

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

28/12/2018

Advanced Regenerator: Partikel- Hochtemperaturwärmespeicher ohne rotierende Komponenten mit Gegenstromcharakteristik

Projektnummer: 858916

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	02/05/2017
Projektende	31/10/2018
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	18 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	TU-Wien
AnsprechpartnerIn	Univ. Prof. Dr. Haider Markus
Postadresse	Institut für Energietechnik und Thermodynamik Getreidemarkt 9 1060 Wien
Telefon	01 58801 302301
Fax	01 58801 302399
E-mail	markus.haider@tuwien.ac.at
Website	https://www.iet.tuwien.ac.at/

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Advanced Regenerator: Partikel- Hochtemperaturwärmespeicher ohne rotierende Komponenten mit Gegenstromcharakteristik

AutorInnen:

Heimo WALTER

Verena SULZGRUBER

Markus HAIDER

Miriam UNTERLASS

1 Inhaltsverzeichnis

Es muss ein Inhaltsverzeichnis mindestens auf Überschriftenebene 1 mit Seitenangabe erstellt werden!

1	Inhaltsverzeichnis.....	5
2	Einleitung	7
3	Inhaltliche Darstellung.....	10
3.1	Advanced Regenerator	10
3.2	Mikropartikel.....	13
3.2.1	Verkapselungsreaktor	13
3.2.2	Partikelerzeugung	15
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	16
4.1	Erzeugung der Mikropartikel	16
4.2	Advanced Regenerator	22
5	Ausblick und Empfehlungen.....	23
6	Literaturverzeichnis	24
7	Kontaktdaten	25

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ein publizierbarer Endbericht sollte folgende Struktur (Index) besitzen und besteht aus **mindestens 25 Seiten**. Die unten angeführte **Darstellung ist eine Mindestanforderung** und kann bei Bedarf erweitert werden.

Vorrangiges Ziel der publizierbaren Berichte ist die Darstellung der wesentlichen Projektergebnisse.

Textformat

- Papierformat: A4 Hochformat
- Linker und rechter Rand: 2,5 cm
- Schriftformatierung: Arial, 11 Punkt, Zeilenabstand 1,3-fach
- Schriftformatierung für Tabellen: Arial, 10 Punkt
- Fußzeile: Seitennummerierung
- Definition der Überschriften bis zur 3. Ebene
 - Überschrift 1:
 - Schriftformat: Arial, 16 Punkt und Fett
 - Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
 - Überschrift 2:
 - Schriftformat: Arial, 14 Punkt und Fett
 - Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
 - Überschrift 3:
 - Schriftformat: Arial, 11 Punkt und Fett
 - Absatzformat: Abstand vor: 12 Punkt, Abstand nach: 6 Punkt

2 Einleitung

Die Reduktion der Treibhausgasemissionen (bezogen auf 1990) sowie die Erhöhung der Energieeffizienz um 20% bis 2020 wurden von der europäischen Union als Ziel gesetzt. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, ist es notwendig den Anteil erneuerbarer Energieträger am Bruttoendenergieverbrauch sowie die Energieeffizienz zu erhöhen. In [1] kommen die Studienautoren zur Schlussfolgerung, dass sich der Prozess einer Energiestrategie den Herausforderungen der **Ausweitung der erneuerbaren Energien** und der **Erhöhung der Energieeffizienz** zu stellen hat. Ein Maßnahme zur Erhöhung der Energieeffizienz stellt u.a. auch die **verstärkte Nutzung von Abwärme in der Industrie und im produzierenden Gewerbe** dar (siehe dazu auch [2], [3]). Zahlreiche Industriebetriebe benötigen Dampf und setzen für die Fertigung u.a. Industrieöfen, welche zum großen Teil im Batch-Betrieb arbeiten, ein und haben daher ein großes Potential zur Abwärmenutzung. Ein **thermischer Speicher** kann hier dazu dienen, den intermittierend anfallenden Abwärmestrom in einen kontinuierlich zur Verfügung stehenden Wärmestrom zu transferieren und somit z.B. eine kontinuierliche Dampfproduktion gewährleisten. Viele Technologien zur Bereitstellung erneuerbarer Energien, die zweite Herausforderung laut [1], wie z.B. die Stromgewinnung mit Hilfe von Wind- oder Solarfarmen, stellen die erzeugte Energie unabhängig vom gerade benötigten Bedarf zur Verfügung. Wird der Anteil der regenerativ erzeugten Energie im Stromnetz weiter erhöht, so muss für Zeiten in denen ein Energieüberschuss oder ein Energiemangel vorliegt Vorsorge getroffen werden, was den **Bedarf an Speichermöglichkeiten** ebenfalls **erhöht**. Auch hier können thermische Speicher zum Einsatz kommen, da Wärme sich wesentlich billiger speichern lässt als Strom [4]. Dieser technologische Ansatz zur Speicherung der elektrischen Energie wird Power-to-Heat bezeichnet (siehe dazu u.a. [5], [6], [7]). In [8] wird, neben der Reduktion der Subvention von fossilen Energieträgern, als **wichtigste Maßnahme**, die die Voraussetzungen für einen beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien schafft, der Infrastrukturausbau, allen voran die **Schaffung leistungsfähiger Übertragungsnetze und Speicher** (siehe dazu auch [9], [10]), gefordert. Die IEA weist in ihrer Roadmap [11] für den thermischen Mittel- und Hochtemperaturspeicher u.a. auf den erhöhten Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der **Reduktion der Systemkosten** und der **Verbesserung** der Speicher und des **dazugehörigen Equipments** hin (siehe dazu auch [12]). Dies führt dazu, dass für die nächsten Jahrzehnte die erneuerbare Energieerzeugung, die Energiespeicherung sowie die Energieverteilung zu einem wichtigen und stark wachsenden Markt und somit auch zu einem wichtigen Thema in Forschung und Entwicklung werden.

Aufgabenstellung

Die Speicherung thermischer Energie stellt neben der Speicherung von mechanischer, chemischer und elektrischer Energie eine weitere Form der Energiespeicherung dar. Neben der simplen Ein- und Ausspeicherung von Wärmeenergie können thermische Energiespeicher im Zuge der Einbindung in thermodynamische Prozesse (Rankine, Brayton,...) auch eine attraktive Methode der Stromspeicherung darstellen. Um die thermische Energie exergetisch günstig speichern zu können muss abhängig vom Wärmeträgermedium das dazu passende Speichermedium gewählt werden. Durchläuft das

Wärmeträgermedium während der Wärmeenergieab- bzw. -aufnahme eine Phasenwechsel so ist es aus exergetischer Sicht günstiger ein Phasenwechselmaterial (mit passender z.B. Schmelztemperatur) zu wählen. Im Falle einer einphasigen Wärmeab- bzw. -aufnahme durch das Wärmeträgermedium wäre jedoch exergetisch ein sensibler Wärmespeicher vorteilhafter.

Um dieses Ziel der exergetisch günstigen Speicherung von Energie in Form von Wärme zu bewerkstelligen sollte ein neuartiger Speicher entwickelt werden. Das **Speicherkonzept** arbeitet dabei auf Basis der Wirbelschichttechnologie und der Gegenstromwärmeübertragercharakteristik, jedoch **ohne rotierende Komponenten**. Diese Technologie stellt einen wichtigen Schritt bei der Systementwicklung von aktiven thermischen Energiespeichern dar. Der Einsatz des Speichers kann auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, abhängig vom eingesetzten Speichermaterial, erfolgen. Um mit diesem Speicher auch thermische Energie auf Basis latenter Wärme (für Verdampfungs- bzw. Kondensationswärme) exergetisch günstig speichern zu können, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes auch an der **Entwicklung von beschichteten Mikropartikeln**, welche im Kern ein Phasenwechselmaterial enthalten, gearbeitet. Mit diesen Mikropartikeln sollte es ermöglicht werden den Nachteil der Phasenwechselmaterialien gegenüber den sensiblen Speichermedien zu durchbrechen um ebenfalls eine Trennung der Speicherkapazität von der Wärmeleistung zu bewerkstelligen.

Schwerpunkte des Projektes

Ziel des Sondierungsprojektes war es

- 1) eine Technologie zu entwickeln, welche eine wirtschaftliche und effiziente thermische Energiespeicherung mittels eines neuartigen aktiven sensiblen Speicherkonzeptes ohne rotierende Komponenten ermöglicht und
- 2) beschichtete mikroverkapselte Partikel zu entwickeln, welche im Kern ein Phasenwechselmaterial enthalten.

