

Anwendungsmöglichkeiten der Hochtemperatur Sand-Wärmespeicherung zur Flexibilisierung des Strommarktes

Martin HÄMMERLE ⁽¹⁾, Markus HAIDER ⁽¹⁾, Karl SCHWAIGER ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Institut für Energietechnik und Thermodynamik E302, TU-Wien, Getreidemarkt 9, A-1060 Wien, Tel.: +43 (0)1 58801 302 500, sekretariat+e302@tuwien.ac.at, <http://www.iet.tuwien.ac.at>

Kurzfassung: Im vorliegenden Artikel wird das am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU-Wien entwickelte Konzept eines aktiven Gegenstrom-Wirbelschicht-Wärmetauschers vorgestellt. Das neue Prinzip zur thermischen Energiespeicherung (TES) beruht dabei auf der Verwendung von Sand als Speichermedium. Daraus leitet sich der hier verwendete Konzeptname „sandTES“ her.

Es werden entsprechende Anwendungsmöglichkeiten zur thermischen Energiespeicherung und zur Mindestlastabsenkung kalorischer Kraftwerke unter Anwendung dieses neuartigen Wärmetauschers präsentiert.

Erste Versuchsanlagen zur Demonstration des Konzeptes sowie zur Grundlagenforschung im Bereich der dichten Partikelströmung werden vorgestellt und diskutiert. Die durchgeführten Experimente wurden zwecks Verifizierung des cpfd-Programms Barracuda[®] in selbigem modelliert und das Partikelströmungsverhalten simuliert.

Die Experimente demonstrieren die Umsetzbarkeit eines aktiven Gegenstrom-Wirbelschicht-Wärmetauschers.

Der Vergleich von Simulationsergebnissen und Modellversuchen, lässt auf eine sinnvolle Anwendungsmöglichkeit des cpfd-Programms zur Abschätzung von dichten Partikelströmungen schließen.

Keywords: Energiespeicher, Wirbelschicht, Wärmetauscher, dichte Partikelströmung

1 Situation am Energiemarkt

Nach Einschätzungen der Internationalen Energie Agentur IEA, decken erneuerbare Energien in etwa die Hälfte des Anstiegs der weltweiten Stromerzeugung bis 2035 ab, wobei Strom aus fluktuierenden Ressourcen, hauptsächlich Windenergie und Photovoltaik, 45% der Zunahme erneuerbarer Energien ausmachen soll. Der steigende Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromsektor stellt Herausforderungen an das gegenwärtige Marktdesign und an seine Fähigkeit, adäquate Investitionen und eine langfristige Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die mittelfristige Zunahme der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird auf einen Anteil am weltweiten Strom-Mix von über 30% geschätzt. In den nächsten Jahren sollen erneuerbare Energien Erdgas überrunden und bis 2035 vielleicht sogar Kohle als führenden Energieträger zur Stromerzeugung einholen [1].

Bezogen auf den Primärenergieverbrauch nahm der Anteil an erneuerbaren Energien im Jahr 2013 in Deutschland um 5,8% zu. Die Windkraft verzeichnete in Deutschland gegenüber dem Vorjahr ein Minus von 2 Prozent, die Photovoltaik legte um knapp 7 Prozent zu.

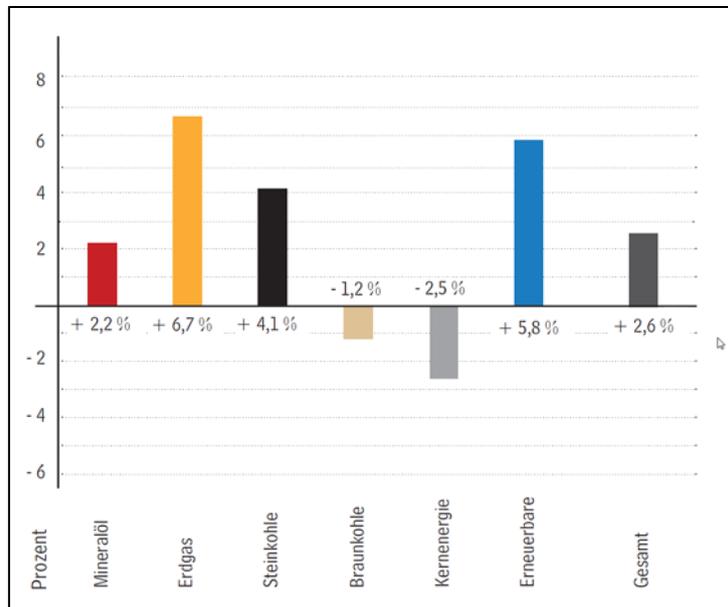


Abb. 1.1, Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Jahre 2013 in Deutschland im Vergleich zum Vorjahr [2].

