes of 18 °C has a cooling capacity of 268.5 W assuming a cooling area of 15 m².

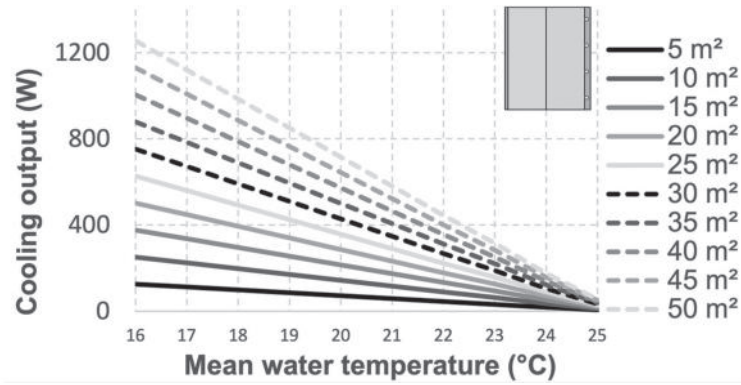


Fig. 7: Effect of water temperature on cooling output at various cooling surface areas (Wall A).

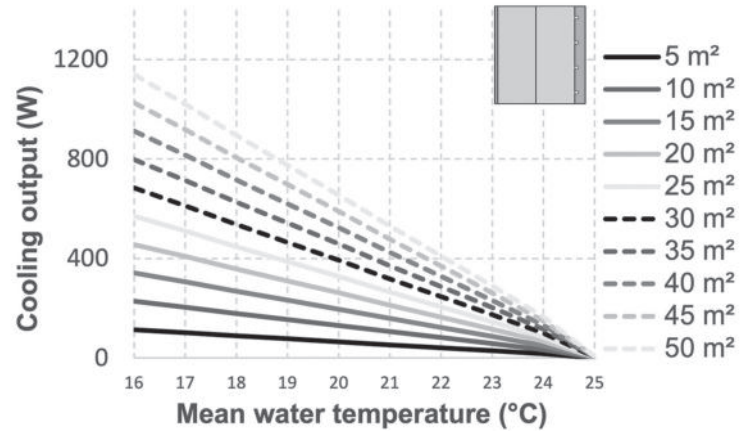


Fig. 8: Effect of water temperature on cooling output at various cooling surface areas (Wall B).

5. THERMAL BALANCE OF AN OFFICE ROOM

The cooling load of a typical office was calculated to evaluate the ability of the wall system investigated to cool down the room. The envisaged office is located on the 3rd floor of a 3-storey office building. The office building is located in Bratislava, Slovakia. The perimeter masonry of the building consists of aerated concrete blocks 400 mm thick, insulated with a thermal insulation 100 mm thick. The office dimensions are

shown in Fig. 9. The 600 mm thick roof presents an insulated reinforced concrete structure. The construction height of the office room is 3 m and the clear height is 2.7 m. The heat load calculation was done for the month of August at 15 o´clock and an outdoor temperature of 30 °C.

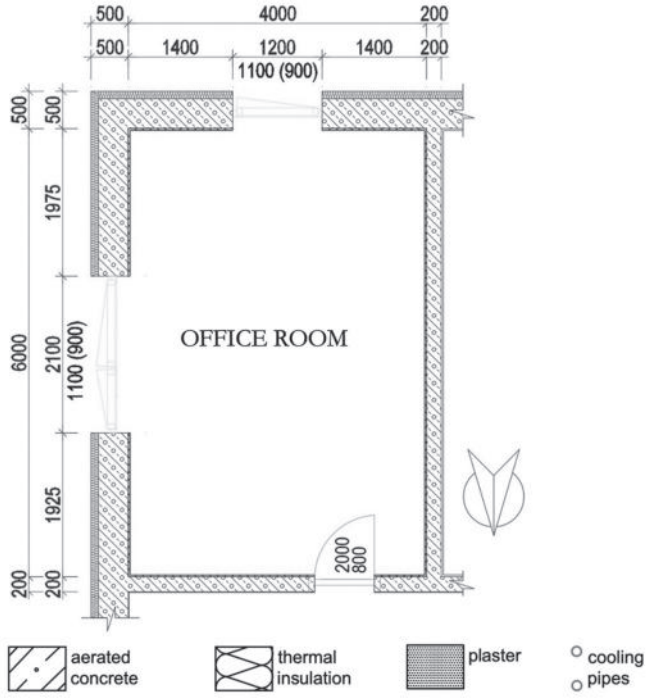


Fig. 9. The construction dimensions of the office.

