Technologiestudie und Einsatzgebiete eines dezentralen Hydraulik-Druckgas-Speichers

Hermann EDTMAYER, Mario HABRING, Manfred TRAGNER

4ward Energy Research GmbH, Reininghausstrasse 13a 8020 Graz, 0664 889 29 638,
hermann.edtmayer@4wardenergy.at, www.4wardenergy.at

Kurzfassung:

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Konzeptstudie zu einem dezentralen, mechanischen Stromspeicher auf Basis eines Druckgasspeichers mit hydraulischem Verdichter, welche im Rahmen des Sondierungsprojektes *HD-Store* durchgeführt wurde. Dabei wurden Einzelkomponenten und deren Zusammenstellung zu einem Hydraulik-Druckgas-Speicher (HDS) betrachtet sowie der Einsatz des HDS-Systems über ein Simulationsmodell analysiert. Bewertungskriterien für den Systemansatz stellten unter anderem die technologische Machbarkeit über Serienbauteile sowie die Kostenanalyse des Systems dar. Als Ergebnis dieses Projektes wurden Empfehlungen für eine Vorgehensweise zur Weiterentwicklung dieser mechanischen Speichertechnologie zusammengefasst.

Keywords: Dezentrale Energiespeicher, mechanische Speicher, CAES, isotherme Druckgasspeicher

1 Einleitung

Um die in der Pariser Klimakonferenz 2015 beschlossenen, ambitionierten Ziele zur Reduktion des CO_2 Ausstoßes erreichen zu können, ist ein massiver Ausbau von erneuerbarer Energieerzeugung notwendig. Für die sichere und stabile Stromproduktion aus volatilen Quellen wie Wind oder Photovoltaik ist der Einsatz von dezentralen Stromspeichern in kritischen Netzbereichen zwingend notwendig. Daher beschäftigte sich das in diesem Beitrag vorgestellte Projekt *HD-Store* mit der Konzeptstudie zu einem dezentralen, mechanischen Stromspeicher auf Basis eines Druckgasspeichers mit hydraulischem Verdichter. In diesem Sondierungsprojekt wurden die Einzelkomponenten und deren Zusammenstellung zu einem Speichersystem betrachtet sowie der Einsatz des Speichers über ein Modell in einer Simulationsumgebung analysiert. Bewertungskriterien für den Systemansatz stellten dabei die technologische Machbarkeit über Serienbauteile sowie die Kostenanalyse des Systems dar.

1.1 Luftspeichersysteme

Es sind mehrere technologische Konzepte Stand der Technik, um elektrische Energie in Luftspeichersystemen – Air Energy Storage (AES) zu speichern, wie in Abbildung 1 skizziert ist. Bei der komprimierten, gasförmigen Luftspeicherung kann zwischen drei grundlegenden Kompressionsvorgängen unterschieden werden. Der diabaten (D-CAES), der adiabaten (A-CAES/U-CAES) und der isothermen Kompression und Speicherung (I-CAES).

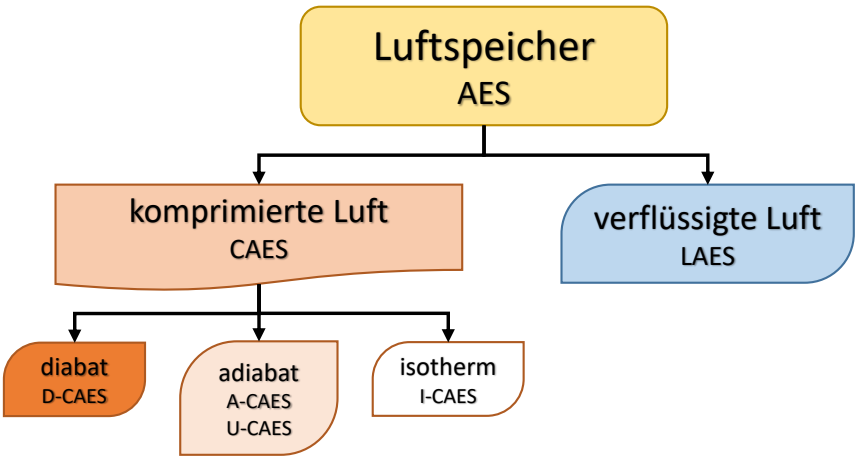


Abbildung 1: Einteilung der Luftspeicherkonzepte (Eigene Darstellung nach (Sterner & Stadler, 2014))

1.2 Isotherme Druckluftspeicher (I-CAES)

Für die Annäherung an eine isotherme Verdichtung muss die während des Kompressionsvorganges entstehende Wärme in der Gasfeder an die Umgebung abgegeben werden und beim Expansionsvorgang dem Gas wieder zugeführt werden. Ein Blockschaltbild für eine mögliche Ausführung eines Systems mit hydraulischer Verdichter-/Expansionseinheit ist in Abbildung 2 gezeigt.

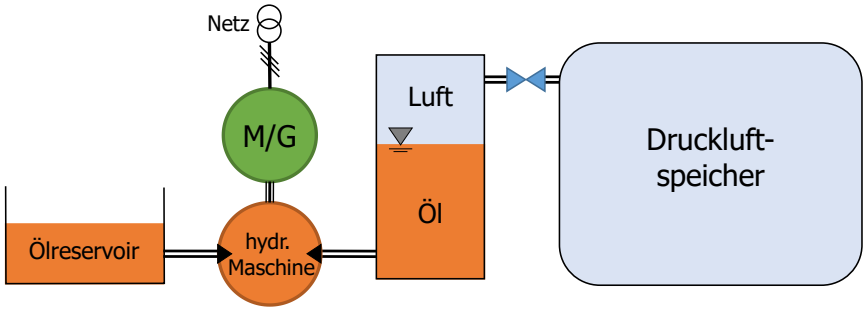


Abbildung 2: Blockschaltbild isothermer Druckluftspeicher

Die Verdichtungs- und Expansionsarbeit wird mit Hilfe einer hydraulischen Maschine durchgeführt, welche über einen Elektromotor angetrieben wird. Die elektrische Energie wird dabei mechanisch in der Gasfeder gespeichert. Zur Ausspeicherung wird die hydraulische Maschine als Motor betrieben und die elektrische Maschine als Generator. Die Arbeit der isothermen Verdichtung und Expansion für ideales Gas (trockene Luft) berechnet sich nach

$$W_{12,isotherm} = p_1 V_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \qquad \textit{Formel 1}$$

2 Methodik

2.1 Analyse bestehender Systeme

Die in diesem Projekt untersuchte Form der Energiespeicherung ist im Mobilitätsbereich Stand der Technik und findet somit Anwendung in vielen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus. Ein Beispiel für einem dem HDS-Ansatz ähnlichem System ist das von Parker Hannifin entwickelte „Runwise“ Speichersystem (Parker Hannifin Corporation, 2013). Ähnliche Systeme werden auch von anderen Firmen der Hydraulikbranche angeboten oder erprobt, wie z.B. das „Hydraulic FlyWheel“ der Fa. Bosch zur Anwendung als Kurzzeitspeicher in Baumaschinen (Renz, Vogl, & Brand, 2010) oder „Pactronic“ von Liebherr als Kurzzeitspeicher für Hafenmobilkräne (Liebherr-Werk Nenzing GmbH, 2014).

