

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

24/09/2019

Projekttitle: OFFSOR

**Offene Sorptionstechnik für Langzeit-
Wärmespeicher**

Projektnummer:

853609

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Ausschreibung	02. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/04/2016
Projektende	31/03/2019
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	(A) FH-Wels/ ASIC (P1) AIT- Austrian Institute of Technology (P2) ECOTHERM Austria GmbH (P3) HAITHERM Industrieofenbau und Wärmebeh. GmbH (P4) IFK-Schüttgut-Technik GmbH (P5) ITW-Inst. für Thermodyn. und Wärmetechn., Univ. Stuttgart (P6) SOLAR.LAUS DI Bernhard Laus
AnsprechpartnerIn	Bernhard Zettl
Postadresse	4600 Wels, Ringstraße 43A
Telefon	050804 46918
Fax	07242 495560
E-mail	Bernhard.zettl@fh-wels.at
Website	https://forschung.fh-ooe.at/asic/

OFFSOR

Offene Sorptionstechnik für Langzeit- Wärmespeicher

AutorInnen:

Thomas Aigenbauer

Nayrana Deborer-Prado

Wolfgang Hohenauer

Henner Kerskes

Harald Kirchsteiger

Bernhard Laus

Mirza Popovac

Bernhard Zettl

Inhaltsverzeichnis

1	Verfahrenstechnik.....	5
2	Thermische Analyse	26
3	Math. Modellierung und Simulationen	42
4	Literaturverzeichnis.....	56
5	Anhang (Konzeptvergleich Betonspeicher)	57
6	Kontaktdaten.....	64

Motivation des Projektes

Ziel des aktuellen Projekts war die Entwicklung der Verfahrenstechnik die für den Betrieb eines Langzeit-Niedertemperatur-Wärmspeichers basierend auf Sorptionstechnologie für Gebäudeanwendungen. Realisiert wurde ein offener Sorptionsprozess mit einem granularen Zeolith als Speichermaterial. Neben der technischen Umsetzung wurden mehrere andere Themen bearbeitet um Voraussetzungen für eine gute Betriebsweise des Speichers zu erreichen: Verfahrenstechnische Versuche, Materialcharakterisierung, Numerische Modellierung, Betrachtung von Alternativtechnologien, Expertise und Evaluierung von unabhängigen Experten.

Das Forschungsthema Sorptionsspeicher für industrielle Prozesse und Gebäudeanwendungen ist im Vergleich zu etablierten Speichertechnologien (mit Flüssigkeiten und Festkörpern) ein Technologiebereich mit hohem technischen Innovationspotential. Trotz dem hohen Stellenwert ist die Zeit bis zur Marktreife größerer thermochemischer Speicher aktuell noch >5 Jahre.

Relevanz in Bezug auf klimapolitische Ziele: Effizienzsteigerung von Produktionsprozessen mit anfallender Abwärme und Erhöhung des Anteils an regenerativer Energie in Gebäude und Industrieprozessen.

Technologieführerschaft: Die österreichischen Forschungsinstitute haben in den letzten Jahren intensiv gemeinsam an der Kompetenzentwicklung auf dem Gebiet der Sorptionsspeicher und Thermochemischen Speichern gearbeitet. Es bestehen gute Chancen eine führende Position im Forschungsgebiet -Sorptionsspeicher und Thermochemische Speicher für Nieder- und Mitteltemperaturanwendungen neben Ländern wie Deutschland und den Niederlanden zu erreichen

1 Verfahrenstechnik

Funktionsprinzip und Dimensionierung

Das Anwendungsszenario für das Projekt OFFSOR beschreibt die Anforderungen an das Wärmemanagement und Wärmebedarf die im Projekt angenommen werden. Der Gesamtprozess setzt sich aus mehreren (Zeit-) Phasen und (Prozess-)Teilschritten zusammen (Abbildung 1).

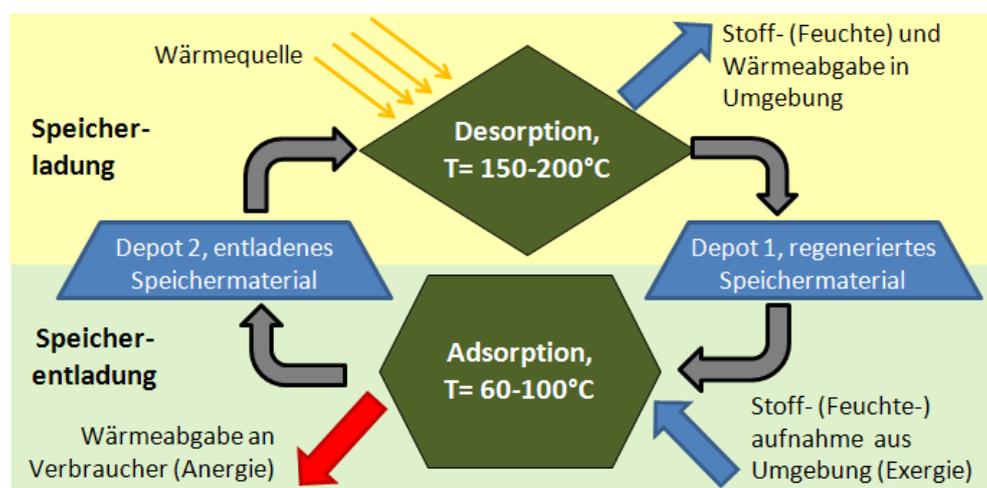


Abbildung 1: Graphische Darstellung des gesamten Speicherzyklus

Trommelauslegung

Die Rotationstrommel stellt die gleichmäßige Befeuchtung und eine langsame Reaktionsbett-Durchmischung sicher und enthält Einbauten für Gas- Ein- und Auslass sowie Material Zu- und Abfuhr. Dafür ist ein Teil drehend auszuführen (Trommel), der andere Teil ruhend (Einbauten). Der Übergang in der Gefäßwand sollte möglichst gas dicht sein, andererseits wenig Reibung verursachen und wird als gleitende Planflächen mit Filzdichtung ausgeführt. Der Antrieb erfolgt über einen Riemen, die Lagerung und Führung der Trommel über Rollen. Die eigentliche Trommel ist somit sehr einfach aufgebaut und kann gegebenenfalls in der Größe verändert werden. Das Konzept wurde bereits in einem Vorgängerprojekt (FLOW-TCS) entwickelt [1].

Die Antriebsleistung ist eine Funktion der Drehzahl und hängt im Wesentlichen von der Reibung der Körner in der Schüttung (Schüttwinkel) und der Außenreibung (Dichtung!) ab. Bei langsamer Drehzahl (1 U/min) wird eine Leistung von 10-20W erwartet.

Reaktor soll gegenüber dem Vorprojekt zweifach (Flow-TCS) größer dimensioniert werden, 150kg Material, und etwa die 3-fache Leistung liefern, 4500W-thermisch bei 10g/kg Luftfeuchte.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Die Konstruktion und Fertigung wurde durch einen Projektpartner durchgeführt. Ausgeführt wurde ein innen liegender Wasserwärmetauscher, Füllstandssensor, Schleifkontakte und die Möglichkeit zur automatischen Befüllung/Entleerung mittels elektrischen Schiebern. Der Druckabfall bei ca. 35 cm durchströmter Höhe beträgt ca. 1200 Pa bei Kantkorn und ca. 1000 Pa bei Rundkorn 3-4mm.

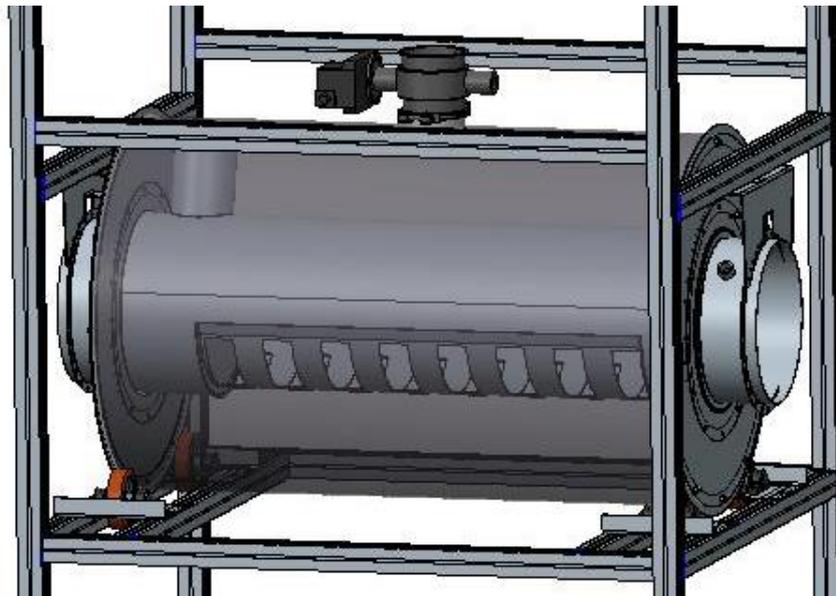


Abbildung 2: Konstruktion der Wärmetrommel Abmessungen: Außen-D=62cm, Tiefe=100cm, Durchströmtes Volumen =119 Liter, Luftstrom 114 Liter/sec, ca. 0,3 m/sec

Für eine effiziente Adsorptionsreaktion ist eine homogene Durchströmung des Schüttbettes anzustreben. Einerseits sollte die Luft möglichst lange Strecken im Schüttbett verweilen um effiziente Adsorption zu ermöglichen, andererseits soll der Strömungswiderstand nicht zu groß werden.

Da im Schüttbett der größte Druckabfall zu erwarten ist gilt:

- der Einlass sollte sich im Zentrum des Schüttbettes befinden.
- die Strömungsgeschwindigkeit der Luft sollte gering sein
- die Korngröße soll nicht kleiner als 1 mm sein
- es darf kein Staudruck vor dem Luft-Einlass entstehen (Kornabrieb, Antriebsleistung)
- Der Luftauslass (warme Seite) liegt im oberen, freien Bereich der Trommel

Die geometrische Gestaltung der Ein und Auslässe konnte mit der Versuchstrommel FLOW TCS vorgenommen werden. Ein Lufteinlass ohne Sieb ist nicht möglich da sich das Material sonst im Luftkanal sammelt.

Ofen – Dimensionierung

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Der Desorptionsreaktor (Ofen) wurde für kontinuierlicher Durchlauf nach dem Prinzip der Getreidetrocknung (als sog. Dächertrockner) konstruiert. Der zonale Aufbau ist in Abbildung 3 erkennbar: Der Materialzufluss erfolgt von oben und wird durch einen Materialschieber am Boden des Ofens begrenzt. Dieser öffnet in Intervallen und erlaubt einen quasi-kontinuierlichen Zustrom vom Materialcontainer. Das zu trocknende Sorptionsmaterial erreicht zuerst eine Vorwärmzone die durch einen Rohrbündel-Wärmetauscher ohne direkten Prozessluftkontakt erwärmt wird.

Danach umströmt das Material insgesamt vier Reihen von dachförmigen Kanälen die unten offen sind. Oben zwei Kanalreihen in denen warme Luft ein und wieder ausströmt und dabei eine Zone (Zone 2) Material durchströmen muss. Dasselbe geschieht in der Zone 1 mit heißer Luft (max. 200°C). Das Sorptionsmaterial strömt als nach unten (ca 2-20kg/h) und erwärmt sich sukzessive und gibt die Feuchtigkeit an den Luftstrom ab. In der unteren Zone Erfolgt eine Abkühlung ohne direkten Prozessluftkontakt mittels einem Rohrbündel-WT, die Warmluft dient der Vorwärmung (oben)

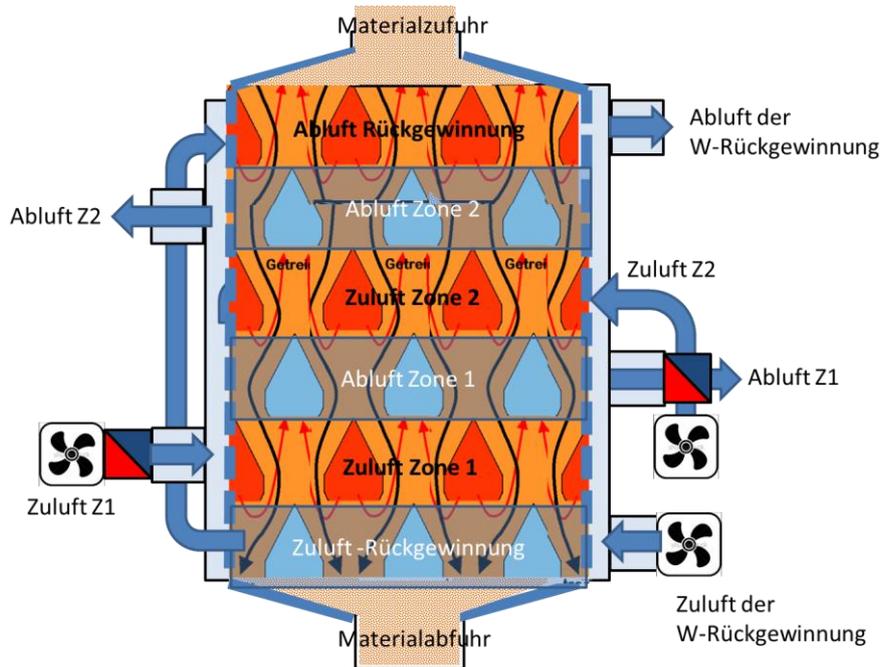


Abbildung 3: Konzept der Desorption mit drei Zuluft- und Abluftzonen

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

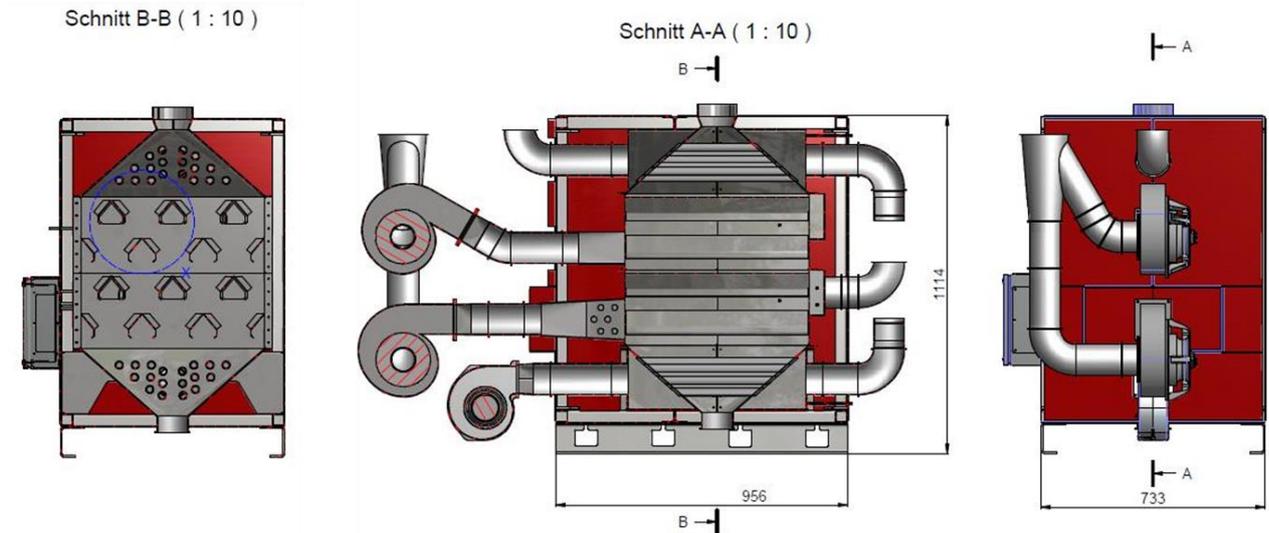


Abbildung 4: Ausführung des Desorptionsofens

Die Abbildung 4 zeigt die Konstruktion des Desorptionsofens. Der Abstand zwischen den Dächern beträgt ca. 20 cm, die Platzierung der Zusatzheizung (6kW für Versuche ohne Solar) vor der Einströmung in die untere Heißluft-Zone.

Materialverfahrenstechnik

Da das Material möglichst ohne Abrieb gefördert werden muss, wurde auf das ursprüngliche Konzept der Schnecken oder Spiralförderer verzichtet. Anstelle dessen ist ein sogenanntes Becherwerk zum Einsatz gekommen (Abbildung 5) der das Material vom tiefsten Punkt unter den Reaktoren bis zum höchsten Punkt oberhalb der Behälter fördert. Diese Ausführung ist für einen Prototyp ideal, da dadurch auch relativ empfindliche Granulate (z.B. salzhaltige Materialien) gefördert werden können. Die Fördermenge ist mit ca. 2 m³/h für eine schnelle Entleerung der Trommel geeignet. Aufgrund der Bauhöhe kann der Prototyp nicht neben dem Heißluftkollektor platziert werden.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

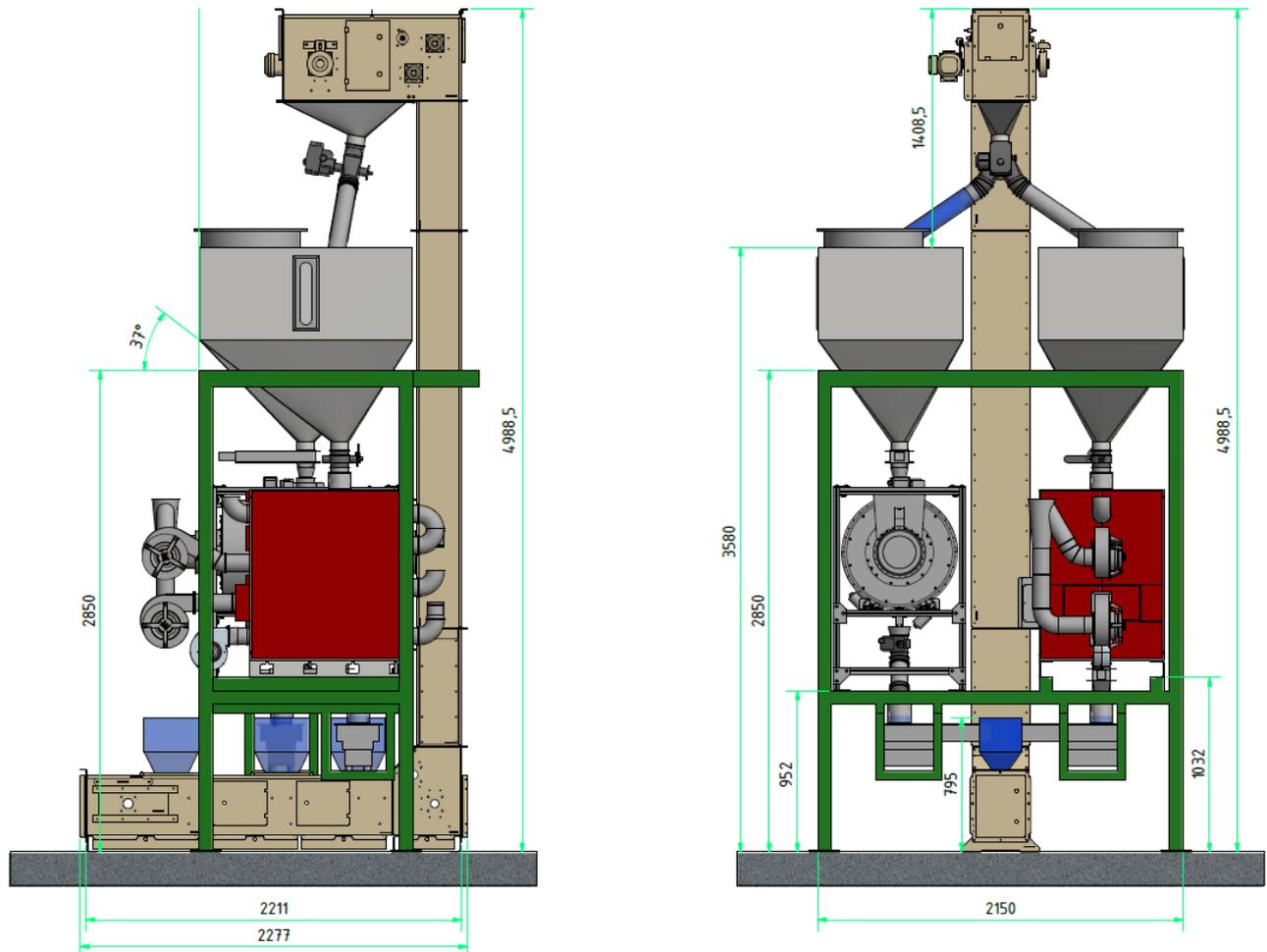


Abbildung 5: Seiten- sowie Frontalansicht des Becherförderwerkes mit Trommel und Desorptionsofen

Die Steuerung des Materialflusses erfolgt mit elektrischen Schiebern (Dosierung) und Klappen (Öffnen). Für die Luftaufbereitung zur Desorption im Winter kommt der am Dach des Standortes befindliche Heißluftkollektor mit integrierter Verdunster-Einheit zum Einsatz. Der Kollektor dient ebenfalls, soweit möglich, als Wärmequelle zur Desorption im Sommer. Der gesamte Aufbau wurde im April 2017 am Standort der FH-Wels aufgebaut und wird bis zum Sommer 2017 in Betrieb genommen.

Heißluftkollektor

Der Heißluftkollektor wurde im Zuge eines Studenten-Projektes im Sommer 2016 an der FH-Wels realisiert [2]. Aufgebaut aus 196 Sydney Röhren in 4 Segmenten die jeweils zweistufig durchströmt werden (Abbildung 7). Die Materialkosten wurden wie im Antrag dargestellt sorgfältig recherchiert.

Die Sammler sind aus gelasertem Alu-Blech und Hochtemperaturschaum (Abbildung 6) aufgebaut, das Innenrohr aus Alufolie. Röhren und Dichtringe wurden vom Hersteller bezogen, alle anderen Bauteile aus eigener Beschaffung.

Die Röhren dienen als Wärmequelle für die Verdunstung im Winter und für die Desorption im Sommer. Da einer der kritischen Faktoren für die Funktion der Sorptionsspeicher, der

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Feuchtebedarf, während der Heizsaison darstellt, sind umfangreiche Messungen und die Einbindung des Kollektors in die Versuchsanlage (Prototyp) geplant.



Abbildung 6: Sammler (links) und Montage der Röhren mit innenliegendem Folien-Rohr (rechts)



Abbildung 7 Kollektorfeld am Dach der FH-Wels bestehend aus 196 Röhren (entspricht 32m² Kollektorfläche- brutto, bzw. ca. 16m² Absorberfläche-netto)

Umfangreiche Ertragsmessungen wurden in den Wintermonaten durchgeführt. Da der Ertrag des Sorptionsspeichers von der Versorgung mit Luftfeuchte abhängig ist muss das Kollektorfeld (sobald die produzierte Wärme und Temperatur für die Direktnutzung nicht mehr ausreichend ist) den Sorptionsspeicher mit Feuchtigkeit versorgen. Zu diesem Zweck werden die Niedertemperatur-Erträge des Luftkollektors im Winter verwendet. In Abbildung 8 sind Beispieldaten für eine Winterperiode von etwa drei Wochen gezeigt. Bemerkenswert ist die Abfolge von sonnigen und nebligen Tagen mit hoher und geringer Einstrahlung. An sonnigen Tagen erreicht die Kolleortemperatur etwa 50.....60°C (Außentemperatur (-10°....0°C) und ist ausreichend für die Direktnutzung für Heizung und Wasser. An Tage mit

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

geringer Einstrahlung (max. 100W/m^2 in der Kollektorebene-gelbe Linie/linke Achse) werden 20K Erhöhung im Intervallbetrieb (schwarze Linie/rechte Achse) und 10K im Dauerbetrieb erreicht.

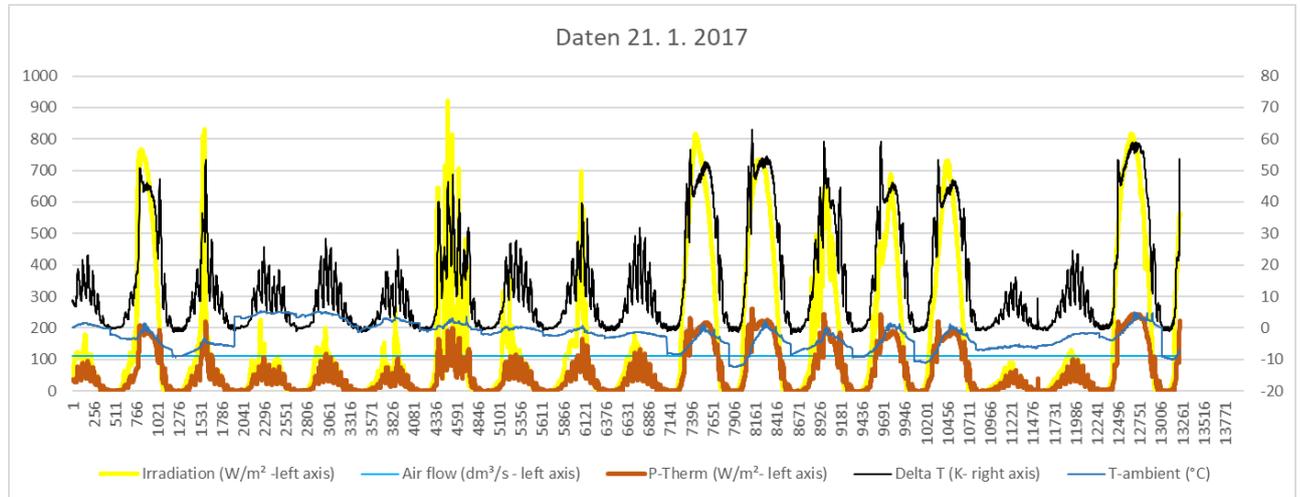


Abbildung 8: Datenerfassung des Kollektorfeldes (2.1.-21.1.2017)

Aufbau und Versuche mit dem Labor-Prototyp

Die Hauptkomponenten des Sorptionsspeichers (siehe Abbildung 9) lassen sich prinzipiell über deren Funktion zur Adsorptions- oder zur Desorptionsseite zuordnen. Beide Abschnitte verfügen jeweils über einen Materialbehälter (3, 10), die über einen automatischen Absperrschieber (11) mit der Trommel (12) bzw. einen manuellen Absperrschieber (4) mit dem Trockner (5) verbunden sind. Der weitere Materialtransport geschieht beidseitig über einen Dosierantrieb (8, 16), der ein gemeinsam genutztes Winkelbecherwerk (1) anspeist. Dadurch gelangt das Sorptionsmaterial, je nach Einstellung der Weiche (2) wieder zurück in den jeweiligen Behälter.

