

SCHÜTTGUTSPEICHER ZUR EFFIZIENZSTEIGERUNG VON DRUCKLUFTSPEICHERKRAFTWERKEN

**Paul Michael Rundel¹, Robert Daschner¹, Samir Binder¹,
Andreas Hornung¹**

Kurzfassung: Die Energiewende macht den Einsatz neuer Technologien unabdingbar, da Erneuerbare Energien nicht zu jeder Tages- und Nachtzeit zur Verfügung stehen. Zur Lösung dieser Problematik rückt der Einsatz von Energiespeichern, so z.B. Druckluftspeicherkraftwerke »Compressed Air Energy Storage« (CAES), immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit. Diese gleichen die fluktuierende Energie der Windkraft aus, indem Druckluft per Überschussstrom verdichtet und in Salzkavernen gespeichert wird. Zu Spitzenlastzeiten wird die Druckluft über Turbinen und Generatoren wieder in elektrische Energie umgewandelt und in das Stromnetz eingespeist. Die thermische Energie des Verdichtungsprozesses wird derzeit allerdings ungenutzt an die Umgebung abgeführt. Aus Gründen der Bergsicherheit darf die Kavernentemperatur 50 °C nicht übersteigen. Beim Entladen der Druckluftspeicher muss durch die Zufuhr von thermischer Energie aus Verbrennungsprozessen die Druckluft auf den Eintrittszustand in die Turbine erwärmt werden. Das dazu benötigte Erdgas ist ein zusätzlicher Kostenfaktor. Aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten sind eine Zwischenspeicherung der thermischen Energie des Verdichtungsprozesses und ein bedarfsgerechtes Abrufen sinnvoll.

Die Verdichtungsenergie kann alternativ auf geeignete Speichermaterialien übertragen und bei Bedarf wieder in den Kraftwerksprozess zurückgeführt werden. Dieses Konzept wird als »Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage« (AA-CAES) bezeichnet. Für die Speicherung der Abwärme bietet sich mineralisches Schüttgut an, welche in Zusammenarbeit mit den Energieversorgern E.ON, EnBW Energie Baden-Württemberg AG und Électricité de France (EDF) bei Fraunhofer UMSICHT in einer Versuchsanlage analysiert wurden. Für die Simulation des Jahresbetriebes wurde eine Versuchsanlage ausgelegt, in der Schüttgüter auf ihre Eignung als Speichermaterial und Langzeitstabilität getestet wurden. Da der Druck keinen Einfluss auf die thermische Speicherfähigkeit der Schüttgüter sondern nur auf die Durchströmungsbedingungen des Schüttguts ausübt, wurde die Technikumsanlage für den normalen Umgebungsdruck von etwa 1 bar ausgelegt. Die Anlage musste so konzipiert werden, dass mit möglichst geringem Versuchsaufwand ein Jahreszyklus der Großanlage zu simulieren war. Unter der Annahme von zukünftig täglich zwei Lade- und Entladevorgängen ergeben sich jährlich ca. 700 Zyklen. Projektziel war die Identifizierung geeigneter Schüttgutmaterialien, die sich bei gegebenen Belastungsanforderungen hinsichtlich thermischer und mechanischer Langzeitstabilität und Materialkosten eignen.

¹ Paul Michael Rundel, Robert Daschner, Samir Binder, Andreas Hornung, Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, An der Maxhütte 1, D-92237 Sulzbach-Rosenberg, E-Mail: paul.michael.rundel@umsicht.fraunhofer.de, www.umsicht-suro.fraunhofer.de

Die erste Versuchsreihe wurde mit einem quarzhaltigen und einem keramischen Schüttgut über jeweils 700 Be- und Entladezyklen durchgeführt. Thermisches Laden und Entladen von jeweils 700 Zyklen entsprach einem Jahreszyklus des thermischen Speichers für ein Druckluftspeicherkraftwerk unter der Voraussetzung eines zukünftig hohen Anteils an Erneuerbaren Energien bei der Energieversorgung. Nach Beendigung der Versuche wurde die Bruch- und Staubmenge im quarzhaltigen Schüttgut zu 1 % und bei keramischen Schüttgut zu 0,078 % des eingefüllten Schüttgutes bestimmt. Während der Testphasen konnte für beide Schüttgüter kein Anstieg des Druckverlustes, was auf eine erhebliche Zerstörung der Schüttgüter hinweisen würde, festgestellt werden. Obwohl keramische Schüttgüter sich durch ihre guten thermischen Speichereigenschaften auszeichnen, sind vor allem die hohen Materialkosten für die Umsetzung und Anwendung in einer Pilotanlage ein Ausschlusskriterium. Die Versuche haben zusätzlich gezeigt, dass aufgrund der Phasenumwandlung des Quarzanteils von α - in β -Quarz bei 575 °C, was mit einer Volumenzunahme von ca. 6 % verbunden ist, statt eines quarzhaltigen metamorphen Minerals ein Schüttgut eingesetzt werden sollte, das keine Mineralanteile enthält, die im angewendeten Temperaturbereich eine Phasenumwandlung aufweisen und sich zusätzlich durch eine hohe Wärmekapazität sowie niedrige Materialkosten auszeichnet.

