

Protokoll zum Laborversuch:

Adsorptionswärmespeicher

Eingereicht von:

Gruppe 3

Alexander Heide	559441
Audrey Ndoumbe	584293
Bettina Rill	584286
Isabel Weinberger	584291
Sherwan Haj	573988

Fachbereich 1

Ingenieurwissenschaften – Energie und Information
Studiengang Regenerative Energien (Master)

Regenerative Wärmetechnik

Datum der Durchführung: **02.06.2022**

Abgabedatum: **24.06.2022**

Inhaltsverzeichnis

1 Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	3
2 Einleitung	4
3 Auswertung.....	4
3.1 Versuchsaufbau	4
3.2 Adsorptionsversuch	5
3.3 Desorptionsversuch	9
3.4 Abschlussbetrachtung	10
4 Anhang.....	11

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verfahrensfließbild	4
Abbildung 2: Messwerte der Temperatur- und Druckverläufe bei der Adsorption.....	5
Abbildung 3: Reaktordruck über die Temperatur im Isosteren-Diagramm des Zeoliths 13X mit Beladungsmittel Wassers.....	6
Abbildung 4: Diagramm Versuchsparameter im Vergleich mit den Isosteren.....	7
Abbildung 5: Adsorptionseenthalpie über die Wasserbeladung.....	8
Abbildung 6: Temperatur- und Druckverlauf bei der Desorption.	10

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Dimension	Größe
T	s	Zeit
T	°C, K	Temperatur
P	Bar	Druck
H	kJ/kg	spezifische Enthalpie
η	%	Wirkungsgrad
Q	J	Wärme
\dot{Q}	J/s	Wärmestrom
Q_{ab}	KJ	abgegebene Wärmemenge
$x_{Messung}$	kg _{Wasser} /kg _{Zeolith}	Wasserbeladung des Adsorbents
p_V	Mbar	Druck am Verdampfer
p_R	mbar	Druck im Reaktor
N	%	Nutzungsgrad
ω	kWh/m ³	Energiedichte
ρ	kg/m ³	Dichte
E	kJ	Energie
m	Kg	Masse
\bar{c}_p	kJ/(kg*K)	spezifische Wärmekapazität
V	ml	Volumen
ΔT	°C, K	Temperaturdifferenz

2 Einleitung

Der Laborversuch zum Adsorptionswärmespeicher wird im Rahmen des Moduls Regenerative Wärmetechnik durchgeführt. Die Eigenschaften des Adsorptionswärmespeichers und des verwendeten Speichermaterials Zeolith werden anhand eines Ent- und Beladevorgangs des Speichers untersucht. Während der Desorption (Beladevorgang) wird das Speichermaterial Zeolith getrocknet und Wärmeenergie in Form von Reaktionsenergie (potentieller Energie) gespeichert. In dieser Form kann Wärme über einen langen Zeitraum nahezu verlustfrei gespeichert werden. Durch die Adsorption wird das Speichermaterial „entladen“ und es wird Wärme freigesetzt. Das geschieht durch Zugabe von Wasser (bzw. Wasserdampf) und der Anlagerung der Wassermoleküle an der Oberfläche der Zeolithkugeln.

Zum Labortermin (02.06.2022) konnten die Ent- und Beladevorgänge nicht wie geplant durchgeführt werden, da das Speichermaterial im Adsorptionswärmespeicher zu Beginn des Versuchs nicht vollständig desorbiert war. Für diesen Laborbericht wurden daher Messwerte zur Verfügung gestellt, welche im Folgenden betrachtet und ausgewertet werden.