Einordnung in das Programm

Das Projekt behandelte innerhalb der 3. Ausschreibung Energieforschung prioritär den **Schwerpunkt 6: Speicher** mit dem **Subschwerpunkt 6/6.4: Thermische Speicher**.

Verwendete Methoden

Um die angestrebten Ziele für das Sondierungsprojekt zu erreichen, wurden die zu verrichtenden Forschungstätigkeiten und organisatorischen Arbeiten in die nachstehend angeführten Arbeitspakete untergliedert:

AP1: Projektmanagement:

Im AP 1 erfolgte das Management des Gesamtprojektes und der einzelnen Arbeitspakete. Dabei wurden Projektmeetings und Besprechungen organisiert und koordiniert sowie für eine effiziente Kommunikation innerhalb des Projektkonsortiums gesorgt. Es erfolgte die Initiierung von Abstimmungsgesprächen für die Feindefinition zu den einzelnen Arbeitspaketen. Das Projektmanagement führte auch die finanzielle Abwicklung des Projektes sowie das gesamte Berichtswesen durch. Dabei wurden während des Berichtszeitraumes sowohl ein Endbericht erstellt. Das Projektmanagement war darüber hinaus auch für die Kommunikation zum Fördergeber zuständig.

AP2: Numerische Systemanalyse

Mit Hilfe der CFPD (Computational Particle Fluid Dynamics) Software Barracuda wurden numerische Untersuchungen zum Strömungsverhalten der Speichermaterialpartikel im **Advanced Regenerator** durchgeführt. Die numerischen Simulationen dienten während der Designphase der Speichertechnologie zur Optimierung der Partikelströmung im Wärmetauscher aber vor allem der Unterstützung beim Design der Speicher. Da die Technologie ohne rotierende Komponenten auskommt, war vor allem der Partikeltransport in bzw. aus dem Speicher von entscheidender Bedeutung für das Gelingen des Forschungsprojektes. Zudem wurden die Ergebnisse der numerischen Analyse auch für eine erste Auslegung des Regelalgorithmus herangezogen.

AP3: Auslegung und Bau der beiden Test-Einrichtungen

Im Zuge dieses Arbeitspakets wurde der **Advanced Regenerator** ausgelegt sowie alle für die Fertigung notwendigen Zeichnungen erstellt. Im Anschluss daran wurden einzelne, nicht von Drittanbietern gelieferte, Komponenten für die Speichertechnologie in der Werkstätte des Institutes für Energietechnik und Thermodynamik (IET) gefertigt. Nach Lieferung der fremdgefertigten Teile wurden alle Anlagenteile im Labor vom IET montiert und die gesamte elektrisch Verkabelung durchgeführt.

Die Herstellung von **gekapselten Mikropartikeln** in einem Wirbelschichtreaktor ist eine technologisch sehr schwierige und technisch aufwendige Aufgabenstellung. Daher wurden vor der Auslegung des eigentlichen Beschichtungsreaktors experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Voruntersuchungen wurde dann ein Beschichtungsreaktor ausgelegt und im Detail konstruiert, so dass Fertigungszeichnungen aus der 3D-CAD-Darstellung des Beschichtungsreaktors abgeleitet werden können. Da die Kosten des ausgelegten Beschichtungsreaktors gegenüber dem im Antrag geplanten Reaktor deutlich überschritten hätten, wurde aus Kostengründen eine Leihanlage für die Beschichtung der Mikropartikel herangezogen.

AP4: Experimentelle Analyse

Nach Fertigstellung der Arbeiten in Arbeitspaket 3 wurde der Prototyp des **Advanced Regenerators** in Betrieb genommen und experimentelle Analysen unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt, um ein tiefgehendes Verständnis für das Betriebsverhalten des Advanced Regenerators zu erhalten. Dazu wurden in der Folge Massenströme und Druckverteilungen unter den verschiedenen Betriebsbedingungen gemessen, aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

Mit der von einem Drittanbieter angemieteten Wirbelschichtanlage wurde in mehreren Kampagnen **gekapselte Mikropartikel** erzeugt. Das für die Beschichtung notwendige Beschichtungsmaterial wurde vom Projektpartner, dem Institut für Materialchemie, mit Hilfe eines Lösungsmittels für den Beschichtungsvorgang aufbereitet. Um auch Aussagen über den Beschichtungsvorgang selbst zu erhalten wurden dem Reaktor während der Beschichtung kontinuierlich Proben entnommen. Die mikroverkapselten Partikel wurden in weiterer Folge mechanischen und thermischen Belastungsszenarien ausgesetzt, um deren Eignung für den Einsatz im Advanced Regenerator zu ermitteln.

Parallel zu den Arbeiten am Institut für Energietechnik und Thermodynamik wurden vom Institut für Materialchemie Untersuchungen zur Qualität der Beschichtung der Mikropartikel durchgeführt. Anhand

der Mikroskopieaufnahmen lässt sich erkennen, ob das Beschichtungsmaterial das zu beschichtende Speichermaterial vollkommen umschließt oder ob offene Poren vorliegen. Diese Analysen wurden mittels dem optischen Mikroskop sowie dem Elektronenmikroskop vorgenommen um die Struktur der Partikel zu analysieren. Die Untersuchungen wurden sowohl für Partikel direkt nach dem Coating als auch nach den einzelnen Belastungen durchgeführt.

Nachdem es bei den zyklischen Belastungen zur exothermen Reaktion zwischen dem Speicher- und dem Beschichtungsmaterial gekommen war, wurden vom Institut für Materialchemie zusätzliche umfangreiche physikalisch-chemische Untersuchungen vorgenommen um die Ursache der chemischen Reaktion zu ermitteln. Der Materialanalyse wurden sowohl das reine Speichermaterial, das reine Beschichtungsmaterial als auch die beschichteten Mikropartikel (vor und nach thermischer Belastung) unterzogen. Dazu wurden folgende Untersuchungen durchgeführt: dazu wurden alle Proben mittels Fourier-Transformationsinfrarotspektroskopie (ATR-FTIR), Pulverdiffraktometrie (P-XRD), dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), und thermogravimetrische Untersuchungen (TGA) charakterisiert.

AP5: Basic design von industriellen Anwendungen

Auf Basis der in den Arbeitspaketen 2 bis 4 gewonnenen Erkenntnisse erfolgte eine Systemauslegung für zwei ausgewählte Speicherszenarien. Dazu wurden mit Hilfe der Speicherauslegung die Kosten für die Systeme abgeschätzt. Ein technischer Vergleich mit Alternativsystemen wurde mit den ausgelegten Speichersystemen durchgeführt.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Advanced Regenerator

Mittels der CPFD (Computational Particle Fluid Dynamics) Software Barracuda wurden numerische Untersuchungen zum Strömungsverhalten der Speichermaterialpartikel im Advanced Regenerator durchgeführt. Um die Simulationsergebnisse mit den später erarbeiteten experimentellen Daten vergleichen zu können, wurde für die Simulationen eine Geometrie gewählt, die dem tatsächlichen Aufbau des Prototyps möglichst ähnlich ist. Die Ergebnisse der numerischen Systemanalyse flossen auch in die Entwurfentwicklung des Advanced Regenerators. Dies verursachte einen iterativen Prozess zwischen der Planung des Regenerators und neuen Simulationsrechnungen.

Da im Wärmeübertragerkanal des Prototyps bei der Erstinbetriebnahme kein Rohrbündel eingebaut wurde, der Einfluss eines Rohrbündels auf die Partikelströmung aber von großem Interesse ist, wurden Simulationen sowohl mit als auch ohne Rohrbündel im Wärmeübertragerkanal durchgeführt. Dazu wurde eine Rohrbündelgeometrie, die konstruktiv umsetzbar ist und gleichzeitig die Partikelströmung möglichst wenig behindert, erarbeitet. Des Weiteren wurden numerische Untersuchungen mit unterschiedlichen potentiellen Speichermaterialien durchgeführt. Neben dem, auch im Prototyp verwendeten, Quarzsand wurde auch das Verhalten der mikroverkapselten Speichermaterialpartikeln untersucht. Für den Quarzsand wurde u.a. der Formfaktor, ein für das Fließverhalten des Sandes wichtiger Parameter, variiert.

