

Auf Druckluft basierende Stromspeicher und deren Einsatzmöglichkeit in Gebäuden

H. Edtmayer, T. Nacht, M. Tragner

4ward Energy Research GmbH, Graz, Österreich

ABSTRACT:

Driven through the aspirations to achieve the climate targets, a clear trend towards increasing the share of renewable energy in the electricity mix can be seen. Significant gains thereby can be recorded particularly in the areas of wind power and photovoltaics. The high share of volatile power generation causes great challenges for the future electricity system. To provide a flexible and intelligent energy system (smart grids, load shift, peak shaving, increase of self-sufficiency, etc.) for the integration of further volatile renewable energy generation a further development of innovative and sustainable decentralized storage technologies is necessary. With the use of storage systems, the spatial and temporal decoupling of consumption and renewable supply can be counteracted. Other important factors in this context are the declining feed-in tariffs in comparison to the increase in electricity purchase prices. To improve the economics of photovoltaic systems in buildings, an increase self-sufficiency is necessary. Amongst other things this can be done via decentralized storage of electrical energy and mechanical storage systems provide the opportunity to meet this functionality.

In a research project about compressed air energy storage systems, the state of the art for mechanical storage systems has been investigated. The analysis of individual technological approaches shows the specific pros and cons of various concepts. In addition to the research work itself, the effects of storage systems on the power consumption are of interest. The usage should be limited to the area of small, decentralized storage systems in buildings. On the basis of data from household loads and photovoltaic generation different storage sizes are analysed in terms of their operating performance and impact. For this, the load data is compared with the respective photovoltaic feeds and determines the surplus of the energy generation. For charging the accumulator only the photovoltaic surplus should be used. This has the consequence that by a subsequent unloading of the accumulator the grid consumption is reduced and by loading the accumulator at times of high surplus production the feed in rate in the net is reduced. A possible design of storage size is a daily storage, so the discharge is started on the same day once the photovoltaic production no longer covers the energy needs of the building. The principle use of the storage can be explained as follows. The building load and the photovoltaic production serve as boundary conditions, where different range areas in the load curves are defined. One area represents the surplus production of the photovoltaic system. This energy can be used for charging the energy storage. Another area defines the amount of energy that is not covered by the photovoltaic system. In the best case this amount of energy should be provided by the available storage energy. By analysing a whole year a preliminary estimation of the required storage size and capacity can be done. By varying the storage capacity and storage performance, a sensitivity analysis can be carried out, which provides information about the necessary storage system parameters.

1. MOTIVATION

Derzeit entfallen 24 % des österreichischen Strombedarfs auf private Haushalte sowie 16,1 % auf Gewerbe und sonstige Kleinkunden (E-Control, 2014). Technische und regulatorische Neuerungen haben Einfluss auf diesen Stromverbrauch. Daneben werden dezentrale PV-Anlagen kostengünstiger, wobei derzeit die Technologie-Förderung (Ökostromförderung oder Investitionsförderung) diese Preisentwicklung stützt. Für Überschusseinspeiser bzw. tarifgeförderte Anlagen nach Auslaufen des Fördertarifs ist eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch eine Erhöhung des Eigenverbrauchs und einer daraus folgenden Reduktion des Netzbezugs elektrischer Energie möglich. Diese Rahmenbedingungen werden mittel- bis langfristig einen signifikanten Einfluss auf den Sektor der erneuerbaren Energieerzeugung ausüben (Kalt & Baumann, 2013). Mit der weiteren Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien im gesamten Energiemix wird der Bedarf an nachhaltigen Technologien, welche die Spitzenlastanforderungen bewältigen, zu einem entscheidenden Thema (Quaschnig, 2013)(Totschnig, 2013). Diese Aufgabe könnte von Speichern in Kombination mit intelligenter Kommunikation zwischen den Technologien, so genannten Smart Grid Lösungen übernommen werden (Pucker, 2014). Mechanische Speicher, im Speziellen Druckluftspeicher, stellen eine Möglichkeit dar elektrische Energie dezentral zu speichern (Dötsch, 2012).