The considered room is inhabited by two employees with the corresponding equipment: 2 x desktop computer, 1 x printer, 1 x refrigerator 100 l, and an electric kettle. The room has two windows with insulating triple glazing equipped with external blinds. The calculated cooling load under peak cooling conditions was 1108 W. The cooling load was calculated using dedicated TECHCON software (Techcon SK 2020). From Fig. 7 it is clear that 45 m² of the active cooling area would be needed to cover the heat gains by Wall A assuming a water temperature in the pipes of 16 °C. With Wall B, 50 m² of cooling system would be required assuming a water temperature of 16 °C.

6. CONCLUSION

This paper aimed to evaluate the ability of the wall cooling system with pipes located in inner plaster to cool down a typical office room under peak cooling load. Two thicknesses of the inner plaster were considered: standard thickness of 2.5 cm and a thick plaster of 5 cm. The purpose of using the thick plaster was to lower the risk of damage to the pipes in case an intervention is made to the wall over the active surface. It was shown that increasing the plaster thickness reduced the cooling output in the order of several tenths of Watts. Regardless of the plaster thickness, it was shown that in an office with a cooling load of 1108 W and net floor area of 24 m² either of the two system variants was able to provide sufficient cooling capacity. For Wall A with the lower plaster thickness, 45 m² of the active surface area would be required, whereas 50 m² was needed for Wall B with a thicker plaster.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Slovak Research and Development Agency under contract No. APVV-16-0126 and Ministry of Education, Science, Research and Sport grant 1/0847/18, and by the grants The work was supported by TAČR NCK CAMEB, project TN01000056/06 and by Czech Science Foundation, project GA 20-00630S.

REFERENCE

ASHRAE (2017) ASHRAE Handbook – Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, 2017.

Bliss Jr. R.W. (1961), Atmospheric radiation near the surface of the ground: a summary for engineers, Sol. Energy 5 (1961) 103–120.

Ding Y., Zhang Q., Yuan T., et al. (2020) Effect of input variables on cooling load prediction accuracy of an office building, Appl. Therm. Eng. 128 (2018) 225–234.

TECHCON software, Techcon SK, https://www.techcon.sk/ (accessed 7 Oct 2020)

Kalús D., Páleš P., Pelachová Ľ. (2011) Self-supporting heat insulating panel for the systems with active regulation of heat transition, Patent WO/2011/146024, 2011.

Olesen, B.W. (2002) Radiant floor heating in theory and practice, ASHRAE Journal, 7, 19-24.

Plasek J. & Šikula O. (2014) Transient numerical simulation of linear thermal transmittance in software CalA, Adv. Mater. Res. 1041 (2014) 277–280.

Sikula O. (2011) Software CalA User Manual (In Czech), Tribun, Brno, p. 42.

Sikula, O. & J. Plasek (2015) Software CalA 4.0 (Calculation Area). version 4.0 Edu. 2015/10/05 Available: doi:10.13140/RG.2.1.1501.7689.

Šimko M., Krajčík M., Šikula O., et al. (2018) Insulation panels for active control of heat transfer in walls operated as space heating or as a thermal barrier: Numerical
simulations and experiments, Energy Build (158) 135–146.

Šimko M., Krajčík M., Šikula O. (2019) Radiant wall cooling with pipes arranged in insulation panels attached to facades of existing buildings, Proceedings of the 13th REHVA World Congress Clima 2019, Bucharest, Romania, 26-29, (2019).

Contact:
Barbora Junasova
Radlinského 11
810 05 Bratislava
Email: barbora.junasova@stuba.sk

Recuperation of waste heat produced by public pools and low-enthalpy energy utilization

A. Predajnianska, J. Takács
Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Services, Bratislava, Slovakia

ABSTRACT: Geothermal energy is clear energy from the interior of the Earth, which can be used in many ways. Around the world we can find many interesting applications of geothermal energy usage, for instance water heating in fish farms, snow melting or streets and sidewalks deicing, vegetable drying and electricity generation. Slovakia is country relatively rich for geothermal energy. Geothermal energy in Slovakia is mainly used in recreational facilities, but is has its uses also in systems of centralized heat supply, in heat transfer stations and greenhouse heating. In general this energy is considered as inexhaustible, but it may not be true in all cases. Exhaustibility of some sources is estimated at only a few decades. This is the reason, why we should to be environmentally friendly and try to use the resources that the Earth provide us as much as possible.