Die Rotation des Trommelreaktors erfolgt über einen Drehstrommotor (13), welcher über ein Schneckengetriebe zwei der insgesamt acht Laufrollen antreibt. Für die Befüllung bzw. Entleerung befindet sich mittig eine Absperrklappe (14), die an der oberen und unteren Position mit Hilfe von Schleifkontakten angesteuert werden kann. Eine weitere Absperrklappe (15) stellt das Verbindungsstück für den Materialtransport zum Dosierantrieb dar.

Am Trockner sind insgesamt drei Luftgebläse (6) in unterschiedlicher Höhe angebracht. Die oberen Beiden sorgen für den benötigten Luftstrom, welcher für einen gleichmäßigen Desorptionsvorgang benötigt wird. Das untere Gebläse dient hingegen zur Abkühlung des etwa 200°C heißem Zeolith, da aus materialtechnischen Gründen eine Temperatur von 120°C nicht überschritten werden soll. Im außen befestigten Heizklemmkasten (9) befindet sich ein Pt-100 Messwiderstand, der die Funktion eines Übertemperatursensors übernimmt. Direkt hinter dem Heizklemmkasten sind eine weitere Pt-100 Messwiderstände montiert, der die Messwerte für die Temperaturregelung liefert. Direkt unter dem Ofen befindet sich ein Wärmetauscher (7), um die Ansaugluft des oberen Gebläses vorzuwärmen. Der

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Materialfluss aus dem Trockner hin zum Dosierantrieb kann, anders als auf der Adsorptionsseite über einen automatischen Absperrschieber kontrolliert werden.

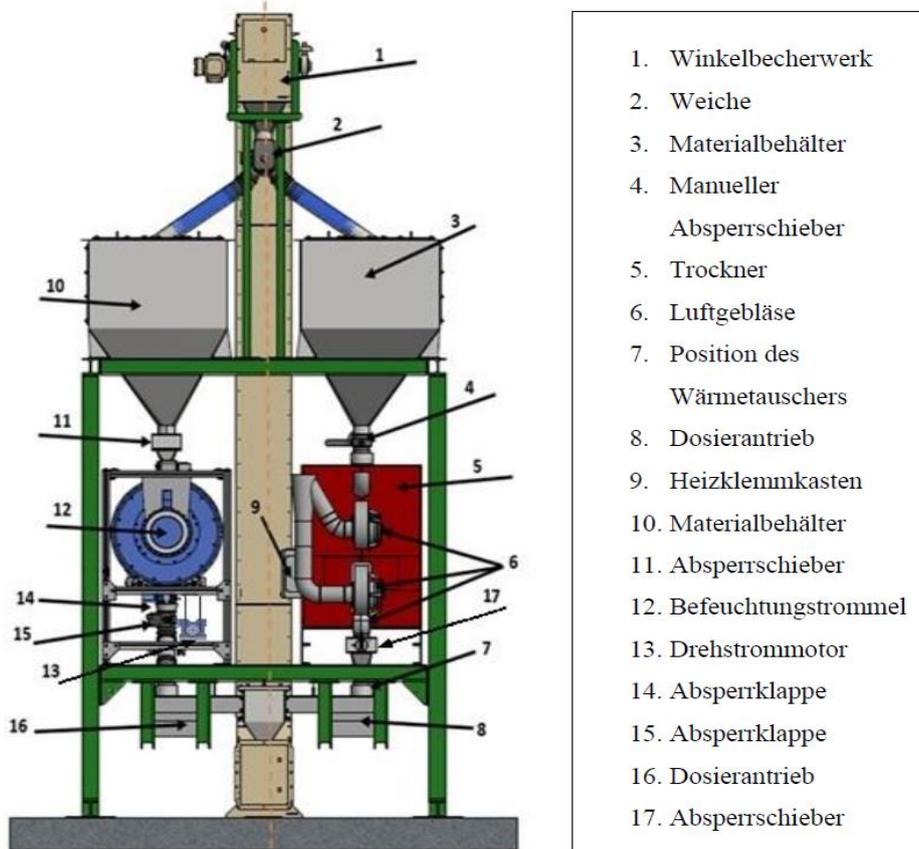


Abbildung 9: Komponenten des offenen Sorptionsspeichers

Befeuchtungstrommel

Die Befeuchtungstrommel (siehe Abbildung 10) ist ein liegender Edelstahlbehälter mit integriertem Wärmetauscher. Der zylindrische Behälter besitzt eine Länge von 100 cm, einen Außendurchmesser von 60 cm und fasst abzüglich des inneren Zylinders ein Volumen von 212 dm³ Speichermaterial. Angetrieben wird die Trommel, wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt, über einen Drehstrommotor mit einer Leistung von 0,12 kW. Dieser Motor dient als Ersatz für die zwei vorher verwendeten Gleichstrommotoren, welche direkt mit den Antriebsrollen verbunden waren.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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



Abbildung 10: Befeuchtungstrommel mit Absperrklappe und Schleifkontakten

Durch den rotierenden Behälter führt ein fest verbauter Hohlzylinder mit einem Durchmesser von 30 cm. Dieser wird mit vorgewärmter, feuchter Luft durchströmt wodurch der trockene Zeolith durch mehrere, unterhalb liegende Öffnungen Wasser aus der Luft aufnimmt und somit Adsorptionsenthalpie freigibt. Die Rotation der Trommel bewirkt eine Vermischung des Speichermaterials, aufgrund derer ein gleichmäßiger Adsorptionsvorgang ohne überhitzende Stellen stattfindet. Um die Spannungsversorgung der Bauteile zu gewährleisten, welche an der Oberfläche des Edelstahlbehälters montiert sind, wurden auf gleicher Linie Schleifkontakte angebracht. Somit können ausschließlich an der oberen und unteren Position Signale eingelesen bzw. ausgegeben werden.

Absperrschieber

Um zu garantieren, dass der Absperrschieber zwischen Materialbehälter und Trommel vollständig schließt, wurde ein Schalter an der Oberseite montiert. Der Schließer wird durch eine, an der Kolbenstange befestigten Schiene erst dann ausgelöst, wenn der Schieber vollständig geschlossen ist. Dieser Zustand wird in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Elektro-Zylinder mit Schieber und Positionsschalter

Füllstandsmessung

Ursprünglich lieferte der Füllstandsensor (siehe Abbildung 12, links) bei Erreichen einer gewissen Höhe des Sorptionsmaterials ein Signal, welches durch das auftretende Drehmoment am Drehflügel und dem daraus folgenden Stillstand der Welle erzeugt wird. Dessen Verwendung stellte sich jedoch als nicht notwendig heraus, da der Befüllungsvorgang der Trommel zeitgesteuert wird und selbst bei einer möglichen Überfüllung kein Material über die beidseitig befestigten Filzstoffe gelangt. Die Belegung der Schleifkontakte wurde somit aufgehoben und mit dem Hilfsschalter der Absperrklappe ersetzt.

Absperrklappen und Hilfsschalter

Die beiden an der Anlage verbauten Absperrklappen sowie die dazugehörigen Hilfsschalter stammen von der Firma NORO und dienen dem kontrollierten Massenfluss auf der Adsorptionsseite. Der Stellantrieb der Trommel-Absperrklappe wird über die Schleifkontakte an der oberen bzw. unteren Position mit 24 V Gleichspannung versorgt, die Absperrklappe zum Dosierantrieb ist hingegen fix angeschlossen. Insgesamt benötigt ein vollständiges Öffnen oder Schließen der Klappe exakt 150 s.

Der in Abbildung 12 sichtbare orange Hilfsschalter dient dazu, die momentane Stellung der Absperrklappe zu erfassen. Hierfür können interne Schließer oder Öffner, je nach gewünschtem Umschaltwinkel der Klappe über ein Stellrad definiert werden. Somit wurden die Positionen „Klappe 2 AUF“ und „Klappe 2 ZU“ jeweils bei Erreichen der letzten 15 Sekunden des Öffnungs- oder Schließvorganges festgelegt.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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



Abbildung 12: Füllstandssensor, Hilfsschalter und Klappenantrieb der Trommel (von links nach rechts)

Positionssensoren

Zwei weitere wichtige Bauteile, welche für die automatische Steuerung über LabVIEW unabdinglich sind, werden in Abbildung 13 dargestellt. Die unterhalb der Befeuchtungstrommel montierten Endschalter dienen als Positionssensoren, um die Trommel entweder in der Befüllungs- oder Entleerungsstellung anzuhalten. Hierfür wurden zwei gegenüberliegende Metallbögen an den Edelstahlbehälter angeschweißt, die die Endschalter zum richtigen Zeitpunkt auslösen.



Abbildung 13: Positionssensoren (Kulissenschalter) für die obere Trommelstellung (links) und die untere Trommelstellung (rechts)

Trockner und Heißluftgebläse

Um die Feuchtigkeit aus dem Zeolithgranulat auszutreiben, wird anstelle eines Solarkollektors ein Trockner mit 6 kW Heizleistung der Firma HAITHERM verwendet. Die Innenraumabmessung beträgt 0,6 x 0,6 x 0,95 m wodurch Volumen von 342 dm³ Speichermaterial zur Trocknung beladen werden kann.

Der Aufbau des Ofens lässt sich aufgrund der unterschiedlichen ablaufenden Prozesse in drei Abschnitte unterteilen. Im oberen Abschnitt wird der Zeolith indirekt über zugeführte Warmluft vorgeheizt, die erforderlichen Temperaturen für die effektive Wasser-Desorption

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

werden hierbei noch nicht erreicht. Der mittlere Abschnitt beinhaltet den eigentlichen Trocknungsprozess, hierbei spielen die beiden in Abbildung 14 sichtbaren Heißluftgebläse eine wichtige Rolle. Die durchströmende Luft sorgt für eine gleichmäßige Trocknung des Speichermaterials und verhindert überhitzende Stellen. Das Kühlerregister des Ofens stellt den untersten Teil dar und wird benötigt, um das Zeolithgranulat von etwa 200 °C auf unter 120 °C zu kühlen. Dieser Vorgang wird mithilfe des direkt unterhalb des mittleren Heißluftgebläse befindlichen Radialventilators durchgeführt und schützt vor möglichen Schäden an den Kunststoffanbauteilen.

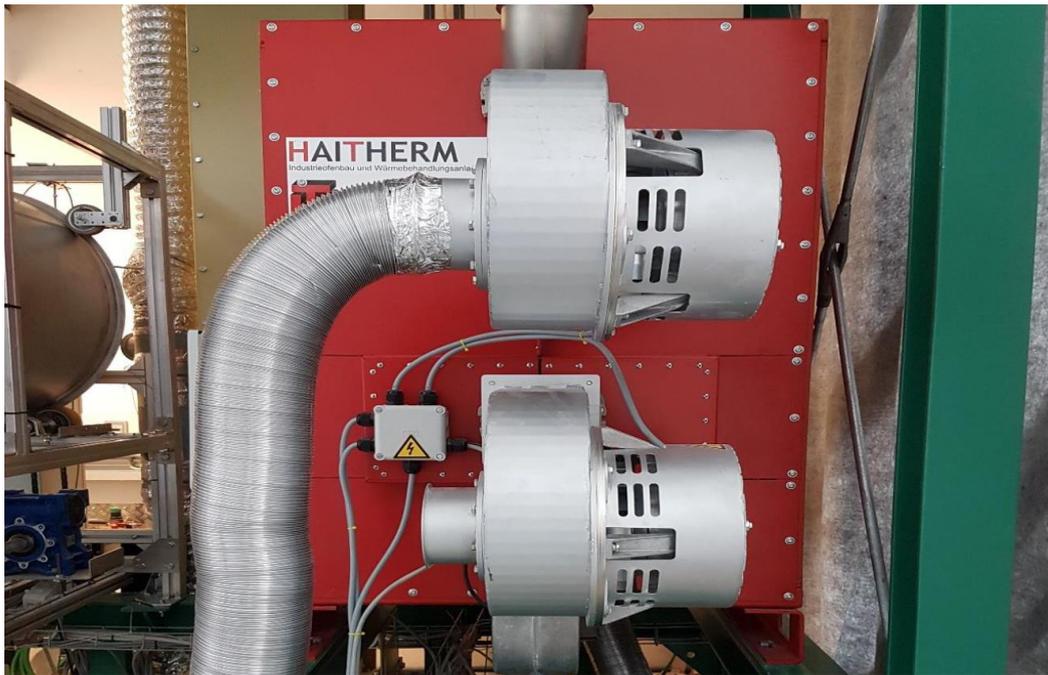


Abbildung 14: Trockner mit zwei Heißluftgebläsen für die Desorption

Absperrschieber

Der Materialfluss durch den Trockner kann oberhalb über einen manuellen- bzw. unterhalb über einen automatisch gesteuerten Absperrschieber eingestellt werden. Letzterer entspricht demselben Modell wie jener auf der Adsorptionsseite und wurde ebenfalls mit einem zusätzlichen Schalter ausgestattet, welcher ein Signal bei geschlossenem Zustand übermittelt. Über das LabVIEW Programm „Desorption_Neu_1“ kann der Massenfluss durch einen definierten Öffnungszyklus gesteuert werden.

Sensoren

Für die Messwerterfassung wurden an den Seitenwänden des Trockners insgesamt fünf Thermoelemente Typ-K verbaut:

- Sensor T1 am Eintrittsbereich
- Sensor T2 im Abschnitt für die Vorwärmung
- Sensor T3 im Heizregister
- Sensor T4 im Kühlregister

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

- Sensor T5 ebenfalls im Kühlregister, jedoch auf der Rückseite des Ofens
Auf der gegenüberliegenden Seite der Sensoren T1 bis T4 befinden sich zwei Platin-Messwiderstände (Pt-100). Jener der sich im Heizklemmkasten befindet dient als Übertemperatursensor, der dahinterliegende Sensor liefert die Messwerte für die Regelung.

Eingesetztes Steuerungskonzept und Durchführung von Anlagentestläufen

Die Datenaufnahme und -ausgabe erfolgt über ein Gerät des LabVIEW Entwicklers National Instruments. Das externe Datenaufnahmeggerät NI USB-6229, zu sehen in Abbildung 15 rechts, besteht aus insgesamt 128 Schraubklemmanschlüssen, die je nach Anschluss entweder digitale oder analoge Signale einlesen bzw. ausgeben können. Der dargestellte Signalverstärkerkasten beinhaltet eine Reihe von Operationsverstärkern, welche die Signale von der PC-Schnittstelle für die anzustuernden Aktoren auf eine höhere Spannung anheben [3].

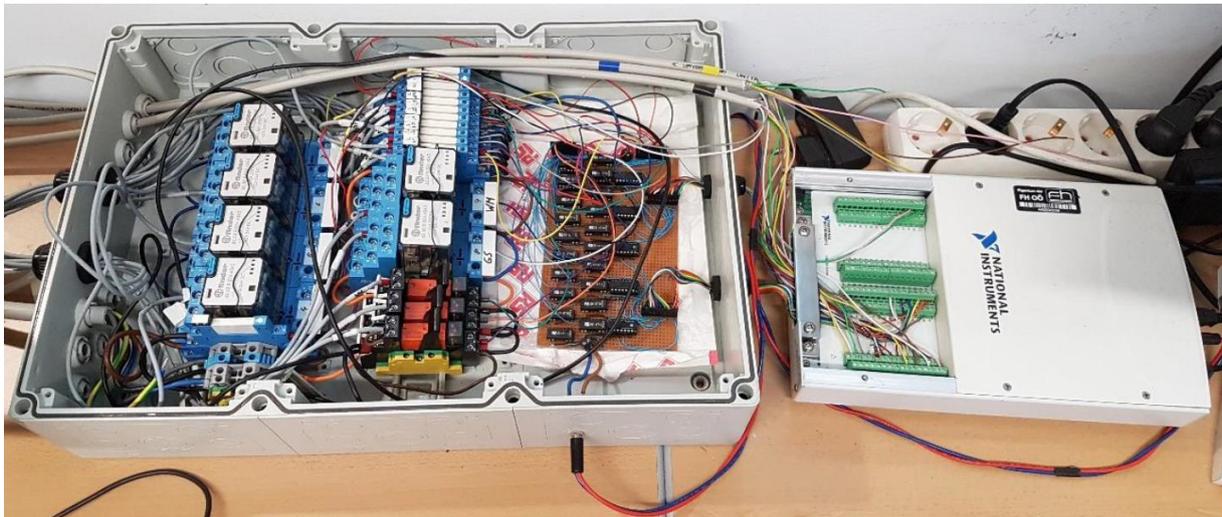


Abbildung 15: Relaisbox mit Operationsverstärker (links) und Datenaufnahmeggerät (rechts)

Da in der Anlage sowohl 230 V AC als auch 24 V DC Komponenten betrieben werden, muss der Signalverstärkungskasten in der Lage sein, diese Signale über passende Relais zu schalten. In Tabelle 1 sind alle vorhandenen Aktoren und auch Sensoren mitsamt zugehöriger Spannung und PIN-Belegung aufgelistet. Die Ventilatoren (1-3) werden hierbei über Leistungs-Printrelais (SCHRACK RT424024) mit einer Kontaktbelastbarkeit von 8A / 250VDC angesteuert, die restlichen 230 V AC Bauteile über 16A Leistungsrelais (FINDER 62.33.9.024.4040). Alle Gleichstromkomponenten der Anlage werden über FINDER 34.51.7.024.0010 Relais mit maximal 6A / 30VDC geschaltet.

**Tabelle 1: Digitale Ein- und Ausgangssignale mit Anschlussbezeichnung, PIN-Belegung und
Betriebsspannung**

Nummer	Sensoren	Signal	Port Line	PIN	Spannung
1	Sensor Heizung Schieber	DI	P0.20	109	24 V DC
2	Sensor Trommel Schieber 1	DI	P0.21	110	24 V DC
3	Positionssensor Oben	DI	P0.22	111	24 V DC
4	Positionssensor Unten	DI	P0.23	112	24 V DC
5	Position Klappe 2 ZU	DI	P0.24	113	24 V DC
6	Position Klappe 2 AUF	DI	P0.25	115	24 V DC
7	Position Klappe 3 ZU	DI	P0.26	117	24 V DC
8	Position Klappe 3 AUF	DI	P0.27	119	24 V DC
	Aktoren				
1	Ventilator Unten (Ein/Aus)	DO	P0.0	65	230 V AC
2	Ventilator Mitte (Ein/Aus)	DO	P0.1	66	230 V AC
3	Ventilator Oben (Ein/Aus)	DO	P0.2	67	230 V AC
4	Heizung Schieber (Zu)	DO	P0.3	68	230 V AC
5	Heizung Schieber (Auf)	DO	P0.4	69	230 V AC
6	Trommel Schieber 1 (Zu)	DO	P0.5	70	230 V AC
7	Trommel Schieber 1 (Auf)	DO	P0.6	71	230 V AC
8	Vibrator Links (Ein/Aus)	DO	P0.7	72	230 V AC
9	Vibrator Rechts (Ein/Aus)	DO	P0.8	97	230 V AC
10	Heizung (Ein/Aus)	DO	P0.9	98	24 V DC
11	Heizungsregler	DO	P0.10	99	24 V DC
12	Förderer (Ein/Aus)	DO	P0.11	100	24 V DC
13	Weiche (Links)	DO	P0.12	101	24 V DC
14	Weiche (Rechts)	DO	P0.13	102	24 V DC
15	Trommel Klappe 2 (Zu)	DO	P0.14	103	24 V DC
16	Trommel Klappe 2 (Auf)	DO	P0.15	104	24 V DC
17	Trommel Klappe 3 (Zu)	DO	P0.16	105	24 V DC
18	Trommel Klappe 3 (Auf)	DO	P0.17	106	24 V DC
19	Trommel Motor (Ein/Aus)	DO	P0.18	107	24 V DC

Ablaufsteuerung mit dem graphischen Programmiersystem LabView:

In Summe wurden während der Bearbeitung des Arbeitspaketes drei Programme erstellt, mit deren eine automatische Befüllung, Rotation und Entleerung der Befeuchtungstrommel durchgeführt werden kann. Ein weiteres Hauptprogramm fasst diese Funktionen zu einem vollständigen Ablauf der Adsorptionsseite zusammen, wodurch dieser Prozess ohne manuelles Eingreifen durchgeführt werden kann. Damit die Sicherheit während des Ablaufes gewährleistet werden kann, wurden zusätzliche Sensoren angeschlossen, die die Anlage bei Auftreten eines Fehlers stoppen.

Das Hauptprogramm liefert die Funktion, einen vollständigen Anlagenszyklus der Adsorptionsseite zu durchlaufen, beginnend bei der Trommelbefüllung, der anschließenden Materialbefeuchtung und letztlich der Entleerungsvorgang der Trommel.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Befüllung:

Um die Trommel möglichst vollständig mit Zeolith zu füllen, muss zwischen den einzelnen Befüllungsvorgängen eine Rotation durchgeführt werden. Diese bewirkt, dass sich der, bei der Befüllung entstandene Schüttkegel abflacht und somit mehr Material nachgefüllt werden kann. Optional lässt sich auch die Vibrationsfunktion des Speisegeräts einsetzen, um eine Abflachung des Schüttkegels zu bewirken.

Befeuchtung:

Der zweite Abschnitt der Ablaufsteuerung beschäftigt sich mit der Materialbefeuchtung und kann nur zu einem gewissen Teil automatisch durchgeführt werden. Ein Nebelgerät und ein Heizstrahler, welche für die Befeuchtung und Vorwärmung der Umgebungsluft sorgen, wenn keine Solareinstrahlung verwendet wird, sind in einer externen Vorrichtung verbaut, über welche der Volumenstrom bezogen wird. Diese Komponenten sind nicht mit dem Datenaufnahmegesetz verbunden und müssen somit manuell ein- und ausgeschaltet werden. Für die restliche Steuerung kann auf ein einfaches Labview-VI zurückgegriffen werden, welches die Funktion hat, die Trommel für eine bestimmte Zeitdauer rotieren zu lassen. Diese Steuerung ist für die ersten Versuche ausreichend, optional soll später eine Berechnung der Materialfeuchte mit automatischem Befeuchtungs-Stop integriert werden.

Entleerung:

Für die Entleerung der Befeuchtungstrommel wurden, gleich wie bei der Befüllung insgesamt drei Zyklen ausgewählt. Wichtig für die Entleerung ist die Einstellung des Vibrationsbettes, damit ein möglichst hoher Massenstrom gewährleistet werden kann. Zeitgleich ist es notwendig, dass der Materialfluss durch das Einschalten des Winkelbecherwerks oder auch "Förderer" gewährleistet ist, um einen Rückstau zu vermeiden. Einzig die Einstellung der Weiche, ob das Material zur Trocknung oder zur erneuten Befeuchtung transportiert wird ist nicht Teil der Ablaufsteuerung und muss vorher manuell festgelegt werden.

Adsorptionsversuch

Ziel der durchgeführten Messungen war die Ermittlung des Temperaturhubs während eines sechsständigen Anlagebetriebs sowie den damit verbundenen Änderungen der Materialfeuchtigkeit. Die absolute Luftfeuchtigkeit der durch die Trommel strömenden, vorgewärmten Umgebungsluft stellt einen weiteren wichtigen aufgenommenen Kennwert dar und ist mitbestimmend für die erreichbare Wärmeleistung des Sorptionsspeichers [4].

Zur Messdatenerfassung wurden am Eintrittsrohr des Innenzylinders in einem Abstand von 30 cm ein Feuchte- und Temperatursensor sowie ein Flügelrad-Anemometer angebracht. Ein Thermoelement Typ K befindet sich, ebenfalls mit 30 cm Abstand auf der gegenüberliegenden Seite der Befeuchtungstrommel und misst die Austrittstemperatur der erwärmten Luft. Des Weiteren liefert ein, unterhalb der Trommel befindlicher Feuchte- und Temperatursensor Messwerte der Umgebungsluft der Anlage. Die aufgezeichneten Messwerte aller verwendeten Sensoren werden in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Verwendete Sensoren für die Messwernerfassung der Materialbefeuchtung

Messgerät	Kanal	Messwert	Abkürzung	Einheit
Temperatursensor	40	Austrittstemperatur	T-Trommel-out	°C
Feuchte- und Temperatursensor (Eingang)	63	Eingangstemperatur	T-in	°C
	73	Relative Luftfeuchtigkeit	RH-in	%H
	83	Taupunkt Eingang	DT,td-in	°C
	93	Absolute Luftfeuchtigkeit	X-in	g/kg
Feuchte- und Temperatursensor (Umgebung)	64	Umgebungstemperatur	T-umg	°C
	74	Relative Luftfeuchtigkeit	RH-umg	%H
	84	Taupunkt Umgebung	DT,td-umg	°C
	94	Absolute Luftfeuchtigkeit	X-umg	g/kg
Flügelrad- Anemometer	66	Eingangsgeschwindigkeit	v	m/s
	76	Eingangsvolumenstrom	VolStrom	m ³ /h

Insgesamt wurden je Trommelfüllung vier Feuchtigkeitsmesswerte bestimmt, wobei vor Beginn des Adsorptionsprozesses die erste Messprobe entnommen und darauffolgend in zweistündigen Abständen gemessen wurde. Der Feuchtigkeitsgehalt des Zeolith lässt sich über die Methode des Massenverlustes durch die Verdampfung des aufgenommenen Wassers bestimmen. Hierfür wird der "Feuchtebestimmer DBS" der Firma Kern verwendet, der mittels selbst definierbaren Trocknungsprogrammen diesen Massenverlust herbeiführt und prozentuell angibt.