2. TECHNOLOGIEBESCHREIBUNG DRUCKLUFTSPEICHER

2.1 LUFTSPEICHERSYSTEME

Es sind mehrere technologische Konzepte Stand der Technik, um elektrische Energie in Luftspeichersystemen – Air Energy Storage (AES) zu speichern, wie in Abb. 1 skizziert ist (Sternier & Stadler, 2014).

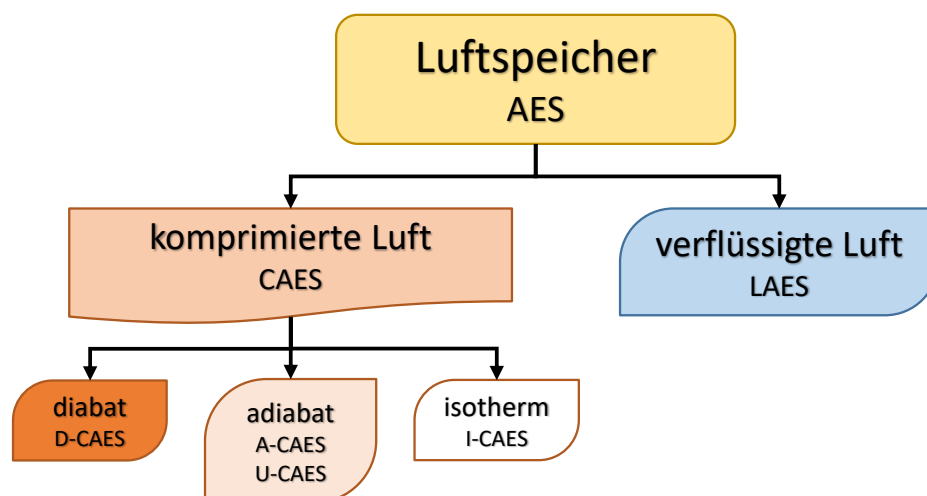


Abb. 1: Einteilung der Luftspeicherkonzepte (Eigene Darstellung nach Sternier & Stadler, 2014)

Wie auch bei anderen Gasen z.B.: Wasserstoff besteht die Möglichkeit, Luft in komprimierter gasförmiger – Compressed Air Energy Storage (CAES) oder in kryoflüssiger Form – Liquid Air Energy Storage (LAES) zu lagern. Die Verflüssigung bringt den Vorteil einer hohen Speicher- und somit Energiedichte mit sich. Nachteilig ist der hohe technische und energetische Aufwand für die Einspeicherung. Daher kommt diese Technologie für dezentrale Speicher im kleineren Leistungsbereich nur bedingt in Frage. Bei der komprimierten, gasförmigen Luftspeicherung kann zwischen drei grundlegenden Kompressionsvorgängen unterschieden werden. In der diabaten Kompression und Speicherung (D-CAES) wird die bei der Gasverdichtung entstehende Wärme im Gas belassen, welches sich bei der anschließenden Lagerung abkühlt und die Wärme dabei abgibt. Vor der Expansion in einer Turbine muss diese Wärme wieder zugeführt werden, z.B. durch einen Gasbrenner. Dies hat einen zusätzlichen Energieaufwand zufolge und verschlechtert somit den Einspeicherwirkungsgrad. In einer Weiterentwicklung dieser Technologie wird Abgaswärme nach der Expansion über einen Wärmetauscher geleitet und für die

Vorwärmung der Druckluft vor der Brennkammer genutzt. Dadurch kann der Kraftstoffverbrauch gesenkt und somit der Wirkungsgrad verbessert werden. Für eine Art der adiabaten Speicherung (A-CAES/U-CAES) wird die Luft nach der Kompression durch einen thermischen Speicher geführt, welcher die entstandene Wärme zwischenspeichert. Während der Expansion wird die gespeicherte Wärme dem umgekehrten Luftstrom wieder zugeführt. In einer weiteren Herangehensweise wird die erhitzte Luft in einem isolierten Behälter gelagert, um den Energieverlust durch Abkühlung zu minimieren. Diese Maßnahmen verbessern den Prozesswirkungsgrad erheblich. Beim Prinzip der isothermen Kompression und Speicherung (I-CAES) wird versucht, die Temperaturerhöhung in der Druckluft während der Kompression zu begrenzen.