Aber auch im Bereich der stationären Energiespeicher hat es in der Vergangenheit einige Versuche gegeben, hydropneumatische Energiespeichersysteme zu etablieren. Durch die Firmen CAEstorage GmbH (CAEstorage GmbH, 2015), und Rosseta Technik GmbH (Täubner, 2005) sowie *Enairys Powertech S.A.* (Enairys Powertech S.A., 2015) wurden Prototypen entwickelt, welche jedoch nicht die Marktreife erlangt haben. Der Ansatz von Enairys beinhaltet speziell entwickelte Wärmeüberträger mit hohen Übertragungsleistungen bei hohen Systemdrücken sowie ein hybrides Antriebskonzept, welches über Lastpunktverschiebungen mit Hilfe von Superkondensatoren optimale Betriebspunkte und somit Wirkungsgrade ermöglichen soll (Lemofouet & Rufer, 2005).

2.2 Analyse möglicher Systemkomponenten

Als Ansatz für die technologische sowie wirtschaftliche Machbarkeit wurde eine Systemzusammenstellung aus Großserienkomponenten zur Kombination von hydraulischem Verdichter und Gasfeder als Energiespeicher in adiabater sowie isothermer Betriebsweise gewählt. Für die Einzelkomponenten wurden mögliche Technologvarianten gesammelt und in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt. Dadurch war es möglich, für spezifische Einsatzbedingungen die notwendigen Eigenschaften der Baugruppen gezielt auszuwählen.

2.2.1 Hydraulikmaschine

Im Bereich der hydraulischen Maschine sind unterschiedliche Bauarten verfügbar, wobei das gewünschte Druckniveau durch Axialkolbenpumpen aus der Großserie erreicht werden kann. Bei Vernachlässigung der Verluste lässt sich die theoretische Leistung eines Hydraulikmotors wie folgt berechnen:

$$\mathrm{P}_{th} = \mathrm{Durchfluss} \cdot \mathrm{Druckdifferenz} = \mathrm{Q}_{th} * \Delta\mathrm{p} = \frac{V_g * n}{6 * 10^5} * \Delta p \qquad \textit{Formel 2}$$

Dieser Zusammenhang zeigt, dass die Leistung bei einem bestimmten Systemdruck durch die Variation von Schluckvolumen V_g oder Drehzahl n gesteuert werden kann.

2.2.2 E-Maschine und Frequenzumrichter

Die Recherche ergab, dass rückspeisefähige Frequenzumrichter erst ab einer Leistung von 5,5 kW aktuell am Markt verfügbar sind. Im kleinen Leistungsbereich würden diese

technologisch ohne Weiteres machbar sein, jedoch besteht dafür aktuell noch keine Nachfrage seitens des Marktes.

Für den Bereich der E-Maschine besteht eine umfangreiche Auswahlmöglichkeit in Bauweise, Eigenschaften und Kosten. Für die Antriebslösung im HDS-System kommen folgende Maschinentypen in Frage:

- Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine (KSL-ASM) am Frequenzumrichter
- Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PM-SM) am Frequenzumrichter
- Synchrone Reluktanzmaschine (Sy-RM) am Frequenzumrichter
- Geschaltete Reluktanzmaschine (SRM)
- Bürstenlose Gleichstrommaschine (BL-GM)

Von verschiedenen Herstellern werden Maschinenserien angeboten, die für den Umrichterbetrieb optimiert sind. Beispiele dazu sind die Synchrone Reluktanzmaschine mit Leistungen von 5,5 - 30 kW und die Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine mit Leistungen von 2,2 - 55 kW.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Wirkungsgradklasse IE4 (>92 % bei 5,5 kW Nennleistung) im HDS-System verwendet werden sollte. Jedoch ist für diese Wirkungsgradklasse ein Kosten-Mehraufwand von etwa 40 % gegenüber der Standardklasse IE2 (>88 % bei 5,5 kW Nennleistung) erforderlich. Des Weiteren sind optimierte synchrone Reluktanzmaschinen bis zu 40 % teurer als vergleichbare umrichteroptimierte Kurzschlussläufer-Asynchronmaschinen.

2.2.3 Verdichtereinheit

Eine bedeutende Komponente des Speichersystems stellt das Interface zwischen Hydraulik- und Gasbereich dar. Die Trennung von Arbeitsgas und Hydraulikflüssigkeit stellt bei den vorhandenen Druckschwankungen und -niveaus eine große Herausforderung dar. Je nach Art der Trennfläche unterscheidet man

- Direkter Kontakt ohne Trennwand
- Kolbenspeicher
- Blasenspeicher
- Membranspeicher
- Sonderausführungen

Kolbenspeicher zeichnen sich durch große Volumen und Durchflüsse bei hohem Volumennutzungsgrad aus. Nachteilig sind die Kolbenreibung und der Gaseintrag in die Flüssigkeit über die Dichtspalte. Blasenspeicher sind geschlossen ausgeführt, was Vorteile bezüglich Dichtheit bringt. Jedoch diffundiert auch hier Gas durch die Kunststoffblase von der Gasseite zur Flüssigkeitsseite. Es tritt kaum mechanische Reibung auf, jedoch kann die Blase bei Kontakt mit dem Ventil beschädigt werden. Die Lebensdauer wird durch Verschleiß des Balges verringert und der Volumennutzungsgrad ist geringer. Membranspeicher stellen aufgrund der geringen Austauschvolumen keine Alternative für das HDS-System dar. Sonderformen wie flüssige Barrieren konnten bis dato noch nicht zur Serienreife entwickelt werden.

2.2.4 Druckgasspeicher

Aus wirtschaftlichen Gründen wurden Stahlbehälter mit einem Standard-Druckbereich bis 350 bar gewählt. Neben den technischen Anforderungen unterliegen die behandelten Druckbehälter (Luft- oder Stickstofffüllung, Druckinhaltsprodukt >3000) der Druckgeräteüberwachungsverordnung (DGÜW-V), wodurch sich eine Reihe von Pflichten für die Betreiber solcher Anlagen ergibt. Als Beispiel seien die Prüffristen erwähnt, die sich bei korrosionsgefährdeten Behälterteilen auf 1 Jahr verkürzen können.

2.3 Simulationstool

Im Projekt wurde das Verhalten des Speichersystems über eine Parameterstudie im Simulationsmodell untersucht. Dazu wurde ein Modell zum Einsatz von Stromspeichern in übergeordneten Netzen im Simulationstool Matlab-Simulink erarbeitet. Bei der Untersuchung erfolgte eine Betrachtung von Systemcharakteristika wie z.B. Leistung, Energieinhalt, Speicherdauer, Einsatzbereich, Druck, Temperatur, Durchfluss, Volumen, etc. Für die Auslegung wurden unter anderem die im Zeitraum von einem Jahr gemessenen ¼ Stunden-Werte von Hauhalten, Bürogebäuden und Gewerbebetrieben sowie von Photovoltaik-Anlagen bzw. Strahlungsdaten analysiert um daraus die Anforderungen an den Speicher abzuleiten.