1. INTRODUCTION

There are many answers to question "What is geothermal energy?" Geothermal energy is the heat that can be extracted from the interior of the Earth (Stefansson 2005). Another explanation is, that geothermal energy is the natural heat of the Earth, which is estimated to be 5 500 °C in the Earth´s centre – almost as hot as the surface of the Sun (International Geothermal Association 2018). By International Geothermal Association, geothermal energy (GE) is pure treasure under our feet.

In general we distinguish two types of geothermal resources – low-enthalpy and high-enthalpy geothermal sources (Lund et al. 2015). Low-enthalpy GE resource is with geothermal water temperature up to 150 °C. This resources types can be used only for direct utilization. Direct utilization is the oldest and most used way of GE usage. This system can be used in recreational and balneological facilities, civic amenities buildings heating, residential buildings heating, also in agricultural facilities for instance for greenhouse heating and in industrial buildings as geothermal power plants. Second is high-enthalpy GE source with geothermal water temperature higher than 150 °C. This sources temperature is high enough to be used for electricity generation. This sources we can find in areas where magma is near the earth´s surface. The largest area with this features is called Pacific ring or "fire belt" which lay out on the edge of American and Asian continent and goes around the Pacific Ocean. There are 72 registered geothermal power plant around the world, whereas none has been built in Slovakia so far.

2. GEOTHERMAL ENERGY UTILIZATION IN SLOVAKIA

Slovakia is relatively small country with large geothermal potential. Geological researches showed, that all geothermal potential in Slovakia is about 215 MWh provided that the geothermal water does not return into underground through the injection well. If geothermal water should be returned to the underground, geothermal potential would increase to 5000 MWh. Geothermal water injection is not possible in all cases. For instance when geothermal water comes in contact with air or human skin, it is not advisable to return it to the underground. Injection is possible only in closed circles as systems of centralized heat supply (Takács & Predajnianska 2019).

In the past, there was 28 perspective areas in Slovakia with 61 registered geothermal wells (Franko et al. 1995). At present there are 32 geothermal potential areas in Slovakia in which we can find 176 registered geothermal wells with geothermal water temperature reaching by 30 °C up to 130 °C (Fričovský et al. 2017). All of this are low-enthalpy geothermal sources except two high-enthalpy sources in the east of Slovakia near the city Košice which reaches temperature suitable for electricity generation. Installed power in Slovakia is about 215 MWh what is only 3.1 % of all geothermal energy potential. Main geothermal energy usage in Slovakia is in recreational facilities. About 60 % of all installed power is used in recreational and balneological facilities (Miček & Takács 2014). More than 16 % is used in systems of centralized heat supply and for greenhouse heating. Another power is used for heat pumps and in fish farms. This data can be seen in Tab. 1.

Tab. 1: Geothermal energy utilization in Slovakia

Place of use	Installed heat power	
	MW	%
Recreational facilities	129.3	60.1
Systems of centralized heat supply	35.9	16.7
Greenhouse heating	34.8	16.2
Heat pumps	10.4	4.9
Fish farming	4.6	2.1
Summary	215.0	100

3. CURRENT SITUATION IN RECREATIONAL FACILITIES

Usage of renewable heat resources contains energy, economy and ecology advantages. Support of renewable energy resources usage is anchored in the directive number 2010/31/EU of the European parliament and of the council about energetic economy of buildings, which assumes lowering the energy consumption by 20 %, increasing of renewable resources usage by 20 % and decrease greenhouse gasses production by 20 % to the year 2020. By the law number 364/2004 Law on Waters and on the amendment of the Law of the Slovak Nation Council n. 372/1990 Offenses law as amended (or Water Law) is maximum waste pool water temperature set at 25 °C. In most cases this requirement is not met which is why operators are facing sanction for environmental pollution. Therefore, in this article we focus on recuperation of waste heat produced by public pools and low-enthalpy energy utilization. Is necessary to design proposals which can secure energy, economy and ecology advantages in accordance with the Directive.

4. ENERGY BALANCE

In recreational facilities are used three basic types of swimming pools. Tóthová & Takács (2004) distinguish:

Flow based pool filled with geothermal water,
Flow based pool filled with mixed geothermal and cold water,
Circulation based pool with buffer tank,
Circulation based pool without buffer tank.