3 Auswertung

3.1 Versuchsaufbau

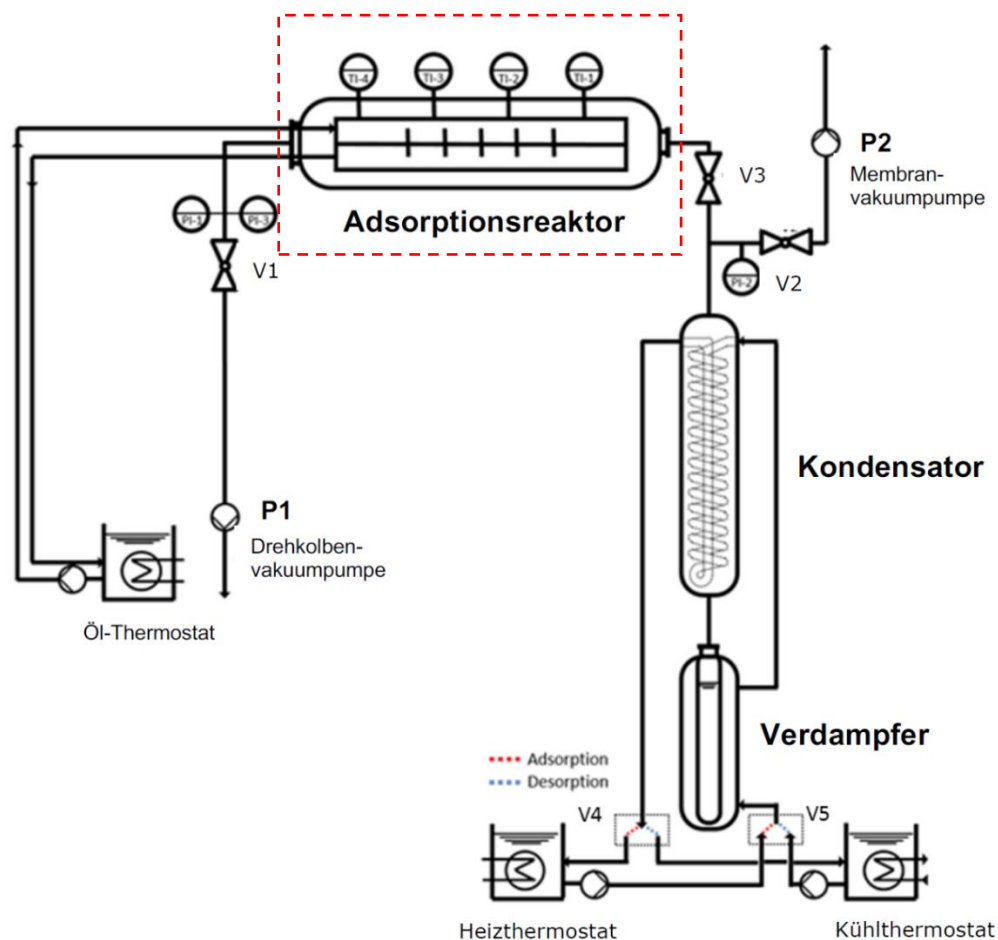


Abbildung 1: Verfahrensfließbild.

Der Versuchsstand des Adsorptionswärmespeichers besteht aus zwei Hauptkomponenten. Die erste Komponente umfasst den Kondensator, Verdampfer sowie Heiz- und Kühlthermostat. In diesem Bereich wird der notwendige Druckunterschied zwischen Reaktor und Verdampfer erzeugt.

Die zweite Komponente ist der Adsorptionsreaktor, in welchem das Speichermaterial Zeolith eingelagert ist. Innerhalb des Adsorptionsreaktors erfassen die Temperaturfühler T1 – T4 die Prozesstemperaturen während der Adsorption und Desorption. In diesem Versuchsaufbau wird ein Ölthermostat reaktorseitig als Erzeuger und Verbraucher verwendet.

Das Hauptventil V3 bildet das Verbindungsglied zwischen den Verdampfer- und Reaktorkomponenten. In den Bereichen werden der Verdampfer- und reaktorseitige Druck über die Messstellen p1-1 und p1-2 aufgenommen.

3.2 Adsorptionsversuch

3.2.1 Temperatur-Druck-Verlauf

Im ersten Teil des Versuchs wird die Adsorption durchgeführt. Über eine Dauer von 28 Minuten nach Beginn des Adsorptionsvorgangs wurden die Temperaturen T1-T4 sowie der Verdampfer- und reaktorseitige Druck aufgenommen. Die Messwerte sind in Abbildung 2 dargestellt und ihr Verlauf wird im Folgenden diskutiert.

