

Adsorptionsspeicher

Regenerative Wärmetechnik (RWT), Laborversuch

30. Juni 2022

Verfasser:	Julia Metla	563309
	Johannes Kretzschmar	581980
	Martin Teichert	564191
	Lena Kühnast	581658
	Angelika Sperling	564621
Studiengang:	Regenerative Energien	
Semester:	SoSe 2021/22	
Gutachter:	Carla Wunsch	
	Prof. Dr. Petra Bittrich	

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
1 Einführung	3
1.1 Versuchsziel	3
1.2 Theoretische Grundlagen	3
1.3 Versuchsaufbau	5
1.4 Versuchsdurchführung	5
2 Adsorption	6
2.1 Darstellung der Messdaten	6
2.2 Auswertung	7
2.2.1 Bestimmung der Beladung und der Adsorptionsenthalpie . .	7
2.2.2 Bestimmung des Nutzungsgrades	7
3 Desorption	8
3.1 Darstellung der Messdaten	8
3.2 Abschlussbetrachtung	9

Abbildungsverzeichnis

1 Schematische Darstellung der Anlagerung des Adsorptivs am Adsor- bent	3
2 Versuchsstand Sorptionsspeicher / Quelle: Versuchsanleitung	5
3 Darstellung der Messdaten des Adsorptionsversuches	6
4 Darstellung der Messdaten des Desorptionsversuches	8

1 Einführung

1.1 Versuchsziel

Das übergeordnete Ziel des Laborversuches ist es, den Aufbau und das Betriebsverhalten eines Adsorptionsspeichers während der Be- und Entladung in der Praxis kennenzulernen.

1.2 Theoretische Grundlagen

Adsorptionsspeicher gehören zu den thermischen Energiespeichern. Diese können in drei Gruppen unterteilt werden: Sensible Wärmespeicher (speichern Energie in Form von fühlbarer Wärme), Latentwärmespeicher (nutzen zusätzlich die Energie vom Phasenwechsel des Speichermediums) und thermochemische Speicher. Eine Unterform der thermochemischen Speicher sind die thermochemischen Adsorptionsspeicher (TCS), welche die Energie nicht in Form von Wärme speichern, sondern als potenzielle Energie.

Bei der Adsorption handelt es sich um einen Prozess, bei dem sich Atome oder Moleküle eines Stoffes A (Adsorptiv) an der Oberfläche eines zweiten porösen Stoffes B (Adsorbent) anlagern. Dabei gehen die Moleküle des Stoffes A mit dem Adsorbent entweder eine chemische Bindung oder eine schwache physikalische Bindung über elektrostatische Kräfte ein.

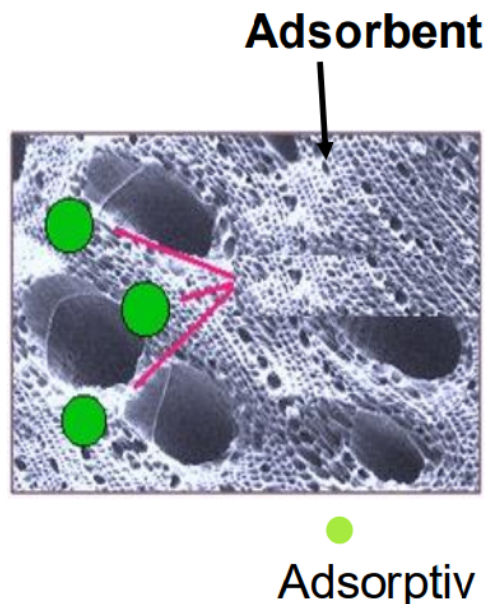


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anlage-
rung des Adsorptivs am Adsorbent