Durch entsprechende Aufarbeitung und Auswertung der Simulationsergebnisse konnte der Einfluss der verschiedenen Massenstrom- und Druckrandbedingungen auf den geförderten Partikelmassenstrom ermittelt werden. Dadurch wurde ein Betriebsbereich, in dem laut der Simulationsergebnisse das Fördern eines konstanten Partikelmassenstroms möglich ist, bestimmt. Besonderes Augenmerk wurde auch auf die auftretenden Druckverluste, die maximalen Druckspitzen und die zur Fluidisierung benötigten Luftmassenströme gelegt, da diese Daten für die Auslegung des Prototyps von hoher Bedeutung waren.

Abb. 1 zeigt stellvertretend den Screenshot einer Simulation mit Quarzsand und Rohrbündel, auf dem der Partikelvolumenanteil beim Austesten des maximal möglichen Sandmassenstroms dargestellt ist. Ausgehend von der bereits vor Projektbeginn getätigten Grobplanung und grundsätzlichen Auslegung des Advanced Regenerators wurden diese unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus den numerischen Simulationsergebnissen im verwendeten CAD-Programm Inventor überarbeitet und danach anschließend detaillierte Konstruktionszeichnungen angefertigt. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse wurden z.B. alle Komponenten und Sensoren, insbesondere die Ventile, Durchflusssensoren und Drucksensoren sowie die Luftversorgung dimensioniert.

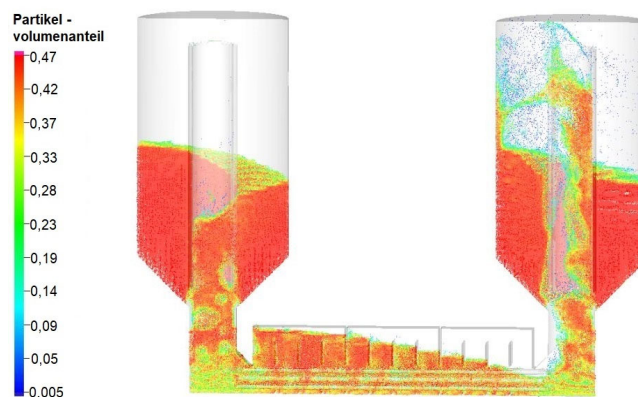


Abb. 1: Beispiel für ein Simulationsergebnis

Nach der Lieferung der einzelnen, von einem Drittanbieter gefertigten, Komponenten wurden die Bauteile im Labor des Institutes für Energietechnik und Thermodynamik mit den selbst gefertigten Anlagenteilen montiert sowie die Sinterplatten zur Verteilung der Fluidisierungsluft eingeklebt. Für einen sicheren Aufbau des Advanced Regenerators wurde zudem ein Gerüst entworfen und errichtet, auf das danach alle Sensoren und Aktoren montiert wurden. Parallel zu diesen Arbeiten wurde ein elektrischer Schaltplan für die Versuchsanlage erstellt, die elektrische Verkabelung durchgeführt und der Schaltschrank ausgerüstet.

Zur Erfassung und Speicherung der Messwerte sowie zur Steuerung des Advanced Regenerators wurde eine X20 cp1858 Steuerung der Firma Bernecker und Rainer (B&R) programmiert. Die Benutzeroberfläche, über die der Advanced Regenerator bedient werden kann, ist in Abb. 2 dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

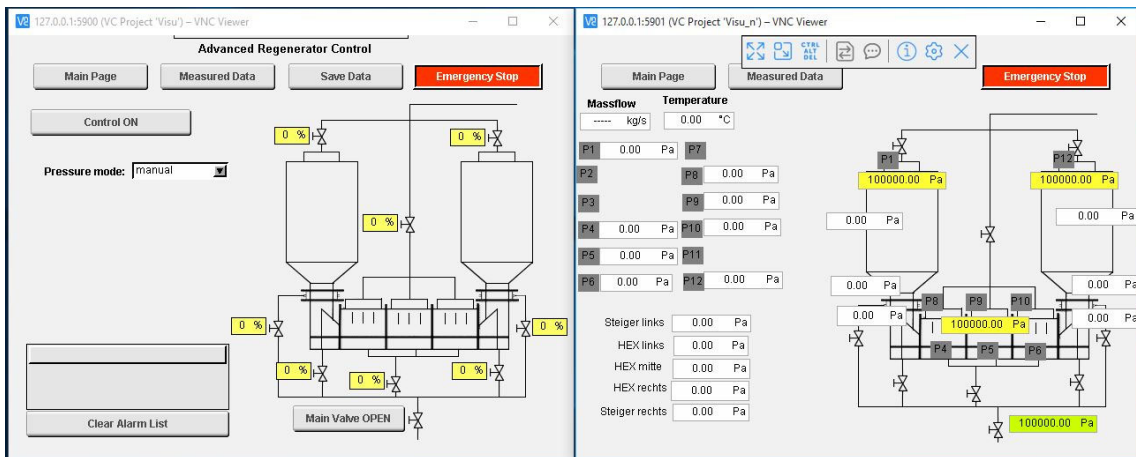


Abb. 2: Benutzeroberfläche der Steuerung des Advanced Regenerators

Im Zuge der Inbetriebnahme wurde die Dichtheit des Versuchszustandes mittels Druckprobe überprüft und die Druckverluste der Sinterplatten in Abhängigkeit der Fluidisierungsgeschwindigkeit erfasst.

Der Prototyp des Advanced Regenerators wurde mit Quarzsand dessen Partikeldurchmesser zwischen 70 und 100 μm liegen befüllt. Danach wurden verschiedene Experimente zum Betriebsverhalten des aktiven Regenerators durchgeführt. Um grundsätzliche Aussagen zur sich einstellenden Wirbelschicht machen zu können, wurden charakteristische Größen, wie die minimale Fluidisierungsgeschwindigkeit und der Druckverlust pro Betthöhe, bestimmt.

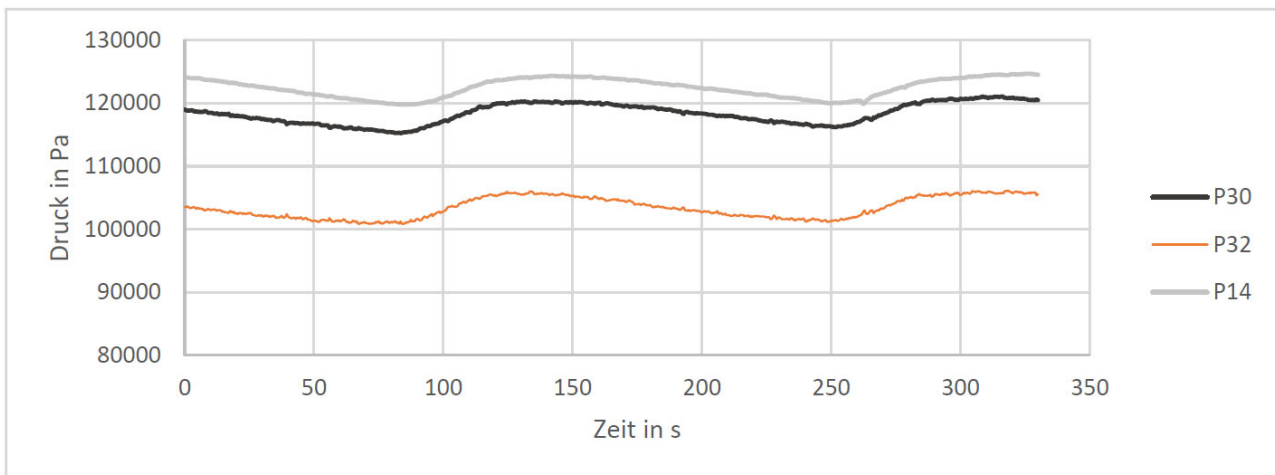


Abb. 3: Absolutdrücke im Freeboard der Silos

Für verschiedene Fluidisierungsgeschwindigkeiten und Füllstände in den Silos wurden die Ventilstellungen ermittelt, bei denen sich ein Gleichgewichtszustand, das bedeutet kein Partikeltransport bei vollständig fluidisiertem Advanced Regenerator, ausbildet. In diesem Gleichgewichtszustand wurden die Druckdifferenzen über alle Teilbereiche der Versuchsanlage aufgezeichnet und durch entsprechende Auswertung charakteristische Druckverluste des Advanced Regenerators bestimmt, die für die Entwicklung einer Regelung essenziell sind. In Abb. 3 sind beispielhaft die Absolutdrücke im Freeboard der Silos (P14 und P30) und des Wärmeübertragers (P32) im Gleichgewichtszustand dargestellt. Die

leichten Schwankungen lassen sich auf den nicht ganz konstanten Massenstrom an Fluidisierungsluft zurückführen.