Before recuperation of waste heat proposal we need to know energy balance of the pools in recreational facility. In cooperation with Thermal Corvinus in Veľký Meder, Slovakia we made energy balance calculation of covered recreational flow based pool filled with mixed geothermal and cold water, which area is 295.0 m^2, depth is 1.25 m, volume is 368.0 m^3. Geothermal water with temperature 70 °C and cold water with

temperature 15 °C, are mix in mixing chamber to desire pool water temperature 38 °C. Operating time of pool is 69 days and pool was out of order for 7 days. In the calculation we consider the summer operation of the pool. Input data can be seen in Tab. 2.

Tab. 2: Energy balance calculation results

Recreational pool	Area	Volume	Depth	GTW	CW	PW	Service	Out of order
	(m^2)	(m^3)	(m)	(°C)	(°C)	(°C)	(days)	(days)
	295.0	368.0	1.25	70	15	38	69	7

GTW – geothermal water, CW – cold water, PW – pool water

For this calculation we made a simple table with which we are able to calculate energy balance of solved swimming pool. Calculation results such as water flow in process of filling and operation of the pool, geothermal and cold water temperature are shown on Fig. 1. Calculation results showed that in process of filling is needed geothermal water flow 5.46 l/s and cold water flow 5.90 l/s to desire pool water flow 11.36 l/s. In process of service of poll is needed geothermal water flow 0.71 l/s and cold water flow 0.77 l/s to desire pool water flow 1.48 l/s. In process of operation there is waste pool water with temperature 38 °C which is discharged into recipient without another usage. Waste pool water is still hot enough to discharge it into recipient without environmental pollution. Waste pool water with this high temperature still has low-energy potential. This is why we need to make increase efficiency proposal.

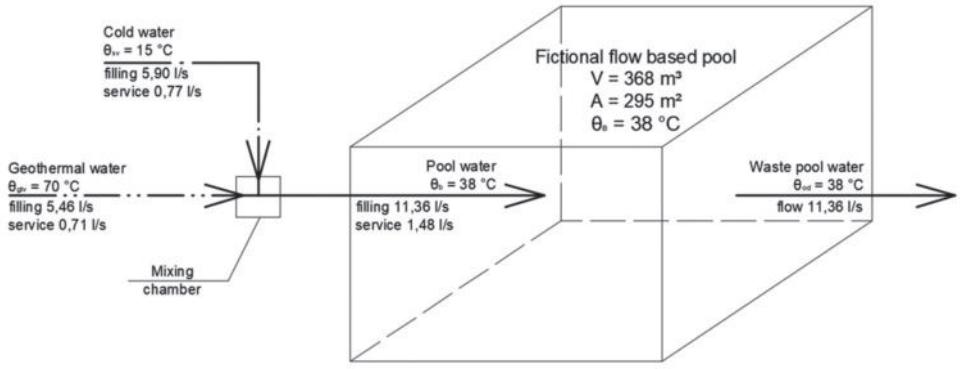


Fig. 1: Scheme of recreational flow based pool without recuperation of waste heat

We summarize energy balance calculation results in graph which can be seen on Fig. 2. Here we can see graphical display of energy used during filling and operation of solved pool. During filling of this pool we need geothermal water volume of 1 947.47 m^3 mix with cold water volume of 2 102.53 m^3 to desire pool water volume of 4 050.0 m^3. During service of this pool we need geothermal water flow of 12 216.10 m^3 mix with cold water volume of 13 175.91 m^3 to desire pool water volume of 25 392.0 m^3 during the whole operation time of pool which is 69 days per year. Calculation showed, that rate of the usage of geothermal energy is 71.1 % and the rest 28.9 % is considered as waste energy. Waste pool water with temperature of 38 °C is discharged into recipient without another usage. With right increase efficiency proposal we can secure many important aspects which will be described in next part.