2.2 ISOTHERME DRUCKLUFTSPEICHER (I-CAES)

Für die Annäherung an eine isotherme Verdichtung wird versucht, entweder die während des Kompressionsvorganges entstehende Wärme in Medien (Hydrauliköl, Wasser) zu leiten, welche am Prozess beteiligt sind oder durch eine geeignete Prozessführung die Temperaturerhöhung im Gas möglichst gering zu halten. Ein Blockschaltbild für eine mögliche Ausführung eines Systems mit hydraulischer Verdichter-/Expansioneinheit ist in Abb. 2 gezeigt.

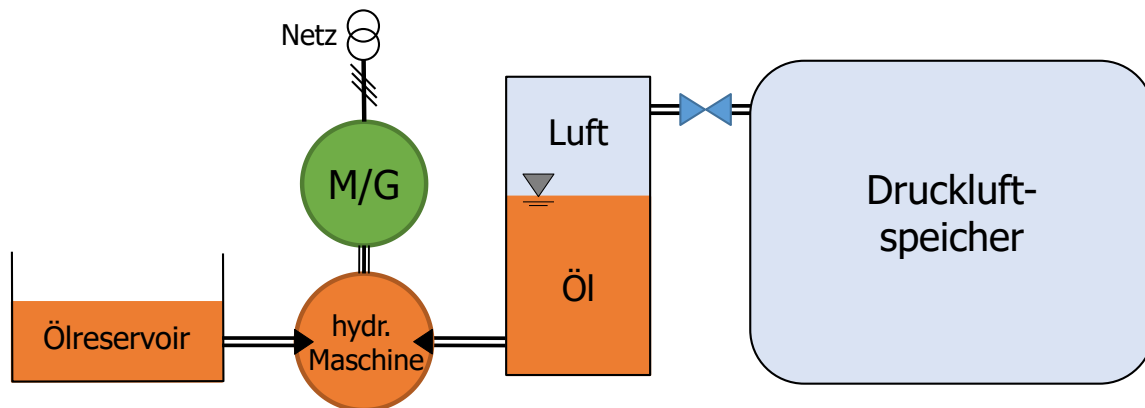


Abb. 2: Blockschaltbild isothermer Druckluftspeicher

Die Verdichtungs- und Expansionsarbeit wird dabei mit Hilfe einer hydraulischen Maschine durchgeführt, welche über einen Elektromotor angetrieben wird. Das Hydrauliköl ersetzt dabei den Kolben im Kompressionszylinder und ermöglicht somit einen Wärmeübergang vom komprimierten Gas in die Flüssigkeit. Die elektrische Energie wird dabei mechanisch in der Gasfeder des Druckluftspeichers gespeichert. Zur Auspeicherung wird die hydraulische Maschine als Motor betrieben und die elektrische Maschine als Generator. Die zuvor im Öl gespeicherte Wärmemenge kann dabei wieder in das expandierende Gas übergehen. In der Herangehensweise einer geeigneten Prozessführung wird die Temperaturerhöhung im Gas durch ein geringeres Druckverhältnis von Minimal zu Maximaldruck reduziert. Dabei vermindert sich jedoch die eingespeicherte Energiemenge und muss durch eine größere Gasfeder kompensiert werden. Eine Kombination dieser technischen Varianten kann die Vorteile verbinden und die Machbarkeit gewährleisten. Für eine Abschätzung einer geeigneten Prozessführung kann in erster Näherung ein idealer Prozess mit isentroper Verdichtung und Expansion sowie isochorer Wärmeabfuhr für ideales Gas (trockene Luft) betrachtet werden. Dabei berechnet sich die spezifische Arbeit der Verdichtung und Expansion nach

$$w_t = \frac{\kappa}{\kappa - 1} * R_L * T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \quad (1)$$