Solange der schwankende Anteil aus erneuerbaren Energiesystemen in das elektrische Netz unter 15% bis 20% bleibt, kann dies vom derzeitig installierten Netz kompensiert werden. In Spanien, Deutschland und Dänemark, in Ländern in denen jeweils größere Kapazitäten an Wind- und Photovoltaik-Anlagen installiert sind, wird dieser Anteil bereits zeitweise überschritten.

Energiespeichertechnologien werden daher in naher Zukunft steigende Bedeutung haben. In Anbetracht der in der EU verfügbaren Speicherkapazität von nur 5% der derzeitig installierten Energieversorgungsleistung, besteht ein großer Bedarf an neuen Speicherkapazitäten und Speichertechnologien [3].

Im Bereich der sensiblen thermischen Hochtemperatur-Energiespeicherung stellt das sandTES-Konzept ein großes Potenzial für die indirekte Integration intermittierender Stromquellen in das bestehende Stromnetz dar. Indirekt deshalb, da die gespeicherte Hochtemperatur-Energie entweder über entsprechende Komponenten verstromt werden muss. Alternativ kann das SandTES-Konzept zur Mindestlastabsenkung und damit zur Flexibilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden.

2 sandTES-Konzept

2.1 Komponenten und Funktionsweise

Das sandTES-Konzept ermöglicht die Wärmeübertragung zwischen einem in Rohren geführten Wärmetauschermedium und einem fluidisierten pulverförmigen Speichermedium. Die Wärmetauscher-Rohre liegen dabei in einem Fließbettbehälter und werden in der entgegengesetzten Richtung des in den Rohren fließenden Mediums von dem fluidisierten Speichermedium umströmt.

Erst die Fließfähigkeit des pulverförmigen Speichermediums in fluidisiertem Zustand ermöglicht das aktive und damit exergetisch effiziente Gegenstromverhalten des Wärmetauschers.

Die Betthöhendifferenz zwischen Ein- und Austritt des Wirbelschichtbehälters erzeugt dabei die treibende Kraft für den Transport des fluidisierten Bettmaterials durch den Wärmetauscher. Der Eintritt des Schüttgutes am Wärmetauscher liegt höher als der Austritt. Der sich einstellende statische Druckgradient setzt das fluidisierte Bett in Bewegung und der Sand fließt in vorgegebener Richtung zum tiefer gelegenen Wärmetauscher-Austritt.

Abbildung 2.1 zeigt die stark vereinfachten Hauptkomponenten einer sandTES-Anlage.

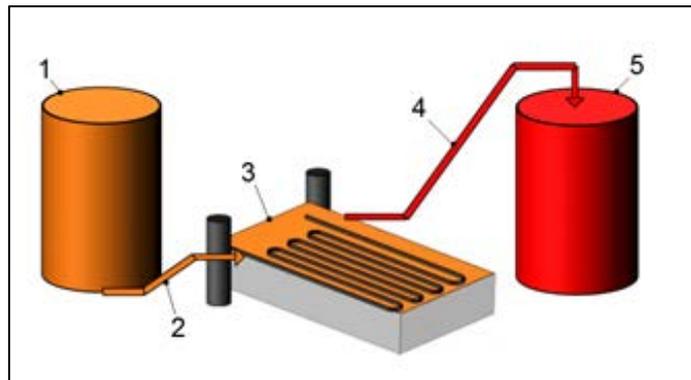


Abb. 2.1 Die Hauptkomponenten des sandTES-Konzeptes (Ladezyklus):
1. kaltes Sand-Silo, 2,4. Becherwerk/Trogkettenförderer
3. aktiver Gegenstrom-Fließbett-Wärmetauscher, 5. heißes Sand-Silo.

Im Ladezyklus wird das pulverförmige Speichermedium aus dem kalten Silo (1) über die Fördertechnik (2) in den Fließbettbehälter (3) gefördert. Das fluidisierte Speichermedium fließt vom Eintritt zum Austritt des Fließbettbehälters und wird dabei im Gegenstrom durch Rohre erhitzt welche, von dem Primär-Wärmetauschermedium durchströmt werden. Nach dem Austritt aus dem Fließbettbehälter wird das Speichermedium über die Fördertechnik (4) in das heiße Silo (5) befördert.