Aus diesem Grund wurde in einer weiteren Versuchsreihe ein Langzeitversuch mit einem quarzfreien Mineral mit insgesamt 7000 Be- und Entladezyklen durchgeführt. Hiermit wurde ein Betrieb des thermischen Speichers für einen Zeitraum von zehn Jahren simuliert. Im Vergleich zu den Versuchen mit quarzhaltigen und keramischen Schüttgut stieg über den Langzeitversuch der Bruchanteil nicht an und der relative Bruch hatte einen niedrigeren Wert von ca. 0,5% der Gesamtmasse. Die Versuche haben gezeigt, dass die thermische Langzeitstabilität bei quarzfreien Mineralien gegeben ist und diese sich auch aus ökonomischen Gründen für den Einsatz in einer Pilotanlage eignen.

Keywords: Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke, Schüttgutwärmespeicher, Thermische Energiespeicherung, Energieeffizienz, Kraftwerkstechnik

1. Hintergrund

Der Anteil der Erneuerbaren Energien an den Erzeugungskapazitäten wird in den nächsten Jahren weiter stark zunehmen, insbesondere die Windenergienutzung wächst mit großer Dynamik. Strom aus Windenergie wird nicht bedarfsgerecht, sondern witterungsabhängig produziert. Eine Speicherung und ein bedarfsgerechtes Abrufen der Energie werden notwendig, um Windenergieanlagen bei einem Überangebot an Strom im Netz nicht abschalten zu müssen bzw. wenn ein zu geringer Windanfall kurzfristig zu überbrücken ist. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Druckluftspeichern, hierbei werden Kavernen in Salzstöcken genutzt, die über Verdichter mit mechanischer Energie geladen werden. Diese Energie kann zu Spitzenlastzeiten des Energieverbrauches über Turbinen und Generatoren in elektrische Energie umgewandelt und ins Stromnetz eingespeist werden.

Die thermische Energie des Verdichtungsprozesses beim Laden der Speicher wird in ausgeführten Anlagen derzeit in die Umgebung abgeführt und geht damit verloren. Beim Entladen der Druckluftspeicher muss durch die Zufuhr von thermischer Energie aus Verbrennungsprozessen die Druckluft auf den Eintrittszustand in die Turbine erwärmt werden. Das dazu benötigte Erdgas ist ein zusätzlicher Kostenfaktor. Um die Effizienz der Kraftwerke zu steigern,

sollte die Abwärme aus dem Verdichtungsprozess der Luft zwischengespeichert werden. Bei Strombedarf kann die gespeicherte Wärme mittels Wärmeübertragung an die entspannte Luft als Prozessenergie wieder zur Verfügung gestellt werden. Die Speicherung der thermischen Energie kann in festen Materialien und auch in Schüttgutwärmespeichern erfolgen.

2. Methodik

2.1 Materialauswahl mineralisches Schüttgut

Die Auswahlkriterien der Schüttgüter erfolgte in Abhängigkeit der gewünschten physikalischen Parameter unter Betriebsbedingungen, d. h. einer hohen spezifischen Wärmekapazität c_p und einer hohen Wärmeleitfähigkeit λ . Zusätzlich spielen die thermische und mechanische Langzeitstabilität, eine hohe Schüttdichte, die Verfügbarkeit und schließlich die Materialkosten eine entscheidende Rolle. Die charakteristischen Materialdaten der untersuchten Schüttgüter wurden von Fraunhofer UMSICHT bereits vorab ermittelt und sind in den nachfolgenden Tabellen 1 und 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Spezifische Daten ausgewählter mineralischer Schüttgüter [UMSICHT2013]