und der Speicherdruck nach isochorer Wärmeabfuhr auf Umgebungstemperatur nach

$$p_3 = p_2 * \frac{T_3}{T_2} \quad (2)$$

Für ein Berechnungsbeispiel wird der Gasdruck im Ausgangszustand mit 300 bar und im maximal komprimierten Zustand mit 400 bar festgelegt. Die Temperatur T_1 wird mit einer Umgebungstemperatur von 25 °C definiert. Bei einem Gasvolumen von 1 m³ wird dadurch ein Fördervolumen des verwendeten Hydrauliköls von 186 l für die Verdichtung benötigt. Somit ergibt sich eine eingespeicherte Energiemenge von 2,5 kWh. Die Temperaturerhöhung während der Kompression wird durch diese Prozessführung auf 25,5 K begrenzt. In der anschließenden isochoren Wärmeabfuhr auf Umgebungstemperatur reduziert sich der Speicherdruck auf 368 bar. Während der Ausspeicherung können bei der Expansion auf den Ausgangsdruck 1,66 kWh rückgewonnen werden. Der Wirkungsgrad dieses idealen Prozesses beträgt 67 %. Durch eine thermische Isolierung des Gasspeichers oder einer Überführung der Wärmemenge in das Hydrauliköl kann der Wirkungsgrad deutlich verbessert werden. Wird der Temperaturrückgang im komprimierten Zustand auf 5 K begrenzt oder die entsprechende Wärmemenge aus dem Hydrauliköl rückgewonnen, verbessert sich der Wirkungsgrad des Prozesses auf 93 %.

3. SPEICHEREINSATZMETHODIK

Die große Herausforderung beim Einsatz von erneuerbaren Energiequellen ist die teilweise zeitliche Entkoppelung vom Verbrauch. Diese Herausforderung findet sich auch im Sektor der Gebäude wieder, in dem hauptsächlich PV-Anlagen für die Deckung des Bedarfs zum Einsatz kommen. Die Charakteristik der PV-Erzeugung richtet sich nach dem aktuellen Sonnenstand, genauer nach der verfügbaren Globalstrahlung. Faktoren wie Bewölkung, Nebel oder andere Effekte können den Ertrag der Anlage beeinflussen. Diese starre Koppelung der PV-Erzeugung an die aktuell verfügbare Globalstrahlung führt dazu, dass es zu einer Überschussproduktion kommen kann. Das heißt, dass die aktuelle Erzeugung aus der Anlage den aktuellen Verbrauch übersteigt. In Abb. 3 ist die PV-Erzeugung einer 5 kW_p Anlage dem Lastgang eines Haushaltes gegenübergestellt.

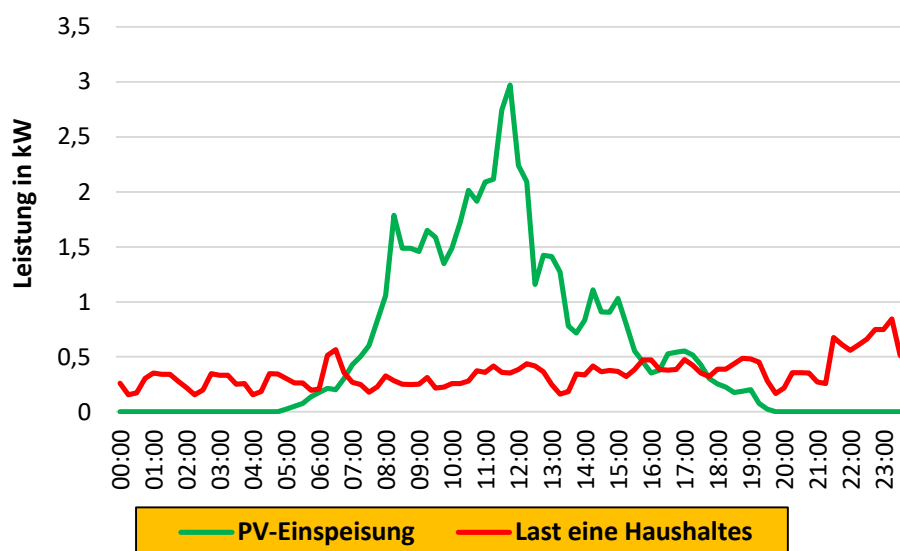


Abb. 3: Gegenüberstellung der Erzeugung einer PV-Anlage mit dem Lastgang eines Haushaltes