Der Entladezyklus unterscheidet sich vom Ladezyklus nur in der Umkehrung der Strömungsrichtungen von Speicher- und Wärmetauschermedium. Die berührungslose Wärmeübertragung gewährleistet dabei eine hohe Flexibilität bezüglich dem Einsatz verschiedenster Wärmetauschermedien wie Wasserdampf, Druckluft oder Flüssigsalz.

2.2 Verfahrenstechnische Herausforderungen

2.2.1 Hilfsleistung und Düsenboden

Das aktive Wärmespeicherkonzept des sandTES-Wärmetauschers bedarf entsprechender Anstrengungen für den Betrieb der Anlage. Die nötige Fluidisierung des Wärmespeichermediums durch Druckluft bedeutet den Einsatz einer Hilfsleistung. Von Beginn an war es deshalb ein grundlegendes Ziel, die nötige Fluidisierungsleistung des sandTES-Konzeptes zu minimieren. Dies setzt voraus, dass die Wirbelschicht nahe am „Minimal-Fluidisierungspunkt“ betrieben wird.

Die Herausforderung, eine Wirbelschicht in der Nähe des Fluidisierungspunktes zu betreiben, besteht darin, eine stabile und homogene Fluidisierung bei minimalem Druckluftaufwand zu gewährleisten. Neben den Eigenschaften des Speichermediums und eventuellen Einbauten im Bettbereich hat der Düsenboden den größten Einfluss auf die Stabilität und die Homogenität einer Wirbelschicht.

Der Düsenboden wird von der Fluidisierungsluft durchströmt. Er hat den Zweck, die Fluidisierungsluft gleichmäßig über die Bettquerschnittsfläche zu verteilen. Der dabei auftretende Druckverlust gewährleistet die Stabilität der Fluidisierung über die Bettquerschnittsfläche und kann nicht beliebig reduziert werden. Im Hinblick auf die gezielte Minimierung des Druckluftaufwandes, wurde eine geeignete Bauweise für den entsprechenden Anwendungsfall experimentell getestet [4].

Als ideales Material für den Düsenboden hat sich poröses Sintermetall in Plattenform erwiesen. Der mit der Durchströmgeschwindigkeit linear ansteigende Druckverlust der Platten ist durch die Parameter Porosität und Plattendicke beliebig anpassbar. Das Schüttgut rieselt nicht durch die Platten hindurch. Die Fluidisierung ist sehr gleichmäßig und stabil. Das Material ist durch herkömmliche Bearbeitungsweisen wie bohren, fräsen und schweißen einfach in der Handhabung. Sintermetalle sind zudem Hochtemperaturbeständig, eine für das sandTES-Konzept unverzichtbare Eigenschaft.

2.2.2 Betthöhendifferenz

Die aktive Eigenschaft des sandTES-Konzeptes bzw. das Verhalten als Gegenstrom-Wärmetauscher erfordert, neben der Fließfähigkeit des Speichermediums Sand auch dessen Transport in eine vorgegebene Richtung.

Die treibende Kraft hinter dem Transport des fluidisierten Bettmaterials bildet die Betthöhendifferenz im Wärmetauscher. Der Eintritt des Schüttgutes am Wärmetauscher liegt höher als der Austritt. Der sich dadurch einstellende statische Druckgradient von Eintritt zu Austritt setzt das fluidisierte Bett in Bewegung und der Sand fließt in die vorgegebene Richtung durch den Wärmetauscher.

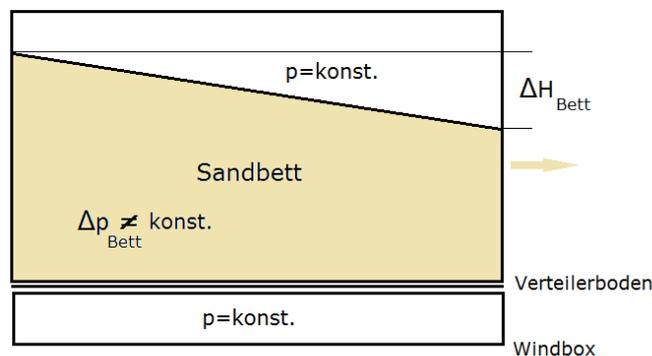
Dieses Prinzip der Fördertechnik innerhalb des sandTES-Wärmetauschers stellt neue Anforderungen an die Wirbelschichttechnik, insbesondere an die Konzipierung des Düsenbodens.