Bezeichnung	Partikel-Durchmesser d_p [mm]	Schüttdichte $\rho_{\text{Schütt}}$ [kg/m ³]	Leerraumanteil ϵ
Quarzhaltiges Mineral	6,2	1580	0,44
Keramisches Schüttgut	4,8	2350	0,375 - 0,4
Schüttgut ohne Quarzanteil	6,6	1600	0,46

Tabelle 2: Mittlere Stoffwerte ausgewählter mineralischer Schüttgüter [UMSICHT2013]

Bezeichnung	Feststoffdichte ρ [kg/m ³]	Mittlere spezifische Wärmekapazität \bar{c}_p [J/(kg K)]	Mittlere Wärmeleitfähigkeit $\bar{\lambda}$ [W/(m K)]	Wärmeausdehnungskoeffizient α [10 ⁻⁶ /K]
Quarzhaltiges Mineral	2820	980	1,8	9,1
Keramisches Schüttgut	3950	1090	2,1	7,3
Schüttgut ohne Quarzanteil	2950	1004	1,7	9,1

In der von Fraunhofer UMSICHT konstruierten Demonstrationsanlage wurden folgende Schüttgutmaterialien auf Einsatzpotenziale zur thermischen Energiespeicherung getestet:

- keramisches Schüttgut,
- quarzhaltiges Schüttgut und abschließend
- mineralisches Schüttgut ohne Quarzanteil.

2.2 Aufbau und Messtechnik Demonstrationsanlage Schüttgutspeicher

Für die Simulation des Jahresbetriebes der Großanlage zur Erprobung der Speichermaterialien auf ihre Langzeitstabilität wurde eine Versuchsanlage im Technikum von Fraunhofer UMSICHT aufgebaut. Da der Druck keinen Einfluss auf die thermische Speicherfähigkeit der Schüttgüter ausübt, sondern nur auf die Durchströmungsbedingungen des Schüttgutes, konnte die Testanlage für den normalen Umgebungsdruck von etwa 1 bar ausgelegt werden.

Das Anlagenschema ist in Abbildung 1 zu sehen. Hierbei sind die Messorte für die Temperaturen, die Drücke, die Volumenströme und den Druckverlust über der Schüttung schematisch dargestellt. Diese Daten werden erfasst, gespeichert und gleichzeitig zur Steuerung der Anlage verwendet. Für die verschiedenen Betriebszustände der Anlage können der Volumenstrom der Heizphase, der Volumenstrom der Kühlphase, die Heizzeit oder die Endtemperatur der Heizphase im Gasraum am Kolonnenkopf und die Kühlzeit gewählt werden. Hiermit können definierte Heiz- und Kühlzyklen über einen vorgegebenen Zeitraum gefahren werden. Die Temperaturmessstellen wurden in unterschiedlichen Höhen verteilt über den Umfang der Schüttgutkolonne gewählt. Zusätzlich können die Temperaturmessstellen mit unterschiedlichen Wandabständen im Speicher, der aus drei Kolonnenschüssen besteht, integriert werden.