Die, während der ersten Versuche (Kaltversuche) gemessenen Werte für die Austritts- und Eingangstemperatur sowie der Volumenstrom einschließlich dessen absoluter Luftfeuchtigkeit, werden in Abbildung 16 dargestellt. Auffallend hierbei ist der stetige Abfall des Volumenstroms über die Zeitdauer der Messung. Dieses Problem steht im Zusammenhang mit der hohen Staubentwicklung, welche durch die ständige Bewegung des Zeolith in der Befeuchtungstrommel hervorgerufen wird. An mehreren Stellen des flexiblen Aluminiumschlauches für die Abluft konnte eine Verstopfung durch Zeolithstaub festgestellt werden, ausschlaggebend für die Drosselung des Volumenstroms ist hingegen die Filterbox. Um eine konstante Durchströmung der Trommel sicherzustellen, müssen die darin verbauten Filter stündlich gereinigt werden.

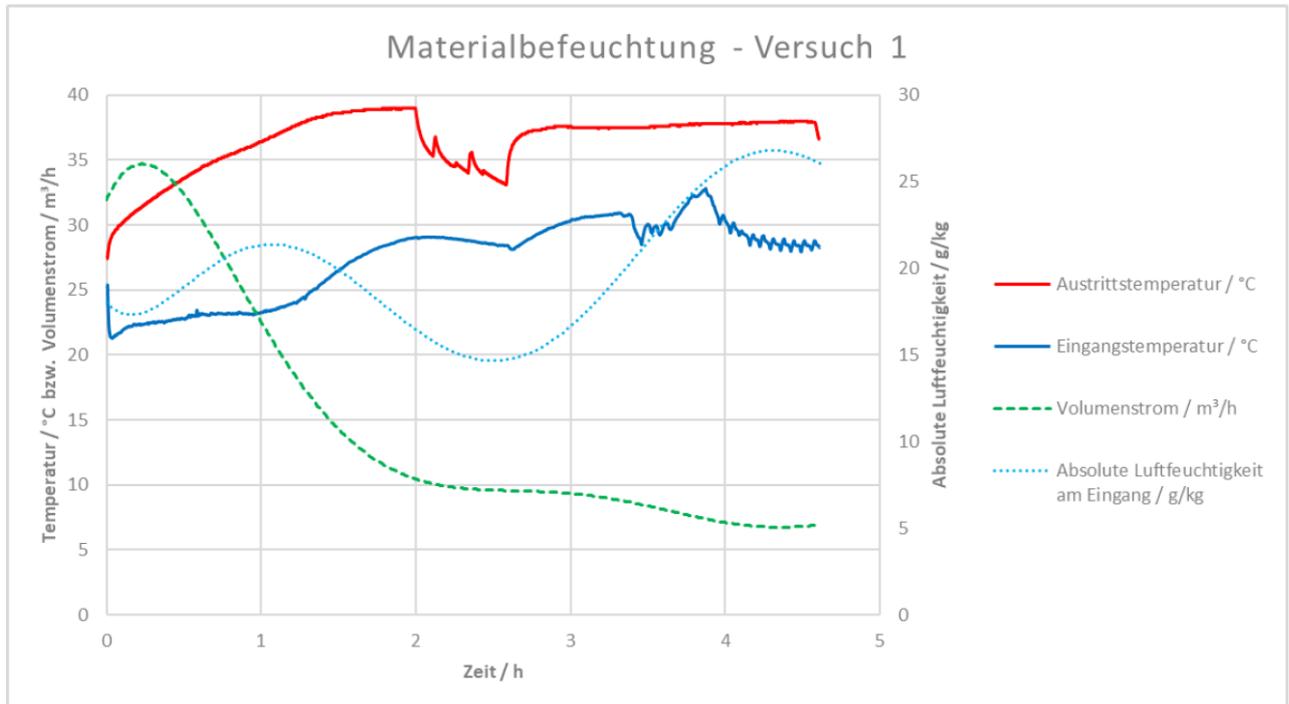


Abbildung 16: Temperaturen, Volumenstrom und absolute Feuchtigkeit der Adsorption (Kaltversuch)

Desorptionsversuche

Das Ziel der Messungen ist es, durch Testen von unterschiedlichen Einstellungen der Trocknungstemperatur des Ofens sowie durch Änderung des Massenflusses eine passende Desorptionsstrategie zu bestimmen. Diese soll einen möglichst niedrigen Feuchtigkeitsgehalt des Materials bei gleichzeitig möglichst hohem Massenfluss bereitstellen.

Dabei ist zu beachten, dass die maximale Temperatur von 120°C am Auslass nicht überschritten werden darf und dass der Materialdurchlauf im heißesten Register genügend Zeit in Anspruch nehmen muss, um eine ausreichende Trocknung zu gewährleisten.

Für den Trocknungsversuch (Messwerte der Materialfeuchte siehe Tabelle 3) wurde der Heizungsregler des Ofens auf 180°C eingestellt, der Massenstrom liegt bei 4 kg/h. Die Feuchtigkeitsbestimmung der Kern-Messwaage liefert Referenzwerte von Materialproben. Nach einer Zeitdauer von sechs Stunden konnte erstmals ein Feuchtigkeitsgehalt von unter 10% erzielt werden, bei weiterer Fortführung der Messung lässt sich ein Einpendeln bei etwa 9% feststellen, wobei sich ein Ausreißer mit 8,17% unter den Messwerten befindet. Schlussendlich führt eine Desorptionstemperatur von 180°C nicht zum angestrebten Ergebnis (<6%) wodurch eine Temperaturerhöhung notwendig ist.

Tabelle 3: Feuchtigkeitsmesswerte Zeolith während des Desorptionsprozesses mit einer Trocknungstemperatur von 180 °C und einem Massenfluss von 4 kg/h

Messung		Material			Umgebung	
Nr	Zeit	Masse vor	Masse nach	Feuchtigkeit	Temperatur	Feuchtigkeit
-	-	g	g	%	°C	%
1	10:00	9,993	8,707	12,84	25,8	60
2	11:00	10,005	8,853	11,50	27,5	56
3	12:00	10,008	8,810	11,96	28,4	51
4	13:00	10,006	8,815	11,91	29,5	46
5	14:00	10,006	8,991	10,10	30,2	42
6	15:00	10,000	8,999	10,10	30,6	40
7	16:00	10,005	9,034	9,70	31,2	39
8	17:00	10,008	9,094	9,12	31,8	37
9	09:00	10,002	9,147	8,54	26,8	51
10	10:00	10,003	9,151	8,65	27,3	52
11	11:00	10,004	9,080	9,22	28,7	50
12	12:00	10,010	9,085	9,22	29,8	46
13	13:00	10,005	9,112	8,93	30	44
14	14:00	10,000	9,065	9,34	30,5	42
15	15:00	10,007	9,060	9,47	31,1	39
16	16:00	10,003	9,124	8,78	31,3	36
17	09:00	10,005	9,186	8,17	27,1	55

Um festzustellen, ob auch bei einem höheren Massenstrom und gleicher Temperatur ähnliche Ergebnisse erzielt werden können, wurde die in Tabelle 4 dargestellte Messreihe mit 40 kg/h durchgeführt. Der Mittelwert der letzten drei Messungen liegt mit 9,54 % etwas höher als bei der vorhergehenden Messung und kann als maximal erreichbare Endfeuchtigkeit betrachtet werden. Folglich sollte der Massenfluss auf ca. 10 kg/h gedrosselt werden.

Tabelle 4: Feuchtigkeitsmesswerte Zeolith während des Desorptionsprozesses mit einer Trocknungstemperatur von 180 °C und einem Massenfluss von 40 kg/h

Messung		Material			Umgebung	
Nr	Zeit	Masse vor	Masse nach	Feuchtigkeit	Temperatur	Feuchtigkeit
-	-	g	g	%	°C	%
1*	14:00	10,005	8,983	10,12	27,8	51
2*	14:30	10,005	8,902	10,91	28,2	48
3*	15:00	10,004	8,999	9,95	28,7	43
4*	15:30	10,000	9,003	9,87	29,1	42
5	16:00	10,006	8,704	13,00	29,4	40
6	17:00	10,003	8,717	12,88	29,9	37
7	18:00	10,004	9,009	9,94	26,6	49
8	10:30	10,011	9,290	7,20	27,4	51
9	11:00	10,011	9,059	9,47	28,2	48

*Schnellmessung

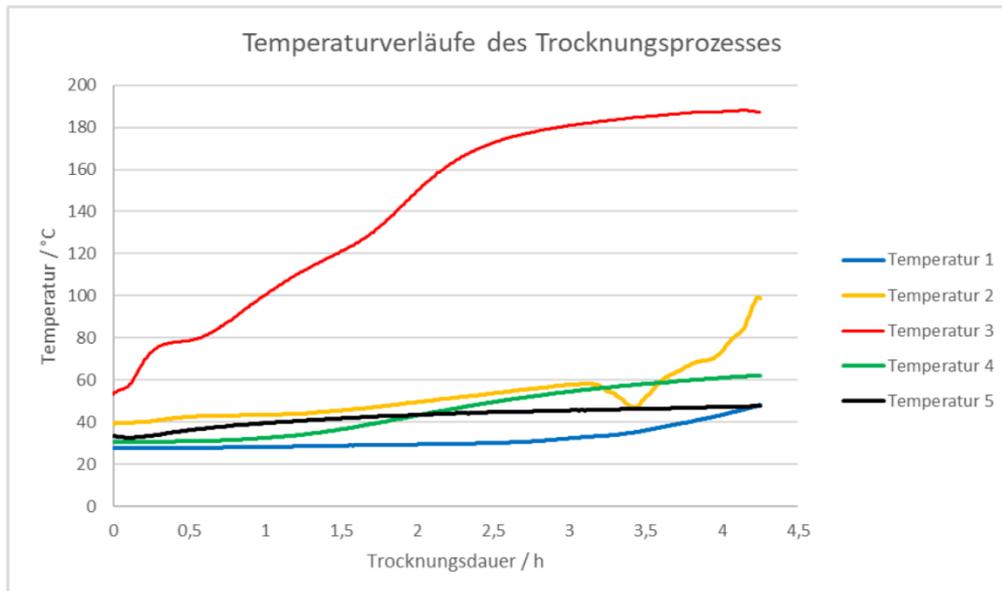


Abbildung 17: Temperaturverläufe in verschiedenen Abschnitten innerhalb des Ofens

Die in Abbildung 17 folgenden Temperaturverläufe beziehen sich auf die Messwerte der seitlich am Ofen angebrachten Thermoelemente. Auffällig hierbei ist der relativ hohe Temperaturunterschied zwischen dem Heizregister (Temperatur 3) und dem oberen Register (Temperatur 2) trotz Vorwärmung und verbesserter Wärmedämmung der Rohre. Die restlichen gemessenen Temperaturen entsprechen mit 50-60 °C in etwa den zu erwartenden Werten. Für die Erreichung der eingestellten Solltemperatur von 180 °C werden exakt drei Stunden benötigt, die maximal erreichte Temperatur dieses Registers liegt nach längerer Heizdauer bei 190 °C.

Bei einem weiteren Versuch (200°C Ofentemperatur) wurden Temperaturen aufgezeichnet, welche in Abbildung 18 zu sehen sind. Zum Erreichen der eingestellten 200 °C werden knapp fünf Stunden benötigt, 180 °C werden hingegen bereits nach zweieinhalb Stunden erreicht. Bis zu diesem Zeitpunkt sollte sich die Weiche am Winkelbecherwerk in jener Stellung befinden, die das Sorptionsmaterial erneut in den Materialbehälter des Ofens befördert, danach ist ein Umschalten notwendig.

Um die relativ niedrigen Temperaturverläufe der Messstelle 2 zu erhöhen, sind weitere Dämmmaßnahmen notwendig. Da die Reduzierung der Wärmeverluste über die Rohrleitungen keine großen Verbesserungen erzielte, wäre eine Dämmung am Wärmetauscher der nächste Lösungsansatz.

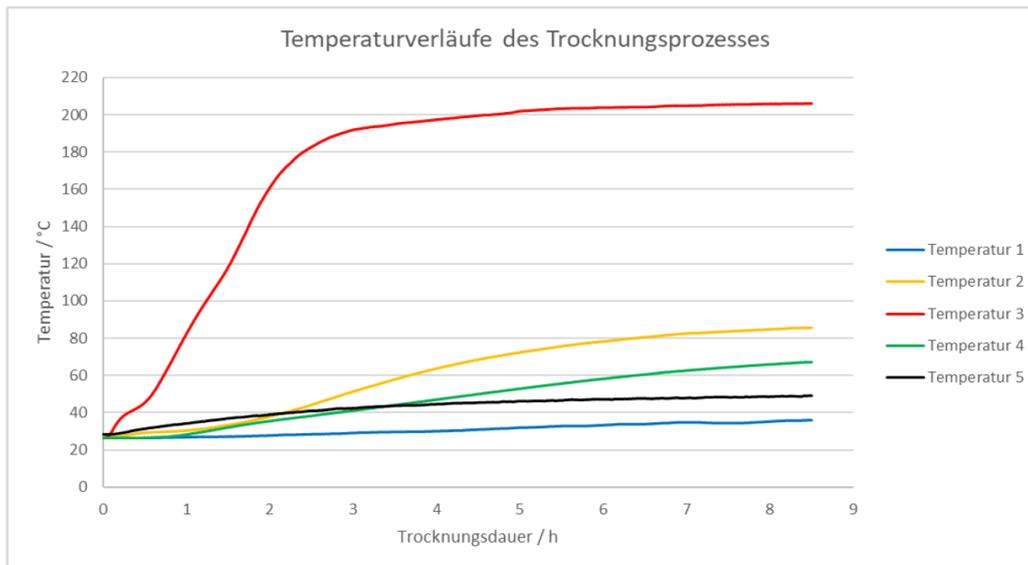


Abbildung 18: Temperaturverläufe in verschiedenen Abschnitten innerhalb des Ofens

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die durchgeführten Desorptions-Messungen wichtige Erkenntnisse über die zukünftige Betriebsweise der Anlage liefern. Ein wichtiger Punkt ist hierbei der Ablauf des Trocknungsprozesses. Da der Ofen ungefähr drei Stunden benötigt, um eine effektive Trocknungstemperatur von über 180 °C zu erreichen, ist es notwendig den Massenfluss vorerst erneut in den Materialbehälter des Ofens zu leiten. Somit wird verhindert, dass bereits feuchtes Material zur Trommel gelangt, wodurch die Leistung der Trommel gesteigert wird.

Adsorptionsversuch (Warmversuch)

Der Testlauf der Anlage läuft grundsätzlich gleich ab wie der Kaltversuch, aufgrund der bereits durchgeführten Trocknung des Materials kann jedoch mit einem höheren Temperaturhub gerechnet werden.

Aufgrund der bereits erwähnten auftretenden Probleme an der Filterbox für die Abluft wurde diese durch einen Behälter ersetzt, in welchem ein perforiertes Blech direkt nach dem Eintrittsbereich befestigt ist. Dieses soll eine Verwirbelung der durchströmenden Luft und folglich eine Absetzung von Zeolithstaub bewirken. Weiter wurde die ebenfalls zuvor verwendete Zyklon-Filterbox infolge der geringen Funktion ausgebaut. Durch diese Maßnahmen konnte während der gesamten Messdauer der Materialbefeuchtung (siehe Tabelle 5) ein höherer und relativ konstanter Volumenstrom von 40 – 45 m³/h erzielt werden. Die maximale Feuchtigkeit beträgt, ähnlich wie beim ersten Anlagentestlauf zwischen 14 und 15% und stellt somit keinen großen Unterschied zur Adsorption bei geringerem Volumenstrom dar.

Tabelle 5: Feuchtigkeit des Zeolith für die Adsorption bei einem Volumenstrom von 40 bis 45 m³/h

Versuch		Material			Umgebung	
Nr	Messung	Masse vor	Masse nach	Feuchtigkeit	Temperatur	Feuchtigkeit
-	-	g	g	%	°C	%
1	1-1	10,100	8,843	13,88	28,6	48
	1-2	10,170	8,890	11,24	29,5	45
	2	10,011	8,663	13,75	27,2	51
	3	10,006	8,565	14,41	28,7	44
	4	9,996	8,547	14,48	30,3	41
2	1	10,001	8,750	12,50	27,8	47
	2	10,006	8,669	13,35	29,5	44
	3	10,005	8,636	13,85	31,3	39
	4	10,009	8,573	14,34	27,5	47
	3	1	10,028	8,739	12,85	24,9
	2	10,012	8,630	13,79	25,5	47
	3	10,000	8,525	14,75	27,1	46
	4	10,009	8,518	14,89	27,5	44

Durch den niedrigeren Feuchtigkeitsgehalt des Sorptionsmaterials lässt sich, wie in Abbildung 19 zu erkennen ist, ein höherer Temperaturhub als beim ersten Testlauf erzielen. Dieser erreicht im ersten Zyklus nach einer Stunde einen Maximalwert von 18K, der Durchschnittswert über die gesamten sechs Stunden beläuft sich auf 10K. Obwohl diese Ergebnisse den ersten Versuch übertreffen, sollte der Feuchtigkeitsgehalt nach der Trocknung bei 180 °C noch geringer sein, und die Trocknung weiter optimiert werden. Material, welches zu feucht zum Trommelbehälter befördert wird, wirkt sich negativ auf die Trommelleistung aus. Ebenso kann der Zeolith bei langer Lagerungszeit etwas Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufnehmen, in einem geschlossenen System sollte dies jedoch ein weniger einflussreicher Faktor sein.

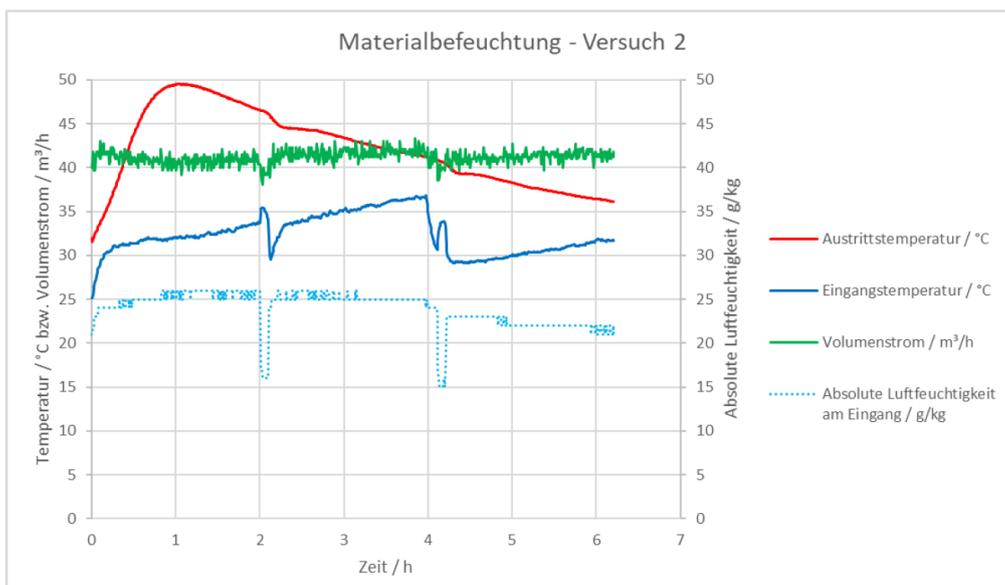


Abbildung 19: Temperaturen, Volumenstrom und abs. Feuchtigkeit der Adsorption

2 Thermische Analyse

Aufgabenstellung und Eingesetzte thermophysikalische Messmethoden

Im Projektantrag wird für das Arbeitspaket die Bestimmung folgender Speichermaterialeigenschaften im Temperatur und Feuchtebereich des Reaktors als Zielsetzung definiert:

- Sorptionsbeladung und Beladungskinetik
- Exo- bzw. endotherme Wärme während Sorption bzw. Desorption
- Gasanalyse bis zur maximalen Desorptionstemperatur
- spezifischen Wärme des Sorbensmaterials
- Wärmeleiteigenschaften des Sorbensmaterials

Folgende Messmethoden wurden genannt:

- Thermowaage mit simultaner Kalorimetrie (STA)
- Kalorimetrie (DSC)
- Gasanalyse mit Infrarot- bzw. Massenspektrometrie
- Wärmeleitfähigkeitsmessung (Laser Flash Analyse bzw. Transient Hot Bridge Methode)

Sorptions- und Desorptionsverhaltens der Speichermaterialien:

Zur experimentellen Bestimmung des Sorptions- und Desorptionsverhaltens der Speichermaterialien kam eine hochauflösende Thermowaage mit Möglichkeit zur simultanen thermischen Analyse (STA Betrieb mit DSC Sensor) NETZSCH STA 449 F1 Jupiter zum Einsatz. Das Gerät kann simultan sowohl mit einem Massenspektrometer NETZSCH QMS 403C Äolos, und einem Infrarot Spektrometer Bruker FTIR Tensor 27 betrieben werden. Als Betriebsgase stehen He, Ar, N₂, O₂, und synthetische Luft zur Verfügung. Die Betriebsgase können über einen *prohumid* Feuchtegenerator geführt werden, der Betriebsmoden unterhalb des Taupunktes des gasführenden Systems zulässt. Als Trägergas wurde synthetische Luft eingesetzt. Veränderungen der Betriebstemperatur der STA wurden mit Heizraten von 25K/min programmiert. Im Kühlmodus wurde diese Kühlrate durch eine Stickstoffkühlung sichergestellt. Temperaturveränderungen von wenigen 10¹°C ergeben Temperaturtransienten von 1 bis 2 Minuten, diese Betriebsdynamik erlaubt somit die Annahme quasi isothermer Betriebsbedingungen des Speicherwerkstoffes.

Die Wahl der einzusetzenden Speicherwerkstoffe ergab, dass auf die Gasanalyse im Desorptionsregime verzichtet werden kann, da bei diesen Speicherwerkstoffen lediglich ein qualitativer Feuchtenachweis erwartet werden kann, der keinen Erkenntnisgewinn bedeutet, bzw. keine signifikanten Effekte erwartet werden. Dem gegenüber bedeutet die Kopplung

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

von je einem Massenspektrometer und einem IR Spektrometer an eine Feuchtgas führende, hochempfindliche Thermowaage, die simultan mit einem DSC Nachweis betrieben wird (STA), eine signifikante Komplexitätssteigerung des Messaufbaues, die zusätzliche Risiken für Messartefakte und Abstürze von Messläufen einbringt. Diese Einschätzung ist insbesondere vor dem Hintergrund der zu erwartenden Messdauer von mehreren Tagen bedeutsam.

Spezifische Wärme der Speichermaterialien:

Die Bestimmung der spezifischen Wärme an Speichermaterialien erfolgte an trockenem und befeuchtetem Probenmaterial in einer Kalorimeter NETZSCH 204 F1 Phönix. Als Feuchtezustände werden ca. 6g/kg (entspricht zur Zeit der Messungen in etwa der Befeuchtung unter Umgebungsbedingungen) und 8g/kg betrachtet. Die Messproben wurden befeuchteter Luft bis zum Erreichen der jeweiligen Massezunahme ausgesetzt, und unmittelbar nach der Befeuchtung in kalt verschweißten Al Tiegeln vermessen. Als Betriebsgas wurde Helium eingesetzt (thermische Ankopplung). Die DSC wurde im optimalen S/N - Bereich des verbauten Sensors mit einer Heizrate von 10K/min betrieben. Die Auswertung der DSC Daten zu c_p und Enthalpie geschieht über eine Empfindlichkeitskalibrierung [5].

Wärmeleitfähigkeit der Speichermaterialien:

Zum Zeitpunkt der Antragstellung waren am AIT ein Laser Flash Gerät NETZSCH LFA 427 zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit a , und ein Transient Hot Bridge Geräte LINSEIS THB 100 zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ installiert. Über den Projektzeitraum wurde zudem ein Heat Flow Meter NETZSCH HFM 446 Lambda zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ in Betrieb genommen. Projekterfahrungen aus anderen Forschungsaktivitäten zeigten, dass das Laser Flash Verfahren, selbst bei Verwendung pulverspezifischer Probenaufnahmen, kein geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit an Schüttungen und gepressten Pulvern ist. Das Transient Hot Bridge Verfahren und das Heat Flow Meter Verfahren stellen für feinkörnige Pulver und Schüttungen gleichwertige Verfahrenszugänge dar. Allerdings bietet das Heat Flow Meter in einem modifizierten Verfahrensablauf auch die Möglichkeit der Bestimmung der spezifischen Wärme, was gibt so eine Vergleichsmöglichkeit der gemessenen c_p Daten aus zwei verschiedenen experimentellen Zugängen. Daher wurde dieser Verfahrenszugang gewählt. Die Messungen wurden unter Verwendung eines Schüttrahmens von 200 x 200 x 25 mm³ an raumfeuchtem Probenmaterial (ca. 6g/kg) durchgeführt.

Untersuchte Speicherwerkstoffe

Zu Projektbeginn war ausschließlich 4A Zeolith zur thermischen Analyse im Sinne der Aufgabenstellung vorgesehen. Erkenntnisse aus den Experimenten am Trommelreaktor motivierten die thermische Analyse an weiteren Speicherwerkstoffen (Tabelle 6). Für die

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

TELLZ-Materialien wurde auf die Bestimmung der spez. Wärme und der Wärmeleitfähigkeit zu Gunsten des erweiterten STA Aufwandes verzichtet.