Innerhalb des HD-Store Blockes werden die Untergruppen „elektrische Maschine“. „hydraulische Maschine“ und „Druckgasspeicher“ in verschieden ausgeprägten Verfeinerungsgraden modelliert. Die Regelung dieser Leistungen wird durch einen heuristischen Ansatz bewerkstelligt, der die Faktoren Speicherstand, Systemdruck und Residualleistung berücksichtigt. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau des Simulationsmodells, welches in Matlab-Simulink erstellt wurde.

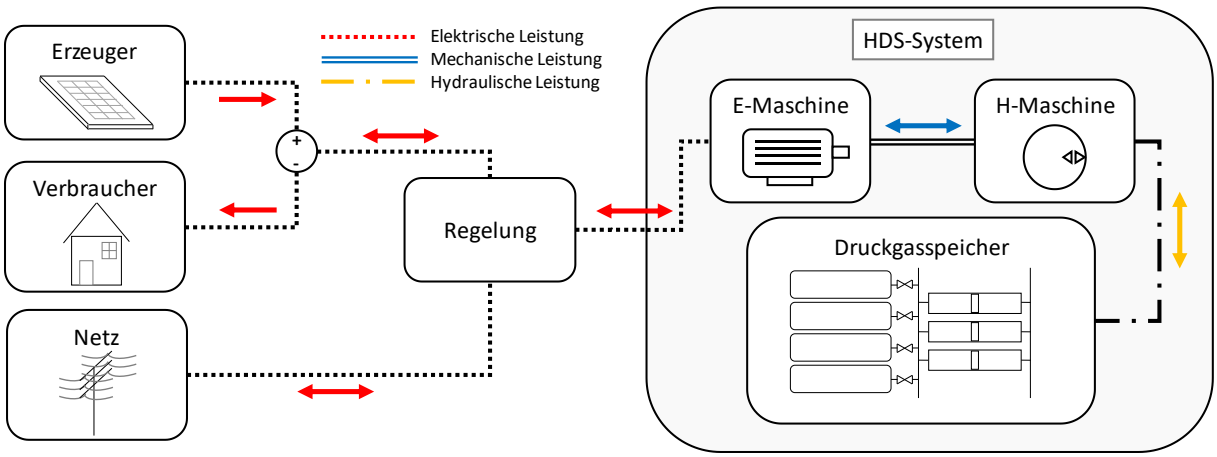


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Simulationsmodelles

Die für die Simulation zur Verfügung stehenden Verbrauchsdaten bestanden aus einem kleinen Haushalt mit 2 erwachsene Personen und einem Jahresverbrauch 3,86 MWh/a, einem Mehrparteienwohnhaus mit 6 Wohneinheiten und einer durchschnittlichen Größe je Wohneinheit 65 m^2 mit einem Gesamtjahresverbrauch 23,7 MWh/a sowie einem Bürogebäude mit einer Bruttogrundfläche von 1860m^2 und einem Jahresverbrauch von 46,1 MWh/a. Für die Erzeugerlastgänge wurden entweder an den Objekten gemessene Erzeugungsdaten verwendet, oder gemessene Globalstrahlungsdaten am Standort Wiener Neustadt aus dem

Jahr 2013 zu einem Erzeugerlastgang umgerechnet.

Für die Energiekosten und -vergütungen wurden 2 verschiedene Szenarien betrachtet. Zum einen wurden aktuelle Marktwerte verwendet (E-Control, 2015a) (PV-Austria, 2016), zum anderen wurde ein Zukunftsszenario (ZKS) betrachtet, wobei eine Voraussage für die Strompreisentwicklung (Schlesinger, Lindenberger, & Lutz, 2014) sowie ein Wegfall der Rückspeisevergütung angenommen wurden.

Tabelle 1: Verwendete Energiekosten und -Vergütungen

Stromkosten	0,20	€/kWh
Rückspeisevergütung	0,04	€/kWh
Stromkosten – ZKS	0,44	€/kWh
Rückspeisevergütung – ZKS	0,00	€/kWh

Die Abbildung der Energiewandlung im Speicher wurde über Wirkungsgradketten und -kennfelder sowie die Modellierung der Gasfeder über ein thermodynamisches Modell durchgeführt. Ein Kennfeld für ein System aus einen geschalteten Reluktanzmotor in Kombination mit einem Umrichter ist in Abbildung 4 dargestellt (ABB, 2016). Der Wirkungsgrad hängt dabei von dem anliegenden Drehmoment M und der Motordrehzahl n ab. Für die hydraulische Maschine ergeben sich ähnliche Verhältnisse, wobei der Wirkungsgrad hier von Speicherdruck p und Drehzahl n abhängt. Das für die Simulation verwendete Wirkungsgradkennfeld, welches Prüfstandsmessdaten eines Schrägachsenkonstantmotors wiedergibt, ist ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt.

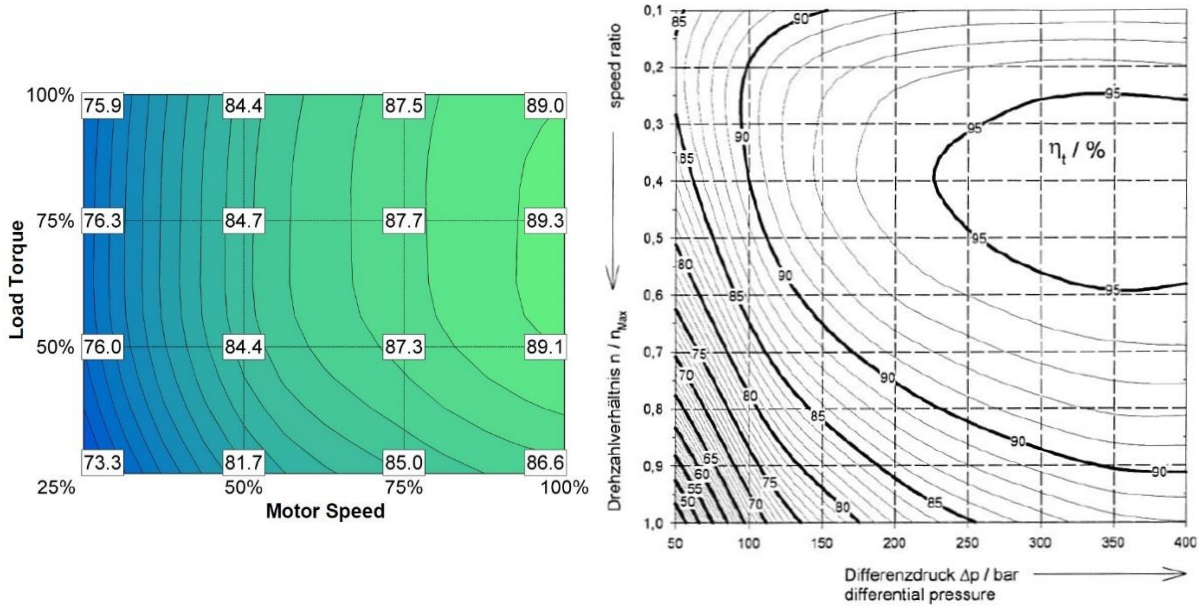


Abbildung 4: links - Systemwirkungsgrad einer Reluktanzmaschine mit zugehörigem Umrichter (ABB, 2016); rechts - Wirkungsgradkennfeld eines Schrägachsenkonstantmotors