Abbildung 2.6 illustriert die Anforderungen an den Gasverteilerboden über einen Abschnitt des Wärmetauschers. Sowohl der Druck innerhalb einer Windbox, welche die Wirbelschicht mit Druckluft versorgt, als auch der Druck im Bereich oberhalb des fluidisierten Bettes sind

konstant. Der Druckverlust durch die Wirbelschicht ist jedoch abhängig vom zurückgelegten Weg der Fluidisierungsluft durch das Schüttgut. Der Bettdruckverlust nimmt damit monoton in Richtung des Wärmetauscher-Austritts ab und ist nicht konstant.

Wird der Unterschied des Bettdruckverlustes im gemeinsamen Versorgungsbereich einer Windbox zu groß, verliert die Wirbelschicht an Stabilität und fällt im Bereich des höheren Bettdruckverlustes in sich zusammen. Die Fließfähigkeit des Speichermaterials geht verloren.

Um das aktive Verhalten des Wärmetauschers gewährleisten zu können, bedarf es eines „selbst stabilisierenden Düsenbodens“ welcher den variierenden Bettdruckverlust kompensiert und den Gesamtdruckverlust entlang einer Windbox so konstant wie möglich hält.



Herausforderung für Verteilerböden:

$$\Delta p_{\text{ges}} = \Delta p_{\text{Bett}} + \Delta p_{\text{Verteiler}} = \text{konst.}$$

Abb. 2.6: Anforderungen an den Gasverteilerboden

Ein solcher selbststabilisierender Düsenboden wurde im Rahmen eines geförderten Forschungsprogramms am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU-Wien entwickelt.

2.3 Vorteile des sandTES-Konzeptes

Neben der aktiven Wärmeübertragung im exergetisch optimalen Gegenstromprinzip, bietet das sandTES-Konzept weitere wesentliche Vorteile im Vergleich zu anderen thermischen Hochtemperatur-Speichertechnologien.

Abgesehen vom Schüttgutgewicht und dem daraus resultierenden Druck auf die Silowände, wird eine drucklose Hochtemperatur-Energiespeicherung ermöglicht [5].

Das Speichermedium Sand ist ein billiges, giftfreies und nachhaltiges Material. Sand im fluidisierten Zustand gewährleistet hohe Wärmeübergangszahlen. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Sandes im nichtfluidisierten Zustand während der Speicherphase, verringert die Speicherverluste an die Umgebung. Auch der Schmelzpunkt des Speichermediums stellt keine Grenze dar in Bezug auf die mögliche Speichertemperatur

sondern dar. Eine hohe Wärmekapazität im Vergleich zu anderen Feststoffmaterialien gewährleistet hohe Energiespeicherdichten.

Die Bauweise des sandTES-Wärmetauschers ermöglicht den Einsatz verschiedenster Fluide welche als Wärmetauschermedien durch die Rohre gepumpt werden können. Auch unterschiedliche fluidisierbare Sekundärmedien sind einsetzbar was die Flexibilität des Konzeptes stark erhöht. Primär- und Sekundärmedium stehen dabei nie in direktem Kontakt und übertragen die Wärme berührungslos.

Aus prozesstechnischer Sicht, ist die mögliche Leistungsanpassung durch Massenstromregelungen im Lade- und Entladebetrieb von großem Vorteil. Ebenso die möglichen konstanten Lade- und Entladetemperaturen nach erreichter Betriebstemperatur stellen für einen Prozess einen entscheidenden Nutzen dar.

Die Flexibilität im Hinblick auf die Speicherkapazitäten des sandTES-Konzeptes wird nur durch die Möglichkeiten des Silobaus bzw. Stahlbaus begrenzt.

Die Kombinationsfähigkeit mit unterschiedlichsten am Markt bereits vorhandenen Technologien wie etwa Druckluftspeicherkraftwerken, Solarkraftwerken und herkömmlichen kalorischen Kraftwerken weist auf ein großes nutzbares Potential des sandTES-Konzeptes hin.

3 Anwendungsmöglichkeiten

3.1 Adiabate Druckluftspeicherung (ACAES)

Die Adiabate Druckluftspeicherung ist derzeit die aussichtsreiche Technologie für die großindustrielle Ergänzung von Pumpspeicherkraftwerken. Im Falle der Druckluftspeicherung wird die elektrische Energie dazu eingesetzt, einen Kompressorstrang zu betreiben und die erzeugte Druckluft in geeigneten Speichern zu lagern. Die Temperaturerhöhung der Luft durch die Kompression verlangt nach einem zusätzlichen thermischen Speicher, um die entstandene thermische Energie im Entladeprozess wieder verwenden zu können und den Gesamtwirkungsgrad in wirtschaftlich rentablen Bereichen zu halten.