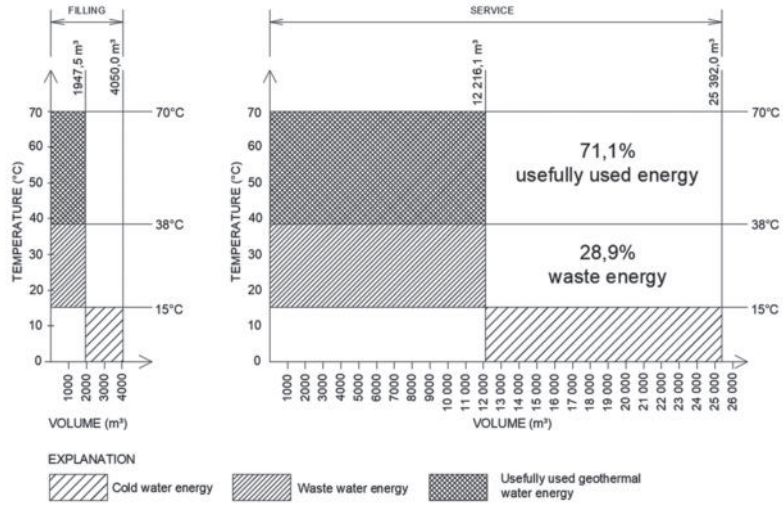


Fig. 2: Graphical display of energy used during filling and operation time of pool without recuperation

5. INCREASE EFFICIENCY PROPOSAL

Our recuperation of waste heat proposal is based on the insertion of heat recovery exchanger into circuit of waste pool water. This system can be seen on Fig. 3. Waste pool water and cold water are pass through the heat exchanger. Waste pool water transfers its heat to the cold water through heat transfer surface. In this case we increase cold water temperature from 15 °C to 27 °C. Preheated cold water is transported to the mixing chamber. Based on preheated cold water we are able to achieve reduction of geothermal water volume to desire the same pool water flow. This will also increase rate of the geothermal water usage, because we preheat cold water thanks to heat from waste pool water.

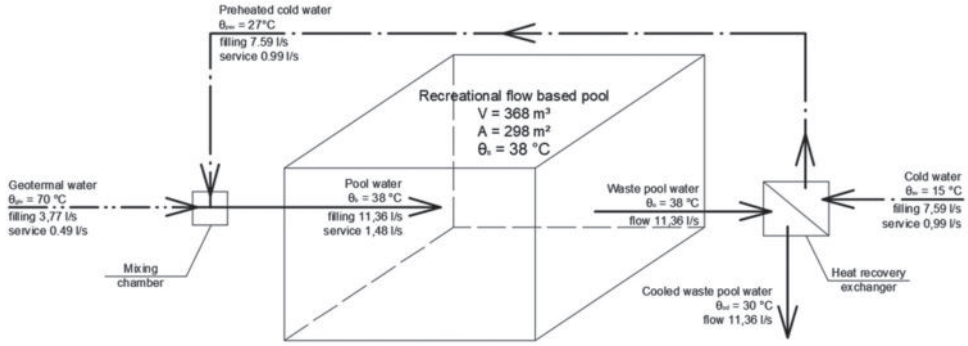


Fig. 3: Scheme of recreational flow based pool with recuperation of waste heat

Energy balance calculation results can be again seen in graphical display of energy used during filling and service of pool with recuperation (Fig. 4). As we can see, we are not able to secure changes during filling of the pool, but in process of operation of the pool we can decrease geothermal water flow from 0.71 l/s (without recuperation) to 0.49 l/s (with recuperation), decrease geothermal water volume from 1 947.5 m³ to

1 343.53 m³ during filling and decrease geothermal water volume from 12 216.1 m³ to 8 407.29 m³ during operation time of the pool. In this case we was able to decrease waste pool water temperature from 38 °C to 30 °C, increase rate of the geothermal water usage from 71.1 % to 80.0 % and decrease waste pool water energy from 28.9 % to 20.0 %. By this arrangement we can increase the lifetime of whole open geothermal energy system. Water flow and water volume results of system without recuperation are summarized in Tab. 3 and results for system with recuperation in Tab. 4.