Bei Hydraulikmaschinen besteht die Möglichkeit, das Verdrängungsvolumen veränderbar zu gestalten. Diese Funktion erlaubt es, bei einer gegebenen, mechanischen An- oder abtriebsleistung und anliegendem, hydraulischen Systemdruck das Verhältnis zwischen Drehmoment und Drehzahl innerhalb bestimmter Grenzen zu wählen. Dadurch gelingt es, den Betriebspunkt in einen für die Elektromaschine effizienteren Bereich zu verschieben.

Das thermodynamische Verhalten des Druckgasspeichers wurde mittels Idealgasgleichungen für zwei thermodynamische Grenzfälle, die isentrope und die isotherme Zustandsänderung

berechnet, wobei die Stoffeigenschaften von Stickstoff verwendet wurden. Die Verdichtungs- und Expansionsarbeit berechnet sich aus

Isotherme Zustandsänderung $$W_{12,isotherm} = p_1 V_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$ *Formel 3*

Isentrope Zustandsänderung $$W_{12,isentrop} = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]$$ *Formel 4*

3 Ergebnisse

3.1 Konzeptentwurf Speichersystem

Für die drei Einsatzszenarien, für welche Realdaten verfügbar waren (Haushalt klein, Mehrparteienwohnhaus, Bürogebäude), wurden unterschiedliche Speichervarianten zusammengestellt und deren Einsatz untersucht. Beispielhaft ist in Abbildung 5 die Systemskizze für einen PV-Speicher mit 5 kWh Speicherinhalt zum Einsatz im Szenario „Haushalt klein“ abgebildet.

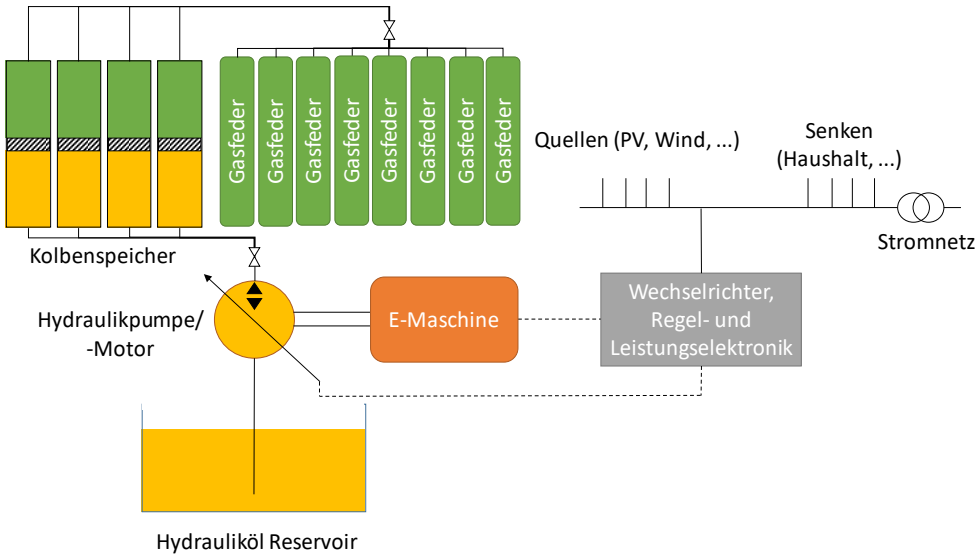


Abbildung 5: Systemskizze für ein 5 kWh HDS-System

Der technische Entwurf des Systems ist als offenes Hydrauliksystem mit geschlossener Gasfeder ausgeführt. Vier Kolbenspeicher mit einem Volumen von je 200 l bilden das Öl-Gas Interface und werden über einen Hydraulikmotor mit variablen Schluckvolumen mit Öl befüllt. Acht Stahl-Druckgasflaschen mit je 75 l Gasvolumen und einem maximalen Betriebsdruck von 350 bar werden für die Gasfeder eingesetzt. Die Druck-Vorspannung der Gasfeder wird an das ideale Verhältnis von 0,632 von Gasvolumen zu Kolbenspeichervolumen bei isothermer Verdichtung angenähert, um eine gute Energiedichte zu erreichen (Findeisen, 2006). Die Verdichtung und Expansion für die Ein- bzw. Ausspeicherung wird durch einen einzigen Kolbenhubvorgang durchgeführt. Das Hydrauliköl wird aus einem Reservoir mit Umgebungsdruck entnommen und bei der Ausspeicherung wieder rück geführt. Der variable Schrägachsen-Hydraulikmotor mit einem Schluckvolumen von 0 - 28 cm^3 ist über eine starre Welle mit einer Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine (KSL-ASM) mit einer Nennleistung von

5,5 kW verbunden, welcher mittels eines entsprechend dimensionierten, rückspeisefähigen Frequenzumrichters betrieben wird. Die Leistungsregelung des Speichers erfolgt über die Drehzahlregelung der elektrischen Maschine sowie die Regelung des Verdrängervolumens der hydraulischen Maschine. Abbildung 6 zeigt die Dimensionierung der Speichereinheit (Kolbenspeicher + Druckgasflaschen) für die Speichervariante zum Einsatz im Szenario „Haushalt klein“. Tabelle 2 listet die Eckdaten des beschriebenen HDS-System Entwurfs auf.