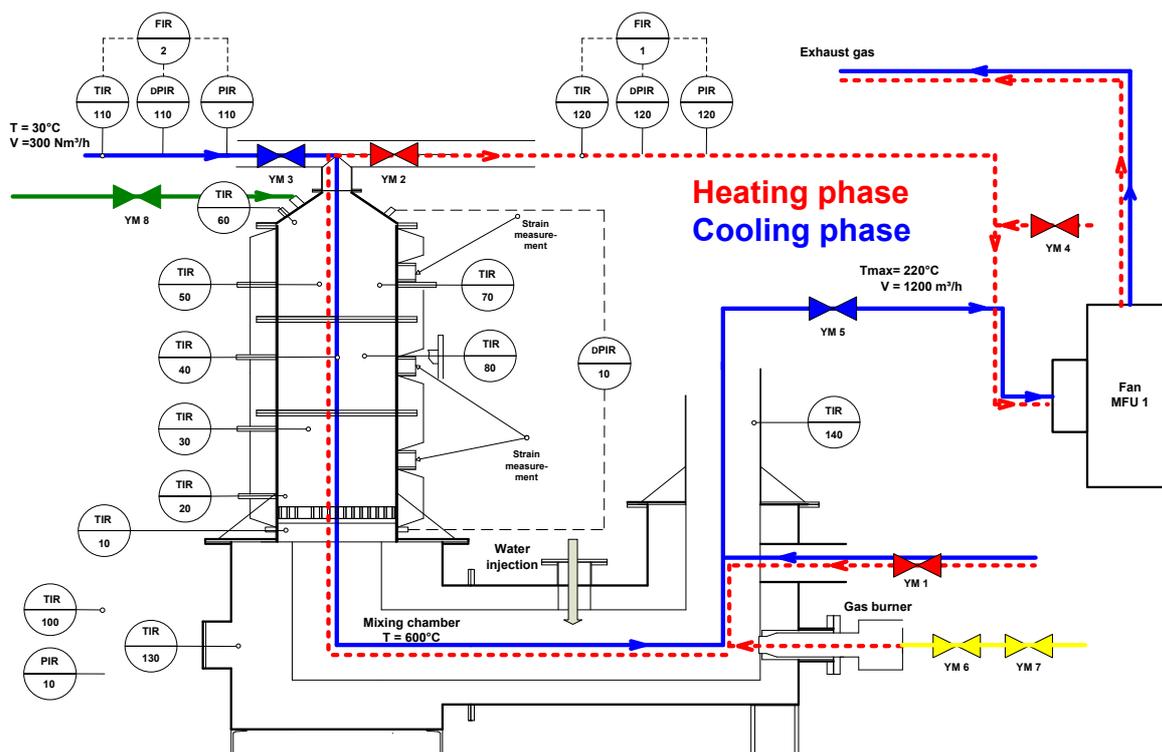


Abbildung 1: Verfahrenskonzept und Messstellen Schüttgutspeicher

Die zu analysierenden Speichermaterialien wurden in der Schüttgutkolonne bei einer Schütthöhe von 1,2 m axial vom Boden zum Kopf der Kolonne mit dem Abgas eines Erdgasbrenners durchströmt. Wie im realen Betrieb ist die Temperatur des Gases 600 °C. Anschließend wurde die im mineralischen Schüttgut gespeicherte thermische Energie im Gegenstrom auf Luft übertragen. Zur Umschaltung von der Heiz- in die Kühlphase und auch von der Kühl-

die Heizphase wurde die Drehzahl des Radialgebläses gesenkt und die Strömungsrichtung verändert.

Das Schüttgutmaterial und die Behälterwand der Schüttgutkolonne besitzen unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten, so dass bei der periodischen Erwärmung und Abkühlung des Schüttgutes und der Behälterwand eine resultierende Kraft von dem Schüttgut auf die Behälterwand ausgeübt wird. Das Schema der Messung des Wanddruckes mit Hilfe eines hydraulischen Kolbens ist in der Abbildung 2 dargestellt. Ergibt sich bei der thermischen Wechselbelastung eine Kraftwirkung auf den als Wandelement gestalteten Kolben durch das Schüttgut, so wird die Kraft auf die Kolbenstange und von ihr auf das Hydrauliköl übertragen, wodurch eine Druckmessung erfolgt. Über eine Druckmessdose wurde die Datenerfassung und Datenspeicherung realisiert.