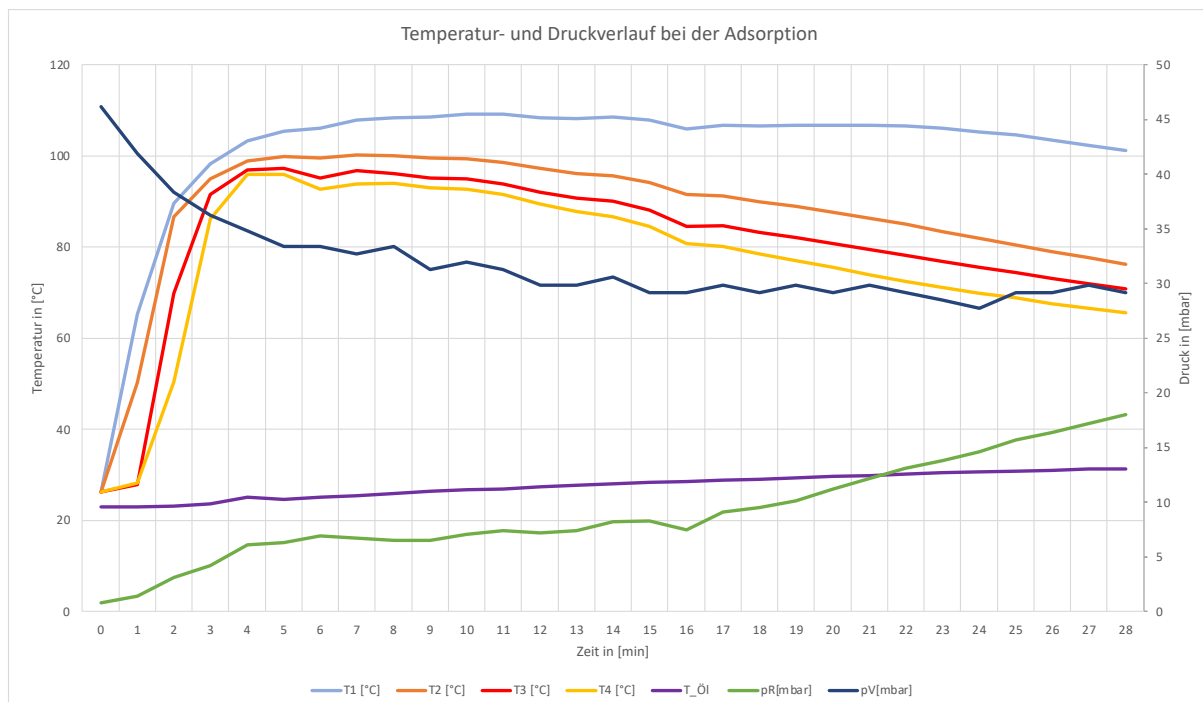


Abbildung 2: Messwerte der Temperatur- und Druckverläufe bei der Adsorption.

Bevor der Adsorptionsvorgang gestartet werden kann, wird das Heizthermostat eingeschaltet, wodurch sich das notwendige Druckniveau im Verdampfer aufbaut.

Die Wassertemperatur am Heizthermostat wird auf 30°C eingestellt. Der Startdruck am Verdampfer ist 46,15 mbar (voreinstellbar über Vakuumpumpe V2) und im Adsorptionsreaktor 0,8 mbar (voreinstellbar über Vakuumpumpe V1). Die Öltemperatur beträgt zu Beginn 23°C.

Um den Adsorptionsvorgang zu starten, wird das Hauptventil V3 geöffnet. Beim Öffnen strömt aufgrund des Druckunterschieds zwischen Reaktor und Verdampfer sofort Wasserdampf in den Adsorptionsreaktor. Die Temperaturen steigen schlagartig an. Dabei kann nach fünf Minuten ein Temperaturanstieg von ca. 80°C festgestellt werden. Die gemessenen Temperaturen T1 bis T4 sind in Abbildung 2 über die Zeit aufgetragen. Der Dampf erreicht die Messstelle T1 zuerst.

Im Reaktor findet die Adsorption statt: Die Wassermoleküle aus dem Dampf lagern sich am Zeolith an. Dabei wird Adsorptionswärme freigesetzt, die zuvor in Form von Reaktionsenergie im Speichermaterial gespeichert war.

Nach dem starken Anstieg zu Beginn fallen die Temperaturen nach ca. acht Minuten annähernd linear ab. Daran ist die kontinuierliche Entladung des Zeoliths erkennbar. Während der Adsorption nähern sich die Druckniveaus von Verdampfer und Reaktor an. Das Ölthermostat fungiert während der Adsorption als Verbraucher. In Abbildung 2 ist ein Temperaturanstieg des Öls um 8,4°C dokumentiert.

Gegen Ende der Versuchsdauer wurde eventuell versucht die Druckdifferenz wieder zu erhöhen, indem der Drucksatz der Vakuumpumpe erhöht wurde. Der Verdampferdruck p_V steigt dabei leicht an.

3.2.2 Bestimmung der maximalen Beladung des Zeoliths

Nachfolgend wird die maximal mögliche Beladung des Zeoliths bestimmt. Dafür wird der Reaktordruck über die Temperaturwerte T1 bis T4 in das Isosteren-Diagramm des Zeoliths mit einer Wasserbeladung eingetragen (s. Abbildung 3).