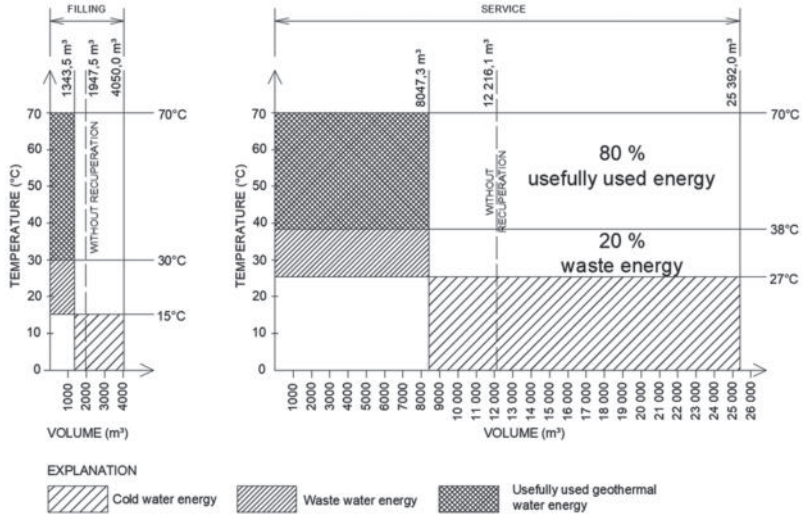


Fig. 4: Scheme of recreational flow based pool with recuperation of waste heat

Tab. 3: Water flow and volume of system without recuperation

Operating condition	PW flow	GTW flow	CW flow	PW volume	GTW volume	CW volume	Rate of GTW usage
	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(m³)	(m³)	(m³)	(%)
Filling	11.36	5.46	5.90	4 050.0	1 945.47	2 102.53	71.1
Service	1.48	0.71	0.77	25 392.0	12 216.1	13 175.91	

GTW – geothermal water, CW – cold water, PW – pool water

Tab. 4: Water flow and volume of system with recuperation

Operating condition	PW flow	GTW flow	CW flow	PW volume	GTW volume	CW volume	Rate of GTW usage
	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(m³)	(m³)	(m³)	(%)
Filling	11.36	3.77	7.59	4 050.0	1 343.53	2 704.47	80.0
Service	1.48	0.49	0.99	25 392.0	8 407.3	16 984.7	

GTW – geothermal water, CW – cold water, PW – pool water

6. HEAT RECOVERY EXCHANGER PROPOSAL

We need to know required waste pool water temperature to secure right heat recovery exchanger proposal. In this step we can use calorimetric equation (1). The more water cooling we required, the more exchanger power is needed (Takács & Predajnianska 2019). In our case we decrease waste pool water temperature from 38°C to 30°C and heat recovery exchanger with power of 380 kW was needed.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T = 11.36 \cdot 4.175 \cdot (38 - 30) \cong 380\ kW \quad (1)$$

Explanation: $\dot{Q}$ – Heat exchanger power (kW)
$\dot{m}$ – Water flow (l/s)
c – Specific heat capacity ($kJ \cdot kg^{1} \cdot K^{-1}$)
ΔT – Temperature change (°C)

7. CONCLUSION

On the solved example of the operation of a recreational pool, we can observe how energy can be recovered from the waste pool water, which is currently not used in any way and is considered as waste energy. By including a heat recovery exchanger into circuit of waste pool water we can achieve important aspects:

- Decrease waste pool water temperature down to the level at which is save to discharge it into recipient without causing any damage to environment.
- Based on preheated cold water thanks to waste pool water energy potential, we can decrease geothermal water volume needed in mixing chamber and increase rate of geothermal water usage.
- Increase open geothermal energy system lifetime.
- Reduce sanctions for environmental pollution, which can be used for modernization of technological equipment.
- Possibility to achieve zero energy potential level of waste pool water in combination with heat pumps.
- Compliance of requirements of directive EU 31/2010 of the European parliament and council about energetic economy of buildings, which assumes lowering the energy consumption by 20 %, increasing the renewable energy resources usage by 20 % and decrease of greenhouse gasses production by 20 %.

In conclusion I would like to summarize that there are a large number of ways how to use geothermal energy. Some methods are more known, others less so. Foreign countries have several different ways of geothermal energy utilization than Slovakia. The possibilities of using geothermal energy are really great, but we must not forget to be environmentally friendly and no waste resources that we consider inexhaustible.

REFERENCE

Franko O., Remšík A., Fendek M. (1995) Atlas of geothermal energy of Slovakia, Dionýz Štúr State Geological Institute, Bratislava, Slovakia

Fričovský B., Černák R., Marcin D., Blanárová V. et al. (2017) Renewability and sustainable use and utilization of geothermal energy resources: Needs and principles in the conditions of Slovakia, Proceedings from scientific conference Renewable energy resources 2017, Štrbské Pleso, Slovakia, ISBN 978-80-89878-10-9

Lund J. W., Ruggero B., Boyd T. L. (2015) Worldwide Geothermal Energy Utilization, Journal GRC Transactions, Volume 39, pp. 79-97

Miček I., Takács J. (2014) Energy and ecological aspects oft he use of geothermal energy in balneological facilities , Proceedings from international scientific conference Low-temperature heating 2014, pp. 61-66, ISBN 978-80-89216-62-8