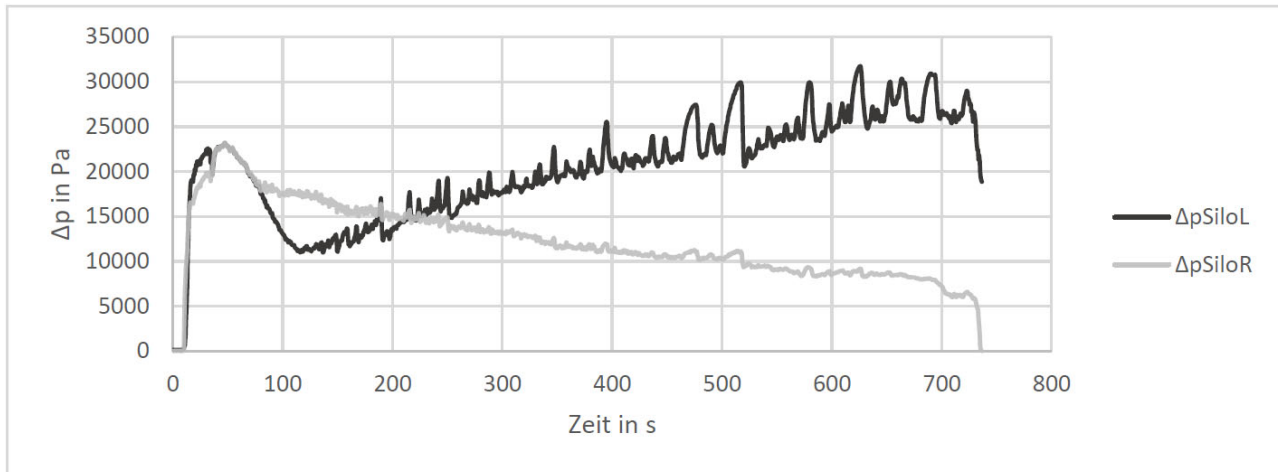


Abb. 4: Druckdifferenzen über die Höhe der Silos

Der Einfluss des eingestellten Druckes im Freeboard der Silos und des Wärmeübertragerkanals auf den geförderten Massenstrom wurde untersucht, wobei die Ventile vorerst manuell gesteuert werden mussten, weil die Programmierung einer entsprechenden Regelung bis jetzt nicht durchgeführt werden konnte. Während des Partikeltransportes wurde der Sandmassenstrom über die Füllstandsanzeige der Silos bestimmt und alle relevanten Druckdifferenzen wurden aufgezeichnet. In Abb. 4 sind beispielhaft für einen Betriebsfall der Anlage die Druckdifferenzen über die Höhe der beiden Silos aufgetragen. Man erkennt an der steigenden bzw. fallenden Druckdifferenz, dass die Sandhöhe im linken Silo ansteigt und im rechten Silo abfällt. Desweiteren erkennt man an den hohen Druckdifferenzen zu Beginn, dass das Hochfahren des Advanced Regenerators bis zur vollständigen Fluidisierung circa 100 s dauert.

Alle Ventilstellungen wurden über einen möglichst weiten Bereich variiert um die zumindest notwendigen Fluidisierungsgrade in den verschiedenen Bereichen des Advanced Regenerators festzustellen und den minimal und maximal möglichen Speichermassenstrom zu ermitteln.

3.2 Mikropartikel

3.2.1 Verkapselungsreaktor

Um erste Erfahrungen auf dem Gebiet der Beschichtung von gekapselten Mikropartikeln zu erhalten und um das knappe dafür vorgesehene Budget zu schonen sollten Voruntersuchungen zur Herstellung der gekapselten Mikropartikel anhand eines einfachen Reaktors durchgeführt werden. Dazu wurde in einem ersten Schritt die Standardliteratur zur Partikelbeschichtung studiert. Basierend auf den dabei gewonnen Erkenntnissen wurde anschließend das Design des Reaktors für die Voruntersuchungen festgelegt (siehe dazu Abb. 5), wobei auf die beschränkten Abmessungen im Labor des Projektpartners, wo die Vorversuche stattfanden, Bedacht genommen wurde.

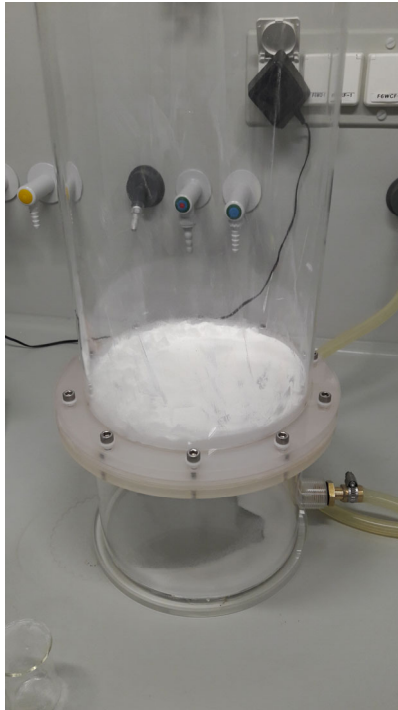


Abb. 5: Prüfstand für Vorversuche zur Partikelerzeugung

Nach Abschluss der Vorversuche wurde eine Analyse der dabei aufgetretenen Vorkommnisse und Probleme durchgeführt. Mit den aus den Vorversuchen gewonnen Erkenntnissen wurde in der Folge das Design des Reaktors (Erstellung eines 3-dimensionalen Modells) zur Herstellung der gekapselten Mikropartikeln unter Zuhilfenahme des Softwarepakets Inventor durchgeführt (Bild des Verkapselungsreaktors inklusive Partikelfilter siehe Abb. 6). Beim Entwurf des Reaktors wurde darauf Bedacht genommen, dass die geometrischen Abmessungen im Hinblick auf den zur Verfügung stehenden Raum am gedachten Aufstellungsort und der Materialkosten minimal werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Abmessung des Beschichtungsreaktors inklusive des Staubfilters ein Raumvolumen von 1080 x 590 x 2871mm (LxBxH) benötigen. Die Dimension des Versuchsreaktors ohne Nebenaggregate alleine beträgt DN300 x 1335mm, was bereits fast das im Labor des Projektpartners Institut für Materialchemie zur Verfügung stehende Aufstellungsvolumen übersteigt. Es wurde daher eine Aufstellung des Versuchsreaktors im Labor des Institutes für Energietechnik und Thermodynamik angedacht, diese wäre jedoch mit zusätzlichen Kosten, wie z.B. für die Reinigung des Abgasmassenstromes oder Versorgungsleitungen für Druckluft usw., verbunden.

Zudem wurde die Planung der notwendigen Sensoren und Aktoren durchgeführt und ein dafür notwendiges R&I-Schema der Verkapselungsanlage erstellt.