Aus der Abbildung ist der Erzeugungüberschuss der PV-Anlage klar zu erkennen. Liegt ein Vertrag mit bspw. der OEMAG vor, kann dieser Überschuss zu einem vergüteten Tarif in das öffentliche Netz eingespeist werden. Dieser Tarif ist jedoch geringer als der Preis für den Bezug von Strom, wodurch es sinnvoller wäre, die selbst erzeugte elektrische Energie auch selbst zu verbrauchen. Um den Eigenverbrauch der Stromerzeugung aus der PV-Anlage zu erhöhen, soll ein Speicher zum Einsatz kommen, welcher den Überschuss an PV-Erzeugung aufnehmen und zu geeigneten Zeitpunkten wieder abgeben kann. Die Information wann eine Ladung bzw. eine Entladung des Speichers erfolgen soll, wird durch die Speichereinsatzstrategie definiert. Zwei solcher Strategien werden hier näher beleuchtet.

Eine entscheidende Größe für die folgend beschriebenen Speichereinsatzstrategien ist die Residuallast, die Auskunft darüber gibt, ob eine Überschusserzeugung vorliegt, oder nicht. Unter dem Begriff Residuallast ist hier die Last abzüglich der erneuerbaren Erzeugung zu verstehen, d.h. eine negative Residuallast bedeutet, dass die Erzeugung aus der PV-Anlage überwiegt. Abb. 4 zeigt den Verlauf der Residuallast für die in Abb. 3 dargestellte Situation.

Die eingefärbten Flächen zeigen jeweils die aus dem Netz bezogene und die in das Netz eingespeiste Energie. Für den Kunden ergibt sich aus der Differenz zwischen Strompreis und Einspeisevergütung ein „Verlust“, da bei einer Eigennutzung der ins Netz eingespeisten Energie weniger Kosten durch den Bezug von elektrischer Energie entstehen würden. Durch den Einsatz des Speichers soll es möglich werden, die in Abb. 4 dargestellten Energiemengen (farbige Flächen) zu reduzieren. Es soll sowohl die ins Netz gespeiste als auch die vom Netz bezogene Energie verringert werden. Dadurch kommt es zu mehreren Effekten: (1.) der Eigenversorgungsgrad und (2.) der Autarkiegrad steigen an und (3.) die Kosten für den Strombezug sinken.

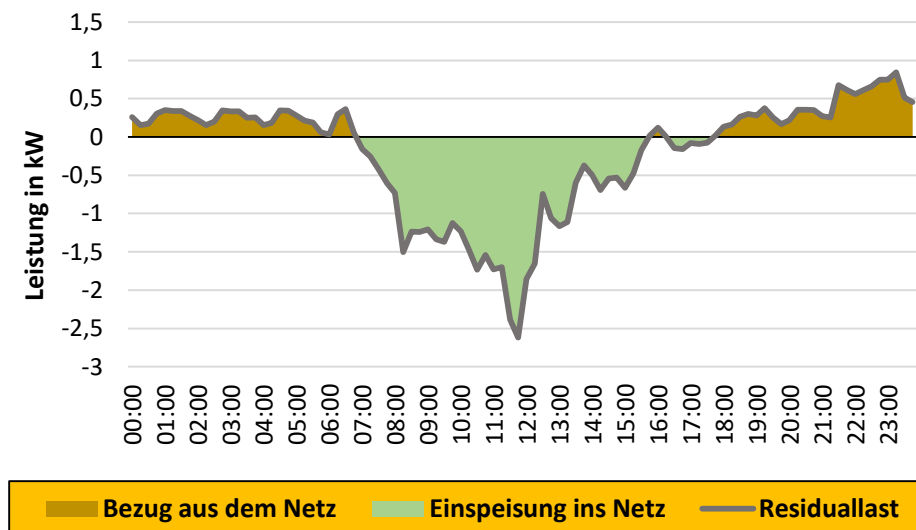


Abb. 4: Residuallastverlauf durch die Einspeisung aus einer PV-Anlage

Für einen wirtschaftlichen Betrieb des Speichers müssen die Anschaffungskosten den Ersparnissen durch den geringeren Strombezug gegenübergestellt werden. Dabei müssen die reduzierten Einnahmen durch die Vergütung der Überschusserzeugung (diese wird durch den Speichereinsatz verringert) berücksichtigt werden. Außerdem ist es notwendig die Lade- und Entladewirkungsgrade, die sich durch Verluste in der Energieumwandlung sowie durch die Wirkungsgrade der Maschinen ergeben, ebenfalls zu berücksichtigen. Wenn sich nach Betrachtung all diese Faktoren nach wie vor verringerte Kosten für Betreiber des Speichers ergeben, liegt ein wirtschaftlicher Betrieb vor.