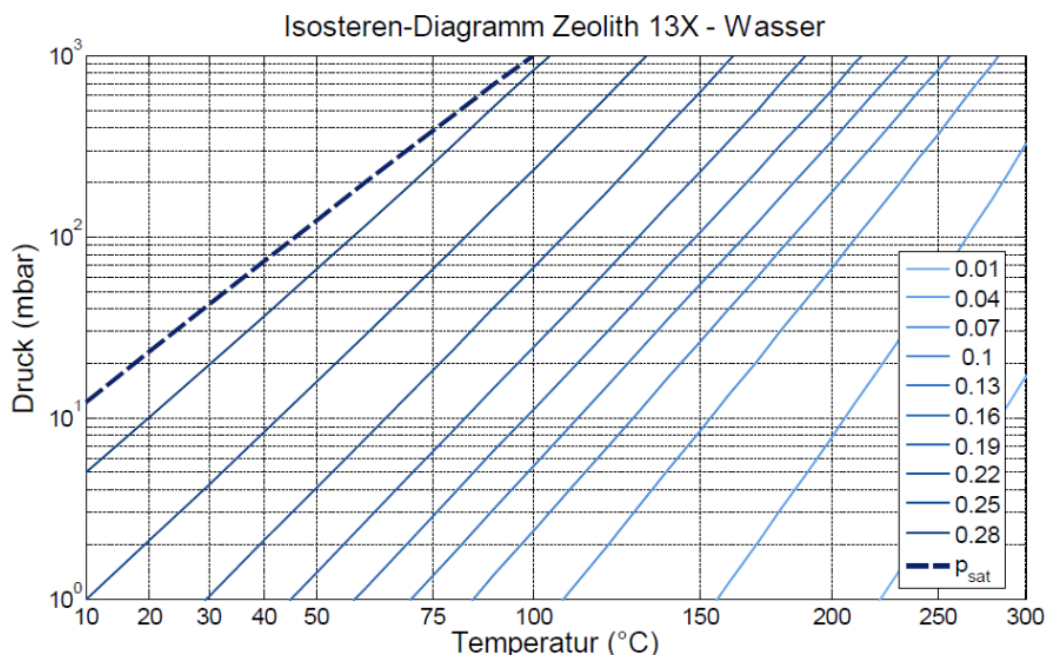


Abbildung 3: Reaktordruck über die Temperatur im Isosteren-Diagramm des Zeoliths 13X mit Beladungsmittel Wassers.

Im Diagramm sind die Beladungsgrade als Isosteren dargestellt. Die Kennlinien entsprechen von rechts nach links um jeweils 3 % ansteigenden Beladungsgraden. Die Isosteren bzw. Beladungsgrade verhalten sich linear bei steigender Temperatur und steigendem Druck.

Die Annäherung der Isosteren an die Dampfdruckkurve entspricht der maximalen Beladung des Speichermediums Zeolith. Die linke Begrenzungslinie stellt die Sättigung des Zeoliths dar. Nach Abbildung 3 beträgt die gesättigte Beladung von Zeolith 13X 31 %.

Zur Bestimmung der maximal möglichen Beladung des Zeoliths bei den eingestellten Versuchsparametern wurden die Messwerte für Druck und Temperatur im Isosteren-Diagramm aufgetragen. Die maximal mögliche Beladung des Zeoliths liegt bei 65,6 °C und 18 mbar vor und beträgt annähernd 25 % (s. Abbildung 4).