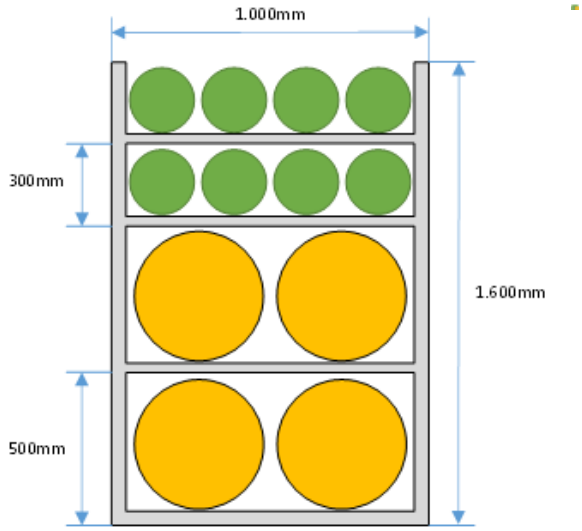


Abbildung 6: Skizze der Speichereinheit mit 5 kWh Energieinhalt

Tabelle 2: Eckdaten 5kWh HDS-System Entwurf im Szenario „Haushalt klein“

Speicherdaten	
Energieinhalt	4,94 kWh (isotherm)
Leistung	5,5 kW
Speicherdruck max.	350 bar
Abmessungen l/b/h **Volumen**	2.700 x 2.300 x 1.600 mm 9,94 m^3
Leistungsdichte	0,554 kW/m^3
Energiedichte	0,497 kWh/m^3
Gewicht	8200 kg
Ölvolumen	800 l
Gesamtvolumen Speichereinheit	1.400 l
Summe Kosten Einzelkomponenten	81.000 €
Spezifische Kosten	16.400 €/kWh 14.730 €/kW

3.2 Simulation Speichereinsatz

In Abbildung 7 ist die Lastpunktverteilung über Drehzahl und Drehmoment als Ergebnis der Simulation des Einsatzszenarios „Haushalt klein“ mit konstantem (links) sowie ein variablem (rechts) Hydraulikmotor im Antriebsstrang dargestellt. Zu erkennen ist die Verschiebung der Betriebspunkte in Bereiche höheren Wirkungsgrades durch die Variabilität des Drehmoments und der Drehzahl.

Tabelle 3 listet die Zahlenwerte dieser Simulation auf. Die Stromkosteneinsparung bei idealer, isothermer Prozessführung unter Annahme von aktuellen Marktpreisen, fällt mit 100 €/a eher

gering aus. Immerhin könnte im Zukunftsszenario (ZKS) eine Einsparung von rund 350 € erzielt werden.

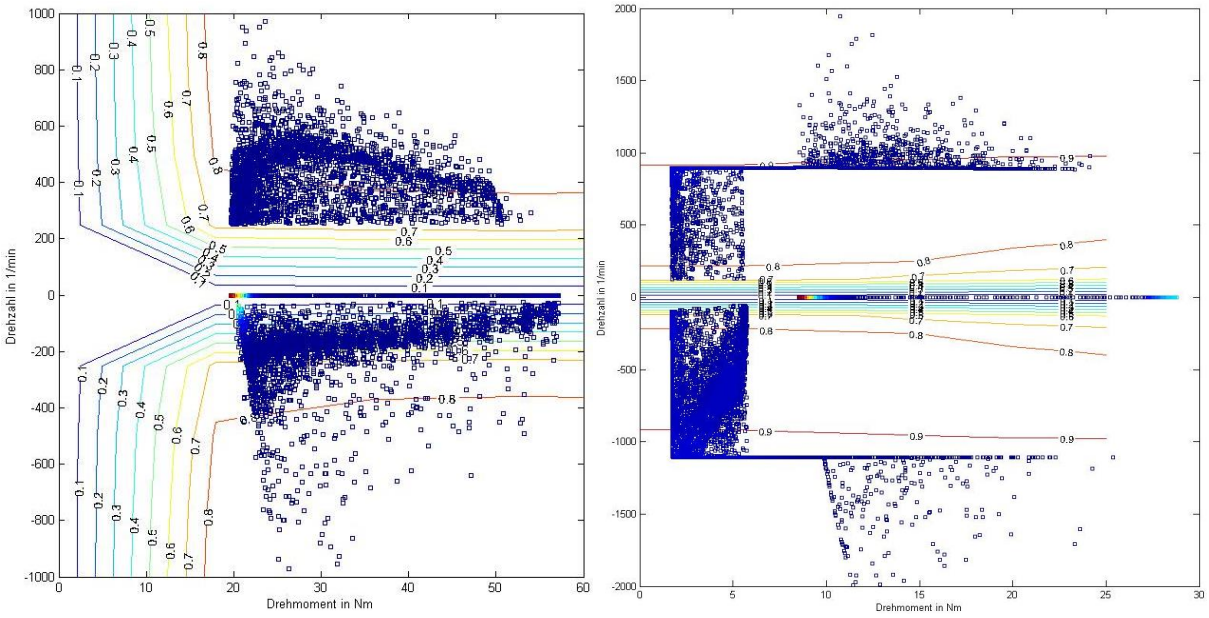


Abbildung 7: Simulierte Jahreslastpunktverteilung der Ein- und Ausspeicherung im Einfamiliengebäude; Vergleich konstante (links) mit variabler (rechts) Hydraulikpumpe

Tabelle 3: Simulationsergebnisse im Szenario „Haushalt klein“

Prozess		Isentrop	Isotherm
Max. Leistung Laden		3,3 kW	
Max. Leistung Entladen		8,9 kW	
Eigenverbrauchsanteil	**ohne Speicher**	30,1 %	
	mit Speicher	63,9 %	67,0 %
Autarkiegrad	**ohne Speicher**	30,0 %	
	mit Speicher	48,5 %	50,6 %
Stromkosten (ZKS)	**ohne Speicher**	433 € (1188 €)	
	mit Speicher	342 € (874 €)	330 € (837 €)
Rückspeisung	**ohne Speicher**	2679 kWh	
	mit Speicher	1385 kWh	1265 kWh
Gesamtwirkungsgrad	**Laden-Entladen**	55,2 %	56,2 %

Die Ergebnisse der Simulationen für alle drei Szenarien mit idealer, isothermer Prozessführung, einer variablen Hydraulikmaschine und einer bedarfsgerechten Speicherdimensionierung sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

	Einsparungs-potential	**Wirkungsgrad**	**Eigenverbrauchs-anteil**	**Autarkiegrad**
Haushalt klein	23,8%	56,2%	67,0%	50,6%
Mehrparteienwohnhaus	29,6%	53,3%	81,3%	57,4%
Bürogebäude	24,7%	59,8%	76,6%	61,7%

Es ist zu erkennen, dass in der aktuellen Zusammenstellung des HDS-Systems mit rund 60 % mittlerem Gesamtwirkungsgrad über die Jahressimulation eine gute Annäherung an den maximalen Wert der Wirkungsgradkette von rund 65,21 % machbar ist. Mit einem gut

dimensionierten System lassen sich bei aktuellen Strompreisen in dieser Systembetrachtung bis zu 30 % der Kosten einsparen. Nimmt man das Zukunftsszenarios als Referenzannahme für die Strompreisgestaltung, so lassen sich die Kosten um bis zu 38 % verringern. Der erzielbare Wirkungsgrad des Speichereinsatzes hängt stark von der Grundlast der Verbraucher im Gebäude ab. Bei höheren Grundlasten kann mit einer Effizienz von rund 60 % im Jahresmittel gerechnet werden.