Die erste Speichereinsatzstrategie basiert auf der Grundidee, dass die Residuallast durch Laden und Entladen des Speichers in einem möglichst schmalen Band gehalten wird. Diese Strategie bringt den Vorteil, dass neben dem erhöhten Eigenverbrauch auch die Residuallastspitzen geglättet werden. Ginge man von einer flächendeckenden Implementierung der Speicher aus, würde daraus ein geringerer Bedarf an Spitzenlastkraftwerken resultieren. Dadurch käme es zu weniger Spitzenlastsituationen und eine Vorhersage des Verbrauchs wäre einfacher möglich.

Für diesen Zweck werden Lade- und Entladegrenzen eingeführt, die als Schwellenwerte für den jeweiligen Betrieb gelten. Der idealisierte Verlauf der Last nach Einsatz des Speichers ist in Abb. 5 dargestellt. Wie bereits erwähnt, wäre aus Sicht des Energiesystems ein solcher Einsatz des Speichers zu bevorzugen, da er zu einer Vergleichmäßigung des Lastganges führt und damit auftretende Lastspitzen reduziert. Um diesen Effekt zu erreichen ist jedoch ein hoher

Aufwand zu betreiben. Die Grenzen für die Ladung und Entladung des Speichers sind nicht willkürlich zu wählen, sondern hängen maßgeblich von der Speicherdimensionierung, der aktuellen Last und der aktuellen PV-Einspeisung ab und auch von der zukünftigen Last und Einspeisung. Aus diesem Umstand ergibt sich ein sehr hoher Aufwand durch notwendige Prognosen für sowohl Last als auch Erzeugung. Hinzu kommt, dass der zusätzliche Vorteil, nämlich die Vergleichmäßigung des Lastprofils, für den Betreiber des Speichers unter der aktuellen Marktsituation keinen Vorteil bringt.

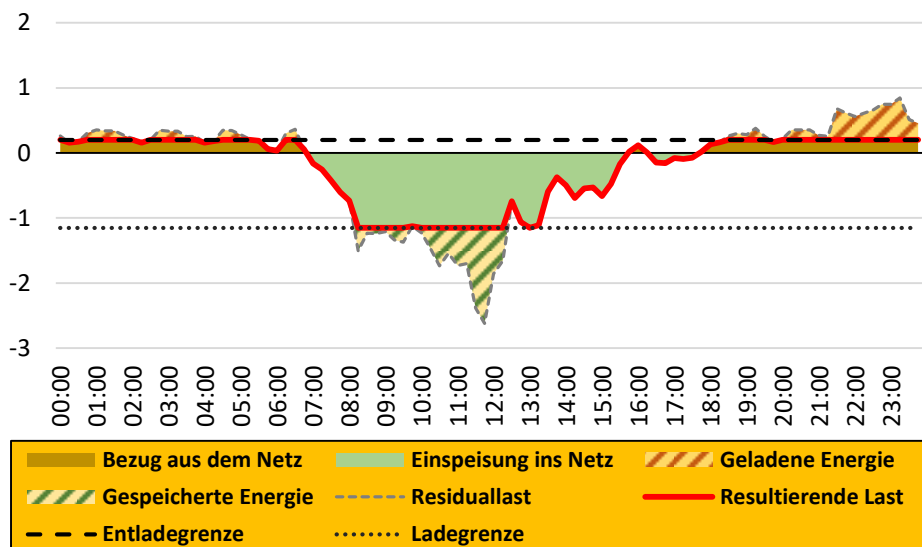


Abb. 5: Verlauf nach Einsatz des Speichers unter Verwendung von Lade- und Entladegrenzen