3.1.1 Gleitdruckbetrieb

Abbildung 3.1 zeigt den Einsatz des sandTES-Konzeptes bei einer Druckluftspeicheranlage im Ladeprozess. Die stark komprimierte und dadurch stark erhitzte Druckluft wird dabei als primäres Wärmetauscherfluid durch das Rohrbündel des sandTES-Wärmetauschers gedrückt und gibt im Gegenstrom die Wärme an den fluidisierten Sand ab. Die Kompressibilität der Luft führt bei konstantem Kavernenvolumen zum Gleitdruckbetrieb der Turbomaschinen im Lade- und Entladezyklus.

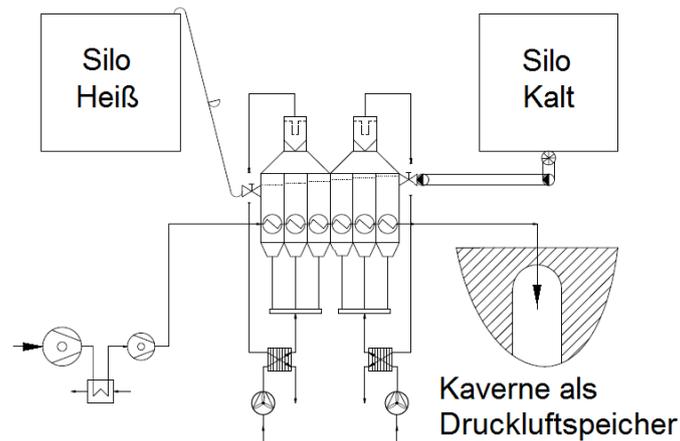


Abb. 3.1 Ladezyklus ACAES im Gleitdruckbetrieb mit sandTES-Wärmetauscher und -Speicher

3.1.2 Festdruckbetrieb

Um den Gleitdruckbetrieb der Turbomaschinen zu vermeiden, kann eine elastische Membran unter Wasser verwendet werden. Der auf die Membran wirkende hydrostatische Druck gewährleistet einen konstanten Speicherluftdruck während den Lade- und Entladezyklen. Abbildung 3.2 zeigt den entsprechenden ACAES-Entladezyklus. Die im Sand zwischengespeicherte Wärme wird hier über den sandTES-Wärmetauscher der Druckluft wieder zugeführt. Die resultierende hohe Temperatur der Druckluft ermöglicht den Betrieb einer Gasturbine ohne zusätzliche Brennstoffzuführung.

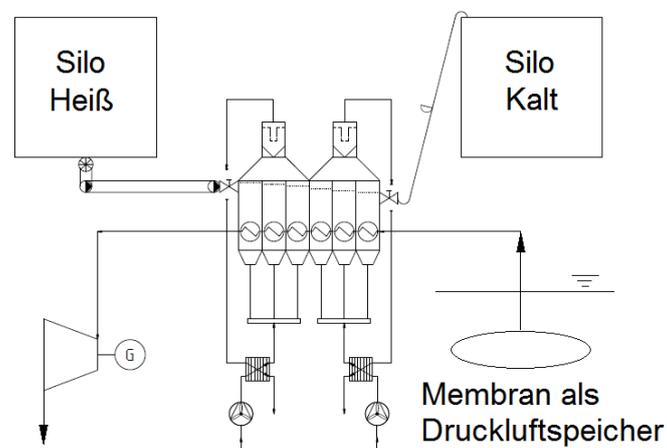


Abb. 3.2 Ladezyklus ACAES im Festdruckbetrieb mit sandTES-Wärmetauscher und -Speicher [6]

3.2 Mindestlastabsenkung in kalorischen Kraftwerken

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit des sandTES-Konzeptes ist der Einsatz zur Mindestlastabsenkung in kalorischen Kraftwerken. Abbildung 3.3 zeigt wie ein Teil des überhitzten Wasserdampfes über die Turbinen entspannt wird, während der Rest dazu genutzt wird den Wärmespeicher zu laden. Dabei bleibt der Speisewasserzyklus

geschlossen. Die minimale Feuerleistung kann beibehalten werden, während die momentane elektrische Leistung des Kraftwerks reduziert wird.