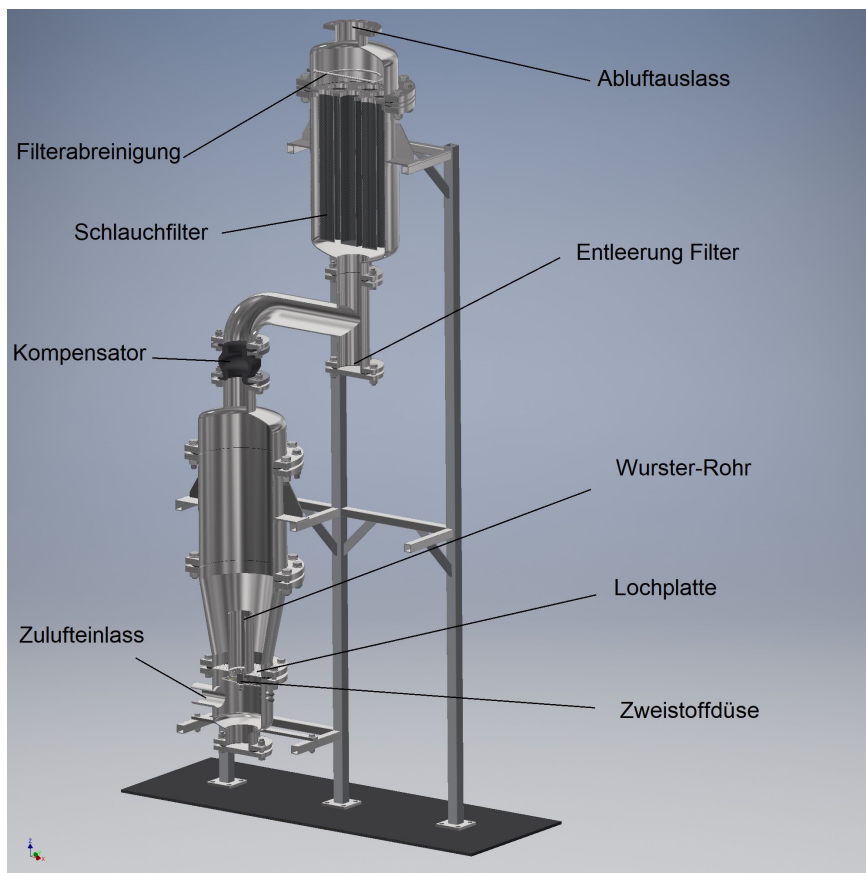


Abb. 6: CAD-Entwurf für den Verkapselungsreaktor

Basierend auf dem CAD-Entwurf und dem R&I-Schema wurden die Kosten für den Wirbelschichtreaktor zur Herstellung der mikroverkapselten Partikel abgeschätzt. Um die wirtschaftlich beste Lösung für die Herstellung der Mikropartikel in dem Projekt zu verwirklichen, wurde auf den Bau des Verkapselungsreaktors verzichtet und eine Versuchswirbelschicht, welche für die Coatingversuche geeignet ist, anzumieten.

3.2.2 Partikelerzeugung

In der angemieteten Wirbelschichtanlage wurden Beschichtungsversuche zur Herstellung von mikroverkapseltem Phasenwechselmaterial durchgeführt. Die zur Beschichtung benötigte Lösung wurde am Institut für Materialchemie hergestellt und deren Konzentration exakt bestimmt. Die als Ausgangsmaterial eingesetzten Speichermaterialpartikel (= das verwendete Phasenwechselmaterial) wurden gemahlen und klassiert, sodass Partikelchargen in verschiedenen Korngrößenbereichen zwischen 80 und 400 μm zur Verfügung standen. Bei den unterschiedlichen Beschichtungsversuchen wurden die wesentlichen Parameter, wie Beschichtungstemperatur, Fluidisierung, Sprühdruk und Sprührate, variiert um deren Einfluss auf die Partikelherstellung festzustellen. Für weiterführende experimentelle Untersuchungen der gekapselten Mikropartikeln wurden zudem stündlich Proben aus dem Reaktor gezogen. Für eine schnelle Vor-Ort-Überprüfung der Beschichtungsqualität der entstehenden Mikropartikeln wurde an den stündlich gezogenen Proben Leitfähigkeitsmessungen an den Partikeln in einem Wasserbad mittels eines Konduktometers durchgeführt.

Die thermische und mechanische Stabilität sowie verfahrenstechnische Größen der erzeugten Partikel wurden mit folgenden Belastungstests überprüft:

- Bestimmung der Schüttdichte
- Bestimmung der Partikelgrößenverteilung
- Bestimmung der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit
- mechanische Belastung in einer Wirbelschicht bei unterschiedlichen Fluidisierungsgraden
- einmalige thermische Belastung über dem Schmelzpunkt
- mehrmalige thermische Belastung durch zyklische Erwärmung und Abkühlung über bzw. unter den Schmelzpunkt des Phasenwechselmaterials

Für die experimentelle Bestimmung des Partikelverhaltens unter thermischer Belastung wurden Partikelproben in einen Muffelofen eingebracht und, wie oben beschrieben, einer einfachen sowie einer zyklischen thermischen Belastung ausgesetzt. In einem ersten Schritt erfolgte die thermische Belastung in der Form einer einmaligen Erwärmung der Proben über die Schmelztemperatur des latenten Materials. Diese Temperatur wurde für 3 Stunden konstant gehalten und danach erfolgte eine Abkühlung des Speichermaterials auf Umgebungstemperatur. Die zyklische thermische Belastung erfolgte auf ähnliche Weise. Die Proben wurden auf 30°C über bzw. unter die Schmelztemperatur des Speichermaterials erwärmt/gekühlt. Die jeweilige Temperatur wurde für 3 Stunden konstant gehalten bevor diese entsprechend dem Zyklus (Schmelzen oder Erstarrung) geändert wurde.

Die Dichtheit der Beschichtung nach den einzelnen Belastungstests wurde, wie bereits an den stündlich gezogenen Proben, mittels Leitfähigkeitsmessung der Partikel in destilliertem Wasser sowie ergänzend durch Mikroskopie (Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie) beurteilt. Desweiteren wurden chemische Analysen der erzeugten Partikel mittels Thermogravimetrie und Spektroskopie durchgeführt.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Erzeugung der Mikropartikel

Die Ergebnisse einer experimentellen Voruntersuchung zur Erzeugung von Mikropartikel mittels einem einfachen, während des Berichtszeitraumes gebauten Wirbelschichtreaktors (Reaktordimensionen: Durchmesser 200 mm und Höhe 350 mm, siehe Abb. 5) zeigten, dass für eine erfolgreiche Beschichtung mehrere Hürden zu bewältigen sind:

- 1) Es muss auf alle Fälle eine Zweistoffdüse für den Beschichtungsvorgang verwendet werden, da ansonsten die Lösung bestehend aus dem Beschichtungsmaterial und dem Lösungsmittel mit den Partikeln aus dem Speichermaterial verklumpen.
- 2) Die Beschichtung der Partikel muss in einem geschlossenen Apparat mit nachgeschalteter Abluftreinigungseinheit erfolgen, da das bei der Partikelbeschichtung ausdampfende Lösungsmittel toxisch (Gefahrenklasse Acute Tox. 4) ist.
- 3) Für eine gute Beschichtung der Speichermaterialpartikel muss ein höherer Fluidisierungsmassenstrom verwendet werden, um einen definierten Partikelumlauf im Reaktor und eine

ausreichende Verweilzeit für das Verdampfen des Lösungsmittels zu gewährleisten. Dies führt jedoch zum Austrag der feinen Partikelkorngrößenfraktionen und hat zudem eine hohe Bauweise des Reaktors zur Folge. Weder eine hohe Reaktorhöhe noch eine entsprechende Luftversorgung für die Fluidisierung ist im ursprünglich für die Versuche vorgesehenen Labor des Projektpartners, dem Institut für Materialchemie, realisierbar, da die experimentellen Analysen in einem Abzugsraum der Größe 1.5m x 1.5m x 0.74m durchgeführt hätten werden müssen. Ein Reaktorvolumen, wie im Antrag vorgesehen, war basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche nicht umsetzbar und hätte zu einem Misserfolg bei der Beschichtung der Mikropartikel geführt.

- 4) Alle Anlagenkomponenten müssen mittels einem lösungsmittelbeständigem Material ausgeführt sein. Bei den Vorversuchen hat sich gezeigt, dass speziell Kunststoffkomponenten, wie z.B. Kunststoffdichtungen, problematisch für den Einsatz zur Partikelherstellung mittels des vorgesehenen Lösungsmittels sind.
- 5) Um ein rascheres Verdampfen des Lösungsmittels zu gewährleisten, ist eine gegen die Umgebung höhere Temperatur für den Beschichtungsvorgang notwendig. Kann dies nicht gewährleistet werden, so kann dies eine nicht erwünschte erhöhte Agglomeration der Partikel zur Folge haben.
- 6) Die notwendige Versorgung mit ausreichender Fluidisierungsluft ist im Labor des Projektpartners, dem Institut für Materialchemie, nicht gegeben.
- 7) Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass der Bau eines Reaktors für die Herstellung von beschichteten Mikropartikeln mit den im Projekt vorgesehenen Budgetmitteln nicht durchgeführt werden konnte, da die im Antrag angestrebte Reaktorgröße nicht zielführend wäre und daher deutlich überschritten werden müsste. Dies wäre mit deutlich zusätzlichen Kosten verbunden.