Tabelle 6: Untersuchte Speicherwerkstoffe: Auslagerungstemperaturen, Feuchteparameter, Auslagerungsdauern, programmierte Ofentemperaturen

4A Zeolith: Silikem				
Materialtemperatur	Gasfeuchte	Exposition	Programmierte Temperatur	Quelle für T(Segment _{neu})
250°	0 g/kg	240 min	265	STA-sDSC: n18-094
40°	2 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-094
40°	4 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-094
40°	6 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-094
40°	8 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-094
40°	10 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-094
160°	10 g/kg	240 min	170	STA-sDSC: n18-094
190°	10 g/kg	240 min	201,5	STA-sDSC: n18-094
220°	10 g/kg	240 min	233	STA-sDSC: n18-094
250°	10 g/kg	240 min	265	STA-sDSC: n18-094
250° (=Start)	0 g/kg	240 min	265	STA-sDSC: n18-094
TELLZ: 5 experimentelle Granulate - TELLZ 1; TELLZ 2; TELLZ 2-550; TELLZ 3-550; TELLZ 4-550				
Materialtemperatur	Gasfeuchte	Exposition	Programmierte Temperatur	Quelle für T(Segment _{neu})
180°	0 g/kg	240 min	191,1	STA-sDSC: n18-098
40°	2 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-098
40°	4 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-098
40°	6 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-098
40°	8 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-098
40°	10 g/kg	240 min	46,5	STA-sDSC: n18-098
120°	10 g/kg	240 min	128,7	STA-sDSC: n18-098
140°	10 g/kg	240 min	149,4	STA-sDSC: n18-098
160°	10 g/kg	240 min	170,2	STA-sDSC: n18-098
180°	10 g/kg	240 min	191,1	STA-sDSC: n18-098
180° (=Start)	0 g/kg	240 min	191,1	STA-sDSC: n18-098

Experimentelle Erfahrungen zur Optimierung der simultanen thermischen Analyse

Vor Beginn der ersten Messungen an 4A Zeolith wurden die gewünschten Isotherm-Temperaturen von 15°C, 40°C, und 65°C, die technologiespezifischen Feuchtebelastungen von 2 g/kg, 5 g/kg und 8 g/kg, und die Auslagerungsdauern für das Erreichen von Gleichgewichtszuständen (240 Minuten) festgelegt. In einem ersten experimentellen Zugang wurden TG Experimente und DSC Experimente mit den jeweils dafür optimalen Sensoren und Probenaufnahmen als Basislinien korrigierte Messungen gefahren. Um die Reaktionskinetik nicht (unzulässiger Weise!) durch Transportphänomene zu überlagern, wurden die Messungen an Einzelpartikeln – und nicht an (großvolumigen) Schüttungen durchgeführt. Um sicher zu stellen, dass die Feuchteentnahme aus dem Gasstrom durch das Experiment praktisch keinen Einfluss auf den Feuchtegehalt des Feuchtgasstromes hat, wurde mit einem Gasstromverhältnis Spülgas / Schutzgas \equiv Feuchtgas / Trockengas = $m_F/m_T = 200/20$ ml/min gearbeitet. Außerdem wurden Konditionierungs- und Trocknungssegmente im Messablauf mit Trockengas in einem eigenen Spülgasstrom durchgeführt. Weiters: sämtliche Messungen wurden an ein und demselben Partikel durchgeführt. In Summe führte dieses Experimentdesign zu enormen Zeitaufwänden, und zu unerwarteten – aber nachvollziehbaren Messartefakten:

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

- Unterbrechungen des Feuchtgasstromes führen im Mischkopf des Feuchtgenerators zu nicht definierten Feuchtebedingungen bis hin zur Bildung von Flüssigphase. Die initialen Befeuchtungsbedingungen in nachfolgenden Befeuchtungssegmenten sind damit thermodynamisch nicht bewertbar
- Aktivierung und Deaktivierung von Gasströmen führt zu Impulsartefakten, die die Bewertung der Masseaussage des Experimentes erschweren bis verunmöglichen
- Die hohen Gasflüsse von in Summe 220 ml/min ergaben statistische Strömungsartefakte
- Die Einzellagerung eines Probekornes birgt die permanente Gefahr der statistischen Bewegung samt der damit verbundenen Impulsartefakte

Zur Vermeidung dieser experimentellen Nachteile wurden folgende Modifikationen am Experimentdesign vorgenommen (vgl. dazu auch *Abbildung 20*):

- Reduktion der Gasflüsse auf $m_F/m_T = 100/10$
- Trockengas wird aus einem permanenten Feuchtgasstrom mit minimal einstellbarer Restfeuchte von $r_H = 0,6\%$ bei 30°C entnommen
- Die Einzellagerung eines Probekornes wird zu einer allseitig strömungsoffenen stabilen Einzellage aus planetenartig angeordneten Körnern erweitert

Unter diesen Bedingungen können Messungen weitestgehend frei von Bewegungsartefakten, Strömungsartefakten, und Feuchteartefakten durchgeführt werden. Das Offset-Effekt Verhältnis $\Delta m_{\text{Offset}} / \Delta m_{\text{Feuchte}}$ wird kleiner, DSC Nachweise werden reproduzierbarer.

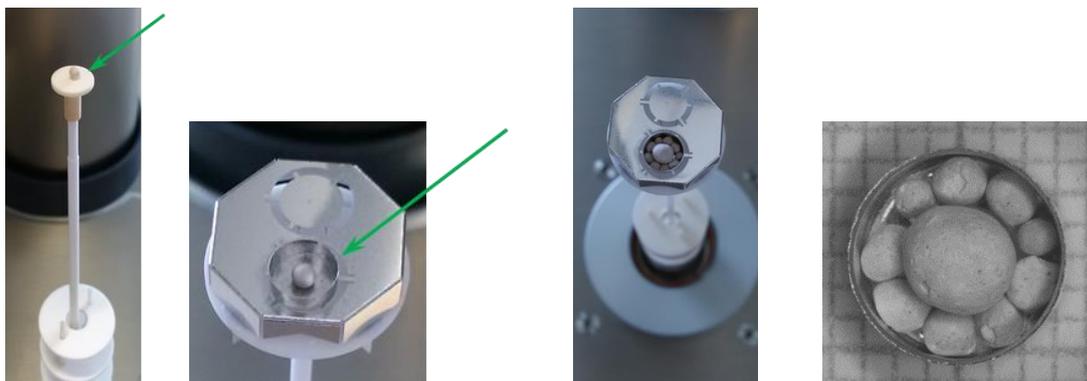


Abbildung 20: TG und DSC Sensoren für getrennte Messungen an Einzelpartikel (links) und DSC Sensor für die Simultanmessung an stabiler Einzellage (rechts)

Designparameter der Messserien:

Messungen der ersten Messkampagne – ausschließlich an 4A Zeolith:

Die Parameter der ersten Messkampagne wurden nach den Best Practice Erkenntnissen thermophysikalischer Labortätigkeit mit dem Ziel festgelegt, auslegungsrelevante Basisdaten für den Betrieb des Trommelreaktors zu gewinnen.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Die Startbedingungen der Messungen werden durch eine „vollständige Trocknung“ des Zeolith bei 250°C ($H_R = 25\text{K/min}$; Isothermphase 30 min) bei abschließender Kühlung auf 15°C erreicht. Der Null-Punkt der Messung ist mit $[\Delta m/m_0 = 0; r_H=0] := [0;0]$ festgelegt. Stoffzustände „A“, „B“, und „C“ kennzeichnen Quasi-Gleichgewichtszustände, die in Abhängigkeit von der Gasfeuchte zu den Parametern: Feuchtgas und Temperatur nach hinreichend langer Zeit erreicht werden. Als hinreichende Expositionsdauer bei einer Befeuchtungsstufe konnte nach Vorversuchen bei $r_H = 2\text{g/kg}$ und $T_{\text{Gas}} = 15^\circ\text{C}$ eine Expositionsdauer $t_e = 200$ min ermittelt werden, die in Folge auch so programmiert wurde.

Das Messprogramm umfasst drei Experiment Varianten:

1. TFG: vom Trockenzustand zum Feuchte Gleichgewicht
Jeweils von $[0;0]$ ausgehend werden zu Expositionstemperaturen T_e aus $\{15^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 65^\circ\text{C}\}$ die Zustände „A“, „B“, und „C“ angefahren.
2. TFzG: vom Trockenzustand über eine Abfolge von Zwischenstufen von Feuchte Gleichgewichten FzG höherer Feuchte. Also:
 1. $A \rightarrow B \rightarrow C$
 2. $A \rightarrow C$
3. TFz: vom Trockenzustand zu einer Abfolge von Zwischenstufen von Feuchte
Jeweils von $[0;0]$ ausgehend werden zu den vorgegebenen Temperaturparametern $\{15^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 65^\circ\text{C}\}$ die Zustände „A“, „B“, und „C“ für eine Expositionsdauer $t_e = 30$ min angefahren. Danach ist die Messung beendet

Messungen der zweiten Messkampagne – an 4A Zeolith und TELLZ Materialien:

Die Startbedingungen die Temperatur – Feuchte – Parameter der Messungen werden in Tabelle 6 für beide Materialtypen definiert. Die Parametervorgaben orientierten sich in dieser Messkampagne nicht an messtechnisch günstigen Verfahrensbedingungen, sondern an simulations-theoretischen Überlegungen, die davon ausgehen, auch aus „ungünstigen“ Einzelereignissen statistisch brauchbare Eingangsdaten für nachgelagerte Parameterstudien zu gewinnen. Daher war es hier kein primäres Ziel, aus wohldefinierten Segmentgrenzen (z.B. in Bezug auf artefaktfreie, oder eindeutige DSC Signale, bzw. rauscharme TG Signale) optimale Integrationsgrenzen für eine kalorische Aussage zu gewinnen.

Ergebnisse

Messungen vom Trockenzustand zum Feuchte Gleichgewicht (TFG):

Ausgehend von $[0;0]$ werden bei den jeweiligen Expositionstemperaturen T_e $\{15^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 65^\circ\text{C}\}$ die Gleichgewichtszustände (=Sättigungszustände) „A“, „B“, und „C“ angefahren. Die Resultate sind in Abbildung 21 gezeigt. Ausgehend von der niedrigsten Feuchtgastemperatur von 15°C stellt man abnehmende Gleichgewichtbeladungen bei steigenden Temperaturen fest. Die zeitliche Charakteristik der Beladungskurven beschreibt die Kinetik der Beladung.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

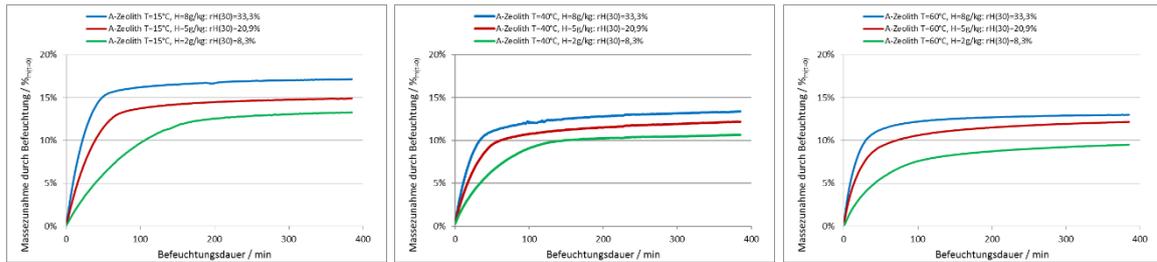


Abbildung 21: Messungen vom Trockenzustand zum Feuchte Gleichgewicht (TFG)

Messung vom Trockenzustand zu einer Abfolge von Feuchte Zwischenstufen (TFz):

Ausgehend von [0;0] werden zu den vorgegebenen Temperaturparametern {15°C, 40°C, 65°C} die Zustände „A“, „B“, und „C“ für eine Expositionsdauer $t_e = 30$ min angefahren. Danach wird die Messung abgebrochen. Die Resultate sind in Abbildung 22 gezeigt.

Messungen vom Trockenzustand in Abfolge von Gleichgewichten auf Feuchte

Zwischenstufen TFzG:

Der Messtyp sieht vor, dass Zustände von jeweils zunehmender Feuchte bis in das Gleichgewicht angefahren werden. Also: A → B → C und A → C. Auf die Durchführung dieser Messungen wurde zu Gunsten des erweiterten Messaufwandes in der 2. Messkampagne verzichtet.

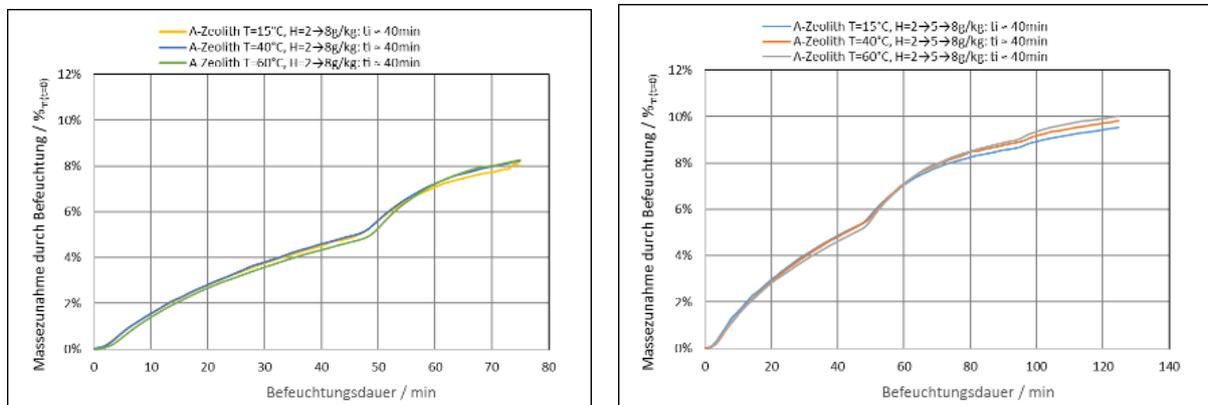


Abbildung 22: Messung vom Trockenzustand zu einer Abfolge von Feuchte Zwischenstufen (TFz)

Messungen der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärme von 4A Zeolith

Die Wärmeleitfähigkeit wurde nach dem HFM gemessen. Das Verfahren dauert mehrere Stunden, über die der Feuchtezustand des Messgutes konstant gehalten werden muss. Das ist aus praktischen Gründen nur im Gleichgewicht mit den Labor-Feuchtebedingungen erreichbar. Die gezeigten Messwerte (Abbildung 23) beziehen sich auf die gegebene Raumfeuchte von ca. 6g/kg

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

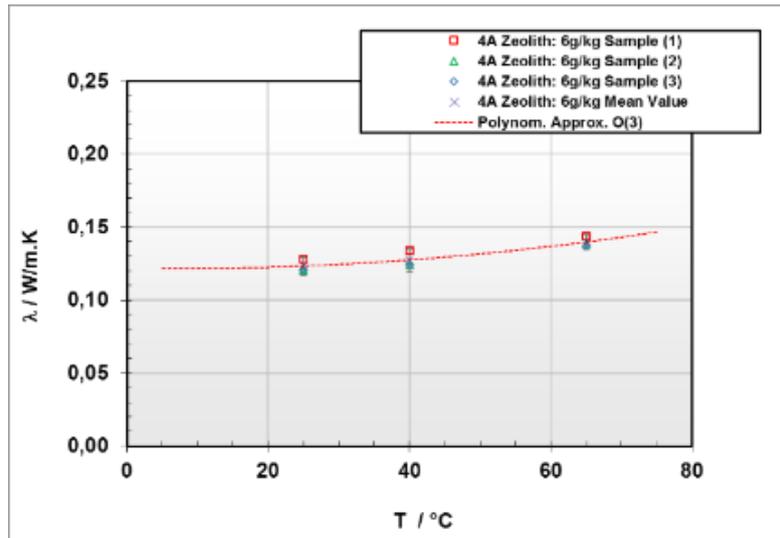
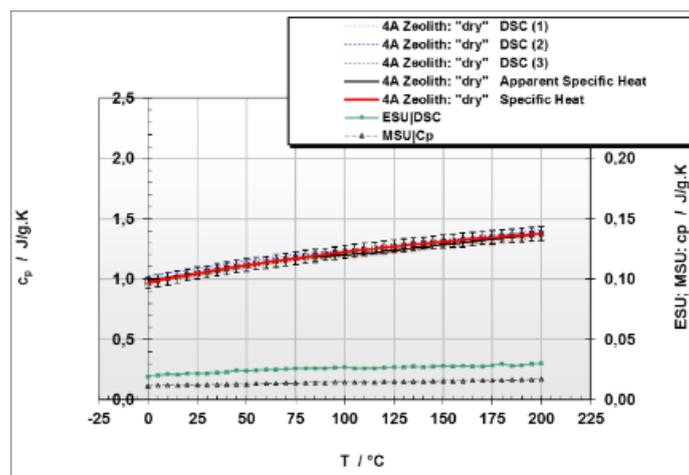


Abbildung 23: Wärmeleitfähigkeit eines raumfeuchten 4A Zeolith (HFM Verfahren)

Die spezifische Wärme wurde bei verschiedenen Feuchten nach dem DSC Verfahren, und bei Umgebungsfeuchte (=Raumfeuchte von ca. 6g/kg) nach dem HFM Verfahren gemessen. Abbildung 24 (links) zeigt die spezifische Wärme des trockenen 4A Zeolith. Es sind keine nennenswerten Enthalpieanteile aus Feuchteverlusten erkennbar. Abbildung 24 (mitte) zeigt die spezifische Wärme des mit 6g/kg befeuchteten 4A Zeoliths. Den DSC Daten sind die Werte aus der c_p Bestimmung nach dem HFM Verfahren gegenübergestellt. Die Messdaten sind im Rahmen der Messunsicherheit vergleichbar. Bei Temperaturen ab ca. 75°C sind nennenswerte Verdampfungsenthalpien (strichlierte Kurven) erkennbar. Die Dargestellte c_p Kurve ist Enthalpie korrigiert. Sie wurde aus der Extrapolation der messtechnisch verfügbaren c_p Daten nach einer *Saphir Master Curve* gewonnen. Analoges gilt für die c_p Darstellungen des feuchten Zeoliths (Abb. Rechts).



Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

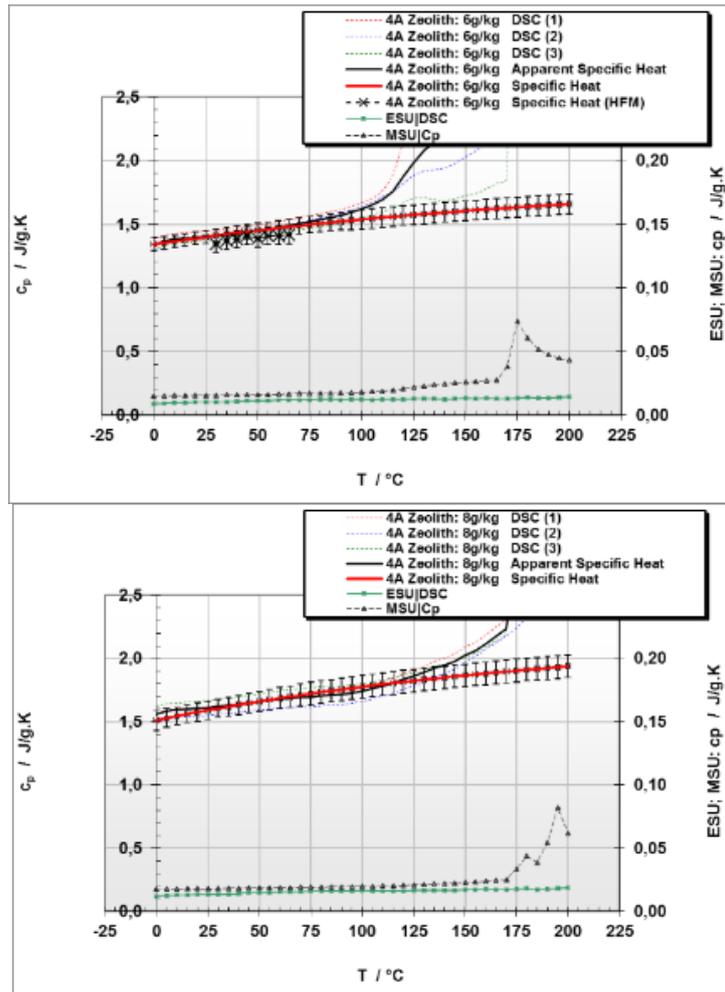


Abbildung 24: Spezifische Wärmen, Links: trockener 4A Zeolith (DSC Verfahren), Mitte: raumfeuchter 4A Zeolith (im Vergleich: DSC und HFM Verfahren), Rechts: feuchter 4A Zeolith (DSC Verfahren)

Thermische Analysen aus Messungen der zweiten Messkampagne – 4A Zeolith und TELLZ Materialien:

Die thermogravimetrischen Messungen ergaben, dass mehrere Befeuchtungsstufen nicht in einen Gleichgewichtszustand führen. Analoges gilt für die zugeordneten DSC Nachweise. Demnach ist auch die Basis der DSC Nachweiskurve im Übergangsbereich von einem vorangehenden in ein nachfolgendes Befeuchtungsregime nicht eindeutig bestimmbar. Das hat Auswirkungen auf die Integration der DSC Kurve – und ist damit Ursache für eine Unschärfe in Bezug auf die Aussage zur Energiefreisetzung im Befeuchtungsregime. Das Trocknungsregime weist die Abfolge von Trocknungsgleichgewichte nach, ergibt jedoch für das erste Trocknungssegment keine DSC Basis: die Störung des dynamischen Gleichgewichtszustandes beim spontanen Wechsel der Temperaturbedingungen bewirkt den dem Messprinzip intrinsisch innewohnenden „Anfahrartefakt“, der die Bestimmung der Integrationsgrenze zu Beginn des Trocknungsregimes verhindert. Damit ergibt sich die unscharfe Kenntnis der Energiefreisetzung im Befeuchtungsregime, und die Unkenntnis der Integrations- Anfangsbedingung zu Beginn des Trocknungsregimes. Die Bilanzierung von Energiefreisetzung bei Befeuchtung gegen Energiekonsum bei Trocknung bei diesem experimentellen Zugang ist aus physikalischer Sicht somit unvollständig, aus technische

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Sicht jedoch ausreichend, wenn unterstellt wird, dass aufeinanderfolgende Beladungs- und Entladungszyklen keine signifikante Veränderung der Stoffnatur zur Folge haben, und damit auch die ungefähre energetische Kenntnis des Trocknungsverlaufes die Bilanzgröße der nachfolgenden Befeuchtung liefert. Dass das Messkonzept der zweiten Messkampagne jedoch seine Berechtigung hat, zeigt Abbildung 25. Die wesentlichste Aussage bildet die grüne Kurve zur spezifischen Energiefreisetzung ab, die zumindest stückweise über den Befeuchtungsprozess annähernd konstant ist: das entspricht technologischen Erfahrungen. Analoges gilt für die Darstellung der Resultate der Messungen an den TELLZ Materialien.

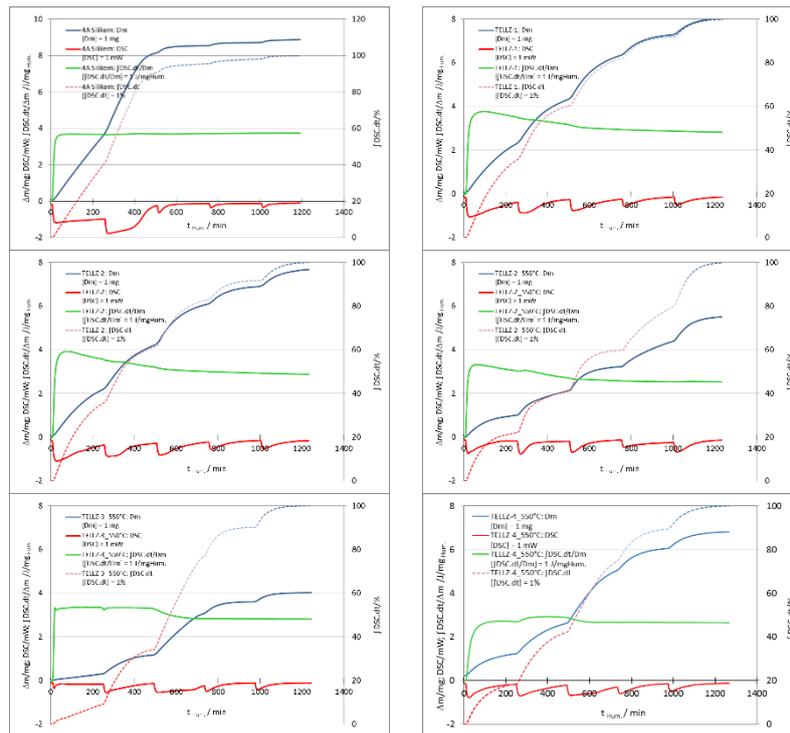


Abbildung 25: Masseverlauf (blau), DSC Verlauf (rot), spezifischer Energieumsatz $\int \text{DSC}(t) \cdot dt / \text{dm}$ (grün), und normierte Darstellung von $\int \text{DSC}(t) \cdot dt$ (rot – blau – strichliert)

Experimentelle Untersuchungen an neuen Speichermaterialien (Univ. Stuttgart)

Von Projektpartner ASIC/FH-Wels wurden Zeolithe vom Typ 4A zur Vermessung im Festbettreaktor zur Verfügung gestellt.

Der für die experimentellen Untersuchungen verwendete Labor-Festbettreaktor ist in der Abbildung 26 schematisch dargestellt. Er besteht aus einer „Vorzone“ mit inerten Partikeln (Glaskugeln, Durchmesser 2 mm) und einer Messzone mit dem Speichermaterial. Die Vorzone dient zu einer Ausbildung des Temperatur- und Strömungsprofils der Luft, bevor es in die Messzone eintritt.