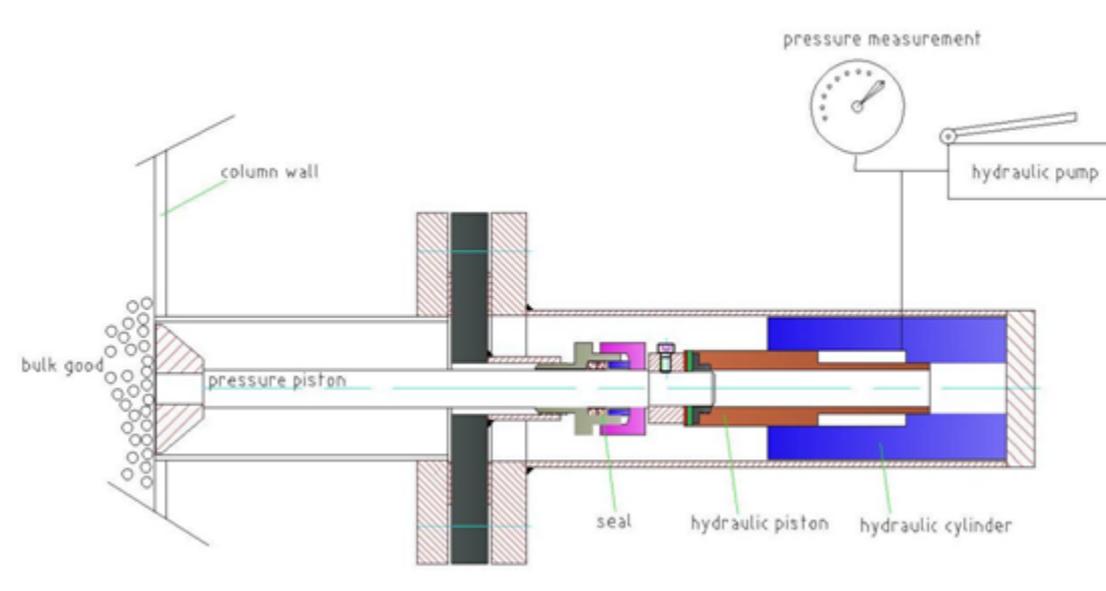


Abbildung 2: Vorrichtung zur hydraulisch Messung des Wanddruckes

Die Wirkungen der mechanischen Wechselbelastung von Schüttgut und Kolonnenwand wurden neben der hydraulischen Druckmessung durch mehrere Dehnungsmessstreifen an der Behälterwand erfasst. Die Dehnungsmessstreifen wurden radial entlang der Höhe der Schüttgutkolonne verteilt angeordnet.

3. Ergebnisse

Zur Simulation eines Jahreszyklus eines AA-CAES wurden jeweils 700 Be- und Entladezyklen mit quarzhaltigen und keramischen Schüttgut in der Kolonne durchgeführt. Nach Abschluss der Materialuntersuchungen wurde ein Langzeitversuch mit jeweils 7000 Be- und Entladezyklen mit nicht quarzhaltigem Schüttgut durchgeführt. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln im Detail wiedergegeben.

3.1 Ergebnisse quarzhaltiges Schüttgut

Zu Beginn des Projektes wurde quarzhaltiges Schüttgut hinsichtlich seiner Eignung als thermisches Speichermaterial für AA-CAES bewertet. Die Schüttgutkolonne wurde vollständig bis zur Höhe von 1,2 m mit quarzhaltigem Schüttgut mit einer Körnung von 8 bis 11 mm ge-

füllt. Es wurden in der ersten Phase der Versuchsdurchführung jeweils 350 Heiz- und Kühlzyklen durchgeführt. Die Temperatur an der Schüttgutoberfläche betrug maximal 210 °C (Messstelle T60, s. Abbildung 3) und im unteren, bodennahen Teil der Schüttgutkolonne zwischen 570 °C und 600 °C (Messstelle T10, s. Abbildung 3).

Bei der ersten Erwärmung des Originalminerals kommt es zu einer Phasenumwandlung des Quarzanteils bei 575 °C, indem α -Quarz sich in β -Quarz umwandelt. Dies ist mit einer Volumenzunahme von ca. 6 % verbunden. Anteile von Calciumcarbonat werden beim ersten Aufheizen zersetzt. Beim Zerfall von enthaltenem Chlorit wird Wasser freigesetzt, was zusätzlich mit Hilfe thermisch behandelter Proben durch einen geringen Masseverlust dokumentiert wurde. Die Phasenumwandlung zusammen mit den Oxidationsprozessen führt zu einer Zerstörung des Gefüges. Es kommt zu feinkörnigen Abplatzungen und die mechanische Festigkeit wird verringert. Zusätzlich sind kleine Rissbildungen zu erkennen. Schliffbilder nach 700 Zyklen wiesen keine Veränderungen gegenüber den Schliffbildern nach 350 Zyklen auf.

Die Phasenumwandlung, die mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) nachgewiesen wurde, führt aufgrund der thermomechanischen Belastungen zu einem Massendefekt des Schüttguts. Dieser entspricht einem prozentualen Anteil von 1% der Gesamtmasse in der Kolonne. Untersucht wurden mit DSC Proben des Originalminerals sowie Proben nach 350 Zyklen thermischer Einwirkung auf das Mineral. Die Proben wurden dabei sowohl von der Schüttgutoberfläche der Kolonne als auch aus dem untersten Teil der Schüttgutkolonne entnommen.