3.3 Kostenanalyse

Die Recherche zu den Kosten der Einzelkomponenten in den Szenarien mit Photovoltaik-Speicheranwendung hat ergeben, dass die Bauteile, welche maßgeblich die Speicherkapazität des Systems beeinflussen (Gasspeicher/-flaschen, Kolben-/ Blasenspeicher, Zubehör) den bestimmenden Kostenanteil bilden. Die Kosten der Komponenten, welche die Speicherleistung bestimmen (Hydraulikmaschine, E-Maschine, Frequenzrichter) machen einen deutlich geringeren Teil der Gesamtkosten aus.

Bei vorgegebener Sollkapazität können durch Wahl des Volumenfaktors ν_k Bauraum und Gesamtkosten des Systems beeinflusst werden.

$$\nu = \frac{V_{Öl}}{V_{Gas}} = \frac{V_{Kolbenspeicher}}{V_{Gasspeicher}} \qquad \textit{Formel 5}$$

In Abbildung 8 sind die Kosten des Gesamtsystems und das Gesamtvolumen der Speichereinheit (Gas- und Ölvolumen) über den Volumenfaktor für die Variante 5 kWh Speicherkapazität und 5,5 kW Speicherleistung aufgetragen.

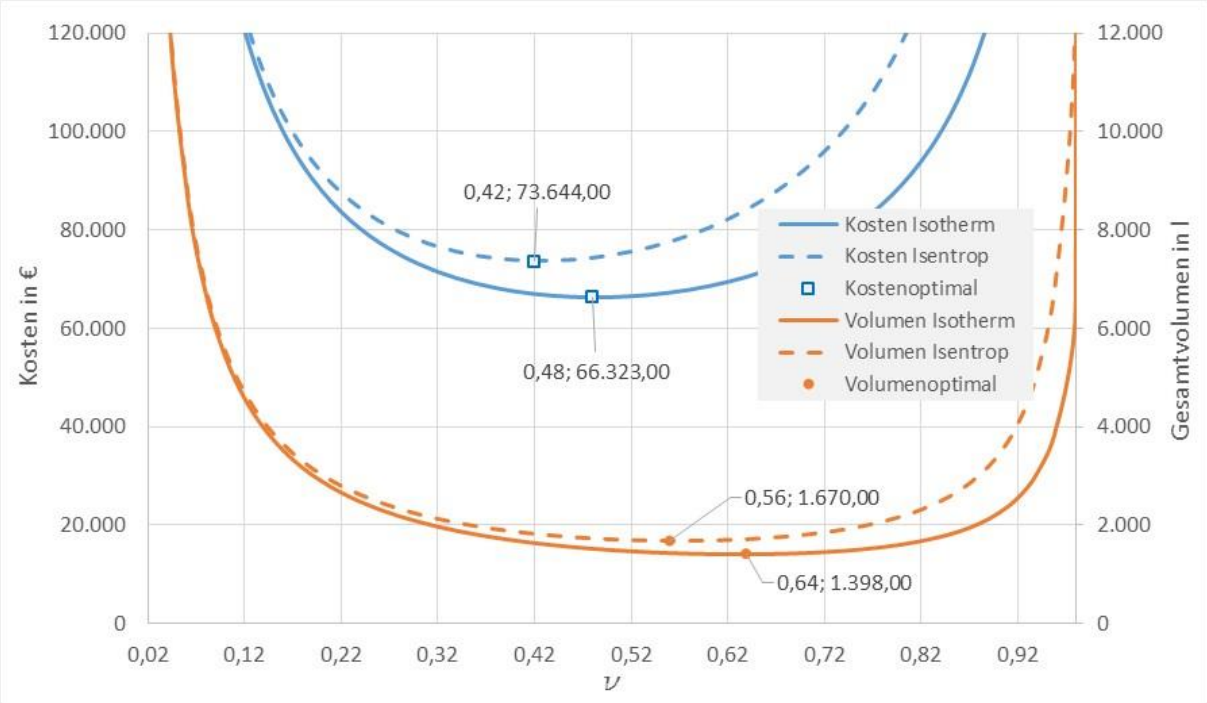


Abbildung 8: Kosten und Nettovolumen über Volumenfaktor für die Speichervariante 5 kWh / 5,5 kW

Das Kostenoptimum bei isothermer Prozessführung liegt mit $\nu = 0{,}48$ bei geringeren Volumenfaktoren, als das Volumenoptimum mit $\nu = 0{,}64$. Die für diese Berechnung angenommenen einzelnen Kostenfaktoren sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Kostenfaktoren für den Entwurf des HDS-Systems mit 5 kWh und 5,5 kW

Gasflaschenregister komplett 350 bar	20 €/l	Preisangebot Hersteller
Kolbenspeicher 350 bar	47 €/l	Preisangebot Hersteller
Stahltank Öl	4 €/l	Katalogpreis
Ölwanne für Stahltank	5,7 €/l	Katalogpreis
Hydrauliköl	1,65 €/l	Katalogpreis
Verrohrung Öl	150 €	Schätzung
E-Maschine 5,5kW	1.310 €	Katalogpreis
Frequenzumrichter	1.670 €	Katalogpreis
Axialkolbenmaschine variabel	5.104 €	Katalogpreis
Gesamtkosten (isotherm)	66.323 €	
Spezifische Kosten	13.265 €/kWh	
Anteil Speicherleistung	12,4%	
Anteil Speicherkapazität	87,6%	

4 Diskussion

4.1 **Systemkosten**

Die Kostenbetrachtung für den Anwendungsfall des HDS-Systems als Tagesspeicher zur Zwischenspeicherung von erneuerbarer Energie hat aufgezeigt, dass die Bauteile, welche maßgeblich die Speicherkapazität des Systems beeinflussen (Gasspeicher/-flaschen, Kolben-/ Blasenspeicher, Zubehör) den bestimmenden Kostenanteil bilden, siehe Abbildung 8. Richtwerte für Großkundenpreise werden von Hersteller oder Vertrieb nicht angegeben und meistens direkt bei Abschluss des Zuliefervertrags ausgehandelt. Es kann angenommen werden, das deutlich günstigere Preise im Einkauf für eine Serienfertigung möglich sind. Des Weiteren können die Herstellungskosten für das Gasflaschenregister bei reinem Zukauf der Gasflaschen sowie des Rohmaterials und des Zubehörs, sicherlich noch deutlich gesenkt werden.

Gründe für die hohen Kosten sind unter anderem, dass Kolbenspeicher gute Oberflächen sowie kleine Toleranzen an Zylinder-Innenwand und Kolben erfordern. Die Bauteile dafür werden in Kleinserien vorwiegend in Handarbeit produziert. Des Weiteren ist eine große Menge an hochwertigem Rohmaterial (Stahl), Halbzeugen in guter Qualität (z.B. Rohre mit Oberflächengüte) und eine hochqualitative Verarbeitung durch Fachpersonal (z.B. Schweißen der Druckbehälter) notwendig. Hochdruckführende Bauteile müssen mit einem großen Sicherheitsfaktor ausgeführt werden und bedürfen einer hochwertigen Konstruktion und aufwändigen Prüfung. Wie oben gezeigt wurden, müssen die Systemkomponenten entsprechend groß dimensioniert werden, um eine ausreichende Speicherkapazität für die vorgesehenen Anwendungsfälle zu erreichen. Dies erhöht die Systemkosten im Konzeptentwurf des HDS-Systems massiv.