Als Adsorbent kommen verschiedene, meist feste und poröse Materialien in Frage, wie bspw. Zeolithe, Silikagele oder Aktivkohle. Wasser wird durch seine Eigenschaften und günstige Verfügbarkeit meistens als Arbeitsmedium verwendet. Bei diesem Versuch wird ein geschlossenes System betrachtet, in dem das Arbeitsmedium sich in einem Vakuum befindet und keinen Kontakt zur Umgebung hat. Es handelt sich dabei um ein evakuiertes System. Während der Beladung des Speichers (Desorptionsphase) ist das Adsorptiv bereits an der Oberfläche angelagert. Durch Wärmezufuhr wird es ausgetrieben, verlässt den Reaktorraum und sammelt sich am Kondensator an. Es handelt sich hierbei um einen endothermen Prozess. Bei der Entladung wird das Adsorptiv verdampft und lagert sich an der Adsorbens Oberfläche an. Da dies ein exothermer Prozess ist wird dabei Wärme freigesetzt, welche über einen Wärmetauscher abgeführt und genutzt werden kann. Dabei ist durch das Vakuum nur eine geringe Energiemenge nötig, um das Arbeitsmittel zu verdampfen. Der Stofftransport im evakuierten System wird durch die verschiedenen Drücke im Reaktor und dem Verdampfer/Kondensator ausgelöst. So ist der Druck im Verdampfer während der Adsorptionsphase höher und der Druck im Reaktor während der Desorption höher, bis es zum Druckausgleich kommt. Diese Art der Energiespeicherung bringt vor allem den Vorteil, dass keine thermischen Verluste während der Speicherung auftreten und die Energie so über einen langen Zeitraum verlustfrei gespeichert werden kann.

1.3 Versuchsaufbau

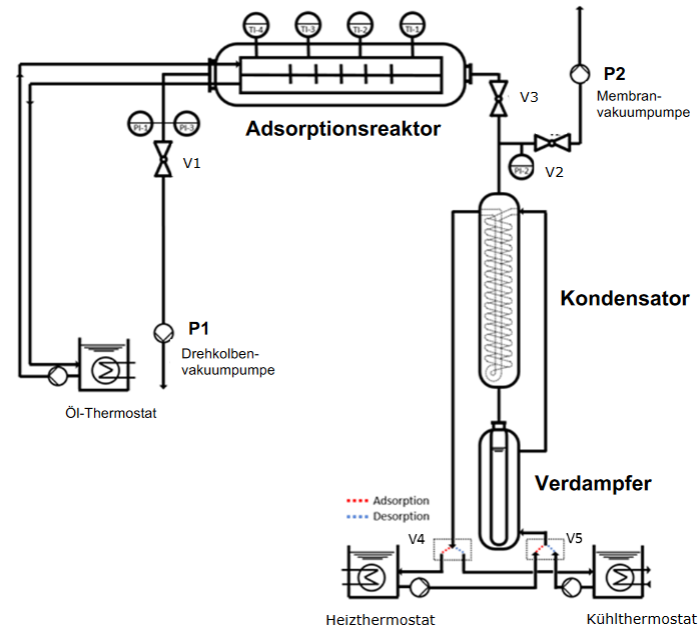


Abbildung 2: Versuchsstand Sorptionsspeicher / Quelle: Versuchsanleitung

Abbildung 2 zeigt den Versuchsstand des Sorptionsspeicher, wie er auch im folgenden Versuch verwendet wird. Zu den wichtigsten Komponenten zählen dabei der Verdampfer, der Kondensator und der Adsorber/Desorber, in welchem auch das Adsorptionsmittel eingebracht ist. Als Adsorptionsmittel dient im Versuch das Zeolith Typ X13, wobei sich im Adsorptionsreaktor 500 g davon befinden. Das Zeolith ist durch Eigenschaften wie einer maximalen Beladung von 0,25 kg ($\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$ Zeolith) und einer Dichte von $650 \text{ kg}/\text{m}^3$ bei einer Nutzttemperatur von 60°C und einer theoretischen Energiedichte von $177 \text{ kWh}/\text{m}^3$ gekennzeichnet. Außerdem enthält der Versuchsaufbau ein Heiz- und Kühlthermostat, welche für die Adsorption und Desorption unerlässlich sind. Mehrere Ventile regulieren die Druck- und Stoffflüsse.

1.4 Versuchsdurchführung

Um den Laborversuch anschließend durchführen zu können, gibt die Laboringenieurin zuerst eine kurze Einweisung. Dabei wird beschrieben, wo sich welche Komponenten des Versuchsaufbaus befinden und wie diese bedient werden. Daraufhin werden alle Ventile geprüft und nach Versuchsanleitung richtig eingestellt. Die

Heiztemperatur des Thermostats wird auf 30 °C eingestellt. Außerdem wird die Temperatur des Öl-Thermostats zu Versuchsbeginn protokolliert, woraufhin dieses eingeschaltet wird. Im Folgenden können die Messwerte der Temperaturen T_1 bis T_4 und die Drücke p_1 und p_2 notiert werden. Die gemessenen Daten werden über einen Zeitraum von 20 min, jeweils im Minutentakt erfasst. Damit das Wasser gleichmäßig verdampfen kann, wird während der Versuchsdurchführung mehrmals gegen den Verdampfer geklopft, um die Oberflächenspannung des Wassers zu brechen. Circa 10 Minuten nach Versuchsende wird die Temperatur des Öl-Thermostats protokolliert.