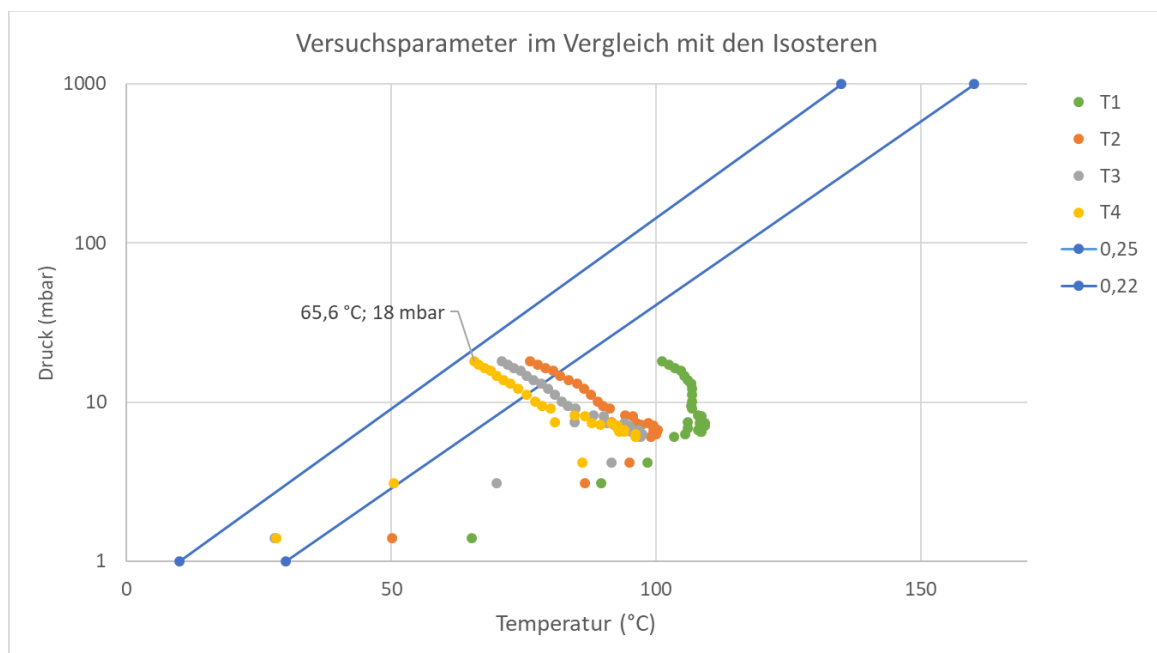


Abbildung 4: Diagramm Versuchsparemeter im Vergleich mit den Isosteren.

3.2.3 Bestimmung der tatsächlichen Beladung des Adsorbens

Die tatsächliche Beladung kann über die aufgenommene Wassermenge berechnet werden. Die im Reaktor befindliche Menge von 500 g Zeolith nimmt über den Zeitraum insgesamt 42,67 ml bzw. g Wasser auf. Daraus ergibt sich:

$$x_{\text{Messung}} = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Zeolith}}} = \frac{0,04267 \text{ kg}}{0,500 \text{ kg}} = 0,085$$

Die gemessene Beladung des Zeoliths mit $x=0,085$ liegt weit unterhalb der theoretisch maximalen Beladung von 22 %. Gründe dafür können die ungleiche Verteilung des Wasserdampfes auf den Zeolithen, Undichtigkeiten im System, die zu einem Wasser-Luft-Gemisch führen oder ein Restbestand von Wasser im Zeolith sein.

3.2.4 Bestimmung Adsorptionsenthalpie

Anhand der berechneten Wasserbeladung wird nun die Adsorptionsenthalpie berechnet. Dazu wird die Kennlinie des Zeoliths in Abbildung 5 verwendet.

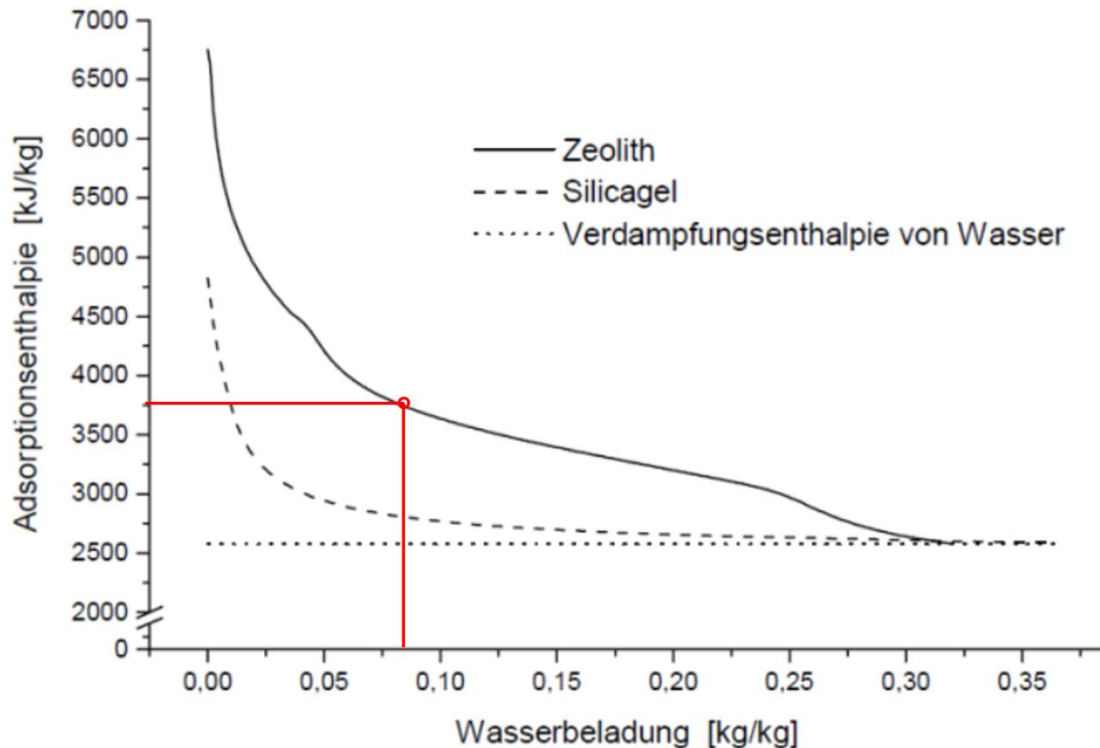


Abbildung 5: Adsorptionsenthalpie über die Wasserbeladung.