Stefansson V. (2005) The renewability of geothermal energy, Proceedings World Geothermal Congress, 2000, Kyushu-Tohoku, Japan

Takács J., Predajnianska A. (2020) What to do with low-temperature energy from thermal baths? Proceedings from international scientific conference Heating 2020, Podbanské, Slovakia, Publishing house SSTP, pp. 147-150, ISBN 978-80-89878-58-1

Tóthová V., Takács J. (2007) How to use geothermal energy in thermal baths, Journal Stavba, pp. 42-45, ISSN 1335-5406

International Geothermal Association (2018) IGA ´Geothermal Quick guide´ Brochure, pp. 1-9, online resource: https://www.geothermal-energy.org/explore/what-is-geothermal/

Contact:
Ing. Anna Predajnianska
Radlinského 11
81005 Bratislava
Email: predajnianska.anna@gmail.co

Autor*innenverzeichnis

Alifragkis	EMTech Space P.C.	453
Archodoulaki	TU Wien	371
Binder	AEE INTEC	113
Böhler	TU Wien	281
Brandl	TU Graz	271
Braunegg	ConsultAIR GmbH	425
Buchner	Wien Energie GmbH	253
Buschmann	Klima- und Energiefonds	131
Bußwald	akaryon GmbH	147
Chondronasios	Core-Innovation	465
Damberger	IBO Innenraumanalytik OG	431
Díaz Triana	Ecodesign	289, 297
Eder	Strateco OG	147
Erker	Slavonia Baubedarf GmbH	201
Erös	Österreichische Gesellschaft der Kältetechnik ÖGKT	209
Fallmann	TU Wien	281
Feichtinger	Know-Center GmbH	271
Fink	AEE INTEC	91
Fleiß	University of Graz	57
Fohringer	Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH	405
Fourakis	Core-Innovation	465
Freimüller	Wärmepumpe Austria	217
Fuhrmann	IBFM-Ingenieurbüro Facility Management	231
Georgoutsos	EMTech GmbH	453
Geyer	AIT Austrian Institute of Technology GmbH	123
Gnam	Forschung Burgenland	27, 83, 99
Gursch	Know-Center GmbH	271
Haselböck	Österreichischer Kachelofenverband	307
Hatzl	University of Graz	57
Hauer	Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH	375
Haugeneder	ATP sustain GmbH	399
Heisinger	IBO	185
Heschl	FH Burgenland	237, 473
Hoche-Donaubauer	Bundesdenkmalamt Graz	195
Höfler	AEE INTEC	159
Holper	EVN	41
Huber-Humer	Universität für Bodenkultur Wien	361
Huemer	FH Burgenland	313
Jasek	Forschung Burgenland	83
Jaunegg	Consulting - Engineering Ewald Jaunegg	105
Jauschnik	Forschung Burgenland	321
Junasová	Slovak University of Technology SK	493
Kaineder	Wärmepumpe Austria	217

Kampourakis	Core-Innovation	465
Kelz	AEE INTEC	113
Klanatsky	FH Burgenland	237, 473
Knotzer	AEE INTEC	389
Kokkorikos	Core-Innovation	465
Kopatsch	Wärmepumpe Austria	217
Kozek	TU Wien	281
Krail	FH Burgenland	123, 321
Krajčík	Slovak University of Technology	485, 493
Kranner	FH Burgenland	333
Kreiner	TU Graz	167
Kremsner	Forschung Burgenland	41, 57
Kröpfl	Joanneum Research Forschungsges.mbH	263
Kugfarth	FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH	139, 381
Kuhlmann	FH Burgenland	355
Kummer	FH Burgenland	41
Kunze	Fraunhofer Institute IWU	69
Kurz	Forschungsinitiative Green Energy Lab	91
Kyriakoulis	Core-Innovation	465
Lang	FH Burgenland	341
Leindecker	FH OÖ Studienbetriebs GmbH	139, 381,
Leonhartsberger	Fachhochschule Technikum Wien	131
Lettner	TU-Wien Energy Economics Group	91
Leusbrock	AEE INTEC	113, 177
Lindmeier	Wien Energie GmbH	253
Livanos	EMTech Space P.C.	453
Livieris	Core-Innovation	465
Lunzer	Dr. Lunzer Energie und Umwelt e.U.	415
Maier	Forschung Burgenland	27, 57
Makoschitz	AIT Austrian Institute of Technology GmbH	289
Mantler	Österreichischer Kachelofenverband	307
Marhold	Forschung Burgenland	41
Markl	normconsult ZT GmbH	245
Mauersberger	Fraunhofer Institute IWU	69
Mauthner	AEE INTEC	177
Meintanis	Core-Innovation	465
Meirhofer	Forschung Burgenland	333
Monios	Core-Innovation	465
Nacht	4ward Energy Research GmbH	19, 33, 99
Osztovits	Bee Green World Ltd	415
Pagel	Fraunhofer Institute IWU	69
Passer	TU Graz	167, 405
Peinsipp	Forschung Burgenland	333
Petráš	Slovak University of Technology	485
Pfeiffer	Forschung Burgenland	27, 41, 57,
Plank	FH Burgenland GmbH	473
Pöttler	Herz Energietechnik GmbH	321
Pratter	4ward Energy Research GmbH	33
Predajnianska	Slovak University of Technology Bratislava	501
Puchegger	Forschung Burgenland	83