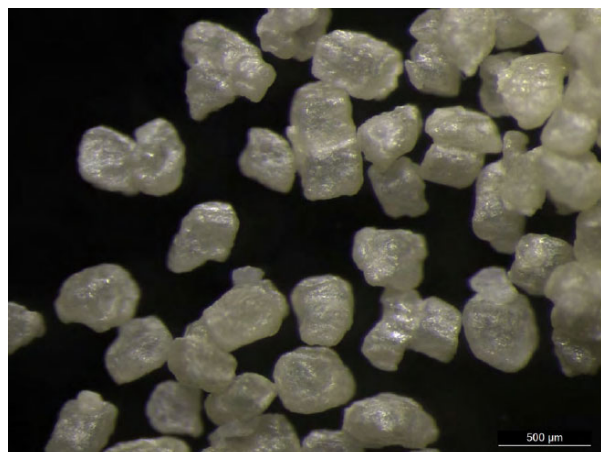


Abb. 7: Mikropartikel links) Proben zweier unterschiedlicher Versuchsdurchläufe rechts) Aufnahme mittels optischen Mikroskop

Um die wirtschaftlich beste Lösung für die Herstellung der Mikropartikel in dem Projekt zu verwirklichen wurde daher eine Versuchswirbelschicht, welche für Coatingprozesse geeignet ist, angemietet. Nach Aufstellung der Versuchswirbelschicht wurden die experimentellen Untersuchungen zur Beschichtung

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

des Phasenwechselmaterials durchgeführt. Dazu wurden unterschiedliche Partikelfractionen unter variierten Betriebsparameter im Wirbelschichtreaktor hergestellt (siehe dazu Abb. 7). Zu diesem Zwecke wurde vom Projektpartner die für die Beschichtung des Phasenwechselmaterials notwendige Lösung in geeigneter Konzentration hergestellt. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf das Finden und Einstellen praktikabler Konzentration gelegt.

Abhängig von den verwendeten Betriebsparametern konnten Partikel mit einer unterschiedlich hohen Agglomeration erzeugt werden. Sehr ungünstigen Betriebsbedingungen konnten soweit führen, dass es zu einer Zusammenballung (sehr starken Agglomeration) der Partikel kommt (siehe Abb. 8)



Abb. 8: Coatingergebnis bei Verwendung nicht günstiger Herstellungsparameter

Für weiterführende experimentelle Untersuchungen der gekapselten Mikropartikeln wurden stündlich Proben aus dem Reaktor gezogen. Für eine schnelle Vor-Ort-Überprüfung der Beschichtungsqualität der entstehenden Mikropartikeln wurden mittels der stündlich gezogenen Proben Leitfähigkeitsmessungen an den Partikeln in einem Wasserbad mittels eines Konduktometers durchgeführt.

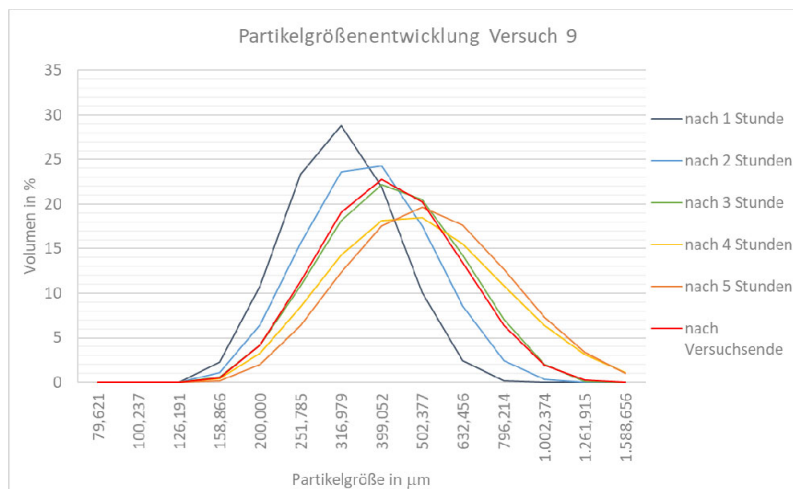


Abb. 9: Entwicklung der Partikelgröße während des Coatingvorganges

Nachdem unterschiedliche Chargen (eine Charge überdeckte nur einen bestimmten Korngrößenbereich des nicht beschichteten Phasenwechselmaterials, z.B. 100 bis 150 μm) an beschichteten Mikropartikeln, bestehend aus dem Phasenwechselmaterial und einer umgebenden Hüllschicht, hergestellt waren, erfolgten **verfahrenstechnische** und **thermische Untersuchungen**.

Dazu wurden die einzelnen erzeugten Mikropartikelchargen mittels Siebanalyse klassifiziert um u.a. die Änderung der Partikelzusammensetzung (Kornklassen) gegenüber dem Ausgangsmaterial festzustellen (siehe dazu beispielhaft Abb. 9).

Zudem wurde für die einzelnen Partikelchargen die Schüttdichte, angelehnt an die EN ISO 60, bestimmt. Dieser Wert ist dahingehend von hohem Interesse, da dieser Wert sowohl in die numerische Simulation als auch in die Auslegung von zukünftigen industriellen Anlagen des Advanced Regenerators eingeht.

Die Bestimmung der Schüttdichte hat gezeigt, dass diese sehr stark von der Partikelgröße des Ausgangsmaterials für das Speichermedium abhängig ist, siehe als Beispiel Tabelle 1 **Fehler!** **Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Tabelle 1: Schüttdichte der beschichteten Partikel

Versuchsnummer	Schüttdichte kg/m ³
1	969,8
2	917,5
3	779,6

Die Gründe dafür könnten zu einem daran liegen, dass die kleineren Partikeln weniger kugelförmig geformt sind und dadurch mehr Freiraum zwischen den Partikeln vorhanden ist, oder andererseits haben diese eine größere Schichtdicke aus dem Hüllmaterial, welches leichter als das verwendete Phasenwechselmaterial ist.

Die mit den einzelnen Partikelchargen als Bettmaterial in einer Versuchswirbelschicht bei unterschiedlichen Fluidisierungsgeschwindigkeiten durchgeführten mechanischen Untersuchungen zeigten, dass diese den Belastungen standhalten.

Bei der Untersuchung zur thermischen Belastung der erzeugten Mikropartikel sind die Ergebnisse etwas anders gelagert. Eine einfache thermische Belastung der Partikel (einmalige Erwärmung der Mikropartikel auf eine Temperatur, welche höher liegt als die Schmelztemperatur des Phasenwechselmaterials, und halten der Temperatur über eine Dauer von 2 Stunden) hat gezeigt, dass es zu keiner signifikanten Änderung an den Partikel gekommen ist. In einer daran anschließenden Untersuchung wurden die Mikropartikel einer zyklischen thermischen Belastung ausgesetzt. Dabei wurden die Partikel je Zyklus mehrere Stunden auf einer Temperatur über bzw. unter der Schmelztemperatur des Phasenwechselmaterials gehalten. Dabei wurde festgestellt, dass es zu einer exothermen Reaktion innerhalb der Partikel gekommen sein muss. Diese Reaktion äußerte sich in einer Temperaturzunahme der Partikel über die Ofentemperatur hinaus (siehe Abb.: 10) sowie in einer deutlichen Zunahme des Partikelvolumens. In weiterer Folge führte dies dazu, dass es zu einer vollständigen Zerstörung der Partikelhülle kam (siehe Abb.: 11).

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

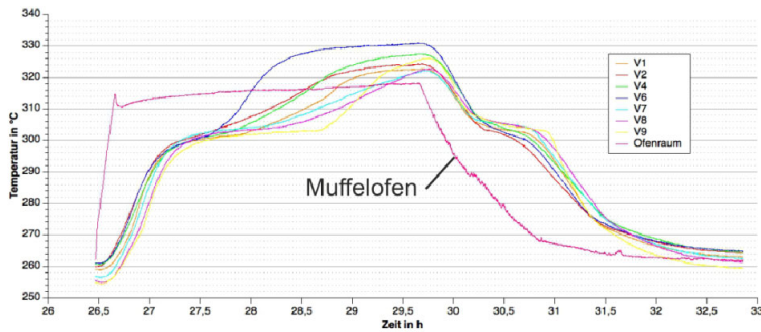


Abb.: 10 Partikel- und Ofentemperatur während des Beladezyklus



Abb.: 11 Zerstörte und aufgeschäumte Mikropartikelproben nach mehrfacher thermischer Belastung

Parallel zu den mechanischen und thermischen Belastungsuntersuchungen wurden Analysen zur Qualität der Beschichtung der Mikropartikel durchgeführt. Anhand von Mikroskopieaufnahmen lässt sich sehr gut erkennen, ob das Hüllmaterial das zu beschichtende Speichermaterial vollkommen umschließt oder ob offene Poren vorliegen. Um die Struktur der Partikel zu analysieren wurden daher Analysen mittels eines optischen Mikroskops sowie einem Elektronenmikroskop vorgenommen. Die Untersuchungen wurden sowohl für Partikel direkt nach dem Coating (siehe Abb. 12) als auch nach den einzelnen Belastungen (siehe z.B. Abb. 13 nach thermischer Belastung) durchgeführt.