Für die Beladung ergibt sich eine Gesamtadsorptionsenthalpie von $H_{\text{ges}} \approx 3750 \text{ kJ/kg}$. Abzüglich der Verdampfungsenthalpie des Wassers ergibt sich folgende Adsorptionsenthalpie:

$$H_{\text{Adsorption}} = H_{\text{ges}} - H_{\text{Wasser}} = 3750 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1150 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

3.2.5 Bestimmung abgegebener Wärme an Thermalölkreislauf

Für die abgegebene Wärmemenge an den Thermalölkreislauf muss das arithmetische Mittel des Versuchsstarts und -endes verwendet werden:

Tabelle 1: Stoffdaten des Thermalöls. (Avia Thermofluid B)

Füllmenge im Kreislauf in (Liter)	5
Dichte bei 20 °C in (kg/m³)	863
Dichte bei 40 °C in (kg/m³)	850
spezifische Wärmekapazität bei 20 °C in kJ/(kg*K)	1,88
spezifische Wärmekapazität bei 40 °C in kJ/(kg*K)	1,95

$$Q_{ab} = m_{\dot{o}l} \cdot \bar{c}_{p,\dot{o}l} \cdot \Delta T_{\dot{o}l} = V_{\dot{o}l} \cdot \bar{\rho}_{\dot{o}l} \cdot \bar{c}_{p,\dot{o}l} \cdot \Delta T_{\dot{o}l}$$

$$Q_{ab} = 0,005 m^3 \cdot 856,5 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,915 \frac{kJ}{kg \cdot K} (31,4 ^\circ C - 23 ^\circ C) = 68,9 kJ$$

Es ergibt sich eine abgegebene Wärmemenge an den Thermalölkreislauf von $Q_{ab} = 68,9 kJ$.

3.2.6 Bestimmung Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad entspricht der übertragenen Wärmemenge an den Thermalölkreislauf in Bezug auf die freigesetzte Wärmemenge des Adsorptionsprozesses. Das Zeolith erreicht bei einer Nutzttemperatur von $60^\circ C$ und einer Dichte von $650 kg/m^3$ eine theoretische Energiedichte von $\omega = 177 kWh/m^3$. Die Energie, welche gespeichert werden kann, ergibt sich wie folgt:

$$E_{Zeolith} = \frac{m_{Zeolith}}{\rho_{Zeolith}} \cdot \omega = \frac{0,5 kg}{650 \frac{kg}{m^3}} \cdot 177 \frac{kWh}{m^3} = 0,136 kWh \cdot 3600 = 489,6 kJ$$

Es ergibt sich ein Nutzungsgrad von $N = \frac{68,9 kJ}{489,6 kJ} = 14\%$. Es werden in der Versuchszeit von 28 Minuten ca. 14 % der aus dem Zeolith freigesetzten Wärme im Thermalölkreislauf genutzt.

3.3 Desorptionsversuch

Der Desorptionsversuch wird im Anschluss an den Adsorptionsversuch eingeleitet. Dieser wird ebenfalls über einen Zeitraum von 28 Minuten durchgeführt und dokumentiert. Eine vollständige Desorption erfolgt erst nach 240 Minuten.

Für die Desorption wird eine Wärmequelle benötigt, die in diesem Versuch durch das Ölthermostat realisiert wird. Zu Beginn wird dieses bei geschlossenem Ventil V3 erhitzt. Die Desorptionstemperatur des Ölthermostats wird auf $185 ^\circ C$ eingestellt. Gleichzeitig wird das Thermostat für die Kühlung des Kondensators auf $8 ^\circ C$ eingestellt. Sobald der Druck p_1 größer ist als der Druck p_2 , wird das Ventil V3 geöffnet, wodurch der Wasserdampf desorbiert und anschließend im Kondensator aufgrund des umgekehrten Druckverhältnisses zum Adsorptionsprozess und der zugeführten Wärme kondensiert wird.

3.3.1 Temperatur-Druck-Verlauf

Nachfolgend die Entwicklung der Temperatur und des Drucks im Rahmen der bei der Desorption aufgezeichneten Werte.