Die Berechnung der Zykluskosten ist in Tabelle 6 dem finanziellen Ertrag aus der Kostenersparnis im Szenario „Haushalt klein“ über eine angenommene Lebensdauer gegenübergestellt. Selbst wenn angenommen wird, dass in einer Serienfertigung des Speichersystems Kostenreduktionen im Bereich von 60 % zur Kostenaufstellung im Konzeptentwurf möglich sind, ist ein wirtschaftlicher Einsatz als Tagesspeicher zur Speicherung von PV-Strom im Einfamiliengebäude noch außer Reichweite.

Tabelle 6: Kostenbetrachtung für den Entwurf des HDS-Systems im Szenario „Haushalt klein“

Lebensdauer	90 Jahre
Preis HDS-System	66.300 €
Servicekosten	17.270 €
Kosten Installation	10.000 €
Gesamtkosten	93.570 €
Kosten pro Speicherinhalt	18.700 €/kWh
Gesamtzyklen über Lebensdauer	32.040
Kosten je Zyklus	2,92 €/Zyklus
Kosten pro Speicherinhalt je Zyklus	0,584 €/kWh/Zyklus
Kostenersparnis pro Jahr	100 €/a
Kostenersparnis gesamt	8.900 €
Kostenersparnis pro Jahr im ZKS	350 €/a
Kostenersparnis gesamt im ZKS	31150 €

4.2 Speicherkomponenten

Ein Ansatz die Kosten für den Kolbenspeicher zu senken wäre, diesen mit alternativen Materialien im Eigenbau herzustellen. Von den Materialkosten sowie dem Herstellungsaufwand in der Anwendung bei Kolbenspeichern könnte Druckbehälterstahl durch bessere Materiealien ersetzt werden. Faserverbundmaterialien wie Glasfaser- oder Kohlefaserverbund könnten hier deutliche Vorteile bringen. Sie zeigen Potential für eine Drucksteigerung bei Senkung des Gewichts und die Machbarkeit von sicherheitsrelevanten Faserverbund-Bauteilen wurde in unterschiedlichen Anwendungen (Automobilbau, Luftfahrt, Raumfahrt, etc.) bereits bestätigt. Bei der Wicklung eines Faserverbundrohres übernimmt der Werkstoff die Oberflächengüte der Form auf die er gewickelt wurde. Eine hohe Oberflächengüte muss daher nur für die einmalige Herstellung im Formenbau gewährleistet werden. Gewickelte Faserverbundrohre für unterschiedliche Beanspruchungen sind Stand der Technik und können ohne großen Kostenaufwand entwickelt werden. Eine Herausforderung, die dabei gelöst werden muss, ist den Zylinder zu verschließen und dadurch einen Druckbehälter zu erzeugen. Lösungsansätze dazu wurden bereits veröffentlicht (Täubner, 2005) (Schulz & Schürmann, 2006). Die Entwicklungskosten für einen solchen Kolbenspeicher sind deutlich höher als bei konventionellen Materialien, die Herstellungskosten für die Serienproduktion könnten jedoch deutlich günstiger sein.

Im Bereich der Gasspeicher nennt eine Veröffentlichung (Cyphelly, Rufer, Brückmann, Menhardt, & Reller, 2004) einen prognostizierten Einkaufspreis von 2 €/l für Standard-Gasflachen aus Stahl. Diese Prognoseaussage konnte jedoch nach eingehender Recherche am europäischen Markt nicht bestätigt werden.

Um den Kolbenspeicher zur Gänze zu ersetzen, werden Konstruktionen ohne Trennung von Gas und Flüssigkeit verfolgt, welche als *Liquid-Piston* bezeichnet werden. Dabei haben die Hydraulikflüssigkeit und das Arbeitsgas direkten Kontakt zueinander. Bei steigendem Druck erhöht sich jedoch die Absorptionsfähigkeit von Gasen in der Flüssigkeit. Dies verursacht unterschiedliche Probleme im System, vor allem jedoch wird Arbeitsgas aus dem geschlossenen Gasspeicher transportiert, welches nach kurzer Betriebszeit des Speichers

wieder aufgefüllt werden muss. Gezeigt wurde dieses Problem an einem Versuchsaufbau zu einem Druckgasspeicher mit Liquid-Piston (Olm, 2004).

4.3 Einsatz kondensierbarer Gase

Eine deutliche Steigerung der Volumenänderungsarbeit und somit der Kapazität im Speichersystem ist möglich, wenn das Gas bei der Verdichtung und Expansion bei konstantem Maximaldruck gehalten werden kann. Dafür eignen sich Gase mit hohem kritischen Druck, wie z.B. Kohlendioxid, Ammoniak, Schwefeldioxid, Distickstoffoxid oder Wasserdampf. In einem Zylinder befindet sich dann sowohl Flüssigkeit als auch Gas desselben Stoffes im Gleichgewicht. Wird das Volumen verringert, gehen Moleküle vom gasförmigen in den flüssigen Zustand über, was bewirkt, dass sich der Systemdruck über weite Bereiche nur wenig ändert.

4.4 Offene Systeme

Das bisher betrachtete Gas-Speichersystem stellt ein geschlossenes thermodynamisches System dar, es fließen also keine Gas-Stoffströme in die Umgebung oder von dieser in das System. Die Gasmasse bleibt dabei, bei Vernachlässigung von Undichtheiten, konstant. Dadurch wird der betrachtete Speicher zu einem *Einhubsystem*. Die gesamte Volumenänderungsarbeit wird in einem Hub des Kolbenspeichers verrichtet.

Bei Verwendung eines offenen Gassystems kann hingegen Gasmasse von Umgebungszustand in das System eingebracht werden (z.B. Luft). Für einen einzelnen Hub ergibt sich durch den geringen Anfangsdruck ein geringer Arbeitsaufwand. Wird der Hub jedoch mehrmals ausgeführt, so kann mit jedem Zyklus eine gewisse Druckerhöhung erreicht und in Summe wieder eine ausreichende Energiemenge eingespeichert werden. Dieser Prozess entspricht im Prinzip einem Kolbenkompressor und lässt sich zumindest theoretisch gleich reversieren wie das betrachtete Einhubsystem. Durch die Anordnung von zwei Zylindern kann jeweils ein Zylinder immer die Gasverdichtung ausführen, während der andere gegen Umgebungsdruck expandiert. Es sind auch Ausführungen mit mehreren parallel oder seriell geschalteten Zylindern denkbar.

Solche Systeme werden seit einigen Jahren untersucht, beispielsweise von (Lemofouet & Rufer, 2005). Der technologische Aufwand, um eine isotherme Prozessführung in diesem System zu gewährleisten ist jedoch erheblich und die Serienreife ist noch nicht bekannt.