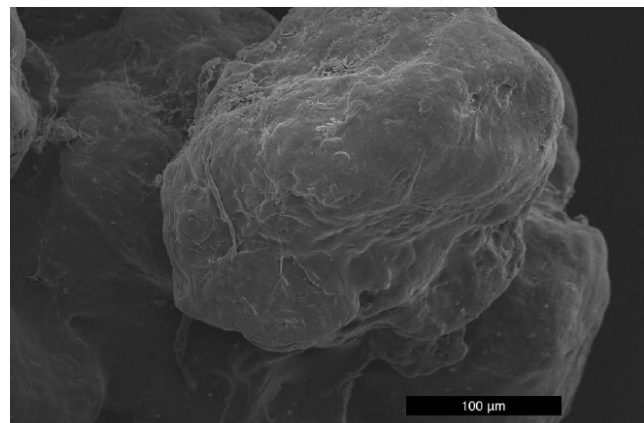
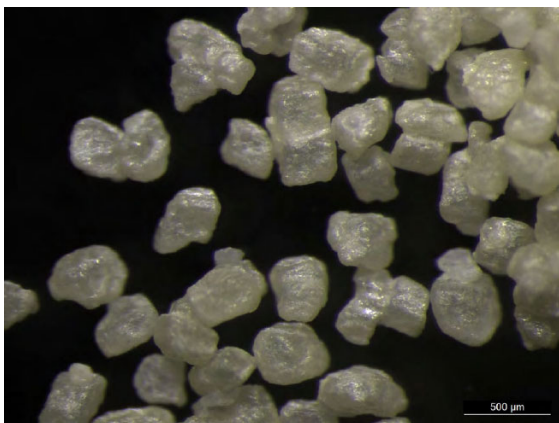


Abb. 12: Aufnahmen von Mikropartikel im links) optischen Mikroskop und rechts) Elektronenmikroskop nach dem Coatingprozess

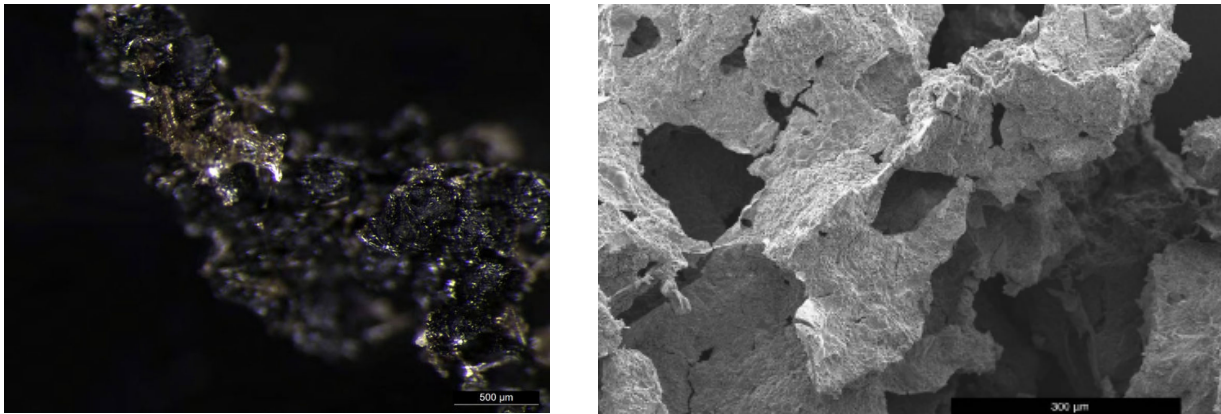


Abb. 13: Aufnahmen von Mikropartikel im links) optischen Mikroskop und rechts) Elektronenmikroskop nach der thermischen Belastung

Um die Ursache für diese exotherme Reaktion zu ermitteln, wurden umfangreiche physikalisch-chemische Analysen vorgenommen. Der Materialanalyse wurden sowohl das reine Phasenwechselmaterial, das reine Hüllmaterial als auch die beschichteten Mikropartikel (vor und nach der thermischen Belastung) unterzogen. Dazu wurden folgende Untersuchungen durchgeführt: Alle Proben wurden mittels Fourier-Transformationsinfrarotspektroskopie (ATR-FTIR), Pulverdiffraktometrie (P-XRD), dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), und thermogravimetrische Untersuchungen (TGA) charakterisiert.

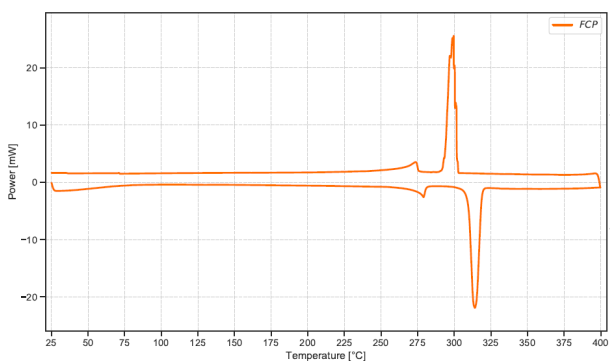


Abb. 14: DSC Analyse einer Probe vor zyklischer thermischer Belastung

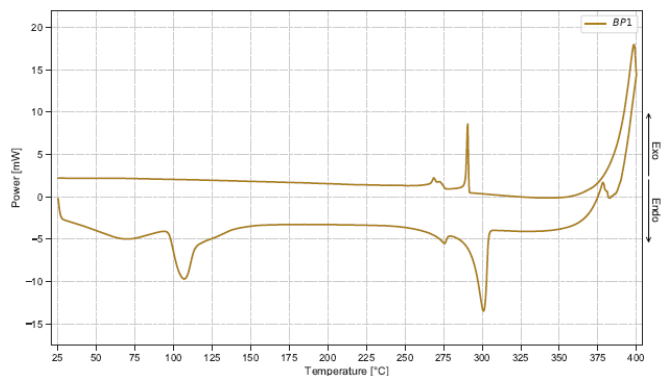


Abb. 15: DSC Analyse einer Probe nach zyklischer thermischer Belastung

Abb. 14 und Abb. 15 zeigen als Beispiel DSC-Messungen der Partikel vor und nach der zyklischen thermischen Belastung. Die Bilder weisen einen deutlichen Unterschied bei einer Temperatur >350 °C auf. Der Anstieg der Leistung in Abb. 15 weist auf eine stattfindende exotherme Reaktion hin. Die eigentliche Ursache für die Auslösung der exothermen Reaktion konnte aufgrund der fehlenden Zeit innerhalb des vorliegenden Projektes nicht mehr gefunden werden. Dies soll in einem weiterführenden Forschungsprojekt detailliert analysiert werden.

4.2 Advanced Regenerator

Innerhalb des durchgeführten Projektes konnte ein Prototyp eines neuartigen aktiven sensiblen Speicherkonzeptes ohne rotierende Komponenten ausgelegt, gefertigt, montiert (siehe dazu Abb. 16) und in Betrieb genommen werden.