Für ihn zählt lediglich, dass mehr Energie aus der erneuerbaren Erzeugungsanlage selbst genutzt wird, und dadurch weniger Strom vom Lieferanten bezogen werden muss. Dieser Umstand lässt sich damit begründen, dass Haushaltskunden derzeit noch einen gleichbleibenden Stromtarif, unabhängig von der Höhe und dem zeitlichen Anfall der bezogenen Leistung zu entrichten haben. Außerdem kommt es aufgrund der Wahl der Lade- und Entladegrenzen zu der Situation, dass wegen der Erzeugungsspitzen der PV-Anlagen die notwendige Ladeleistung zumeist höher ausfällt als die Entladeleistung. Wenn nur ein Maschinensatz zum Einsatz kommen soll, ist dieser Umstand aus Sicht des Wirkungsgrades nicht ideal, da somit die Maschine bei der Entladung stets nur im Teillastbetrieb laufen würde. Dies hat einen schlechten Wirkungsgrad zur Folge. Diese Punkte führen zu dem Entschluss, dass diese Speichereinsatzstrategie für einen Haushaltskunden nicht sinnvoll und zielführend ist.

Da die erste Speichereinsatzstrategie für Haushaltskunden nicht ideal ist, soll eine Strategie definiert werden, welche sich leicht umsetzen lässt und dennoch denselben Effekt für den Betreiber hervorruft. Die aus dieser Überlegung resultierende Einsatzstrategie basiert auf dem Gedanken, dass der Speicher auf Basis von aktuell verfügbaren Werten (daher kein Prognosebedarf) agieren soll. Daher wird der Speicher anhand der aktuellen Residuallast eingesetzt. Fällt die Residuallast unter 0, d.h. die Erzeugung aus der PV-Anlage überwiegt, soll der Speicher geladen werden. Eine Entladung des Speichers soll erfolgen, wenn die Residuallast über 0 ist. Da sich im Lade- und Entladebetrieb Verluste, welche durch den Wirkungsgrad der Maschinen entstehen, ergeben, wird für die Ladung und Entladung ein Minimalwert der Leistung definiert. Erst wenn dieser Wert überschritten wird, kann eine tatsächliche Ladung oder Entladung erfolgen. Damit sollen zu schlechte Wirkungsgrade bei der Ladung und Entladung abgefangen werden, wodurch ein wirtschaftlicher Betrieb des Speichers gewährleistet wird. Eine Entladung des Speichers erfolgt solange die Entladebedingung erfüllt ist, und der Speicher noch nicht vollständig entleert ist. Die Ladung erfolgt, solange die Ladebedingung erfüllt ist, und der Speicher noch nicht vollkommen gefüllt ist. Der resultierende Speichereinsatz ist in Abb. 6 dargestellt.

Es ergeben sich klare Unterschiede zwischen den erläuterten Einsatzstrategien. Die ein- und ausgespeicherten Energiemengen sind in beiden Fällen jedoch nahezu ident. Daraus folgt, dass der Nutzen für den Betreiber des Speichers nahezu gleich ist aber die zweite Speicherstrategie einen wesentlich geringeren Aufwand für Prognosen etc. mit sich bringt.

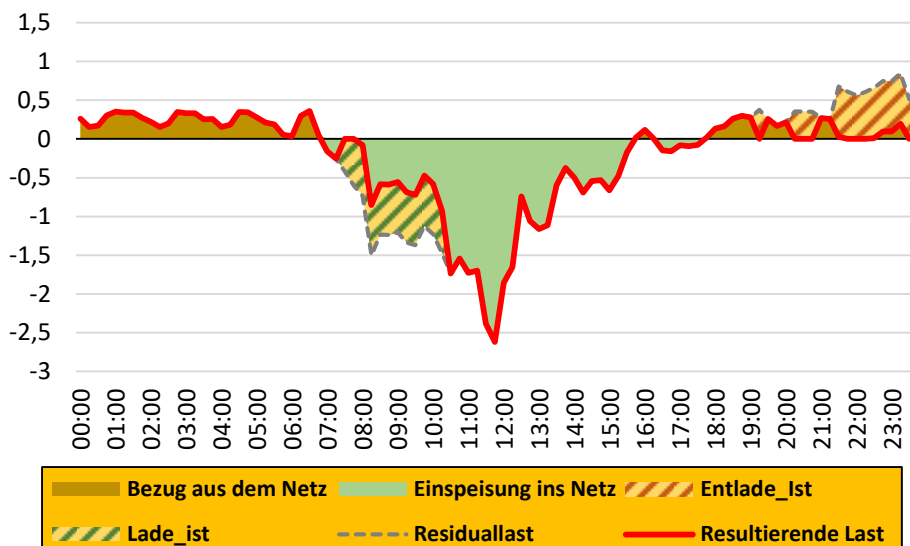


Abb. 6: Verlauf nach Einsatz des Speichers mit Einsatz des Speichers nach Verfügbarkeit der erneuerbaren Erzeugung

4. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde ein grober Überblick über die grundsätzlichen Überlegungen für den Einsatz eines mechanischen Energiespeichers dargestellt. Es wurde die Notwendigkeit eines Speichereinsatzes für einzelne Haushalts- oder Gewerbekunden beleuchtet, der erwünschte Benefit aus einem Speichereinsatz erläutert und anschließend zwei Strategien für ein Speichereinsatz beschrieben. Unter den vorliegenden Rahmenbedingungen ergibt sich, dass eine Einsatzstrategie mit reduziertem regelungstechnischem Aufwand als günstiger erscheint.

Zur Speicherung von elektrischer Energie über ein Druckluftsystem stehen mehrere technologische Möglichkeiten zur Auswahl. Eine genauere Betrachtung der Prozessauslegung sowie der Systemzusammenstellung und der daraus folgenden Anforderungen an die beteiligten Komponenten ist in weiteren, tiefergehenden Untersuchungen erforderlich. Die Erstellung von Modellen zur physikalischen Abbildung des Speichers und dessen Anwendungsstrategie kann eine verbesserte Analyse ermöglichen. Dazu ist auch die Sammlung und Aufbereitung von Randbedingungsdaten für die Speicherberechnung notwendig. Die Betrachtung von unterschiedlichen Kombinationen aus Speicherleistung, Speicherkapazität und der dazugehörigen Wirkungsgrade aus der Prozessführung in Kombination mit verschiedenen Konstellationen aus PV-Anlagen und Verbrauchern werden Aussagen über die wirtschaftlichsten Varianten einer Systemzusammenstellung und Betriebsstrategie zulassen.

LITERATUR

- Quaschnig, V. (2013): Sizing and grid integration of residential PV battery systems, IRES 2013
- Pucker, J. (2014): Energiesysteme und Speichertechnologien, Sonnensymposium 2014
- Fechner, H. (2014): Netzintegration –aktueller Stand der Smart Grids Diskussion aus dem PV Blickwinkel, Sonnensymposium 2014
- Totschnig, G. et al.(2013): AutRES100 – Hochauflösende Modellierung des Stromsystems bei hohem erneuerbaren Anteil – Richtung 100% Erneuerbare in Österreich

E-Control (2014): Statistikbroschüre 2014

Rummich E., (2009): Energiespeicher; Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen, Expert Verlag, ISBN 978-3-8169-2736-5, 2009

Dötsch, Ch. et al. (2012): Adiabates Niedertemperatur-Druckluftspeicherkraftwerk zur Unterstützung der Netzintegration von Windenergie; Abschlussbericht, Fraunhofer UMSICHT

Kanngiesser, A. et al. (2011): Optimierte Netz- und Marktintegration von Windenergie und Photovoltaik durch Einsatz von Energiespeichern, 7. Internationale Energiewirtschaftstagung TU Wien

Lemoufouet, S. & Rufer, A.(2006): A Hybrid Energy Storage System Base on Compressed Air and Supercapacitors With Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT). IEEE Transactions on Industrial Electronics 53 (2006), 4, S. 1105-1115

Sternner M. & Stadler I. (2014): Energiespeicher, Bedarf-Technologien-Integration, Springer Vieweg, ISBN 978-3-642-37379-4, 2014

Kontakt Daten Autoren:

DI Hermann Edtmayer

Reininghausstraße 13A / EG / 17

A-8020 Graz

Email: hermann.edtmayer@4wardenergy.at

DI Dr. Thomas Nacht

Reininghausstraße 13A / EG / 17

A-8020 Graz

Email: thomas.nacht@4wardenergy.at

DI Dr. Manfred Tragner

Tannengasse 18/6

A-1150 Wien

Email: manfred.tragner@4wardenergy.at