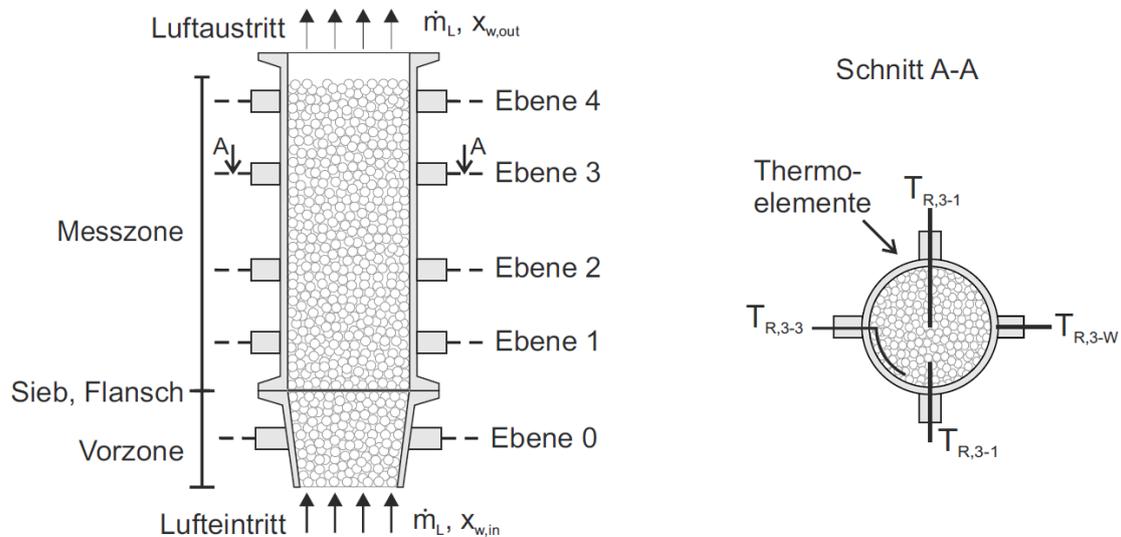


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Labor-Festbettreaktors, links: Radialschnitt, rechts: Querschnitt durch die Schnittebene A-A

Der Reaktor ist aus Edelstahl mit einer Wandstärke von 3 mm, einem Durchmesser von 50mm und einer Länge von 140 mm. Das axiale und radiale Temperaturprofil im Festbett wird mit radial in den Reaktor eingeführten Thermo-elementen in vier Ebenen gemessen (vgl. Abbildung links). Die Ebenen eins bis vier befinden sich auf einer Höhe (ausgehend vom Siebboden) von $H_1 = 25$ mm, $H_2 = 55$ mm, $H_3 = 95$ mm und $H_4 = 125$ mm. Die radiale Verteilung der Thermo-elemente in den jeweiligen Ebenen ist in Abbildung 1, rechts, exemplarisch für die Ebene 3 dargestellt.

Der für die experimentellen Untersuchungen verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 26 schematisch abgebildet. Die Prozessluft aus dem Druckluftnetz wird über einen Ölabscheider geleitet und in einer Lufttrocknungseinheit, die aus einer trockenen Zeolithschüttung besteht, auf eine Luftfeuchte von $< 2\%$ (bei 20 C bzw. auf einen Wasserdampfpartialdruck von $p_w < 0,5$ mbar) getrocknet. Mit einem digitalen Massendurchflussmesser und -regler (Fa. Bronkhorst, El-Flow, Regelbereich bei Normbedingungen: (0)...0,16...8 m³/h, Genauigkeit: $\pm 1,4\%$ bei einem Massenstrom von 1 kg/h) wird der Luftmassenstrom auf den geforderten Massendurchfluss geregelt. Zur Einstellung des Wasserdampfgehalts der in den Reaktor einströmenden Luft wird der Luftstrom aufgeteilt. Ein Teilstrom wird über einen Befeuchter geleitet und ein Teilstrom über einen Bypass. Anschließend werden beide Luftströme wieder vermischt und der Taupunkt der Luft mit einem Taupunktsensor gemessen. Über ein Stellventil wird der Luftmassenstrom durch den Bypass geregelt, so dass sich beim Mischen der Luftströme die geforderte Taupunkttemperatur einstellt. Soll keine Befeuchtung der Luft erfolgen, wird das Magnetventil zum Befeuchter geschlossen und der gesamte Luftstrom strömt über den Bypass.

Über eine elektrisch beheizte Rohrleitung wird der Luftstrom auf die gewünschte Lufteintrittstemperatur erwärmt und dem Reaktor zugeführt. Nach Verlassen des Reaktors

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

wird mit einem zweiten Taupunktsensor gleicher Bauart die Taupunkttemperatur gemessen und die Luft anschließend in die Umgebung abgelassen.

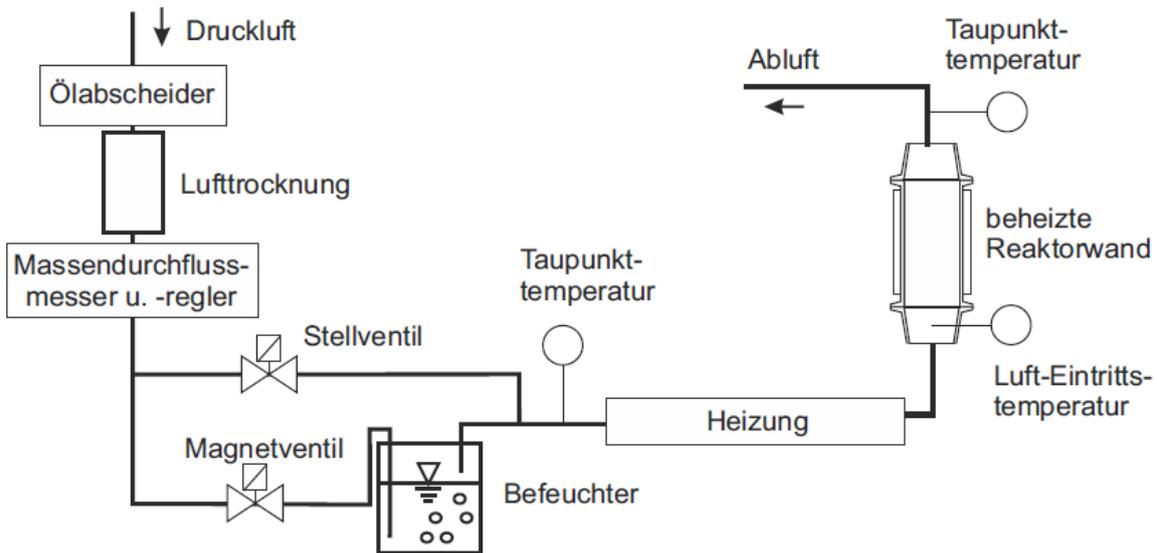


Abbildung 27: Schema der Versuchsanlage für die Adsorptionsuntersuchungen im Festbett

Mit der oben beschriebenen Apparatur wurden Adsorptionsuntersuchungen bei einer Lufteintrittstemperatur von 30 °C und einem Wasserdampfpartialdruck von 20 mbar bzw. 10 mbar durchgeführt. Die vorangegangene Desorption erfolgte mit einem trockenen Luftstrom bei 140 °C.

Abbildung 27 zeigt exemplarisch während eines Desorptions-Adsorptionszyklus die Reaktoreintrittstemperatur (T_{ein}) die Temperaturen im Reaktor ($T_{1,1} \dots T_{4,1}$) sowie die Feuchte am Ein- und Austritt des Reaktors ($x_{\text{in}}, x_{\text{aus}}$).

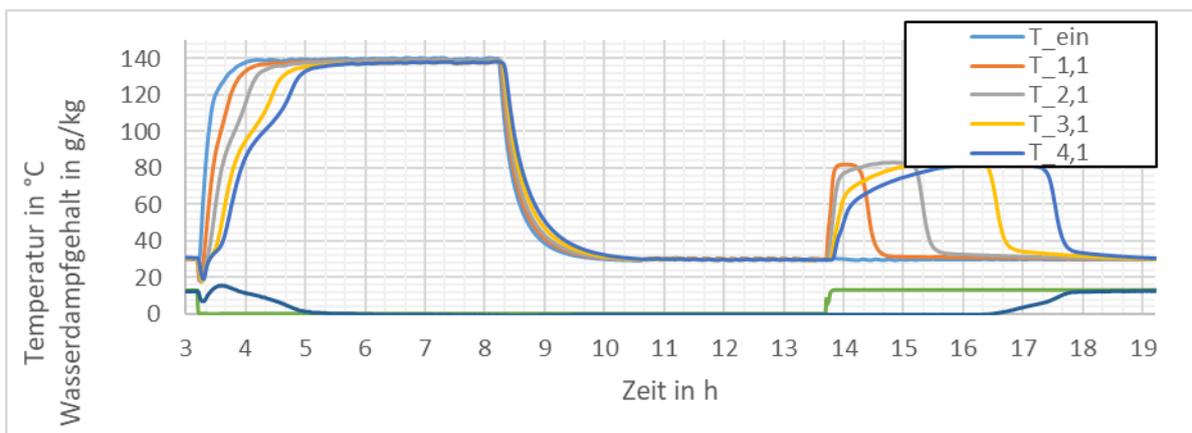


Abbildung 28: Temperatur der einströmenden Luft (T_{ein}) und im Festbettreaktor ($T_{1,1} \dots T_{4,1}$) sowie die Feuchte der in den Reaktor ein- und ausströmenden Luft ($x_{\text{in}}, x_{\text{aus}}$) während eines Desorptions-Adsorptionszyklus

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Die Desorption beträgt 5 h, so dass sichergestellt ist, dass im gesamten Reaktor die Desorption abgeschlossen und das Material auf die Desorptionstemperatur erwärmt worden ist. Anschließend wird das Material auf 30 °C abgekühlt und konditioniert, so dass vor Beginn der Adsorption eine einheitliche Temperatur im Reaktor vorliegt. Die Adsorption dauert – je nach zugeführter Feuchte der Luft – zwischen 6 und 14 h.

Die experimentellen Messungen im Festbettreaktor sind mit Wärmeverlusten an die Umgebung behaftet. Um die Höhe der Wärmeverluste abschätzen zu können wurden weitere Messungen durchgeführt. In Temperaturstufen wurde die Eintrittstemperatur in den Reaktor von 40 °C auf 100 °C erhöht. Die Eintrittstemperatur wurde so lange konstant gehalten, bis sich im Festbett ein stationärer Zustand eingestellt hat (vergl. Abbildung 29).

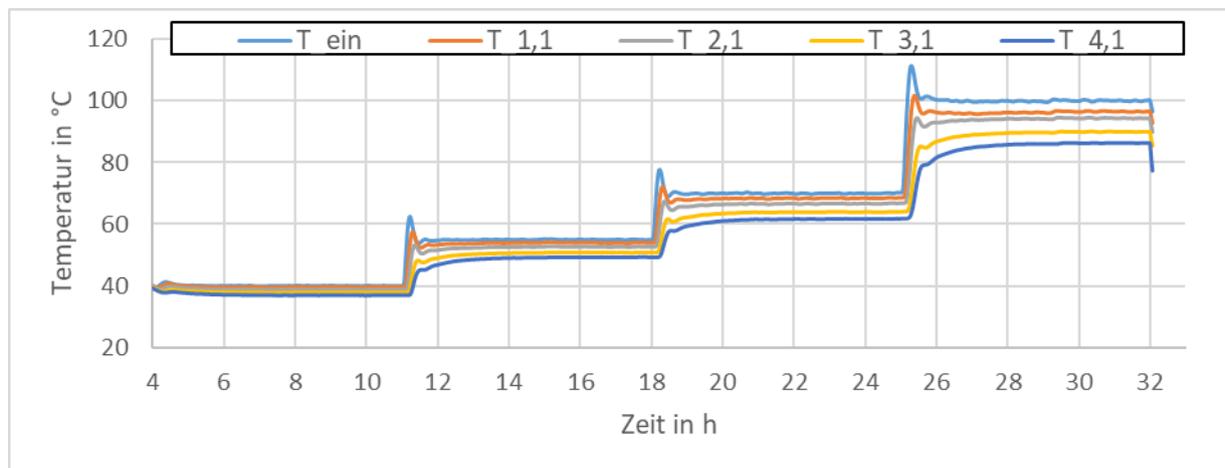


Abbildung 29: Temperatur der einströmenden Luft (T_{ein}) und im Festbettreaktor ($T_{1,1}, \dots, T_{4,1}$) während einer Messung zur Bestimmung der Wärmeverlustrate

Aus den stationären Messpunkten wurde durch einen linearen Fit eine Wärmeverlustrate „ $kA = f(T_R, M, T_{\text{amb}})$ “ ermittelt, so dass gilt:

$$\Delta \dot{Q}_R = \dot{Q}_{\text{Verl}}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_L \cdot c_{p,L} \cdot (T_{4,1} - T_{\text{ein}}) = kA \cdot (T_{R,M} - T_{\text{amb}})$$

Formel 1

mit $T_{R,M} = 0.25 \cdot (T_{1,1} + T_{2,1} + T_{3,1} + T_{4,1})$

In Formel 1 ist $\Delta \dot{Q}_R$ die Energiedifferenz zwischen ein- und ausströmender Luft, \dot{Q}_{Verl} der Wärmeverlust über den Reaktor, \dot{m}_L der Luftmassenstrom, $c_{p,L}$ die spezifische Wärmekapazität der Luft, $T_{R,M}$ die mittlere Reaktortemperatur und T_{amb} die Umgebungstemperatur.

Mit der aus den stationären Messungen bestimmten Wärmeverlustrate „ kA “ kann für die dynamischen Adsorptionsuntersuchungen eine adiabate Temperatur $T_{4,\text{ad}}$ anhand folgender Gleichung berechnet werden:

$$\dot{m}_L \cdot c_{p,L} \cdot (T_{4,ad} - T_{ein}) = kA \cdot (T_{R,M} - T_{amb}) + \dot{m}_L \cdot c_{p,L} \cdot (T_{4,1} - T_{ein}) \quad \text{Formel 2}$$

Exemplarisch ist in Abbildung 30 für eine Wärmeverlustmessung die gemessene Temperatur $T_{4,1}$ und die berechnete adiabate Austrittstemperatur $T_{4,ad}$ über der Temperatur der in den Reaktor einströmenden Luft aufgetragen.

Die berechnete adiabate Temperatur $T_{4,ad}$ entspricht nahezu der Reaktoreintrittstemperatur. Dies bestätigt eine gute Approximation der Wärmeverluste. Die gemessene Temperatur $T_{4,1}$ liegt vor allem bei höheren Temperaturen deutlich unter der adiabaten Temperatur (um 15 K bei einer Eintrittstemperatur von 100 °C in den Reaktor). Dies zeigt, dass insbesondere bei höheren Temperaturen die Wärmeverluste über den Reaktor nicht zu vernachlässigen sind.

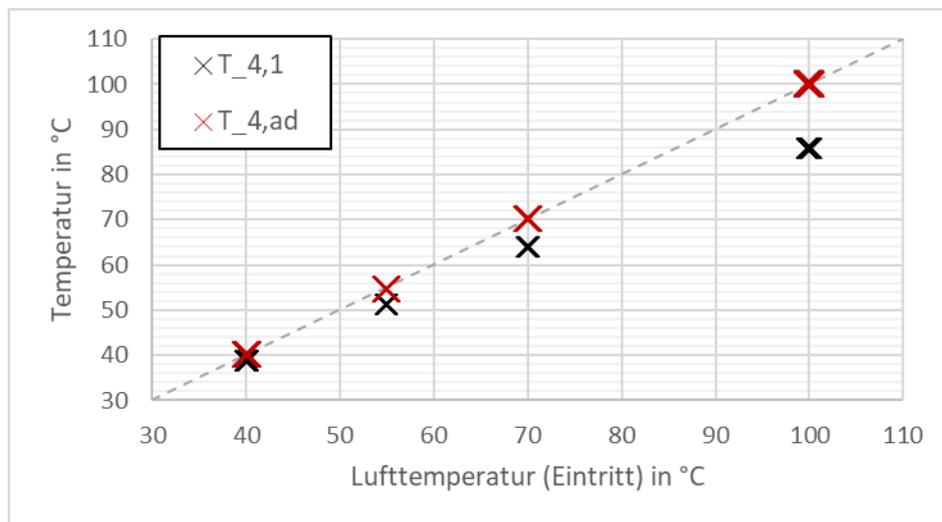


Abbildung 30: Gemessene Temperatur ($T_{4,1}$) und berechnete adiabate Temperatur $T_{4,ad}$ aufgetragen über die Reaktoreintrittstemperatur (T_{ein})

Adsorptionsuntersuchung

In den Abbildung 31 bis Abbildung 33 sind die zeitlichen Temperaturverläufe an den Messstellen TR1,1 bis TR1,4 im Festbettreaktor dargestellt. Die Positionierung der Messstellen ist ebenfalls dargestellt. Es handelt sich hier um die Temperaturprofile in der radialen Mitte des Reaktors an vier unterschiedlichen axialen Höhen. Die Temperatur der einströmenden Luft (T_{ein}) betrug bei den Experimenten 30 °C, der Volumenstrom betrug 1 kg/h. Der Wasserdampfpartialdruck wurde variiert betrug 10, 15 oder 20 mbar. Folgendes ist zu beobachten:

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

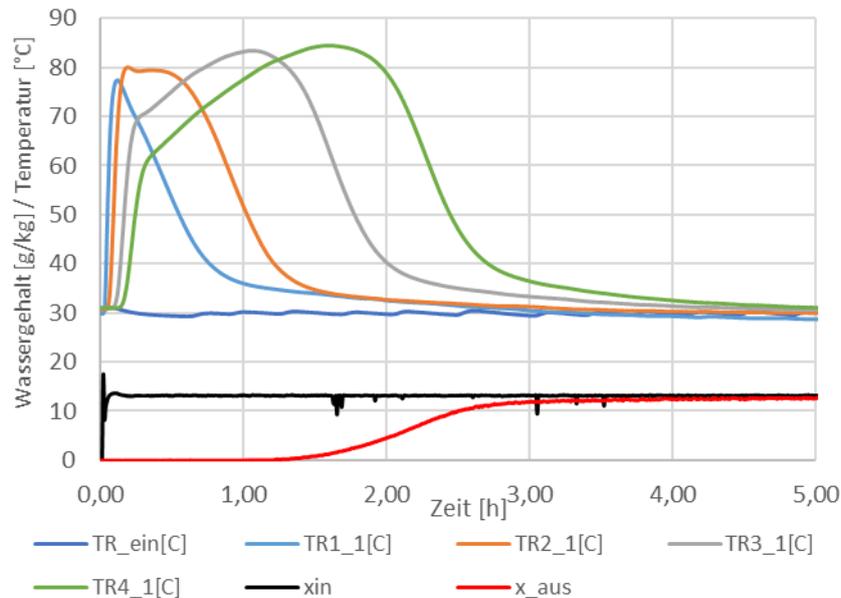


Abbildung 31: Temperaturprofile in der Zeolithschüttung während der Adsorption an den Messstellen TR1,1 bis TR1,4 und der Wassergehalt der ein- und ausströmenden Luft (x_{in} , x_{aus}) während einer Adsorptions-untersuchung bei $p = 20$ mbar. Material: OffSor 4A

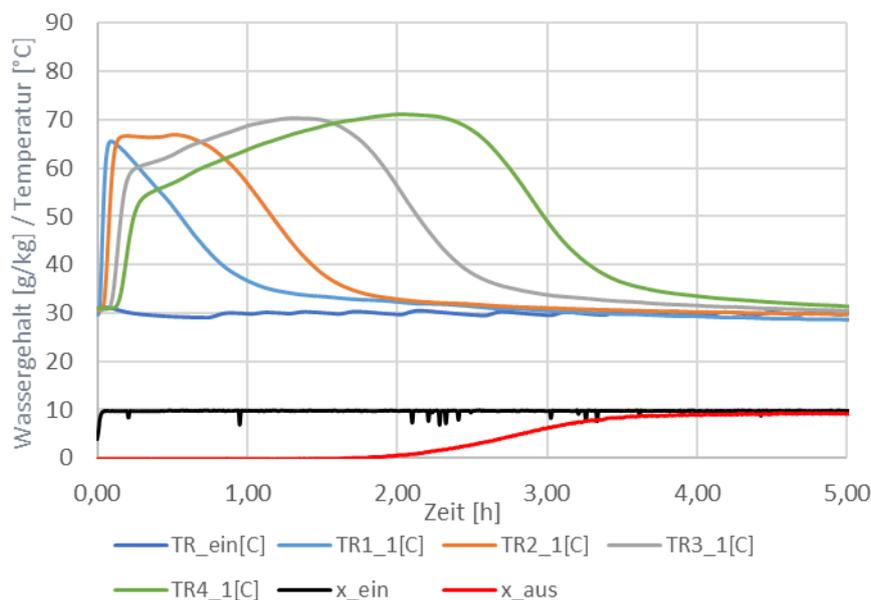


Abbildung 32: Temperaturprofile in der Zeolithschüttung während der Adsorption an den Messstellen TR1,1 bis TR1,4 und der Wassergehalt der ein- und ausströmenden Luft (x_{in} , x_{aus}) während einer Adsorptions-untersuchung bei $p = 15$ mbar. Material: OffSor 4A

Das Adsorptionsverhalten der untersuchten Zeolithe ist gekennzeichnet durch steile Temperaturprofile und eine deutlich erkennbare Wanderung der Temperaturfront im Reaktor. Dieses Verhalten ist typisch für Adsorbentien mit sehr hoher Adsorptionsleistung. Die sich einstellenden Temperaturerhöhung ist abhängig von der pro Zeit aufgenommenen

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Wassermenge. In den ebenfalls in den Abbildungen sechs bis acht dargestellten Wassergehalt der Luft am Eintritt in den Reaktor (x_{ein}) und am Austritt aus dem Reaktor (x_{aus}) ist zu erkennen, dass nahezu der gesamte Wassergehalt der Luft von den Zeolithen während langer Zeiträume aufgenommen wird. Daraus resultiert eine große Temperaturzunahme. Im Experiment mit 20 mbar Wasserdampfpartialdruck im Zulauf des Reaktors beträgt die Temperaturerhöhung im Maximum ca. 55 K. Dies ist gleichbedeutet mit einer hohen Adsorptionsenthalpie. Der für Zeolithe des Typs 4A typische Wert von ca. 3500 kJ/kg bestätigt sich in den Messungen.

Entsprechend des geringeren pro Zeit zugeführten Wassers in den Experimenten mit 15 bzw. 10 mbar ist die Temperaturerhöhung geringer. Die Adsorptionszeiten verlängern sich dem entsprechend.

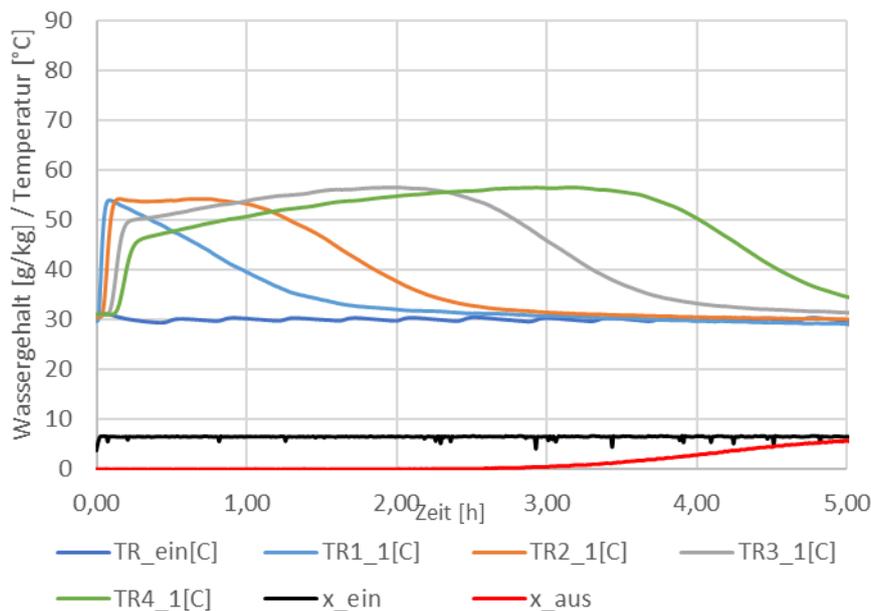


Abbildung 33: Temperaturprofile in der Zeolithschüttung während der Adsorption an den Messtellen TR1,1 bis TR1,4 und der Wassergehalt der ein- und ausströmenden Luft (x_{in} , x_{aus}) während einer Adsorptionsuntersuchung bei $p = 10$ mbar. Material: OffSor 4A

Der Wasserdampfpartialdruck hat nur geringen Einfluss auf die maximal erreichte Wasserbeladung der Zeolithe. Dies macht der Vergleich der gemessenen Wasserbeladung für die unterschiedlichen Experimente in Abbildung 34 deutlich. Mit zunehmendem Partialdruck steigt die maximale Beladung in dem hier untersuchten Temperaturbereich geringfügig an. Die gute Reproduzierbarkeit der Experimente zeigt der Vergleich der Messungen mit gleichen Zuströmbedingungen.

Der absolute Wert der Wasseraufnahme je Gewicht ist im Vergleich zu Zeolithe anderer Hersteller eher gering. Die hier untersuchten Zeolithe erreichen eine Wasseraufnahme von ca. 12,5 bis 13,5 Gewichtsprozent. Materialien der Firma CWK, die in einem speziellen Verfahren binderfrei hergestellt werden erreichen Wasserbeladungen von 20 bis 24 % bei gleichen Adsorptionsbedingungen.