Rabelhofer	Forschung Burgenland	27
Ragossnig	RM Umweltkonsulenten ZT GmbH	347
Reinfeld	Energie Burgenland AG	91
Riebenbauer	ACAM Engineering GmbH	307
Scherhaufer	Universität für Bodenkultur Wien	361
Scherz	TU Graz	167, 405
Schiffert	Österreichischer Kachelofenverband	307
Schindler	Forschung Burgenland	99
Schittl	Forschung Burgenland	321
Schlager	Know-Center GmbH	271
Schloffer	4ward Energy Research GmbH	33
Schrammel	AEE INTEC	113
Schulz	ATP sustain GmbH	399
Schüssler	ACAM Engineering GmbH	307
Seuschek	Bundesdenkmalamt Graz	195
Sieberer	FH Technikum Wien	51
Šikula	Brno University of Technology	493
Šimko	Slovak University of Technology	485, 493
Skudelny	Klima- und Energiefonds	131
Soulioti	EMTech GmbH	453
Stangl	ACAM Engineering GmbH	307
Steiner	IBO	185
Strobel	FH Technikum Wien	51
Supper	Forschungsinitiative Green Energy Lab	91
Szabó	Slovak University of Technology	485
Takács	Slovak University of Technology Bratislava	501
Tappler	IBO Innenraumanalytik OG	431
Truger	TU Graz	405
Türk	Schrack Seconet AG	237
Twrdik	IBO Innenraumanalytik OG	431
Veitsberger	normconsult ZT GmbH	245
Venus	AEE INTEC	177
Veynandt	FH Burgenland	473
Vondrus	CV-Consulting e.U.	201
Wartha	FH Burgenland	333, 341
Weiß	AEE INTEC	159
Weiss	Joanneum Research Forschungsges.mbH	263
Weissenbacher	4ward Energy Research GmbH	33
Wenig	FH Burgenland	237
Wenzl	Joanneum Research Forschungsges.mbH	263
Wind	Wind – Ingenieurbüro für Physik	147
Wychera	Energy Changes Projektentwicklung GmbH	131
Zeilinger	Universität für Bodenkultur Wien	361

BRINGT BESONDERES ZUSAMMEN

FH Burgenland
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

e·nova
INTERNATIONAL CONFERENCE

Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

klimaaktiv

FORSCHUNG Burgenland
RESEARCH & INNOVATION

acr austrian cooperative research

Zum 24. Mal organisiert die FH Burgenland – heuer erstmals rein digital – den internationalen Fachkongress „e·nova". Passend zu den fachlichen Schwerpunkten des veranstaltenden Departments Energie- Umweltmanagement werden jedes Jahres aktuelle Themen aus den Bereichen Gebäude-, Energie- oder Umwelttechnik diskutiert. In diesem Jahr steht die Veranstaltung unter dem Titel „Technologie- und Klimawandel". Als internationale wissenschaftliche Konferenz konzipiert, richtet sich die e·nova sowohl an die wissenschaftliche Gemeinschaft als auch an berufsfeldorientierte Fachleute. Beiträge beider Gruppen aus dem Bereich der anwendungsbezogenen Forschung und Entwicklung bieten einen Überblick zum Stand der wissenschaftlichen Entwicklung. Alle im Rahmen der Konferenz präsentierten und zur Veröffentlichung freigegebenen Beiträge sind im vorliegenden Band zusammengefasst.

ISBN: 978-3-7011-0460-4