Es folgt die Einleitung des Desorptionsversuchs. Dafür werden wieder die Ventile geprüft und nach der Versuchsanleitung eingestellt. Die Einstellung des Kühlthermostats auf 8 °C und einer Desorptionstemperatur von 185 °C wird vorgenommen. Nachdem der Druck p_1 höher ist als p_2 folgt die Protokollierung der nächsten Messwerte (T_1 bis T_4 und p_1 und p_2). Diese werden aus zeitlichen Gründen nur über einen Zeitraum von 20 min anstatt, wie in der Versuchsanleitung beschrieben über 30 min, notiert. Der Versuch endet daraufhin, wobei die Desorption unter Kontrolle der Laboringenieurin noch weiter verläuft und erst nach 240 min abgeschlossen ist.

2 Adsorption

2.1 Darstellung der Messdaten

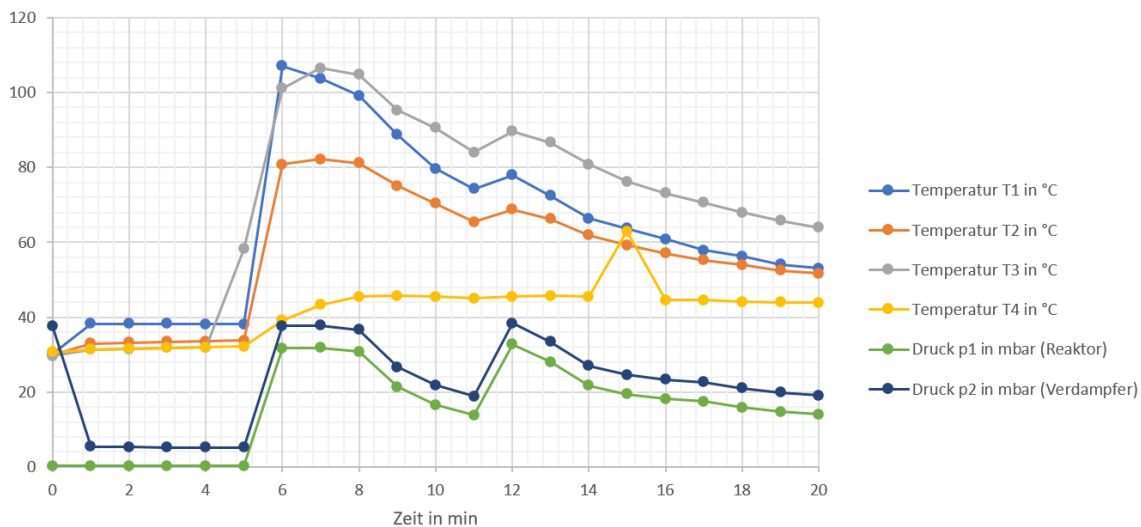


Abbildung 3: Darstellung der Messdaten des Adsorptionsversuches

Aus dem Diagramm wird deutlich, dass ab Minute fünf die Temperatur im Speicher stark ansteigt. Die Tatsache, dass erst dann die Temperatur ansteigt und nicht schon sobald das Ventil 3 aufgedreht wird, hängt damit zusammen, dass das Wasser im Verdampfer nicht direkt verdampft ist und dadurch auch kein Wasser adsorbiert werden konnte. Die Oberflächenspannung des Wassers war am Anfang zu gering und musste erst durch Anstoßen des Verdampfers gebrochen werden. Anschließend wurde das verdampfte Wasser im Reaktor vom Zeolith adsorbiert und Wärme freigesetzt. Die Temperaturen an den Punkten 1 und 2 sind deutlich höher als die Temperaturen an den Punkten 3 und 4. Die Punkte 1 und 2 liegen weiter vorne im Reaktor und adsorbieren dadurch mehr Wasser. Somit wird mehr Wärme dort freigesetzt und die Temperatur steigt schneller an.