Dem entsprechend fällt auch die volumetrische Energiespeicherdichte gering aus. Zur Bestimmung der Energiespeicherdichte wird der Wärmestrom der sich aus der

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Temperaturerhöhung zwischen Reaktoreintrittstemperatur und Reaktoraustrittstemperatur ergibt für das Adsorptionsexperiment aufsummiert. Die so berechnete Wärme wird nun auf der Volumen der Zeolithschüttung bezogen. In Abbildung 35 Abbildung 34 ist dieser Wert für die Experimente in Form der blauen Balken dargestellt. Die gelben Balken berücksichtigen die Wärmeverluste des Reaktors und repräsentieren die tatsächlich freigesetzte Adsorptionswärme.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die untersuchten Zeolithe eine hohe Adsorptionsleistung und eine hohe Adsorptionsenthalpie haben, wie sie für den Zeolith Typ 4A bekannt sind. Die Wasseraufnahmekapazität ist jedoch im Vergleich zu anderen marktverfügbaren 4A Zeolith-Typen gering.

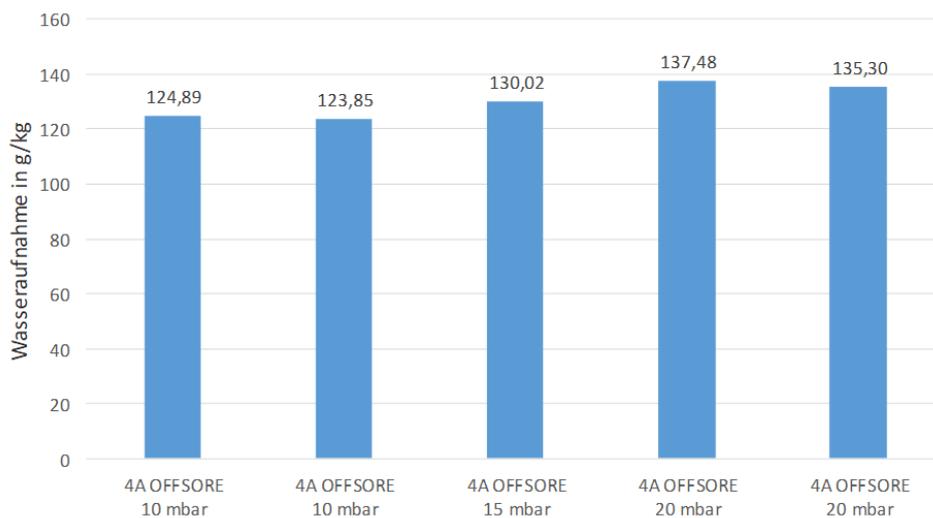


Abbildung 34: Wasseraufnahme (Beladung) der Speichermaterialien in Gramm Wasser pro kg Speichermaterial für die Adsorptionsuntersuchung bei einem Wasserdampfpartialdruck von $p = 10$, $p = 15$ mbar bzw. von $p = 20$ mbar

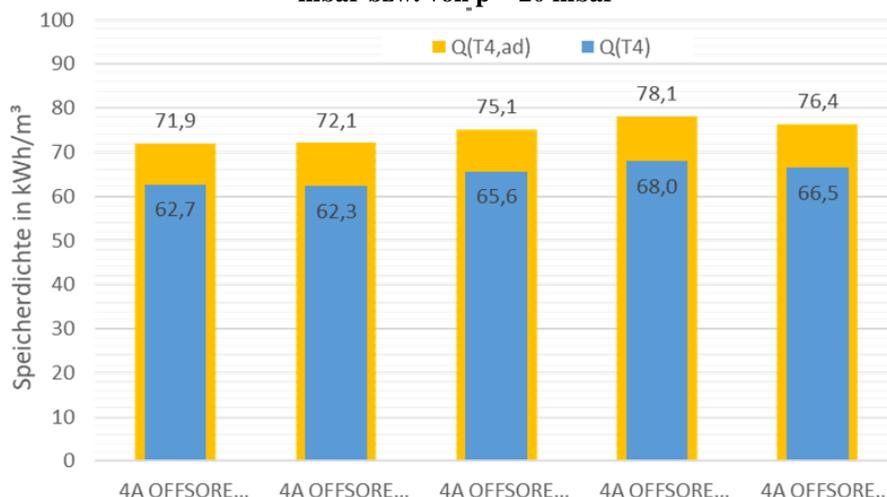


Abbildung 35: Volumetrische Speicherdichten der untersuchten Speichermaterialien berechnet mit der gemessenen Temperatur $T_{4,1}$ ($Q(T_4)$) und der berechneten adiabaten Temperatur $T_{4,ad}$ ($Q(T_{4,ad})$). Der Wasserdampfpartialdruck der Luft am Reaktoreintritt beträgt $p = 10$ mbar, $p = 15$ mbar bzw. $p = 20$ mbar

3 Math. Modellierung und Simulationen

Es wurden mathematische Modelle eines Sorptionsreaktors in Form eines stillstehenden Zylinders und einer sich rotatorisch bewegten Trommel erstellt. Die Modellierung wurde auf zwei unterschiedlichen Grundsätzen aufgebaut, einer physikalischen Modellierung mittels phänomenologischen Grundgleichungen und einer datenbasierten Modellierung welche auf Messdaten des zu untersuchenden Prozesses beruht.

Physikalische Modelle und Abgleich mit Messdaten

Um ein hohes Einsparungspotential beim Ausstoß von klimarelevanten Gasen für industrielle Anwendungen zu nutzen, liegt der Fokus hier auf einem Wärmespeichersystem mit Sorptionstechnologie. In dieser Ansicht ist der Inhalt dieses Arbeitspakets die Analyse der Feuchtigkeitsadsorption in Zeolith, der in eine vertikale zylindrische Röhre gefüllt ist. Aufgrund der Adsorption des Wassers in den Zeolith, reduziert sich in Folge die Luftfeuchtekonzentration in der Umgebung. Dadurch erhöht sich auf der anderen Seite die Zeolith-Temperatur. Im Falle des Umkehrprozesses sinkt die Temperatur bei gleichzeitiger Wasserabgabe. Um diese Prozesse mathematisch zu beschreiben, wurde sowohl der 1D Phänomenologische Modellierung als auch der 3D multi-fluid Modellierung verfolgt.

Phänomenologische Modellierung

Diese Modelle sind von Vorteil für schnelle Simulationen, die in der Optimierungsschleife verwendet werden können. Hier wurde ein 1D Modell der Strömung durch das Schüttbett erstellt, das den Wärme- und Massentransfer mit Adsorption beschreibt. Das Modell wurde in der Modelica Umgebung implementiert [6] und die grundsätzliche Funktionsweise getestet. Eine endgültige Validierung wurde noch nicht durchgeführt, da noch nicht genügend Messdaten verfügbar waren. Dieser Schritt wird nach Eintreffen der experimentellen Daten abgeschlossen.

Im entwickelten Modell tritt die feuchte Luft in den Schüttbett-Zylinder mit einer gegebenen Geschwindigkeit, Temperatur und absoluten Luftfeuchte ein. Wärme- und Massentransfer findet zwischen der Luft (Fluid) und dem Zeolith (Festkörper) statt. Zusätzlich zu den grundlegenden Transportmechanismen wird bei dieser Anwendung ein Teil der Luftfeuchtigkeit (Wassergehalts) in den Zeolith hineinadsorbiert. Diese nicht isotherme inkompressible Strömung wird im Modell durch die Erhaltungsgleichungen von Impuls, Energie und Feuchtigkeitskonzentration beschrieben. Ergänzt wird die Modellierung mit dem Langmuir-Ansatz zur Beschreibung des Gleichgewichts-Adsorptions-Prozesses [7]. Im Anschluss wurden die Gleichungen diskreditiert und iterativ gelöst. Dies ist eine typische Vorgangsweise für Transportgleichungen in Standardformulierung und besteht aus einem lokalen Ableitungsterm, den konvektiven und diffusiven Flüßen und dem Wärme- und Massenquellterm [8].

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Die Impulsgleichung im Falle einer Axialströmung durch das Schüttbett reduziert sich zur Ergun-Beziehung zwischen der allgemeinen Oberflächengeschwindigkeit U und des gemittelten Druckverlustes ΔP über die Schüttbettlänge L [9]:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} \mu U + \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} \rho U^2 \quad \text{Formel 3}$$

Dabei sind μ und ρ die Viskosität und Dichte des Fluides, d_p ist der charakteristische Durchmesser der Zeolith-Partikel und ε ist die Porosität des Schüttbetts. Die Erhaltungsgleichung für die Luftfeuchtigkeit wird hier durch die Transportgleichung für die Konzentration entlang der x-Achse (Axial-richtung) beschrieben:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \dot{m}_{ad} \quad \text{Formel 4}$$

mit C der Konzentration der absoluten Luftfeuchte, D_c dem Dispersions-Koeffizienten des Zylinders, der die molekulare Diffusion und die turbulente Durchmischung kombiniert. Die Größe \dot{m}_{ad} repräsentiert die adsorbierte Feuchtigkeit. Die Erhaltungsgleichung für die Energie reduziert sich analog zu einer Transportgleichung für die Temperatur entlang der axialen Richtung:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p U \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Delta H \dot{m}_{ad} \quad \text{Formel 5}$$

Dabei ist ΔH die Absorptionswärme, während ρ , c_p und λ die äquivalente Dichte, Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit darstellt. Letztere ist der Volumen-Mittelwert zwischen den korrespondierenden Werten für Zeolith und feuchte Luft, die aus den Korrelationen für Feuchte Luft berechnet wurden [10]. Der Adsorptionsprozess ist durch die Langmuir-Isotherme charakterisiert, die die Menge des Adsorbens (Feuchtigkeit), welche in das Adsorbat (Zeolith) adsorbiert wird, unter Gleichgewichtsbedingungen beschreibt:

$$C_{ad} = K_0 \frac{CK_1 e^{K_2/T}}{1 + CK_1 e^{K_2/T}} \quad \text{Formel 6}$$

K_0 , K_1 und K_2 sind dabei die Langmuir-Konstanten, die experimentell bestimmt werden. Mit der in dieser Weise beschriebenen Adsorption kann der Massentransfer (Feuchtigkeitstransport) zwischen Luft und Zeolith mit einem linearen Modell einer treibenden Kraft dargestellt werden:

$$\dot{m}_{ad} = \alpha(C - C_{ad}) \quad \text{Formel 7}$$

α ist hierbei der Koeffizient des Massentransfers, der mittels Nusselt-Korrelationen erhalten wird.

Multi-fluid Modellierung

Für eine genauere und detailliertere Analyse des hier betrachteten Falles, in dem die Festbett (Zeolith) durch das Fluid (feuchte Luft) innerhalb des rotierenden Zylinders (Trommel) durchgeblasen wird, gibt es unterschiedliche Ansätze zur numerischen Modellierung von Mehrphasenströmungen. Die genaueste ist die Auflösung der Bewegung

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

von interagierenden Phasen durch die direkte numerische Simulation oder die Verfolgung von Partikeln (Lagrange-Ansatz). Allerdings sind diese Methoden für industrielle Anwendungen rechnerisch zu teuer. Der rechnerisch tragbare Ansatz besteht darin, beide Phasen (fest und flüssig) als Kontinuum zu behandeln und damit ihre bestimmenden Bewegungsgleichungen gemittelt zu lösen.

In diesem Euler-Euler Ansatz wird der Strömungsverlauf als Multi-Fluid [11] behandelt. Jede Phase wird separat betrachtet, und der Satz von Bewegungsgleichungen besteht aus der Kontinuitätsgleichung (pro Phase):

$$\frac{\partial(\alpha_1\rho_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1\rho_1\vec{u}_1) = R_{12} = 0$$

Formel 8

$$\frac{\partial(\alpha_2\rho_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_2\rho_2\vec{u}_2) = R_{21} = 0$$

und die Impulsgleichung (wieder, pro Phase):

$$\frac{\partial(\alpha_1\rho_1\vec{u}_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1\rho_1\vec{u}_1\vec{u}_1) = \nabla \cdot \underline{S}_1 + (\alpha_1\rho_1\vec{g}) + \vec{I}_1$$

Formel 9

$$\frac{\partial(\alpha_2\rho_2\vec{u}_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_2\rho_2\vec{u}_2\vec{u}_2) = \nabla \cdot \underline{S}_2 + (\alpha_2\rho_2\vec{g}) - \vec{I}_2$$

wobei $U_{1,2}$, $\alpha_{1,2}$ und $\rho_{1,2}$ die Geschwindigkeit, Dichte und den Volumenanteil der flüssigen bzw. festen Phase darstellen. Der Spannungstensor $S_{1,2}$ ist in Analogie zur Formulierung für die Fluidphase definiert (bezogen auf die Bulk-Viskosität), und die Interaktionsmechanismen zwischen den Phasen werden in einem mittleren Sinne ($I_{1,2} = \text{Drag} + \text{Lift} + \text{turb. disp} + \text{andere Effekte}$) durch validierte Korrelationen der einzelnen Effekte behandelt. Das Beispiel einer solchen Behandlung der Interaktion zwischen den Phasen, die typischerweise in diesem Ansatz angewendet wird, ist die Definition der Widerstandskraft F_D nach dem Schiller-Neumann-Modell:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_f A |V_r| V_r$$

Formel 10

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687})$$

Wobei der Widerstandskoeffizient C_D durch eine experimentell validierte Funktion der lokalen Reynoldszahl Re (basierend auf der Relativgeschwindigkeit V_r) ausgedrückt wird.

Man kann zwischen drei verschiedenen Formen der Festbettbewegung bei rotierenden Zylindern unterscheiden: slipping - Rutschen, tumbling - Taumeln, cataracting - Kataraktbildung [12]. Die wichtigsten Parameter für diese Bewegungscharakterisierung sind die Froude-Zahl, $Fr = \omega^2 R / g$, und der Befüllungsgrad, H/R (hier g ist die Schwerkraftbeschleunigung, ω ist die Winkelgeschwindigkeit, R ist der Trommelradius, H ist die Festbetthöhe). In den meisten praktischen Anwendungen ist die Mischwirkung der Taumelbewegung sehr wünschenswert. Daher soll hier geprüft werden, inwieweit diese Erkenntnisse im OFFSOR-Fall angesprochen werden können.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Im Mittelpunkt dieser Untersuchung ist die Relativbewegung zwischen dem Zeolith und der feuchten Luft in der rotierenden Trommel des OFFSOR-Aufbaus, und zu diesem Zweck wurde die Simulation mit dem Solver durchgeführt, der auf der vorgestellten Euler-Euler Ansatz von Mehrphasenströmungen basiert und in der Open-Source CFD-Bibliothek OpenFoam [13] implementiert ist. Um die Zylinderrotation zu simulieren, die Zentrifugalkraft wurde durch den Quellterm behandelt. Andere Simulationsparameter werden so gewählt, dass sie ungefähr dem OFFSOR-Aufbau entsprechen (in dieser Sicht waren einige Annahmen erforderlich: z.B. in Abwesenheit der Zeolith-Daten wurden die notwendigen Feststoffeigenschaften des Sandes angenommen), so dass sich diese Vergleichsstudie in den veröffentlichten Publikationen widerspiegeln kann. Die erhaltenen Ergebnisse, die die Strömungsprozesse innerhalb des OFFSOR-Aufbaus qualitativ beschreiben, entsprechen der allgemeinen Beschreibung in der Literatur [14].

Als erster Schritt in der vorliegenden Analyse wurde die Festbettbewegung im rotierenden Zylinder als 2D-Fall analysiert (Abbildung 36). Die Luftzufuhr wurde in diesem Fall nicht berücksichtigt, die Froude-Zahl wurde über drei Festbettbewegungsarten variiert (ω) und zwei Befüllungsgrade (H/R) wurden untersucht.

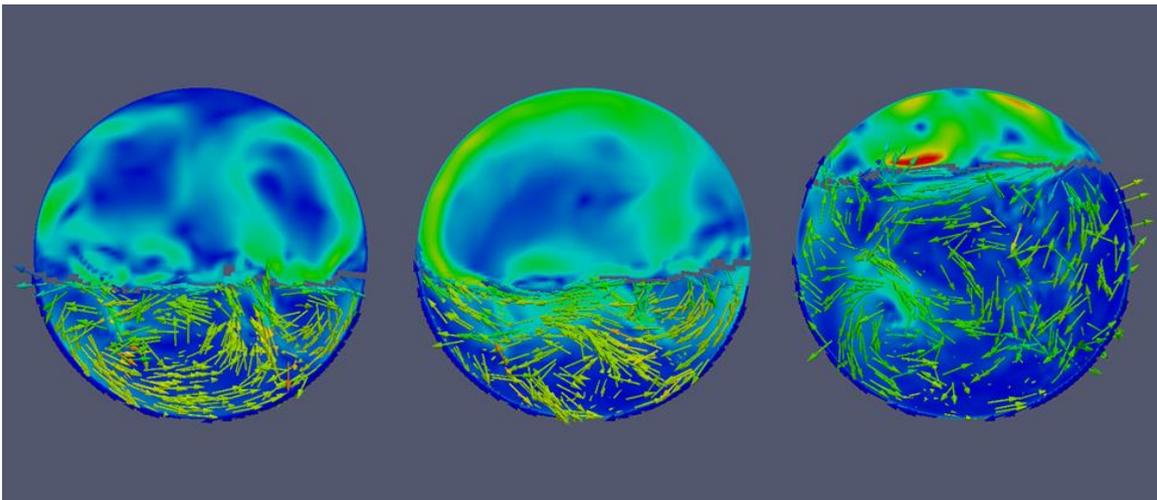


Abbildung 36: 2D-Fall, Festbett innerhalb des rotierenden Zylinders; $Fr \sim 10^{-4}$, $H/R=0,9$ (links); $Fr \sim 10^{-2}$, $H/R=0,9$ (Mitte); $Fr \sim 10^{-2}$, $H/R=1,8$ (rechts)

Bei niedrigen Froude-Zahlen dominiert der Festbettbereich mit geringer Effektivgeschwindigkeit U (nahe der Zylinderwand) die Bettbewegung. Durch die Erhöhung der Froude-Zahl fördert das Taumeln die Durchmischung, was durch die Strömungsstrukturen der Relativgeschwindigkeit U_r sichtbar wird. Andererseits schwächt sich durch die Erhöhung des Befüllungsgrades die Interaktion zwischen dem Bereich nahe der freien Oberfläche und dem Rest des Festbettes ab.

Für den 3D-Fall, bei dem die Luft durch das Festbett innerhalb des rotierenden Zylinders geblasen wurde (Abbildung 37), wurde der Luftenlass niedrig im Festbettbereich, und der Luftauslass diagonal hoch im Luftbereich platziert. Die Einströmgeschwindigkeit wird durch das Verhältnis zwischen dem Volumen des Festbettes und der volumetrischen

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Einströmgeschwindigkeit $AX=V_{bed}/\phi_{in}$ ausgedrückt, die der Luftwechselzeit innerhalb des Festbettes entspricht (im Idealfall die doppelte Durchlaufzeit).

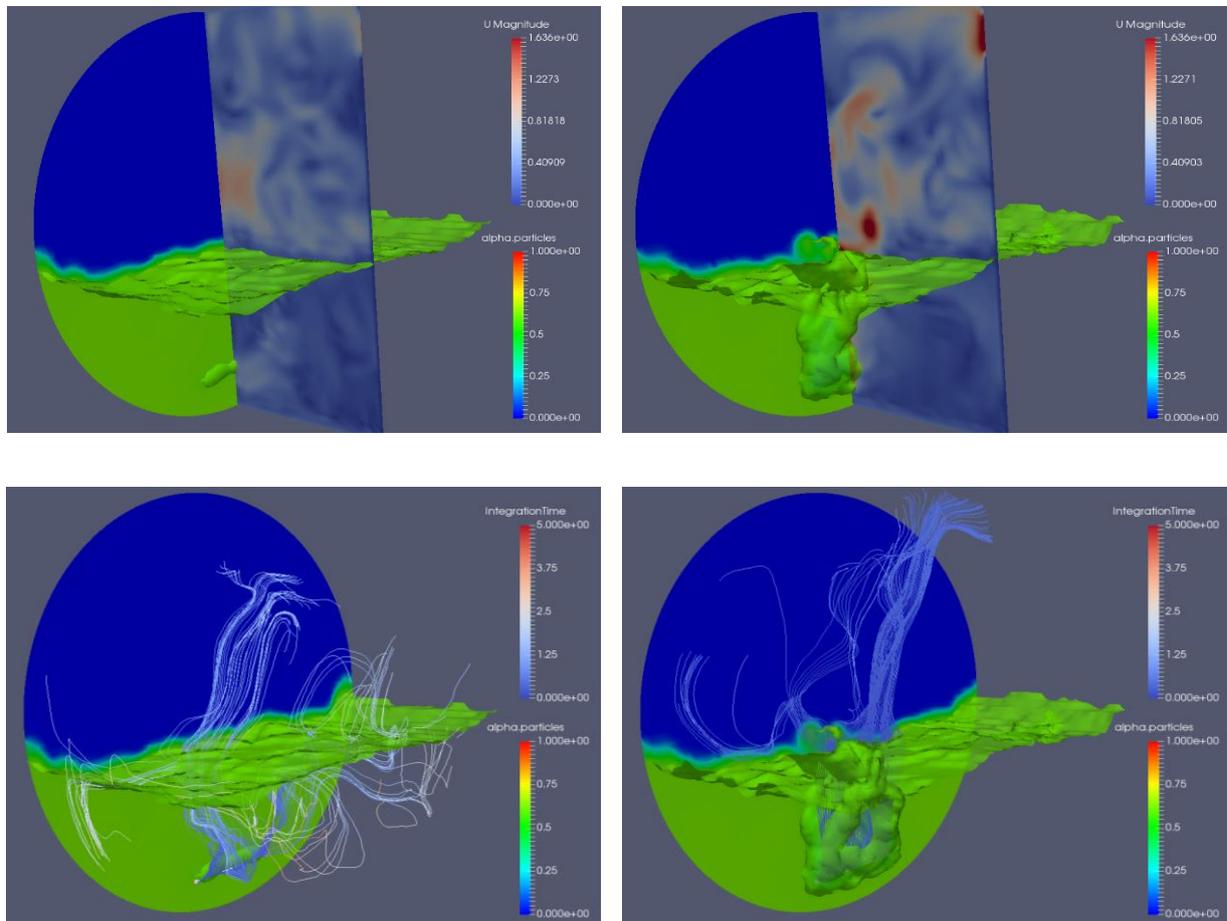


Abbildung 37: 3D-Fall, Luftströmung durch das Festbett innerhalb des rotierenden Zylinders; Fr~10-2, H/R=0.9, AX=8 (links); Fr~10-2, H/R=0.9, AX=4 (rechts)

Durch die Einstellung niedriger Luft Einströmgeschwindigkeiten ist die Ausbreitung des Luftstroms im Inneren des Festbettes kurz, und die Festbettbewegung wird nicht gestört. Mit zunehmender Luftzufuhrgeschwindigkeit wird die Mischung gefördert und die Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen erhöht.

Datenbasierte Modelle und Abgleich mit Messdaten

Der Stand des Wissens in der wissenschaftlichen Literatur wurde aufgearbeitet und in Form eines Reports dokumentiert. Wie erwartet konnten einige Modelle gefunden werden, die das stationäre Verhalten (Sorptionsgleichgewichte) beschreiben, jedoch sind kaum dynamische Modellierungen vorhanden. Eine Ausnahme stellt das sogenannte „Linear Driving Force“ Modell dar, bei dem davon ausgegangen wird dass sich die Geschwindigkeit der Beladungsänderung aus der Entfernung von der jeweiligen Gleichgewichtslage ergibt.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Ein Simulationsmodell basierend auf dem Linear Driving Force Ansatz wurde vom Projektpartner ITW Stuttgart in Form eines TRNSYS Modells eingebracht. Dieses Modell wurde für einen Labor-Festbettreaktor entwickelt, weshalb eine entsprechende Anpassung notwendig ist um auch den kontinuierlichen Sorptionsprozess in der rotierenden Trommel zu beschreiben. Das TRNSYS Modell wurde zunächst in MATLAB/Simulink neu aufgebaut, da die weiterführenden Analyseverfahren und Regelungen zielführender in diesem Softwarepaket durchzuführen sind.

Simulationsmodell

Die Grundlage des entwickelten numerischen Modells ist ein offenes Sorptionsspeichersystem mit einem Zeolith 13XBF-Bett, wie in [Mette2014] beschrieben. Ein axialer Luftstrom treibt den Sorptionsprozess an und ermöglicht das direkte Be- und Entladen des Sorptionsmaterials. Der zylindrische Speicher ist für numerische Simulationszwecke in zylindrische Segmente (Knoten) unterteilt zwischen denen eine Wärmeleitung und Konvektion stattfindet. Um die numerischen Simulationen durchzuführen, basiert das Modell auf den folgenden Annahmen:

- Das Modell geht von einem eindimensionalen Ansatz aus, bei dem kein radialer Einfluss berücksichtigt wird.
- Es wird ein homogenes Modell für Speichermaterial und Luftstrom verwendet, d.h. es wird davon ausgegangen, dass die Luft jeden Speicherknoten mit der Knotentemperatur $T_S^{(i)}$ verlässt, wobei (i) die Knotenzahl darstellt.
- Die Reaktionsausbeute wird nur durch das Sorptionsgleichgewicht des Materials begrenzt, so dass die Ungleichungen $X_S \leq X_{S,eq}(T_S, X_{Gin})$ für die Adsorption und $X_S \geq X_{S,eq}(T_S, X_{Gin})$ für die Desorption immer erfüllt sind wobei X_G die absolute Feuchtigkeit der in den Knoten einströmenden Luft ist.
- Es wird eine ideale Kinetik angenommen, so dass das Gleichgewicht immer erreicht wird, entweder am Eingang oder am Ausgang des Systems.
- Die spezifischen Wärmekapazitäten des Festkörpers und der Luft sind unabhängig von der Feuchtigkeit und der Temperatur im System.