Die optimierte Anpassung des sandTES-Wärmetauschers an die Stoffeigenschaften des Sekundärmediums Wasserdampf verlangt eine Auftrennung in Überhitzer- und Verdampferteil der Speicheranlage.

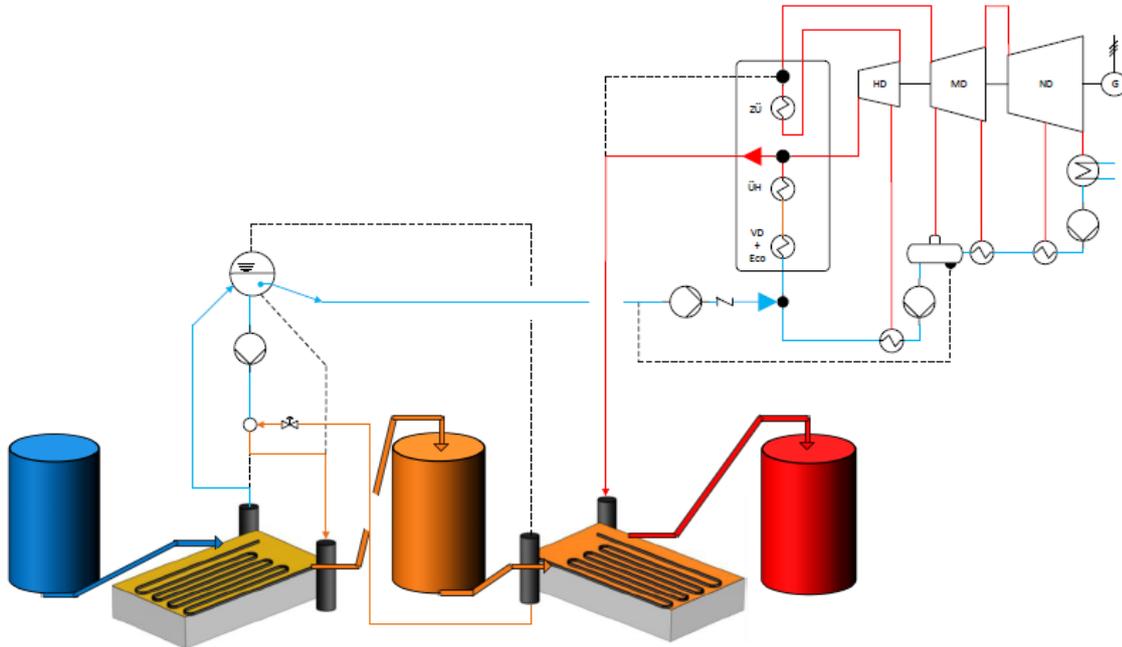


Abb. 3.3 sandTES-Konzept zur Mindestlastabsenkung, Ladezyklus

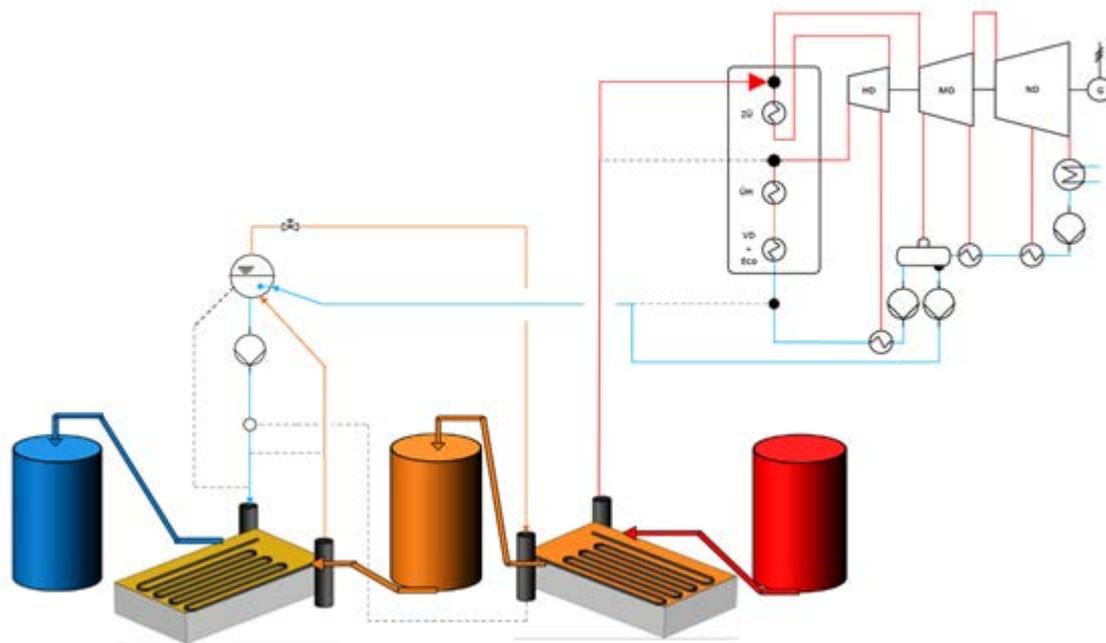


Abb. 3.4 sandTES-Konzept zur Mindestlastabsenkung, Entladezyklus

Weitere Anwendungen des sandTES-Konzeptes für Solarkraftwerke wurden in früheren Artikeln beschrieben [7].

4 Experimente zum Fließverhalten

Neben experimentellen Untersuchungen zum selbststabilisierenden Düsenboden und zur maximal möglichen Betthöhendifferenz über einer Windbox, wurde eine Versuchsanlage aus Plexiglas gebaut um das Fließverhalten des fluidisierten Sandes über ein Rohrbündel von einem Meter Länge zu untersuchen. Dieser Versuchsstand wurde auch im cpfd-Programm Barracuda[®] modelliert und simuliert.



Abbildung 4.1 zeigt den Versuchsstand mit dem Sandbehälter über dem Einlassstutzen.

Die Strömungsform des Sandes über den Querschnitt des Wärmetauschers, bestimmt maßgeblich die Effizienz und den Wirkungsgrad der Wärmeübertragung.

Um die Strömungsform des Sandes entlang des Rohrbündels im Experiment nachvollziehen zu können, wurde mit gefärbtem Sand gearbeitet. Dieser wurde, nach Erreichen eines stationären Förderprozesses des farblosen Sandes, solange eingefüllt bis sein Ausfließen am Austritt festzustellen war.

Einlass- und Auslassphänomene treten bei der vorliegenden Länge des Versuchsstandes leider überproportional in Erscheinung, sodass keine fundierten Prognosen über die Strömungsform bei längeren Strecken angegeben werden können.

Die Simulation im cpfd-Programm Barracuda[®] zeigt für unsere geplante Anwendung zur Auslegung einer Pilotanlage zufriedenstellende Übereinstimmungen im Hinblick auf die beobachtete Strömung des Bettmaterials durch den Versuchsstand [8].