3.2 Ergebnisse keramisches Schüttgut

Als zweites Mineral wurde keramisches Schüttgut zur Speicherung thermischer Energie erprobt. Insbesondere keramische Schüttgüter haben gute Speichereigenschaften und sind durch das Herstellungsverfahren, das auch einen Brennprozess bei Temperaturen über 1200 °C enthält, von Phasenumwandlungen und Volumenzunahme frei. Nachteilig ist jedoch, dass diese sehr kostenintensiv sind.

Bis zur Höhe von 1,2 m wurde die Kolonne mit keramischem Schüttgut gefüllt und die gleichen Versuchsparameter wie bei quarzhaltigem Schüttgut eingestellt. Der Temperaturbereich lag bei ca. 210 °C an der Schüttgutoberfläche des Kolonnenkopfes (Messstelle T60, s. Abbildung 3) und bei ca. 600 °C am Kolonnenboden (Messstelle T10, s. Abbildung 3). Nach 700 Zyklen mit keramischem Schüttgut wurde die Kolonne nach der Abkühlung geöffnet und einer optischen Kontrolle unterzogen. Die Verringerung der Schütthöhe in der Kolonne resultiert aus mechanischen Erschütterungen, die zu einer Verdichtung der Schüttung führte. Wie nach 350 Zyklen war die Schüttungshöhe am Rand geringer als in der Mitte. Die Differenz betrug ca. 10 mm, in der Mitte hatte sich die Schüttung um ca. 3 mm gesenkt. Das Maximum der Schütthöhe in der Mitte ist wieder auf Verdrängungseffekte zurück zu führen.

Bei der Entleerung der Kolonne wurde das mineralische Schüttgut mit einem Sieb der Maschenweite von 4 mm gesiebt. Die Masse dieses Feinanteils entspricht einem Anteil von 0,078 % der Gesamtmasse des keramischen Minerals in der Schüttgutkolonne.

Bei den ersten Versuchsreihen zur Überprüfung der Speicherung thermischer Energie für ein Druckluftspeicherwerk wurden als Speichermaterialien quarzhaltiges Mineral und kera-

misches Schüttgut in einem Schüttgutspeicher analysiert. Nach Beendigung der Versuche wurde die Bruch- und Staubmenge im quarzhaltigen Schüttgut zu 1 % und bei keramischen Schüttgut zu 0,078 % des eingefüllten Schüttgutes bestimmt. Der hohe Staubanteil ist auf die Phasenumwandlung von α -Quarz in β -Quarz bei 575 °C zurückzuführen. Während der Testphasen konnte für beide Schüttgüter kein Anstieg des Druckverlustes, was auf schwerwiegende Zerstörung der Schüttgüter hinweisen würde, festgestellt werden. Quarzhaltiges Schüttgut ist allerdings aufgrund der Phasenumwandlung bei ca. 575 °C nicht für den Einsatz als thermisches Speichermaterial in AA-CAES geeignet.

3.3 Ergebnisse Langzeitversuch mineralisches Schüttgut ohne Quarzanteil

Statt eines quarzhaltigen metamorphen Minerals wurde ein mineralisches Schüttgut eingesetzt, das keine Mineralanteile enthält, die im angewendeten Temperaturbereich eine Phasenumwandlung aufweisen und sich zusätzlich durch eine hohe Wärmekapazität sowie niedrige Materialkosten auszeichnet. Aus diesem Grund wurde in einer weiteren Versuchsreihe unter den gleichen Parametern ein Langzeitversuch mit 7000 Zyklen durchgeführt, der somit einen Speicherbetrieb von zehn Jahren simuliert.

Identisch zu den Materialuntersuchungen zu quarzhaltigem und keramischem Schüttgut wurden folgende Parameter an der Technikumsanlage eingestellt: Die Temperatur im Brennraum betrug während der Heizphase 600 °C. Die Heizzeit dauerte ca. 10 min und wurde beendet, sobald die Temperatur im Gasraum am Kolonnenkopf 120 °C erreicht hatte. Zur Kühlung der Kolonne wurde Raumluft im Saugbetrieb mit Hilfe des Ventilators durch die Schüttung gefördert. Die Raumluft hatte über den Versuchszeitraum eine mittlere Temperatur zwischen 20 °C und 28 °C. Die Versuche konnten ohne Unterbrechungen im automatischen Betrieb realisiert werden.