Bei der Modellierung einer rotierenden Trommel anstelle eines statischen Zylinders mit Festbett wird davon ausgegangen, dass das Material immer optimal gemischt ist. Das bedeutet, dass die Wasseraufnahme des Materials für alle Partikel gleich ist, also auch die erzeugte Wärme gleich ist und insbesondere die Beladung des Materials mit Feuchte gleich ist. Unter dieser Annahme kann die rotierende Trommel durch das Modell für ein Festbett mit nur einem einzigen Knoten approximiert werden.

Es wurden in weiterer Folge mehrere Modellvarianten, basierend auf den nachfolgend beschriebenen mathematisch/physikalischen Grundgleichungen erstellt. Die Modelle unterscheiden sich in der Anzahl der Knoten (axiale Diskretisierung) wobei das Einknotenmodell für die rotierende Trommel und die Mehrknotenmodelle für die Festbettspeicher gedacht sind. Alle Modelle verwenden als dynamische (frei Wählbare) Eingangssignale

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

- Massenstrom einströmende Luft
- Absolute Feuchte einströmende Luft
- Temperatur einströmende Luft

Um daraus die folgenden Ausgangsgrößen zu berechnen

- Beladung des Zeolith mit Wasser (für jeden Knoten)
- Temperatur (für jeden Knoten)
- Feuchtigkeit der austretenden Luft (für jeden Knoten)

Diese Berechnung basiert auf den folgenden Grundgleichungen

- Wassermassenausgleich im Speichermaterial

$$\frac{dX_S}{dt} = \frac{mG_0}{M_{S_0}} * (X_{G_{in}} - X_{G_{out}}) \quad \text{Formel 11}$$

Dies stellt die zeitliche Änderung der Wasserbeladung des Zeoliths durch die Adsorptions- oder Desorptionsprozesse dar. Mit anderen Worten, es stellt die Reaktionsgeschwindigkeit dar.

- Luftfeuchtigkeit entlang der Knotenlänge

$$\frac{dx_G}{dl} = \frac{\rho_{S_0} * A_S}{mG_0} * K_{LDF} * (X_S - X_{S,eq}) \quad \text{Formel 12}$$

Demnach ergibt sich die Luftfeuchtigkeit am Ausgang des Speicherknötens x_G die die Berechnung der Reaktionsrate ermöglicht, welche wiederum angibt, wie schnell der Wassermassenstrom aus dem Luftstrom adsorbiert wird.

- Sorptionskinetik

Die Leistung von Sorptionswärmespeichern hängt von der Kinetik des Prozesses im Adsorptionsbett ab. In dieser Studie das *linear driving force* modell verwendet. Dieses Modell stellt eine bessere Schätzung des internen Stoffübergangs des Wasserdampfes innerhalb der Zeolithkugeln oder der Sorptionsrate im Vergleich zum Gleichgewichts-Diffusionsmodell dar. Die Gleichung ist

$$\frac{dX_S(l)}{dt} = K_{LDF} * (X_{S,eq}(T_S, X_G(l)) - X_S) \quad \text{Formel 13}$$

- Energiebilanzen: Die Energiebilanzgleichung ist

$$\frac{dT_S}{dt} = \frac{1}{(M_{S_0} * c_{pS_0} + M_{S_0} * x_S * c_{pS1})} = \Sigma dQS \quad \text{Formel 14}$$

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

wobei die spezifische Wärmekapazität des Zeoliths in den Anteil des trockenen Zeoliths ($cpS0$) und der adsorbierten Feuchtigkeit ($cpS1$) unterteilt ist. Die Summe der auftretenden Wärmeströme in den Speicherknotten (i) ist

$$\Sigma dQ_S = dQ_{brd} + dQ_G + dQ_{ax}^{(i)} - dQ_{ax}^{(i+1)} + dQ_{ads} \quad \text{Formel 15}$$

Dabei entspricht dQ_{brd} dem Wärmestrom von Umgebung zum Speicherknotten, dQ_G ist der sensible Wärmestrom aufgrund des Luftstroms, $dQ_{ax}^{(i)}$ ist der axiale Wärmestrom vom benachbarten Speicherknotten und dQ_{ads} ist die gewonnene Wärme der Reaktion. Eine zweite Energiebilanzgleichung berücksichtigt die Wärmeübertragung zwischen Speichermaterial und umgebenden Material der Speicherhülle (Border):

$$\frac{dT_{brd}}{dt} = \frac{[dQ_{ax,brd}(i) - dQ_{ax,brd}(i+1) - dQ_{amb} - dQ_{brd}]}{C_{border}} \quad \text{Formel 16}$$

Simulationsergebnisse

Exemplarisch werden hier Vergleiche zwischen den Simulationen mit dem Einknotenmodell und den Mehrknotenmodellen (mit 3, 5, 7, 10 Knoten) dargestellt. Gezeigt werden Temperaturen jeweils am letzten Knoten (Ausgang) und die freigesetzte Energie unter der Annahme einer konstanten Durchströmung mit 20°C warmer Luft mit absoluter Feuchte 0.008 kg/kg und einem Massenstrom von 300 kg/h. Die gesamte Zeolithmasse ist hierbei 5 kg.

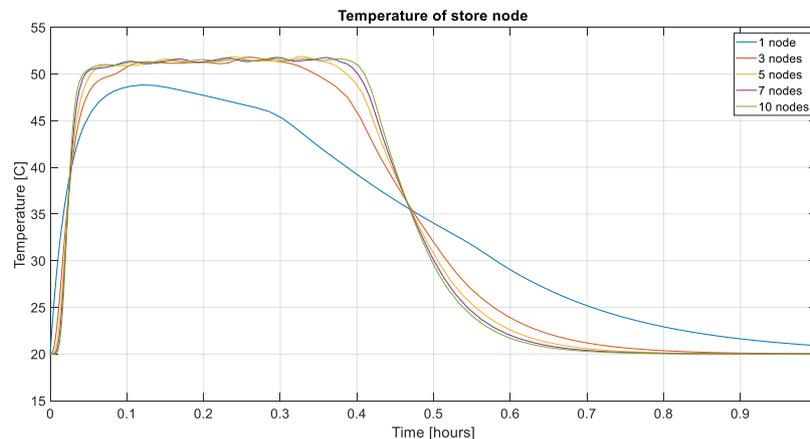


Abbildung 38: Luftaustrittstemperaturen für unterschiedliche Knotenanzahlen

Die verfügbare Leistung des austretenden Luftstroms entspricht in ihrem Signalverlauf jenem der oben gezeigten Temperatur (gemäß der Formel $\dot{m} c_p \Delta T$) und erreicht unter den verwendeten Simulationsparametern einen annähernd konstanten Wert von ca. 2500W über einen Zeitraum von ca. 20 Minuten. Der zeitliche Verlauf der freigesetzten Energie kann der folgenden Abbildung 39 entnommen werden. Die Sättigung der einzelnen Materialknotten während der Adsorption ist für das Dreiknotenmodell in Abbildung 40 dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

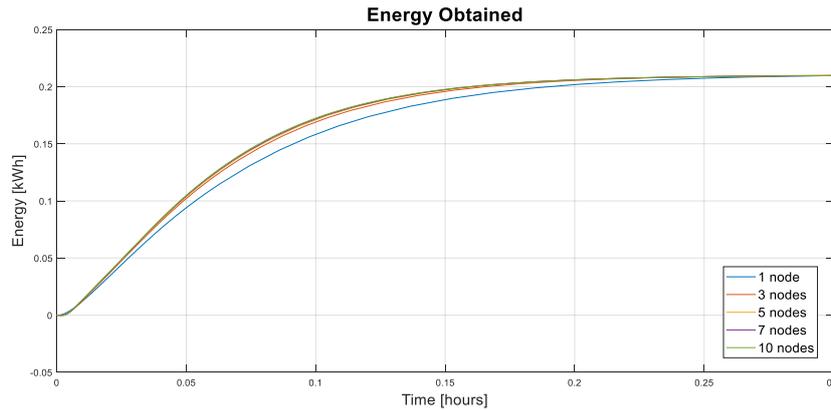


Abbildung 39: Heizleistung bei Adsorption für unterschiedliche Knotenzahlen

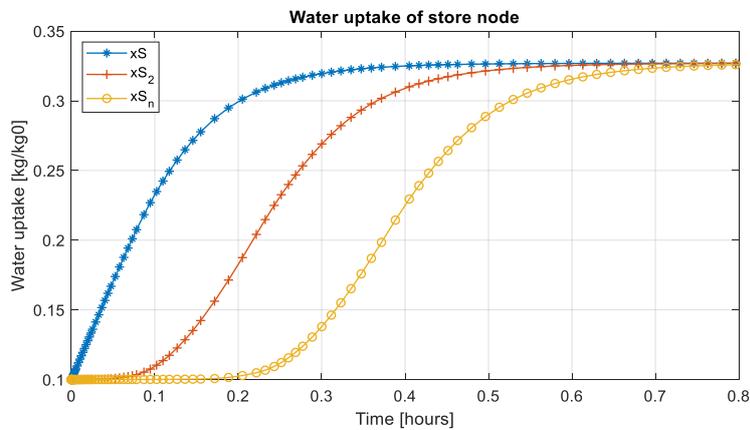


Abbildung 40: Sättigung des Zeoliths mit Wasser beim Dreiknotenmodell

Datenbasierte Modellstrukturen

Abseits der oben erwähnten physikalisch motivierten Struktur des Simulationsmodells wurden Strukturen, die auf der Analyse der auftretenden Signale beruhen ermittelt. Das globale Ziel ist eine möglichst einfache Struktur zu finden welche als Eingangssignale den Massenstrom m_G , die absolute Luftfeuchte x_G und die Temperatur T_G des in den Reaktor eintretenden Luftstroms verwendet und daraus die Ausgangsgrößen Beladung des Zeoliths mit Feuchtigkeit x_S und Temperatur der Luft am Austritt des Speichers T_S berechnet.

Als erstes Teilmodell wurde der funktionelle Zusammenhang $x_S(t) = f(m_G(t), x_G(t), T_G(t))$ näher analysiert. Ausgehend von mit dem Simulationsmodell generierten Datensätzen wurde die erzielbare Genauigkeit mit unterschiedlichen Modellansätzen überprüft. Als bester Modellansatz stellte sich dabei ein Zustandsraummodell 2. Ordnung mit einer Eingangs-Nichtlinearität (Wiener Modell zur Berücksichtigung des Sättigungsverhaltens des Zeoliths) heraus. Zur Beurteilung der Modellqualitäten wurde der weit verbreitete fit-Wert

$$fit = 100 \left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y - \bar{y}\|} \right)$$

Formel 17

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

verwendet. Die verwendeten Datensätze bestehen aus Adsorptionsversuchen ausgehend von einem getrockneten Material mit jeweils unterschiedlichen aber für jeden Versuch konstanten Werten für x_S und T_G . Es zeigte sich, dass bereits drei Versuche ausreichend sind, um die unbekannt Parameter des Zustandsraummodells samt Ausgangs-Nichtlinearität konsistent zu bestimmen. Dies wurde durch eine Validation des Modells an 10 unabhängigen Datensätzen überprüft, die erzielte Genauigkeit lag bei ca. 91% fit Wert. Werden 10 anstelle von 3 Versuchsdaten zur Parameterbestimmung verwendet, so kann die Modellgenauigkeit auf ca. 96% gesteigert werden.

Für das zweite Teilmodell wurde der Zusammenhang $T_S(t) = f(m_G(t), x_G(t), x_S(t), t)$ analysiert. Wie sich zeigte, besteht kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der maximal erreichbaren Temperatur T_{max} des austretenden Luftstroms und dem Massenstrom. Es zeigte sich jedoch ein eindeutig erkennbarer linearer Zusammenhang zwischen T_{max} und x_G welcher mittels einer Regressionsanalyse zu

$$T_{max} = 20 + 3413.7 x_G \quad \text{Formel 18}$$

bestimmt wurde. Der Wert 20 muss i.A. durch die jeweils vorhandene Umgebungstemperatur ersetzt werden. Aufbauend auf diesem linearen Zusammenhang konnte nun ein Prozessmodell mit der Struktur der Übertragungsfunktion

$$T_S(s) = \frac{K_1}{1+T_1s} T_{max}(x_G) + \frac{K_2}{1+T_2s} x_S(s) \quad \text{Formel 19}$$

gefunden werden, welches die generierten Versuchsdaten mit ausreichender Genauigkeit beschreibt. Die gefundene Übertragungsfunktion passt sehr gut, um individuelle Versuche zu beschreiben, jedoch ist die Übertragbarkeit des Modells auf unabhängige Messungen (Validation) nicht gegeben. Aus der Analyse der identifizierten Parameter der Übertragungsfunktion (K_1, T_1, K_2, T_2) zeigte sich ein näherungsweise quadratischer Zusammenhang (siehe Abbildung 41) bzw. ein konstanter Wert von 1 für K_1 .

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

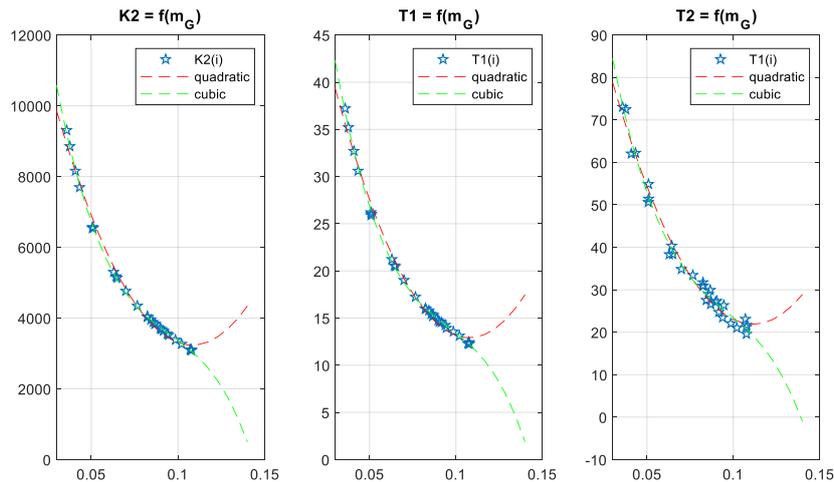


Abbildung 41: quadratische/kubische Approximation der Parameter der Übertragungsfunktion

Falls die Beladung $x_s(t)$ als bekannt angenommen wird, können mit diesem Modellansatz fit-Werte > 96% erzielt werden. Bei der Hintereinanderschaltung des ersten Teilmodells (zur Bestimmung der Beladung) mit dem zweiten können immer zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden (siehe Abbildung 42). Hierbei wurden die definierten datenbasierten Modellstrukturen in einer Simulink Simulation zusammengefasst, welche eine Echtzeitsimulation ermöglicht.

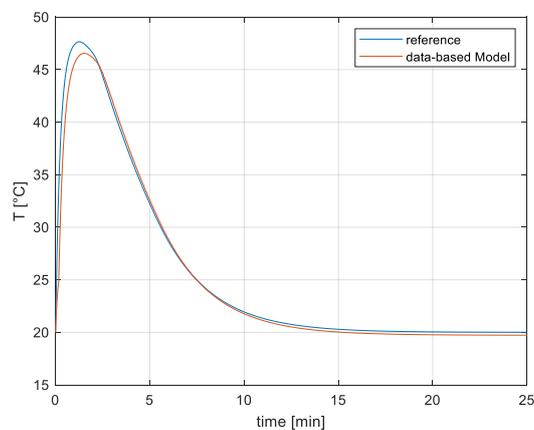


Abbildung 42: Kombiniertes Datenbasiertes Modell

Abgleich mit Messdaten

Die vom Projektpartner IWT eingebrachten Messdaten wurden als qualitativ besser geeignet - im Vergleich zu den ursprünglich geplanten Messungen bei ASIC - zum Abstimmen der Modellparameter eingestuft. Diese Messungen wurden an einem Festbett-Laborreaktor mit hochwertiger Messtechnik und der Möglichkeit einer gezielten Einstellung der Eingangsluftfeuchte durchgeführt.

Das oben beschriebene Simulationsmodell wurde mit diesen Messdaten abgestimmt, insbesondere wurden die Parameter k_{LDF} (für Adsorption und Desorption) und die

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Gleichgewichtszustände der Isothermen ermittelt sodass Messung und Simulation bestmöglich übereinstimmen. Nachdem das datenbasierte Modell auf dem Simulationsmodell aufbaut, ist auch dieses implizit mit den Messdaten abgeglichen. Ein direkter Vergleich zwischen dem Referenzmodell und dem entwickelten Simulationsmodell ist in der Abbildung 43 ersichtlich.

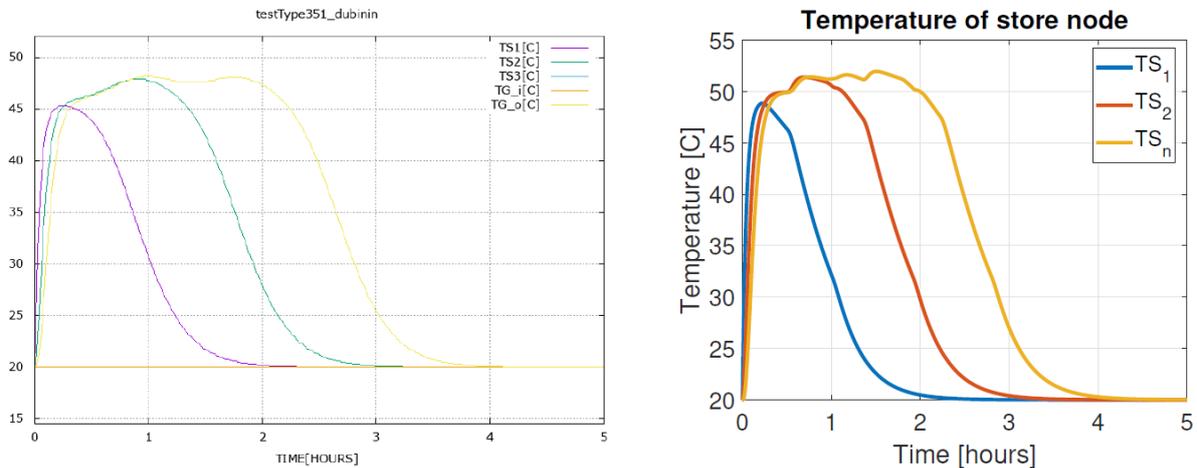


Abbildung 43: Vergleich zwischen Referenzmodell (links) und entwickeltem Simulationsmodell (rechts)

Optimierungsmethoden und Simulation des Betriebsverhaltens

Das analysierte Betriebsverhalten bezieht sich auf den zyklischen Betrieb des Speichers als Wechsel zwischen Adsorption und Desorption. Die Arbeitshypothese war, dass eine unterschiedliche Beladungsmenge des Speichers mit Wasser, welche als Indikator zum Starten der Ad- bzw. Desorption verwendet wurde, zu einer unterschiedlichen Gesamteffizienz führt.

Um die Hypothese zu prüfen, wurde eine total verfügbare Desorptions-Energie als konstant angenommen (z.B. die gesamte während der Sommermonate verfügbare Energie) und es wurden mittels des Simulationsmodells für den Trommelreaktor mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Grenzen der Beladung, ab wann die Desorption beginnt und ab wann die Adsorption beginnt ausgeführt, siehe Tabelle 7. Das Temperaturniveau zur Desorption wurde mit 150°C gewählt, welches in Sommermonaten mit Vakuum-Luftröhrenkollektoren erreicht werden kann.

Tabelle 7: Simulationseinstellungen (Grenzwerte) und daraus resultierende Energie

Ende Desorption	0,12	0,12	0,12	0,12	0,17	0,17	0,17	0,21	0,21	0,26
Start Desorption	0,17	0,21	0,26	0,30	0,21	0,26	0,30	0,26	0,30	0,30
Gespeicherte Energie %	32	45	53	59	53	73	89	73	100	98

Es zeigte sich, dass sich die Grenzwerte sehr stark auf die speicherbare Energie auswirken. Die maximale Ausbeute konnte mit einem Betrieb des Speichers zwischen 0,21 kg/kg und 0,3 kg/kg erzielt werden. Dies bedeutet einerseits, dass der Trocknungssofen so betrieben

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

werden sollte, dass die Desorption bei einer Beladung von 0,21 kg/kg stoppt da eine weitere Trocknung keinen Energiegewinn bringt. Anstelle dessen sollte das Material gewechselt und die nächste Charge auf 0,21 kg/kg getrocknet werden. Andererseits bedeutet es, dass die Desorption zur Wärmegewinnung aus dem Speicher bis zu einer Beladung von 0,3 kg/kg erfolgen sollte. Mit diesen Betriebsdaten und mit mittleren Wetterdaten kann darüber hinaus eine Grobdimensionierung der notwendigen Materialmenge zur Beheizung eines Einfamilienhauses erfolgen.

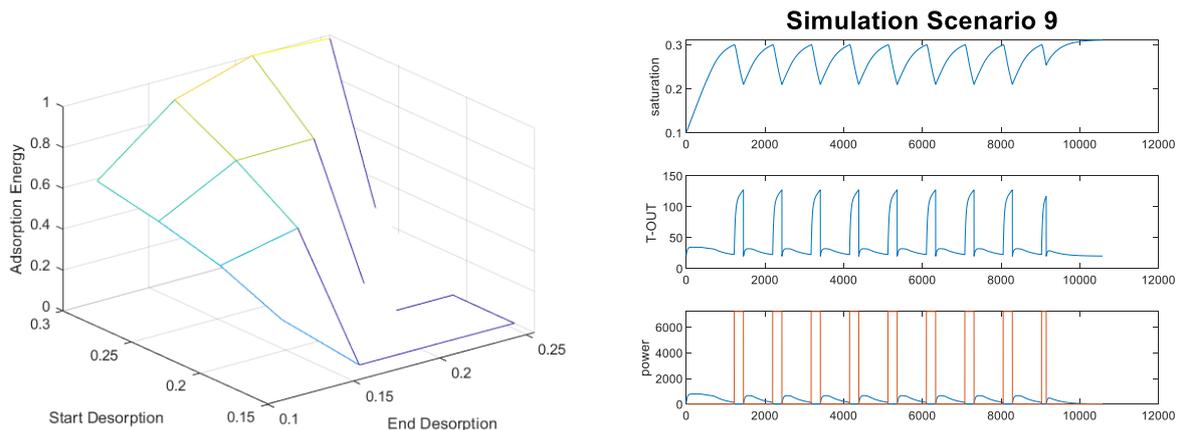


Abbildung 44: Simulation Szenario 9

Simulation des Betriebsverhaltens

Neben dem bereits beschriebenen Sorptionsspeichermodell wurde ein Modell eines Vakuum-Luftröhrenkollektors aufgebaut und ein Bestehendes eines Gebäudes (Einfamilienhaus) verwendet, um ein realistisches Betriebsverhalten des Gesamtsystems zu simulieren. Die Komplexität des Betriebsverhaltens ergibt sich aus der Vielzahl an Verschaltungs-möglichkeiten zwischen den Komponenten:

- Bei hoher solarer Einstrahlung und keinem Heizbedarf wird die erwärmte Luft des Kollektors zur Desorption des Zeolith verwendet.
- Bei hoher solarer Einstrahlung und gleichzeitigem Heizbedarf wird die erwärmte Luft des Kollektors direkt zur Wohnraumheizung verwendet bzw. bei geringem Heizbedarf gleichzeitig desorbiert.
- Bei geringfügiger solarer Einstrahlung und Heizbedarf kann der Kollektor alleine das Haus nicht aufheizen, und die vom Luftkollektor vorerwärmte Luft wird durch den Sorptionsspeicher weiter aufgeheizt.
- Bei nicht ausreichender solarer Einstrahlung zum Betrieb des Kollektors und Heizbedarf wird der Sorptionsspeicher direkt mit Raumluft als Eingangsluftstrom betrieben

Die unterschiedlichen Betriebsmodi samt den zugehörigen Logikabfragen und Regelungselementen (Relais mit Hysterese, Lookup-Tables) wurden in Simulink implementiert und es wurden exemplarisch vier Betriebstage (durchschnittlicher Tag im Frühling, Sommer, Herbst Winter) simuliert. In Abbildung 46 sind die Betriebsgrößen für

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

einen typischen Herbsttag dargestellt. Hierbei erfolgt die benötigte Beheizung durch den Sorptionsspeicher frühmorgens, wobei Temperaturen bis zu 60°C am Speicherausgang erreicht werden, ab ca. 9 Uhr übernimmt der Luftkollektor die Heizung, wobei gleichzeitig der Sorptionsspeicher etwas desorbiert wird. Die eingestellte Referenztemperatur für das Gebäude ist 25°C.