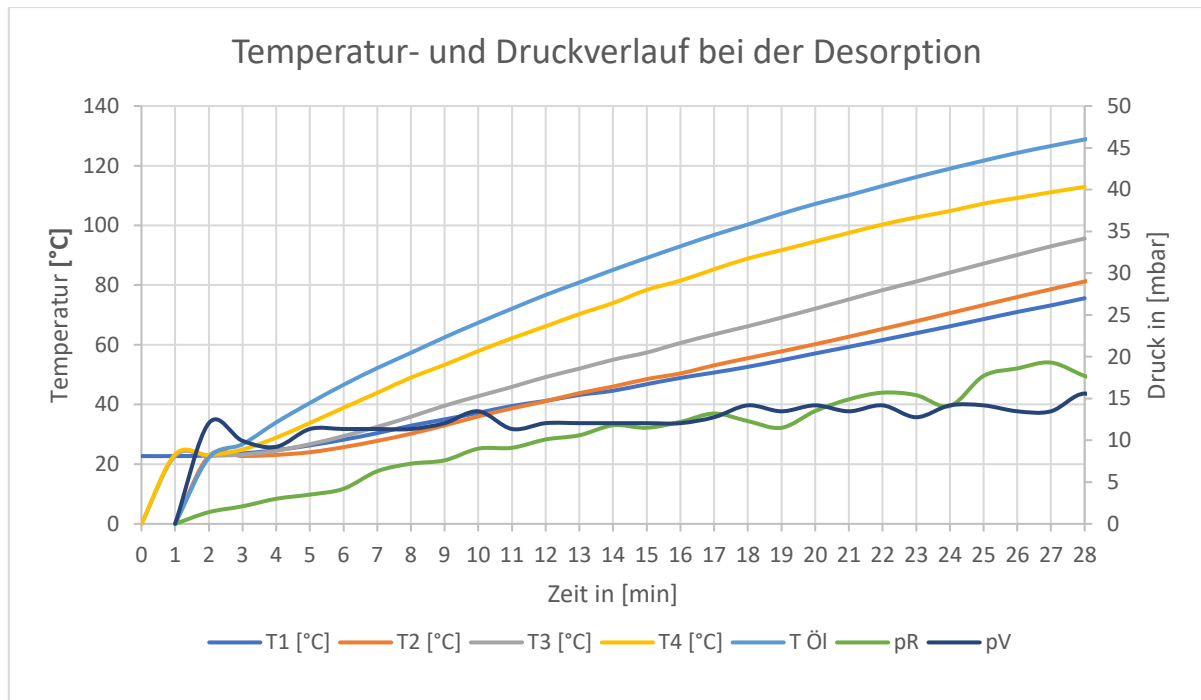


Abbildung 6: Temperatur- und Druckverlauf bei der Desorption.

Bei der Vorbereitung wird das Öl erhitzt. Dadurch erwärmt sich auch der Reaktor und der Wasserdampf wird ausgetrieben. Da das Ventil V3 noch geschlossen ist, kann das Wasser nicht entweichen. Aufgrund der Temperaturerhöhung steigt der Druck im Reaktor. Wenn das Ventil V3 geöffnet wird, strömt der Wasserdampf aufgrund des Druckgefälles in den Kondensator und der Druck ist gestiegen. Von der 14. bis zur 17. Minute stellen wir fest, dass nach dem Öffnen des Ventils V3 die Drücke pR und pV in etwa übereinstimmen. Eben-so beginnt der Desorptionsversuch, die Beladung des Zeoliths. Darüber hinaus ist es ersichtlich, dass die Temperaturen T1, T2, T3, T4 aufwärts gegangen sind und steigen annähernd linear an.

3.4 Abschlussbetrachtung

Das untersuchte Sorptionsreservoir (Zeolith) konnte über einen Zeitraum von 30 min etwa 42 ml Wasser in Form von Wasserdampf aufnehmen und speichern. Bei der Desorption wurde eine fast identische Menge Wasser, etwa 32 ml, mittels einer Wärmequelle ausgetrieben.

Bemerkenswert ist, dass auch die maximal erreichten Temperaturen bei den Adsorptions- (110°C) und Desorptionsversuchen (115°C) nahezu identisch waren. Somit zeichnet sich das Zeolith über Eigenschaften der thermochemischen Speicherung aus, es ist in der Lage, aufgenommene Wärmeenergie nahezu verlustfrei zu speichern und die gewünschte Temperatur in kurzer Zeit zu erreichen, und bietet damit für die Zukunft in verschiedenen Anwendungsbereichen bessere Speichereigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Wasserspeichern und damit ein großes Potential für die Langzeitwärmespeicherung.

4 Anhang

Tabelle 2: Messwerte Adsorptionsversuch.