Abb. 16: Prototyp des Advanced Regenerators

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Anlage wurden umfangreiche Testläufe bei unterschiedlichen Betriebszuständen durchgeführt. Dies erfolgte zum einen zur Validierung der numerischen Ergebnisse und zum anderen um das Verhalten des Regenerators unter den verschiedenen Betriebsbedingungen zu analysieren. So ist z.B. für den Betrieb der Anlage die Kenntnis des minimalen und maximalen Fluidisierungsgrades von hoher Bedeutung. Diese Parameter wurden mit Hilfe der Versuche ermittelt. Bei der Analyse der unterschiedlichen Lastfälle wurde der Volumenstrom und die Drücke im Regenerator mit aufgezeichnet. Die Lagen der einzelnen Druckmesspunkte sind über die Länge des Prototyps verteilt um Druckprofile (siehe als Beispiel Abb. 4) zu erhalten, welche helfen sollten, ein tieferes Verständnis für das Verhalten des Massenstroms an Speichermaterial in den einzelnen Abschnitten zu erhalten. Zudem dienen die Druckprofile und Massenströme dazu die numerischen Simulationen zu validieren. Dazu wurden die aufgezeichneten Messwerte einer entsprechenden Datenauswertung unterzogen. Die experimentellen Untersuchungen am Advanced Regenerator haben gezeigt, dass das dem **Regenerator zugrundeliegende Konzept funktioniert und für eine Umsetzung im industriellen Maßstab somit geeignet ist.**

Um einen Vergleich der Leistung und der Anwendungsmöglichkeiten des Prototypens mit anderen thermischen Energiespeicherkonzepten durchführen zu können, wurde eine Hochskalierung des

Prototypens vorgenommen. Dazu wurde mit Hilfe des Softwarepaketes Mathcad ein Advanced Regenerator ausgelegt und somit dessen Anlagendimensionen abgeschätzt. (Die experimentell ermittelten Daten haben dabei geholfen die entsprechenden Randbedingungen für diese Abschätzung zu setzen). Auf Basis der Anlagendaten konnte eine Kostenabschätzung (z.B. auf Basis des Materialpreises pro Tonne Stahl wurden die Investitionskosten ermittelt) durchgeführt werden.

5 Ausblick und Empfehlungen

Mit der weiteren Zunahme des stark fluktuierenden regenerativen Energieanteils am österreichischen und europäischen Stromerzeugungsmix wird die Anforderung an die Betreiber der elektrischen Netze diese stabil zu halten immer größer und zudem wird durch die Energieeffizienz-Richtlinie (2012/27/EU) [13], welche Anreize und Zwänge für eine erhöhte Wärmerückgewinnung in der energieintensiven Industrie schafft, ein zukünftiges Marktpotential für Speichertechnologien aufgebaut. Daher spielt in allen Energieszenarien die Speichertechnologie eine zentrale Rolle einerseits in der Flexibilisierung der Energieerzeugung und andererseits im Ausgleich zwischen der Energiebereitstellung und der Energienachfrage. Thermische Energiespeichersysteme (sowohl sensibel als auch latent) stellen, neben den mechanischen, chemischen und elektrischen/elektromagnetischen Speicher, eine attraktive Möglichkeit dar elektrische Energie aber auch Wärme zu speichern. Insbesondere dann, wenn diese in einem thermodynamischen Prozess integriert werden können.

Die latente Energiespeicherung weist dabei gegenüber der sensiblen Speicherung durch die hohe Energiedichte und der konstanten Temperatur, bei der die Energie durch Ausnutzung des Wechsels des Aggregatzustandes des Phasenwechselmaterials gespeichert bzw. abgegeben werden kann, einen großen Vorteil auf. Nachteilig bei latenten Energiespeichern ist jedoch, dass

- 1) sich viele für die konventionelle latente Energiespeicherung vorgesehene Materialien dadurch auszeichnen, dass sie eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen sowie
- 2) dass in der Regel eine Trennung der Speicherkapazität von der Wärmeleistung nur sehr schwierig zu bewerkstelligen ist.

Im Sondierungsprojekt wurden zwei Technologieentwicklungen um die Speicherung von Energie in Form von Wärme zu bewerkstelligen verfolgt. Dabei handelte es sich um

1. eine neuartige Speichertechnologie welche auf Basis der Wirbelschichttechnologie und der Gegenstromwärmeübertragercharakteristik, jedoch **ohne rotierende Komponenten arbeitet** und
2. um die Entwicklung von beschichteten Mikropartikeln, welche im Kern ein Phasenwechselmaterial enthalten.

Im gegenständlichen Projekt konnten **beide Technologien** entwickelt werden. D.h., es wurde zum einen ein Prototyp der neuartigen Speichertechnologie im Labor des Institutes für Energietechnik und Thermodynamik errichtet und erste erfolgreich Tests durchgeführt. Zum anderen wurden die angestrebten Mikropartikel erzeugt und mechanischen sowie thermischen Belastungsuntersuchungen unterzogen.

Die marktreife Entwicklung solcher Technologien kann natürlich nicht im Rahmen eines einjährigen Sondierungsprojektes erfolgen. Daraus ergibt sich zwingend, dass es **wichtig und notwendig** mittels geeigneter industrieller Partner eine **weitere industrielle Forschung** anzuschließen um noch **grundlegende offene Fragestellungen**, wie z.B. der Frage nach der exothermen Reaktion der Mikropartikel bei zyklischer thermischer Belastung, **einer Lösung zuzuführen** und um danach über den Weg einer experimentellen Entwicklung zum marktreifen Produkt zu gelangen. Da jedoch in der 5. Energieausschreibung trotz förderwürdigem Anschlussprojekt keine Anschlussfinanzierung möglich war, musste das Projekt zur Erzeugung von Mikropartikel eingestellt werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] B. Gebetsroither, A. Karner, C. Kettner, A. Köppl, N. Nakicenovic, R. Lang, S. Schleicher, H. Schnitzer, K. Steininger und G. Wallner, „Energiesstrukturen für 2020 - Technisches Basisdokument für die österreichische Energiestrategie,“ 2009.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, „1. Energieeffizienzaktionsplan der Republik Österreich gemäß EU-Richtlinie 2006/32/EG,“ Austrian Energy Agency, 2007.
- [3] European Association for Storage of Energy, „Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030,“ European Energy Research Alliance, 2013.
- [4] A. Thess, F. Trieb, A. Wörner und S. Zunft, „Herausforderung Wärmespeicher,“ *Physik Journal*, Bd. 14, pp. 33-39, 2015.
- [5] B. Armbrrecht und T. Schütte, „Anwendung von P2H zur Begrenzung der Einspeisung aus Photovoltaikanlagen,“ in *Dialogplattform Power to Heat*, 5. bis 6. Mai, Goslar, Deutschland, 2015.
- [6] U. Nepustil und D. Laing, „P2H in Hochtemperatur-Latentwärmespeichern für Prozesswärmeanwendungen,“ in *Dialogplattform Power*, 5. bis 6. Mai, Goslar, Deutschland, 2015.
- [7] C. Pieper, N. Sykora, M. Beckmann, D. Böhning, N. Hack und T. Bachmann, „Die wirtschaftliche Nutzung von Power-to-Heat-Anlagen im Regelenergiemarkt,“ *Chem. Ing. Tech.*, Bd. 87, Nr. 4, p. 390–402, 2015.
- [8] Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen, „Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation / WBGU, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen,“ Berlin, 2011.
- [9] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, „Energiewende Österreich,“ Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Wien, Österreich, 2014.
- [10] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, „Welt im Wandel - Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation,“ AZ Druck und Datentechnik Berlin, Berlin, 2011.
- [11] International Energy Agency, „Technology Roadmap Energy storage,“ International Energy Agency – IEA, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France, 2014.
- [12] F. Graeter und J. Rheinländer, „Thermische Energiespeicherung mit Phasenwechsel im Bereich von

Energieforschungsprogramm - 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

150 bis 400 °C,“ in *FVS-Workshop 2001: Wärmespeicherung*, 28. – 29.05.2001, Köln, Deutschland, 2001.

[13] Amtsblatt der Europäischen Union, „Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG,“ Brüssel, 14.11. 2012.

7 Kontaktdaten

ProjektleiterIn: Ao. Univ. Prof. Dr. Heimo Walter

TU-Wien

Institut für Energietechnik und Thermodynamik

Getreidemarkt 9/302

1060 Wien

Tel.: 01 58801 302318

Fax: 01 58801 302399

e-mail: heimo.walter@tuwien.ac.at

<https://www.iet.tuwien.ac.at/>

Privatdoz. Dipl.-Chem. Dipl.-Ing. Dr.rer.nat. Miriam Margarethe Unterlass, MSc

TU-Wien

Institut für Materialchemie

Forschungsgruppe Organische Hochleistungsmaterialien

Getreidemarkt 9/165

1060 Wien