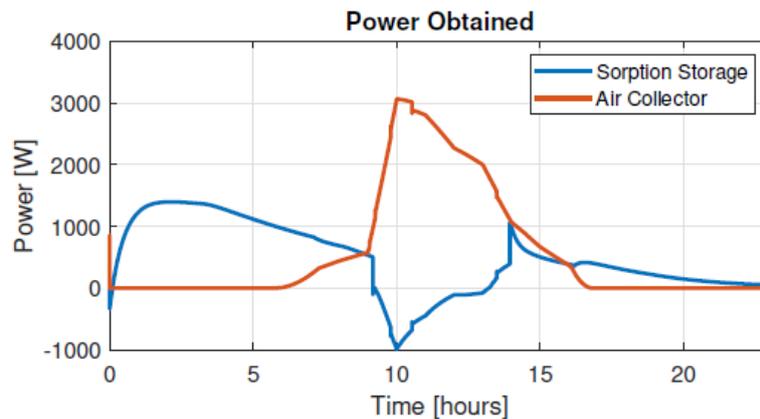


Abbildung 45: Ausgangsleistung Luftkollektor und Sorptionsspeicher

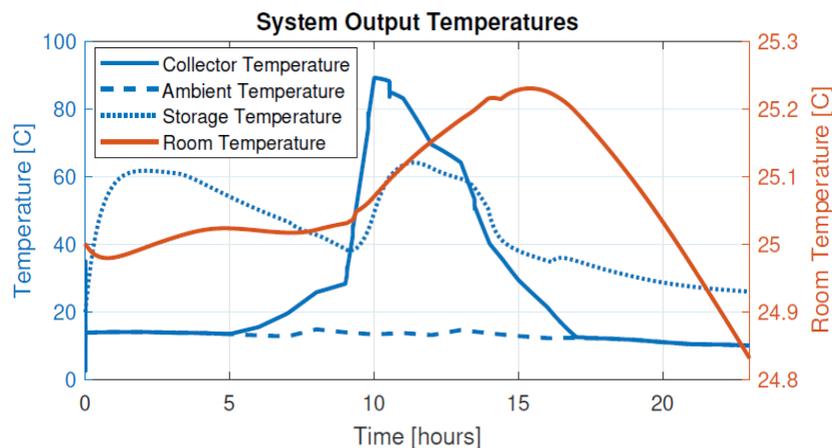


Abbildung 46: Temperaturverläufe

Eine Ganzjahressimulation war aufgrund der Simulationsanforderungen (Rechenzeit) nicht möglich; die Simulation eines einzelnen Tages benötigt ca. 3 Stunden (Desktop PC, Intel i5 3GHz). Die Simulation des Sorptionsspeichers alleine (ohne Gebäude und Luftkollektor) ist wesentlich schneller durchgeführt. Detailliertere Informationen über diese Simulation des Betriebsverhaltens finden sich in der Masterarbeit [15] und der Literatur [16].

4 Literaturverzeichnis

- [1] B. Zettl - Offene Feststoff Sorptionsspeicher für Raumheizung, 2. Tagung-
Kompaktthermische Energiespeicher (Platzhalter1), WKO-Wien, Österreich, 2016.
- [2] B. Zettl - Offene Sorptionstechnik für Langzeit-Wärmespeicher - Science Brunch des
KLIEN, Wien, Österreich, 2017, pp. 51-61.
- [3] Christoph Hager: Technologieentwicklung und Steuerungsprogramme für einen TCM-
Prototyp, FH-Wels/ Öko Energietechnik-Bachelor, August 2018.
- [4] B. Zettl, H. Kirchsteiger - AN OPEN SORPTION HEAT STORAGE APPLICATION -
Proceeding of the International Sustainable Energy Conference – ISEC 2018, Graz, Graz,
Österreich, 2018, pp. 8.
- [5] D. Lager, Evaluation of thermophysical properties for thermal energy storage materials –
determining factors, prospects and limitations, Dissertation TU Wien (2017)
- [6] Fritzson, 2003. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1.
Wiley-IEEE Press, New York.
- [7] D. Ruthven, 1984. Principles of adsorption and adsorption processes. Willey and Sons,
New York
- [8] S. Patankar, 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. CRC Press, New York.
- [9] S. Ergun, 1952. Fluid flow through packed columns. Chem. Eng. Prog. 48:89–94
- [10] A. Melling, S. Noppenberger, M. Still, H. VenzkeView, 1997. Interpolation Correlations
for Fluid Properties of Humid Air in the Temperature Range 100 °C to 200 °C. Journal of
Physical and Chemical Reference Data 26, 1111
- [11] D. Gidaspow, 1977. Multiphase Flow and Fluidization - Continuum and Kinetic Theory
Descriptions, Academic Press.
- [12] J. Mellmann, 2001. The transverse motion of solids in rotating cylinders - forms of
motion and transition behavior, Powder Technology 118, pp 251–270.
- [13] H.G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby, 1998. A tensorial approach to computational
continuum mechanics using object orientated techniques, Computers in Physics 12, pp 620 –
631.
- [14] S. Dissanayake, S.S. Karunarathne, J. Lundberg, L.A. Tokheim, 2017. CFD study of
Particle Flow Patterns in a Rotating Cylinder Applying OpenFOAM and Fluent, Proceedings
of the 58th SIMS, Reykjavik, Iceland
- [15] Nayrana Deborer-Prado: Modeling of Rotating Sorption Heat Storages, FH-OÖ,
Sustainable Energy Systems, Master thesis, June 2019.
- [16] N. Brado, H. Kirchsteiger, B. Zettl: Mathematical Modeling of Rotating Sorption Heat
Storages, submitted, SWC 2019 / SHC 2019.

5 Anhang (Konzeptvergleich Betonspeicher)

Bericht: Bernhard Laus

Bodenplatte als Betonkernspeicher im Wohnhaus – Prinzip und Erfahrungen:



Abbildung 47: Referenzgebäude (links) und Bodenplatte kurz nach Fertigstellung (rechts)

Die Ideen bzw. Ziele hinter dem umgesetzten und nun vermessenen Projekt „Betonkernspeicher“ waren folgende – nähere Erläuterungen erfolgen im Anschluss:

- Die kostengünstige Nutzung eines größeren Teils des Wärmeangebots aus der Solarthermie-Anlage.
- Die massive Reduktion der Transmissionsverluste durch die Bodenplatte.
- Durch nach oben und unten gedämmte Ausführung der Bodenplatte größerer möglicher Temperaturhub als bei reiner Betonkernaktivierung.
- Ein aktiv nutzbarer Wärme- und „Kühle“-Speicher.
- Eine wärmepumpenlose Lösung.

Basis all dieser Überlegungen ist die Tatsache, dass Beton in Bezug auf das Volumen immerhin etwa die halbe energetische Speicherfähigkeit von Wasser aufweist und somit in Anbetracht der außergewöhnlichen Eigenschaften von Wasser als durchaus passables Speichermedium gelten kann. Noch dazu ist er sehr kostengünstig und zu einem großen Teil ohnehin im Gebäude und hier im Speziellen in der Bodenplatte vorhanden.

Vorhandene Speicherkapazitäten im Gebäude:

- Pufferspeicher (Wasser) 11,5m³
- Betonkernspeicher ca. 70m³

Damit gespeicherte Energie bei einer Temperaturänderung von 1K:

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

- Pufferspeicher: ca. 48MJ = 13,4kWh
- Betonkernspeicher: ca. 154MJ = 42,8kWh

Der Betonkernspeicher würde ohne die höheren Verluste durch die beschränkte Dämmbarkeit wie eine Vervielfachung des Wasserspeichers wirken – allerdings bei schlechterer Dynamik und viel kleinerem nutzbarem Temperaturbereich. Die ohne weitere Kosten verfügbaren Zusatzerträge aus der Solarthermie-Anlage zur Betonkernerwärmung zu nutzen, drängt sich also scheinbar auf.

Eine Mindestervartung an die Wirkung der Beheizung der Bodenplatte war, dass die Transmissionsverluste des Gebäudes durch die Bodenplatte deutlich reduziert werden können. Solange die Temperatur des Betonkernes nicht unter der des Raumes liegt, geht über die Bodenplatte praktisch nichts verloren – im Gegenteil. Zur Vergrößerung des nutzbaren Temperaturbereiches wurde die Bodenplatte unten (Schaumglasschotter) und oben (Zellulose) gedämmt. Dieses Detail ist auch der entscheidende Unterschied zu einer klassischen Betonkernaktivierung, weshalb ich auch von einem Betonkernspeicher spreche. Bei der Betonkernaktivierung hat der Beton zumindest in Richtung Raum praktisch keine Dämmung und gäbe bei höheren Temperaturen entsprechend viel – zu viel – Energie an den Wohnbereich ab. Die thermisch nicht von der Bodenplatte getrennten Außenwände stellen allerdings naturgemäß auch im vorliegenden Projekt einen Kompromiss dar.

Ein weiteres Ziel war zu guter Letzt auch, dass die Wärme bzw. „Kühle“ des Betonkerns neben der passiven Wärmeabgabe bzw. – Aufnahme auch ohne Wärmepumpe aktiv nutzbar sein soll. Die Hauptanwendung dabei die Durchströmung der Fußbodenheizung bei zu großen Raumtemperaturen im Sommer und die weitere Nutzung durch das Vorheizregister der Lüftungsanlage (theoretisch fast bis hinunter auf Außenlufttemperatur) –zur Schaffung einer „Kühlreserve“.

Das Gebäude - Kurzbeschreibung:

Das vermessene Gebäude ist ein voll unterkellertes Ziegelbau mit Dachboden und angebauter Garage und befindet sich in Linz. KG, EG und OG haben jeweils ca. 65m² Nutzfläche und sind beheizt (KG teilweise nur passiv), der Dachboden ist bis auf weiteres unbeheizt und wirkt als Pufferraum. Besonders zu erwähnen ist, dass der 11.500l-Pufferspeicher sich gänzlich in der Thermischen Hülle befindet und somit Speicherverluste als Nutzwärme im Gebäude zur Verfügung stehen. Er erstreckt sich über zwei Geschoße. Die Energiekennzahl HWB-ref lt. Energieausweis liegt bei 26,5 kWh/m²a. Bezug und schrittweise Inbetriebnahme erfolgte ab Anfang 2016.

Die Gebäudetechnik - Kurzbeschreibung:

- Kontr. Wohnraumlüftung mit Solekreis im Erdreich, keine Feuchterückgew.
- Solarthermie ca. 40 m²
- Photovoltaik 4,9 kWp
- Pufferspeicher ca. 11.500 Liter
- Betonkernspeicher ca. 70 m³

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

- Wärmeverteilung: Fußbodenheizung, Badheizkörper
- Zusatzheizung: Pellets via Mikrowärmenetz mit Nachbargebäude
- Warmwasserbereitung: Frischwassermodul
- Regelung und Gebäudeautomation: frei programmierbare Regler und Miniserverkonzept

Aufbau des Betonkernspeichers – Kurzbeschreibung:

Der Betonkernspeicher entsteht durch den so weit wie möglich gedämmten Einbau der verstärkten Bodenplatte:

- Glasschaumschotter ca. 50 cm
- Magerbeton 25 cm
- Rohrregister auf Armierung des 2. Teils der Bodenplatte ca. 800 m
- „reguläre“ Bodenplatte 25 cm Stahlbeton
- Feuchteisolierung
- Blindboden mit Zellulose 18cm bzw. Schaumglasplatten 18cm
- Estrich mit FBH
- Fliesen/Parkett

Die auf der Bodenplatte aufgebauten Wände sind thermisch nicht getrennt und stellen somit eine relativ starke Wärmebrücke in den Innenraum dar.

Kosten des Betonspeichers:

Reine Speicher-Material-Kosten (ohne Dämmung und Anschluss) pro $\frac{kWh}{K}$:

$$\text{Puffer: } \frac{15000}{13,4} = 1120 \frac{\text{€}}{\frac{kWh}{K}}$$

$$\text{Betonkern: } \frac{4000}{42,8} = 93 \frac{\text{€}}{\frac{kWh}{K}}$$

Beton zu Wasser Kostenverhältnis in etwa 1:12.

Implementierte Messungen:

Um die relevanten Energieflüsse und Auswirkungen der Betonkernerwärmung so gut wie möglich erfassen zu können, wurde neben diversen Systemtemperaturen (Räume, Pufferspeicher etc.) und der Solareinstrahlung Folgendes erfasst:

- Solarerzeugung (Leistung/Energie) → Puffer, Betonkern
- Mikrowärmenetz „Import“ und „Export“ (Leistung/Energie)
- Betonkernspeicher: aktive Ladung und Entnahme (Leistung/Energie)
- Wärme Puffer → Heizung (Leistung/Energie)

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

- Wärme Puffer → Warmwasser (Leistung/Energie)
- Wand- und Bodenoberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten
- Betonkerntemperatur an 7 verschiedenen Stellen (erst gegen Projektende; davor nur an einer Messstelle unter dem Technikraum)

Speichernutzungsmöglichkeiten - Betriebsführung:

Es sind mehrere verschiedene Betriebsarten im Jahresverlauf möglich. Sie unterscheiden sich in Energieflussrichtung, Quelle und Senke. In der Folge sind diverse Optionen inklusive ihrer Haupteinsatzzeiten aufgelistet.

- „Kühle“ Beton → Heizkreise: zur Konditionierung bei Hitzewellen
- Wärme Kollektor → Beton: Spätsommer, „am Ende der Hitze“
- Heizbeginn aus Puffer: ca. Anfang bis Mitte November
- Heizbeginn „Import“: Mitte November bis Anfang Dezember
- Ende „Import“: Ende Jänner bis Mitte Februar
- Heizschluss aus Puffer: Ende März bis Anfang April
- Wärme Beton → Vorheizregister KWL: bei Kälte/Winterende
- Wärme Puffer → Beton: bisher gar nicht
- Vor und nach der „Pufferheizperiode“ Export
- Passive Nutzung: sonst

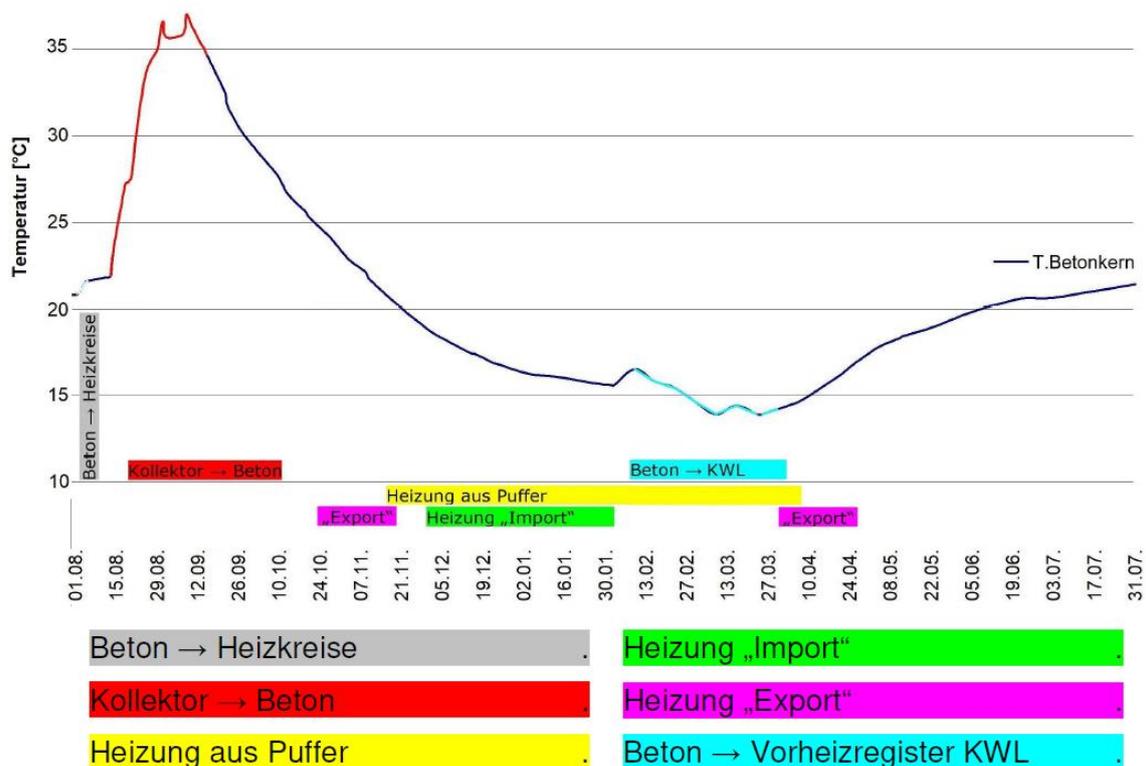


Abbildung 48: Darstellung der Heizsystem-Phasen während eines Jahres

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

Die passiven Phasen stellen typische Lade-/Enlade- bzw. Aufheiz-/Abkühlkurven dar. Die Begrenzung der maximalen Temperatur entspringt zweierlei Beobachtung: einerseits zeigten sich bei ca. 37°C Betonkerntemperatur an fünf Stellen Risse im Putz (vier davon zumindest in zeitlicher Nähe des Aufheizens), gleichzeitig hat die Raumtemperatur im KG langsam den Komfortbereich verlassen – es wurde also zu warm. Theoretisch könnte man die Verluste in Richtung Innenraum durch Dämmung reduzieren oder gar die Außenwände – zumindest teilweise – thermisch getrennt aufbauen, allerdings scheint mir der Aufwand dafür unverhältnismäßig hoch. Ein anderer Ansatz ist aus meiner Sicht vielversprechender: Es hat sich in einer Einzelmessung der Temperaturverteilung im Betonkern (siehe weiter unten) am Ende des Projektes gezeigt, dass relativ große Temperaturunterschiede herrschen können. Es wird Inhalt weiterer Versuche sein, ob sich auch schon bei der solaren Beladung Zonierungen schaffen lassen, die eventuell höhere Temperaturen – ohne Schäden – in Teilbereichen bei gleichzeitig geringeren Temperaturen in den Randbereichen und somit weniger Überwärmung in den Räumen zulassen. Die Ausführung der Heizkreise im Beton mit Kern- und Randzonen würde dies jedenfalls erlauben.

Zur Wirkung der sommerlichen Konditionierung sei mir noch eine kurze Beschreibung gestattet. Die Durchströmung der Fußbodenheizung mit dem „Betonkernwasser“ mit 20-24°C hat nur zu einer geringen Absenkung der Raumtemperatur um ca. 1°C geführt. Durch den etwas kühleren Boden (Wärmestrahlung) war allerdings der subjektive Komfortgewinn trotz sommerlicher Hitzewelle ohne jegliche feststellbaren unangenehmen Nebenerscheinungen hoch. Der Taupunkt wurde grundsätzlich überwacht, war allerdings immer weit entfernt.

Temperaturerteilung im Betonkern

Gegen Ende der Projektlaufzeit wurde noch eine vergleichende Messung der Betonkerntemperatur an sieben Stellen realisiert. Die Rohre in die Mitte der Betonschicht und die Leerverrohrung für eine etwaige Messung wurden schon in der Bauphase eingebracht. Zwei Fühler haben zu unbrauchbaren Werten bei der Erstmessung im März geführt, weshalb aktuell nur eine nachgeholtete Messung von Anfang Juni 2019 zur Verfügung steht. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Betonkern jedenfalls seit mehr als zwei Monaten nicht mehr durchströmt. Interessant sind die sich einstellenden deutlichen Temperaturunterschiede.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

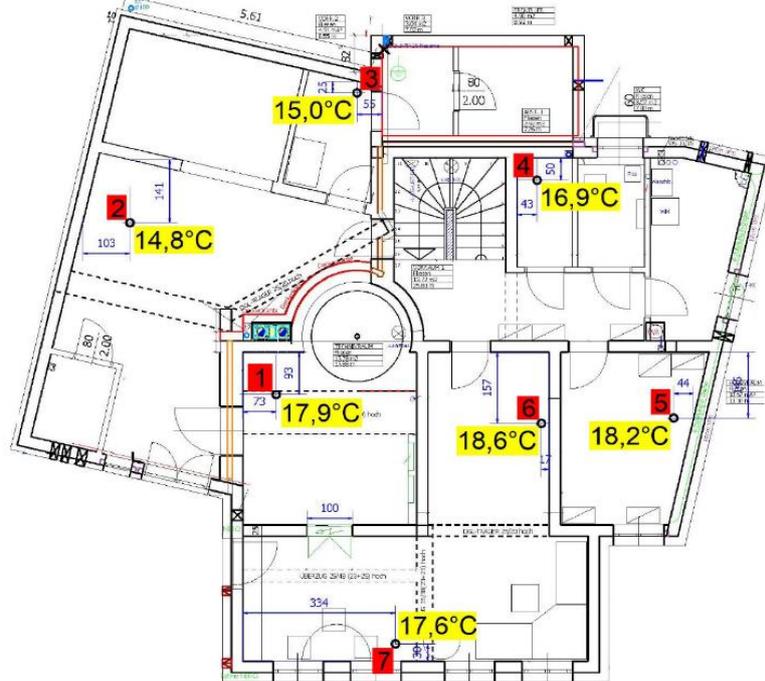


Abbildung 49: Darstellung der Temperaturverteilung im Betonkern

Betonkernspeicher-Energieflüsse innerhalb eines Jahres

Im Folgenden sind die (messbaren) Energieflüsse in und aus dem Betonkern aufgeführt. Der Betrachtungszeitraum wurde einmal wie im Diagramm mit der Darstellung der Betriebsphasen (Saison 1.8.2017-31.7.2018) und einmal als Kalenderjahr 2018 gewählt (1.1.2018-31.12.2018). Letzteres deshalb, da das Jahr 2018 als eines der Wärmsten in der Geschichte der Aufzeichnungen bekannt wurde – mit dem Kalenderjahr als Beobachtungszeitraum.

Saison 1.8.2017 - 31.7.2018

- Beton → Heizkreise: Konditionierung b. Hitze: 60 kWh
- Sonne → Beton: 2085 kWh
- Beton → KWL: bei Kälte/Winterende: 287 kWh
- Passive Nutzung: sonst

Kalenderjahr 1.1.2018 – 31.12.2018

- Wärme Heizkreise → Beton: Konditionierung b. Hitze: 248 kWh
- Wärme Sonne → Beton: 2184 kWh
- Wärme Beton → KWL: bei Kälte/Winterende: 287 kWh
- Passive Nutzung: sonst

Die Entnahmeleistung (Kälte) aus dem Betonkern lag 2018 zwischen 4200W zu Beginn (3.8.2018 kühler Speicherzustand mit 21,5°C und „überhitzter“ Raum mit 26,2°C) und ca. 500W kurz vor Ende des Kühlbetriebs (Betonkern 23,6°C und Wohnraum 24,9°C). Ca. 10%

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

der „eingelagerten“ Wärme wurde aktiv, die restlichen 90% offensichtlich passiv genutzt bzw. gingen ungenutzt als Verlust an die Umgebung.

Die Einlagerung von Solarwärme war wie im Abschnitt „Betriebsführung“ durch die festgelegte Maximaltemperatur des Betonkerns begrenzt, die Abkühlung über die Lüftungsanlage durch das Ende des Winters bzw. die steigenden Außentemperaturen.

Zusammenfassung

Die bisherigen Erfahrungen und Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass die meisten der gesetzten Ziele für das gesamte Gebäude – siehe erster Abschnitt – erreicht werden oder zumindest erreichbar sind.

- lange angenehm kühl, keine Überhitzung trotz Puffer in thermischer Hülle und noch nicht automatischer Beschattung
- Heizbedarf gering, hauptsächlich Dezember und Jänner
- angenehmes Wohnklima, Zonierungen funktionieren gut (Bad/Wohnen/Schlafen im Winterbetrieb 25/21/19 °C).
- kein „Austrocknen“ aufgrund Management der Wohnraumlüftung über die m_{CO_2} -Konzentration. Die Werte der relativen Feuchte sinken kaum unter 40%.
- Der Restheizbedarf liegt bisher zwischen 0 und 1200 kWh/a bzw. bei maximal 300 kg Pellets pro Jahr, somit sind die Heizkosten sehr gering.
- Gesamt: „Plus-Energie-Haus“ (mehr bilanzierte eigene Erzeugung als Verbrauch).
- Kleinere Bauschäden durch Wärmedehnung – werden weiter beobachtet.

Zukünftige Entwicklungen/Umsetzungen

- Einfluss von zonierter Einbringung in Beton – geringere Überwärmung & höhere mögliche Betonkerntemperatur?
- Automatisierte Beschattung und andere Smarthome-Funktionen
- Stromspeicher mit Notstromfunktion, Abdeckung zumindest des Basisverbrauchs in der Nacht.

Allgemeine Empfehlungen und Tipps:

- Wenn die Möglichkeit besteht: Betonkernspeicher umsetzen
- Rohrverlegung im Betonkern: Randzonen zur eventuellen gezielteren Beladung des Betonkerns ausführen
- Wände wo kostengünstig möglich (also nicht tragende Wände) thermisch getrennt zu Bodenplatte ausführen; z.B. Betonrippenkonstruktion mit durch Glasschaumplatten nach unten thermisch getrennten Ziegelfüllungen oder Zwischenwände auf Glasschaumplatten.
- Einplanen einer Niedertemperatursenke (z.B. Lüftungsanlage) zwecks „Kühle“-Speicherung.

Energieforschungsprogramm - 02. Ausschreibung

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

- Im Falle kleinerer Wasserspeicher auch z.B. Stiegen als aktivierte Bauteile ausführen und bei solarem Überangebot in den passenden (Jahres-) Zeiten eine gewisse Überheizung zulassen.

Aus Anwendersicht waren die Mehrkosten für den Betonkernspeicher sehr überschaubar und gerechtfertigt. Die Nutzung basiert, abgesehen von der solaren Beladung, auf passiven Wärmeübergänge zum Baukörper, die dahinterstehende Technik ist einfach und auch kleiner dimensionierte Systeme können eine entsprechende Wirkung zeigen. Aus Anwendersicht für nicht unerheblich, im Hinblick auf die Klimaentwicklung, ist die gesteigerte passive Sommertauglichkeit des Gebäudes.

6 Kontaktdaten

DI Dr. Bernhard Zettl

FH-Oberösterreich F&E /Forschungsgruppe ASIC

4600 Wels, Ringstrasse 43A

Tel: 050804 46918

Fax 07242 495560

E-mail Bernhard.zettl@fh-wels.at

Website <https://forschung.fh-ooe.at/asic/>

Titel weiterer laufender Projekte an der FH/ASIC (Stand 2019)

- Entwicklung hocheffizienter thermochemische Speichermaterialie (New-TCM)
- Methodenentwicklung für Energieflussoptimierung
- Urbaner Speichercluster Südburgenland
- Solar Cooling 2.0
- IEA-PVPS Task 16 Solar Resource for High Penetration and Large Scale Application
- IEA SHC Task 58 Thermische Energiespeicher
- IEA SHC Task 60 PVT
- Sorptive Konditionierung von Elektrofahrzeugen
- Center for Applied Smart Grid Systems (CASGriS)
- ASTTP - Solarthermie Technologie Plattform
- Speicherförderungsbegleitung
- StoreITup-IF