Beispielhaft für die Reproduzierbarkeit der Zyklen sind die Temperaturen in der Schüttung in Abbildung 3 gezeigt. Gut erkennbar ist die Homogenität der Temperaturverteilungen.

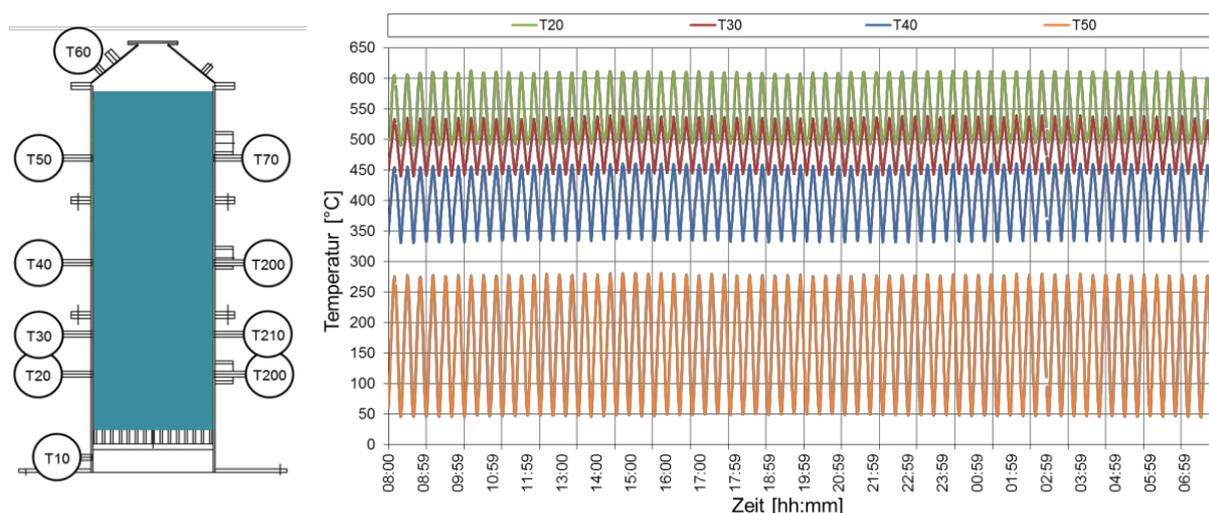


Abbildung 3: Temperaturverlauf in der Schüttgutkolonne während Be- und Entladezyklen

Der Druckverlust steigt mit den Versuchstagen an, was auf die Verdichtung der Schüttung und den mechanischen Bruch einiger Partikel zurückzuführen ist. Mit der Verdichtung der Schüttung durch mechanische Schwingungen und thermische Wechselbelastung wird das

Lückenvolumen der Schüttung verringert und damit steigt der Druckverlust. Der Druckverlust ist nach ca. 7000 Zyklen gegenüber dem Druckverlust zu Beginn des Versuches um ca. 20% gestiegen. Ermittelt wurde der Druckverlust in Abhängigkeit vom Volumenstrom im kalten Anlagenzustand zu Beginn und am Ende des Langzeittests. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt.