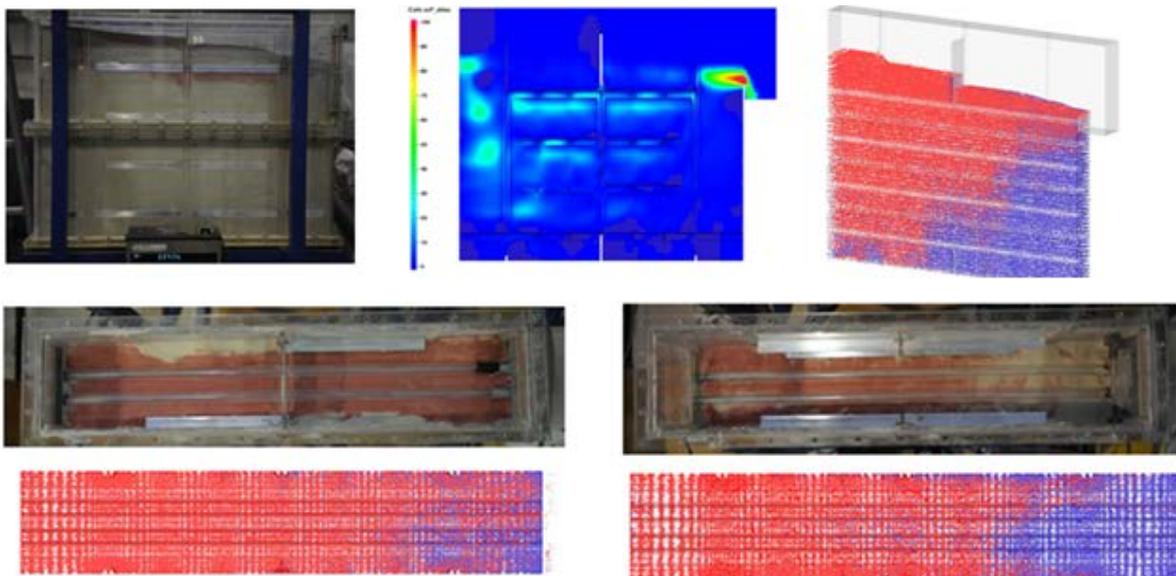


Abb. 4.2 Vergleich der Strömungsformen in der Simulation und im Experiment

5 Diskussion

Das neuartige Konzept eines aktiven Gegenstrom-Fließbett-Wärmetauschers, stellt das Projekt-Team am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU-Wien vor große Herausforderungen. Mehrere Experimente die auf die verschiedenen grundlegenden Fragestellungen der Fließbettfördertechnik ausgerichtet sind, wurden umgesetzt und vergrößern kontinuierlich den Wissensstand und das Verständnis für die Technologie.

Innovationen im Bereich der Düsenbodenkonstruktion ermöglichten den Nachweis der Funktionsfähigkeit des Gegenstrom-Prinzips basierend auf dem Betthöhenunterschied zwischen Ein- und Austritt des Wärmetauschers.

Detailliertere Untersuchungen des Strömungsverhaltens über die Querschnittsfläche des Wärmetauschers stehen für längere Strömungsabschnitte noch aus.

Weitere Untersuchungen über den Einfluss der Rohrbündelgeometrie auf Fluidisierung und Dispersion sind bereits in Planung. Thermisch aktive Versuchsstände sollen weitere Einblicke liefern und das Potential des sandTES-Konzeptes belegen.

Die Verwendung des cpfd-Programms Barracuda[®] lieferte schon für die Vorversuche wichtige Erkenntnisse bezüglich des Fluidisierungsverhaltens und wird auch zur Auslegung weiterer Experimente angewendet.

Die Planung einer 200 kW_{th} -sandTES Pilotanlage ist in fortgeschrittenem Stadium und wird alle bisherigen Erkenntnisse berücksichtigen.

6 Zusammenfassung

In Anbetracht der in der EU verfügbaren Speicherkapazität von nur 5% der derzeit installierten Energieversorgungsleistung und der wachsenden Zunahme intermittierender Stromquellen, besteht ein großer Bedarf an neuen Speicherkapazitäten und Speichertechnologien um eine stabile Stromversorgung auch zukünftig gewährleisten zu können.

Die Anwendungsmöglichkeiten des sandTES-Konzeptes zur Flexibilisierung des Strommarktes sind vielfältig und wurden in diesem Artikel anhand zweier Beispiele vorgestellt. Insbesondere die Anwendungsmöglichkeit für die adiabate Druckluftspeicherung, die derzeit aussichtsreiche Technologie für die groß-industrielle Ergänzung von Pumpspeicherkraftwerken, könnte durch die sandTES-Technologie ermöglicht werden.

Es wurden mehrere Vorteile des sandTES-Konzeptes erläutert, von verfahrenstechnischen Vorteilen über die Vorteile des Speichermediums Sand bis hin zu den Vorteilen der Bauweise.

Die ersten Herausforderungen zur Umsetzung der geplanten Technologie wurden bewältigt. Die Funktionsfähigkeit der nötigen Fördertechnik zur Umsetzung eines Gegenstrom-Fließbett-Wärmetauschers konnte experimentell nachgewiesen werden.

Die Umsetzung weiterer thermisch aktiver Vorversuche und die Umsetzung einer 200 kW_{th} -sandTES Pilotanlage sind in Planung.

7 Literaturliste

- [1] IEA, *World Energy Outlook 2013*, International Energy Agency (IEA) Paris, Frankreich (2013)
- [2] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), *Pressedienst Nr.08|2013*, (2013)
- [3] European Commission Directorate-General for Energy D, *The future role and challenges of Energy Storage*, Brüssel (2012)
- [4] Hämmerle M., Diplomarbeit, *Auslegung und Konstruktion einer 200[kW]th-sandTES Pilotanlage*, TU-Wien (2013).
- [5] Haider M., Schwaiger K., *A Comparison between Passive Regenerative and Active Fluidized Bed Thermal Energy Storage Systems*, Eurotherm (2012)
- [6] Sublake Electrical Energy Storage (SEES), *Neue Energien 2020, Klima und Energiefonds*, TU-Wien Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Strabag AG, ENRAG, Österreichische Bundesforste AG, (2012)
- [7] Schwaiger K., *Applications of the sandTES System for various Types of Solar Thermal Power Plants*, SolarPACES (2013)
- [8] Schwaiger K., *Numerical and Experimental investigation of long stationary fluidized bed heat exchangers*, CFB 11, (2014)