Der Druck steigt ähnlich wie die Temperatur ab dem Zeitpunkt des Verdampfens stark an, weil erst ein starker Unterdruck im Verdampfer herrscht, welcher durch das Verdampfen verringert wird. Die Adsorption hingegen hat zur Folge, dass der Druck im Verdampfer und Reaktor sinkt aufgrund der Adsorption des Wasserdampfs. Der Druckanstieg in Minute elf ist wieder darauf zurückzuführen, dass zu dem Zeitpunkt besonders viel Wasser verdampft. Diese Schwankungen treten wegen der Oberflächenspannung auf, diese führt immer wieder dazu geführt, dass kein Wasser verdampft. Der Speicher gilt als vollständig beladen, wenn die Drücke p_1 und p_2 gleich sind. Da dies nicht eingetreten ist, ist der Speicher zum Ende der Adsorptionsphase nicht vollständig beladen. Dies lässt sich auch anhand des, in der Auswertung berechneten Ladezustandes erkennen, welcher bei 14,34% liegt.

2.2 Auswertung

2.2.1 Bestimmung der Beladung und der Adsorptionsenthalpie

Zunächst wird aus dem Isosteren-Diagramm die maximale gravimetrische Beladung bestimmt. Mit den Arbeitsbedingungen von 30 mbar und 35 °C ergibt sich eine maximale Beladung von 0,265 kg H₂O / kg. Die tatsächlich aufgenommene Wassermenge m_{Wasser} kann mithilfe der Dichte (1 g/ml) und der Volumendifferenz zwischen Anfang und Ende des Versuchs ermittelt werden. So ergibt sich m_{Wasser} mit $(464-445) \text{ ml} \cdot 1 \text{ g/ml} = 19 \text{ g}$. Die Beladung von dem 500 g Zeolithmaterial beträgt demzufolge $19/500=0,038$. Bezogen auf den Maximalwert von 0,265 bedeutet dies einen Ladezustand von 14,34%. Mithilfe der Beladung von 0,038 ergibt sich ebenfalls die Adsorptionsenthalpie, welche aus dem Diagramm mit 4500 kJ/kg abgelesen werden kann.

2.2.2 Bestimmung des Nutzungsgrades

Um den Nutzungsgrad zu bestimmen, sind die freigesetzte und abgeführte Energie nötig. Diese ergeben sich mithilfe der gemessenen Öltemperaturen und der

Adsorptionsenthalpie. Mit der mittleren Öltemperatur von 34,5 °C und linearer Interpolation ergeben sich die Dichte des Öls mit 853,6 kg/m³ und die spezifische Wärmekapazität mit 1,931 kJ/(kg·K). Daraus lässt sich die abgeführte Wärme $Q_{\text{Öl}}$ bestimmen. Für diese gilt:

$$Q_{\text{Öl}} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$= 0,005 \text{ m}^3 \cdot 835,6 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,931 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \cdot (39,21 - 29,89) \text{ K} = 76,80 \text{ kJ} \quad (2)$$

Die freigesetzte Energiemenge Q_{ab} ergibt sich mithilfe der Adsorptionsenthalpie Δh und der aufgenommenen Wassermenge von 19 g. Es gilt:

$$Q_{\text{ab}} = m_{\text{Wasser}} \cdot \Delta h = 0,019 \text{ kg} \cdot 4500 \text{ kJ/kg} = 85,50 \text{ kJ} \quad (3)$$

Der Nutzungsgrad η_N ergibt sich anschließend als Verhältnis aus $Q_{\text{Öl}}$ zu Q_{ab} :

$$\eta_N = \frac{Q_{\text{Öl}}}{Q_{\text{ab}}} = \frac{76,80 \text{ kJ}}{85,50 \text{ kJ}} = 89,82\% \quad (4)$$