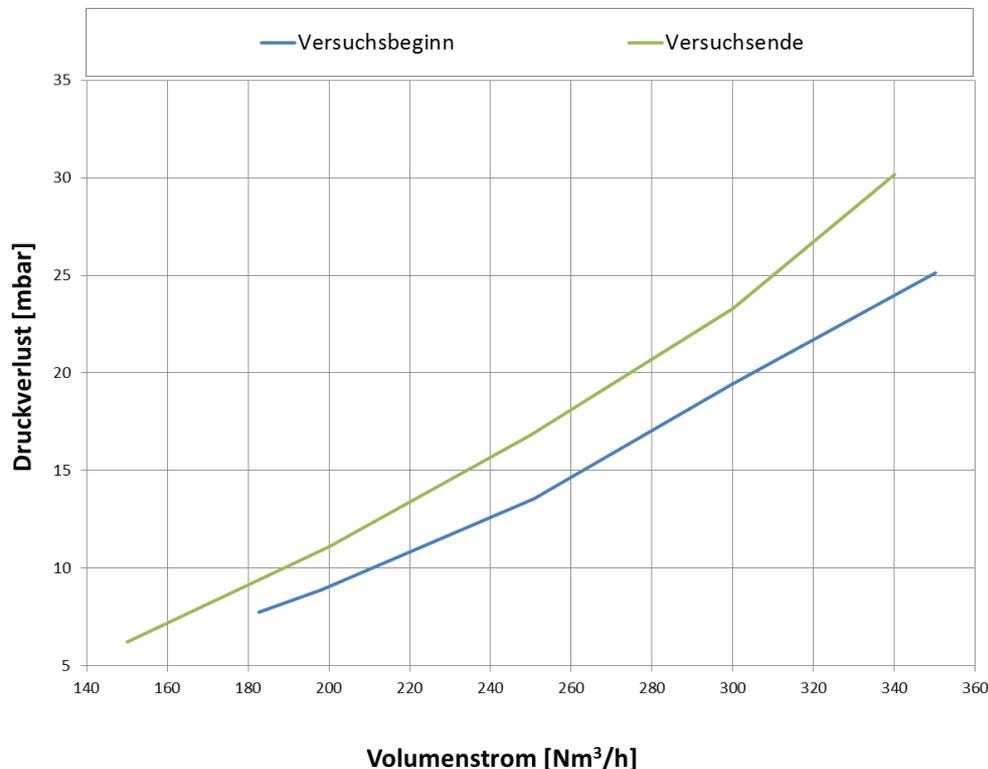


Abbildung 4: Verlauf Druckverlust Schüttgutspeicher in Abhängigkeit des Volumenstroms zu Versuchsbeginn (blau) und -ende (grün)

Während der Versuchsphase wurde jeweils nach 1000 Zyklen die Kolonne geöffnet und die Schüttungshöhe am Rand und in der Mitte der Kolonne erfasst. Gemessen wurde der Abstand der Schüttungsoberfläche zur Oberkante der Kolonne. Die Zunahme der Absenkung der Schüttung zwischen Zyklus 1000 und Zyklus 7000 betrug im Mittel über die Oberfläche ca. 20 mm. Da auch hier vorab keine Verdichtung des mineralischen Schüttguts in der Kolonne erfolgte, kam es infolge der thermomechanischen Spannungen während der Be- und Entladezyklen zu einem geringfügigem Absinken des Speichermaterials. Dies ist auf die Bildung kleiner Hohlräume beim Befüllen der Anlage zurückzuführen, die sich aufgrund der thermischen Stressbelastung und der Ausdehnung des Schüttguts nachträglich verschließen.

Ebenfalls nach jeweils 1000 Zyklen wurden vom Material drei Partikel jeweils an der Oberfläche, der Mitte des oberen Kolonnenschusses, der Kolonnenmitte und kurz über dem Schüttungsrost am Kolonnenboden entnommen. Diese Partikel wurden einer optischen Begutachtung unterzogen. Es konnten mit steigender Zykluszahl keine Besonderheiten festgestellt werden. Während der Testphasen konnte für die analysierten Schüttgüter kein Anstieg des Druckverlustes, was auf schwerwiegende Zerstörung der Schüttgüter hinweisen würde, festgestellt werden. Am Ende des Langzeittests wurde die Schüttung ausgetragen

und mit einem 4 mm Maschensieb gesiebt. So konnte der durch die thermische Wechselbelastung verursachte Bruch festgestellt werden. Nach der Siebung wurde die Masse der Partikel mit einer Abmessung kleiner als 4 mm mit 0,39 % der Gesamtmasse ermittelt. Im Brennraum unter dem Schüttungsrost hatte sich infolge von Partikelbruch und Abrieb der Ausmauerung des Brennraumes 0,07 % angesammelt. Der gesamte Feinanteil kleiner 4 mm betrug 0,46 % der Gesamtmasse. Bei der Siebung wurde im unteren Drittel der Kolonne die Hauptmenge des Bruches mit ca. 0,18 % kleiner als 4 mm angetroffen. Die Versuche zeigten, dass die Langzeitstabilität mit nicht quarzhaltigem Schüttgut gewährt werden kann. Über den langen Testzeitraum stieg der Bruchanteil nicht weiter an.

Danksagung

Abschließend möchten wir uns bei den Projektpartnern E.ON, EnBW Energie Baden-Württemberg AG und Électricité de France für die stets kooperative und erfolgreiche Zusammenarbeit bedanken.

Quelle

UMSICHT2013 Rundel, P.M. et al.: »Speicher für die Energiewende«, http://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/studien/studie_speicher_energiewende.pdf, letzter Aufruf: 29.01.2014