4.5 Wärme Zu- und Abfuhr

Eine große Herausforderung liegt in der technologischen Ausgestaltung des Wärmeübergangs vom Speichergas an die Umgebung. Der Wärmestrom am Übergang zwischen Fluid und Wand berechnet sich aus der nachfolgenden Formel

$$\dot{Q} = \overline{\alpha} \cdot A \cdot \Delta T \qquad \textit{Formel 6}$$

mit dem mittleren Wärmeübergangskoeffizienten $\overline{\alpha}$, der Grenzfläche A und der Temperaturdifferenz ΔT. Um eine schnelle Wärmezu- oder -abfuhr bei Temperaturänderungen im Fluid zu erreichen, müssen die Grenzfläche oder die Wärmeübergangszahl erhöht werden.

Von Lemofouet und Rufer (Lausanne (CH) Patentnr. US 8,567,183 B2, 2013) wurden mehrere Systeme entworfen, bei denen der Wärmetauscher in den Kolben integriert ist. Zur Erhöhung der wirksamen Oberfläche wird die Hydraulikflüssigkeit durch viele Leitungen kleineren Querschnittes geführt, was die Reynolds-Zahl und damit die Wärmeübergangszahl, sowie die wirksame Oberfläche erhöht. Die Phasentrennung wird entweder als direkte Kontaktfläche zwischen Gas und Flüssigkeit, oder aber mittels Platte isoliert ausgeführt.

Als Gemeinsamkeit haben die meisten dieser Ansätze, dass der Kolbenspeicher an Komplexität zunimmt und die Trennung der Medien erschwert oder gar unmöglich wird. Auch die Herstellbarkeit ist ein Problem, da sich die komplizierten Geometrien nur schwer mit den Dichtheitsanforderungen vereinbaren lassen. Es konnten in der Recherche keine Veröffentlichungen zu Umsetzungen gefunden werden, die die Anforderungen des Prozesses erfüllen und gleichzeitig einen hohen, quasi-isothermen Wirkungsgrad liefern können.

4.6 Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)

Der Einsatz eines HDS-Systems zur Unterstützung von USV-Anlagen wäre ein möglicher Weg, diese Speichertechnologie weiter zu Entwickeln und die Marktreife in der Kleinserie zu erlagen. In USV-Anlagen dienen Speichersysteme zur Überbrückung der Anfahrtszeit der konventionellen Generatoren (meistens Dieselgeneratoren). Üblicherweise werden dazu hohe Leistungen für eine Zeitspanne von 10 – 30 Sekunden benötigt, wodurch der Speicherinhalt des Systems deutlich reduziert werden kann. Einer der Vorteile der HDS-Technologie besteht in der sehr geringen Selbstentladung und somit geringen Speicherverlusten bei langen Standzeiten mit vollem Speicherinhalt. Da bei einer direkten, mechanischen Anbindung der hydraulischen Maschine an den Generator der USV-Anlage der Motor/Generator mit Frequenzumrichter für das HDS-System entfällt, reduzieren sich die spezifischen Leistungskosten erheblich. Die Eckdaten eines möglichen HDS-USV-Systems sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Eckdaten HDS-System Entwurf im Szenario „USV-Anlage“

Speicherdaten	
Energieinhalt	0,71 kWh (isotherm)
Leistung	200 kW
Speicherdruck max.	330 bar
Leistungsdichte	27,61 kW/m³
Energiedichte	0,095 kWh/m³
Ölvolumen	100 l
Gesamtvolumen Speichereinheit	260 l
Summe Kosten Einzelkomponenten	16.950 €
Spezifische Kosten	23.870 €/kWh 85 €/kW
Mögliche Ausspeicherzeit	10 s
Wirkungsgrad	80 %

Literaturverzeichnis

ABB. (2016). *IE4 SynRM motor-drive packages*. (ABB Asea Brown Boveri Ltd, Herausgeber) Abgerufen am 02 2016 von http://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/frequency-controlled-motors/synchronous-reluctance-motor-drive-packages/ie4-synrm-motor-drive-packages

CAEstorage GmbH. (09 2015). *CAEstorage - Compressed Air Energy Storage*. Von http://www.caestorage.de/ abgerufen

Cyphelly, I., Rufer, A., Brückmann, P., Menhardt, W., & Reller, A. (2004). *Usage of Compressed Air Storage Systems.* Les Brenets: Swiss Federal Office of Energy.

E-Control. (12 2015a). Strompreismonitor Dezember 2015. *Strompreise in Österreich*. Wien, Österreich: Energie-Control Austria. Von https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/strompreis-monitor/strompreis-monitor-archiv abgerufen

Enairys Powertech S.A. (09 2015). *Enairys Powertech Clean energy storage solutions*. Von http://www.enairys.com/en/ abgerufen

Findeisen, D. (2006). *Ölhydraulik* (5. Auflage Ausg.). Berlin: Springer Verlag.

Lemofouet, S., & Rufer, A. (09 2005). Hybrid Energy Storage Systems based on Compressed Air and Supercapacitors with Maximum Efficiency Point Tracking. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*. Dresden, Deutschland: IEEE. doi:10.1109/EPE.2005.219203

Lemofouet, S., & Rufer, A. (29. 10 2013). *Lausanne (CH) Patentnr. US 8,567,183 B2.*

Liebherr-Werk Nenzing GmbH. (2014). Liebherr Pactronic Hybrid Power Booster. Nenzing, Österreich: Liebherr-International Deutschland GmbH.

Olm, U. (2004). *Planung, Aufbau und Konstruktion einer Druckgasspeicheranlage mit anschließender Funktionsprüfung und Optimierung des Arbeitsregimes.* Roßlau: Hochschule Anhalt.

Parker Hannifin Corporation. (2013). *Parker RunWise Advanced Series Hybrid Drive.* Columbus, USA: Parker Hannifin Corporation.

PV-Austria. (01 2016). *PV-Strom verkaufen: PVA-Plattform für Überschuss-Einspeiser*. (Bundesverband PHOTOVOLTAIC AUSTRIA) Von Photovoltaik - Strom verkaufen: http://www.pvaustria.at/strom-verkaufen/ abgerufen

Renz, K., Vogl, K.-H., & Brand, M. (09 2010). Hydraulischer Energiespeicher für hydrostatische Fahrantriebe. *ATZ offhighway*, 62-70. Springer Verlag.

Schlesinger, M., Lindenberger, D., & Lutz, C. (2014). *Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose.* Basel/Köln/Osnabrück: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Von https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf abgerufen

Schulz, M., & Schürmann, H. (03 2006). Faserverbund-Druckbehälter mit thermoplastischer Matrix. *Automobiltechnische Zeitschrift, 108*(03). doi:10.1007/BF03221778

Sterner, M., & Stadler, I. (2014). *Energiespeicher.* Berlin: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-642-37380-0

Täubner, F. (2005). *Druckgasspeicher als Alternative zur Bleibatterie.* Leipzig: Rosetta Technik GmbH.