3 Desorption

3.1 Darstellung der Messdaten

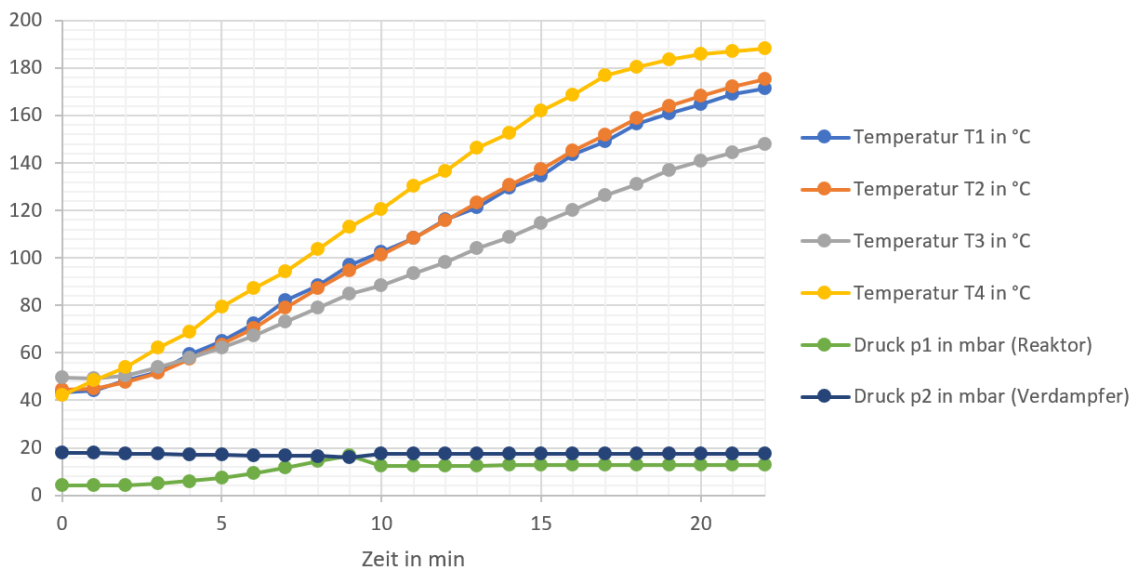


Abbildung 4: Darstellung der Messdaten des Desorptionsversuches

Bei der Desorption, die hier in Abbildung 4 dargestellt ist, wird der Reaktor mit heißem Öl erhitzt, wodurch das Wasser desorbiert. Daraufhin steigt der Druck im Reaktor an. Das Ventil zwischen Reaktor und Verdampfer kann ab dem Zeitpunkt, an dem im Reaktor ein höherer Druck als im Verdampfer entsteht, geöffnet werden. Dieser Zustand wurde nach neun Minuten erreicht. Dadurch fließt der Wasserdampf in den Verdampfer bzw. Kondensator und kondensiert an den Kühlrippen. Nach der Öffnung des Ventils kommt es zu einem Druckausgleich, woraufhin der Druck im Reaktor wieder leicht sinkt, während der Druck im Kondensator steigt. Obwohl der Druck im Reaktor nun ein wenig geringer ist als im Verdampfer verläuft die Reaktion weiter, denn es wird weiterhin Wärme zugeführt.

Die Temperatursensoren melden alle eine unterschiedliche Temperatur, obwohl im Wärmetauscher im Reaktor überall das Öl gleich heiß durchläuft. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Temperatursensoren jeweils unterschiedlich weit weg vom Wärmetauscher liegen. Das Speichermaterial Zeolith besitzt zudem eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit, so kommt es zu den starken Temperaturunterschieden.

3.2 Abschlussbetrachtung

Im Versuch konnten 76,80 kJ gespeichert werden. Dabei wurde der Speicher bei den gegebenen Betriebsparametern nur um 14,34% geladen. Dies bedeutet, dass maximal 76,80 kJ/14,34% gespeichert werden können, was 535,55 kJ entspricht. Bezieht man dies auf das gesamte Speichergewicht (inklusive dem gespeicherten Wasser) von 632 g, ergibt sich eine Energiedichte von 0,235 kWh/kg. Im Vergleich dazu liegt die Energiedichte von einem sensiblen Wärmespeicher mit Wasser und einem effektiven Temperaturbereich von 90 K nur bei 0,105 kWh/kg, also bei weniger als der Hälfte von der thermochemischen Speicherung mit Zeolithen.

Da herkömmliche sensible Wärmespeicher eine höhere Temperatur als die Umgebung haben, wenn sie befüllt sind, stellt sich ein Wärmefluss in die Umgebung ein. Dieser wird durch Isolation verlangsamt. Er kann jedoch nicht vollständig gestoppt werden. Adsorptionsspeicher haben diesen Nachteil nicht, da die gespeicherte Wärme als potentielle, thermochemische Energie gespeichert wird. Dennoch werden sie noch nicht weitgehend als Speicher eingesetzt. Dies liegt zum einen an ihrer technischen Komplexität und zum anderen daran, dass es noch nicht so viel Erfahrung mit dieser Art von Speichern gibt. Sie sind noch nicht vollständig entwickelt. Aufgrund ihrer spezifischen Vorteile kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sie in Zukunft an Popularität gewinnen werden. Besonders in Anbetracht der Energiewände, welche auch den Wärmesektor betrifft, ist eine verlustfreie bzw. verlustarme Langzeitspeicherung von Wärme bedeutsam.