Messzeit [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T_Öl	pR[mbar]	pV[mbar]
0	26,2	26,2	26,3	26,3	23	0,8	46,15
1	65,2	50,2	27,9	28,3	23	1,4	41,9
2	89,6	86,6	69,9	50,4	23,2	3,1	38,36
3	98,3	94,9	91,5	86,1	23,6	4,2	36,24
4	103,3	98,9	97	96	25,2	6,1	34,83
5	105,4	99,9	97,3	96	24,7	6,3	33,41
6	106	99,5	95,2	92,7	25,2	6,9	33,41
7	107,8	100,2	96,7	93,9	25,5	6,7	32,7
8	108,4	100,1	96,1	94	25,9	6,5	33,41
9	108,6	99,5	95,2	93	26,4	6,5	31,29
10	109,2	99,4	95	92,7	26,8	7,1	31,99
11	109,1	98,5	93,9	91,5	27	7,4	31,29
12	108,4	97,2	92	89,4	27,4	7,2	29,87
13	108,2	96,2	90,7	87,8	27,7	7,4	29,87
14	108,6	95,6	90	86,6	28	8,2	30,58
15	107,9	94,2	88,2	84,5	28,4	8,3	29,16
16	105,9	91,5	84,6	80,8	28,6	7,5	29,16
17	106,7	91,2	84,7	80,1	28,8	9,1	29,87
18	106,6	89,9	83,3	78,5	29,1	9,5	29,16
19	106,7	88,9	82,1	77,1	29,4	10,1	29,87
20	106,8	87,7	80,8	75,5	29,7	11,2	29,16
21	106,7	86,4	79,5	73,9	29,9	12,2	29,87
22	106,6	85,1	78,2	72,5	30,2	13,1	29,16
23	106	83,4	76,8	71,1	30,5	13,8	28,46
24	105,3	81,9	75,5	69,8	30,7	14,6	27,75
25	104,6	80,5	74,4	68,8	30,8	15,7	29,16
26	103,5	79	73,1	67,6	31	16,4	29,16
27	102,4	77,7	72	66,5	31,3	17,2	29,87
28	101,1	76,2	70,8	65,6	31,4	18	29,16

Tabelle 3: Wasserstand während Adsorptionsversuch

Zeit [min]	0	10	20	30
Wasserstand [ml]	420	409,28	389,52	377,33

Tabelle 4: Messwerte Desorptionsversuch.

Messzeit [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T_Öl	pR[mbar]	pV[mbar]
0	22,7	22,7	22,8	23,3	22,1	1,4	12,05
1	22,7	22,7	22,8	23,1	26,7	2,1	9,93
2	22,9	23,1	23,2	24,9	34	3	9,22
3	23,6	24	24,5	28,9	40,5	3,5	11,35
4	24,7	25,7	26,7	33,8	46,6	4,2	11,35
5	26,3	27,8	29,4	38,9	52,2	6,3	11,35
6	28,2	30,2	32,5	43,9	57,3	7,2	11,35
7	30,4	33	35,9	49	62,5	7,6	12,05
8	32,9	36	39,6	53,3	67,4	9	13,47
9	35	38,7	42,8	57,9	72,1	9,1	11,35
10	37,2	41,1	45,9	62,2	76,7	10,1	12,05
11	39,5	43,8	49,2	66,2	80,9	10,6	12,05
12	41,2	46	52	70,3	85,1	11,8	12,05
13	43,2	48,5	55	74	89,1	11,5	12,05
14	44,6	50,4	57,4	78,4	93	12,2	12,05
15	46,8	53,1	60,6	81,5	96,8	13,2	12,76
16	48,9	55,5	63,5	85,3	100,3	12,3	14,18
17	50,7	57,8	66,2	88,9	103,9	11,5	13,47
18	52,6	60,2	69,1	91,7	107,2	13,5	14,18
19	54,8	62,7	72,1	94,6	110,1	14,9	13,47
20	57,1	65,3	75,2	97,5	113,2	15,7	14,18
21	59,3	67,9	78,3	100,3	116,2	15,4	12,76
22	61,6	70,6	81,2	102,7	119	14,1	14,18
23	63,9	73,3	84,2	104,8	121,7	17,7	14,18
24	66,2	76	87,2	107,3	124,3	18,6	13,47
25	68,6	78,6	90,1	109,2	126,6	19,3	13,47
26	71	81,2	93	111,1	128,8	17,7	15,59
27	73,2	83,7	95,6	112,9	131	16,5	13,47
28	75,6	86,1	98,2	115,1	133,1	15,8	14,18

Tabelle 5: Wasserstand während Desorptionsversuch.

Zeit [min]	0	10	20	30
Wasserstand [ml]	260	264,82	274,89	291,96