

Protokoll zum Laborversuch Adsorptionswärmespeicher

Gruppe: 2

[Jan Helge Valentin Ambrosius, 576774]

[Tim Schachtschnabel, 579677]

[Simon Imhoff, 579986]

[David Asbeck, 576761]

[Florian Riesebeck, 578183]

Abgabedatum: 14.06.2021

Fachbereich 1

Ingenieurwissenschaften – Energie und Information

Studiengang Regenerative Energien

Betreuer:

M. Sc. Kadow, Prof. Dr.-Ing. Bartz

Inhalt

1	Versuchsaufbau und Durchführung	3
2	Versuchsauswertung Adsorptionsversuch	4
3	Versuchsauswertung Desorptionsversuch	8
4	Abschlussbetrachtung	10
	Literaturverzeichnis	11
	Anhang	12

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsstand Sorptionsspeicher [Barz 2020]	3
Abbildung 2: Darstellung Ad- und Desorptionsprozesse, [Barz 2020]	4
Abbildung 3: p,T-Diagramm der Messwerte	5
Abbildung 4: Isosterendiagramm Zeolith 13X-Wasser [Lanzerath 2013] mit Temperaturmessungen an den Stellen 1 bis 4 in °C und Druck im Reaktor in mbar	6
Abbildung 5: Differentielle Adsorptionseenthalpie von Silikagel und Zeolith X13 [Barz 2020]	7
Abbildung 6: p,T – Diagramm der Desorption	8
Abbildung 7: p,T – Diagramm der ersten 30 Minuten des Desorptionsvorgangs	9
Abbildung 8: Messwerte Gruppe 2	12

Symbole und Konstanten

ρ	Dichte
i	Index
h_i	Spezifische Enthalpie
T_i	Temperatur
η	Wirkungsgrad
Q	Wärmemenge
m	Masse
c_p	Spezifische Wärmekapazität
V	Volumen
ΔT	Temperaturdifferenz

1 Versuchsaufbau und Durchführung

Im Laborversuch "Adsorptionswärmespeicher" wird ein Speichermedium bezüglich seiner thermochemischen Speicherkapazität untersucht. Der Laborversuch wurde an einem bestehenden Versuchsstand (siehe Abb. 1) zur thermochemischen Wärmespeicherung im Raum WH G311 durchgeführt. Die Messdaten wurden aufgezeichnet und den jeweiligen Gruppen zur Verfügung gestellt, da die Anwesenheit der Teilnehmer aufgrund COVID-19 nicht möglich war.

Der **Adsorptionswärmespeicher** macht sich die Eigenschaften eines Zeoliths zu Nutze und kann Wärme über einen langen Zeitraum nahezu verlustfrei speichern. Ein Adsorptionswärmespeicher besteht dabei im Wesentlichen aus den Komponenten Verdampfer, Kondensator und Adsorber/Desorber, in dem das Adsorptionsmittel eingebracht ist. Als Adsorptionsmittel wird im Laborversuch der Zeolith Typ X13 (siehe Abb. 3) der Fa. Zeosys GmbH verwendet. Beim Zeolith X13 wird mit einer max. Beladung von ca. 0,25 kg ($\text{H}_2\text{O}/\text{kg}_{\text{Zeolith}}$) und einer Dichte von 650 kg/m^3 bei einer Nutztemperatur von 60°C eine theoretische Energiedichte von 177 kWh/m^3 erreicht [Gantenbein, Frei 2000]. Im Reaktor befinden sich 500 g des Zeoliths.

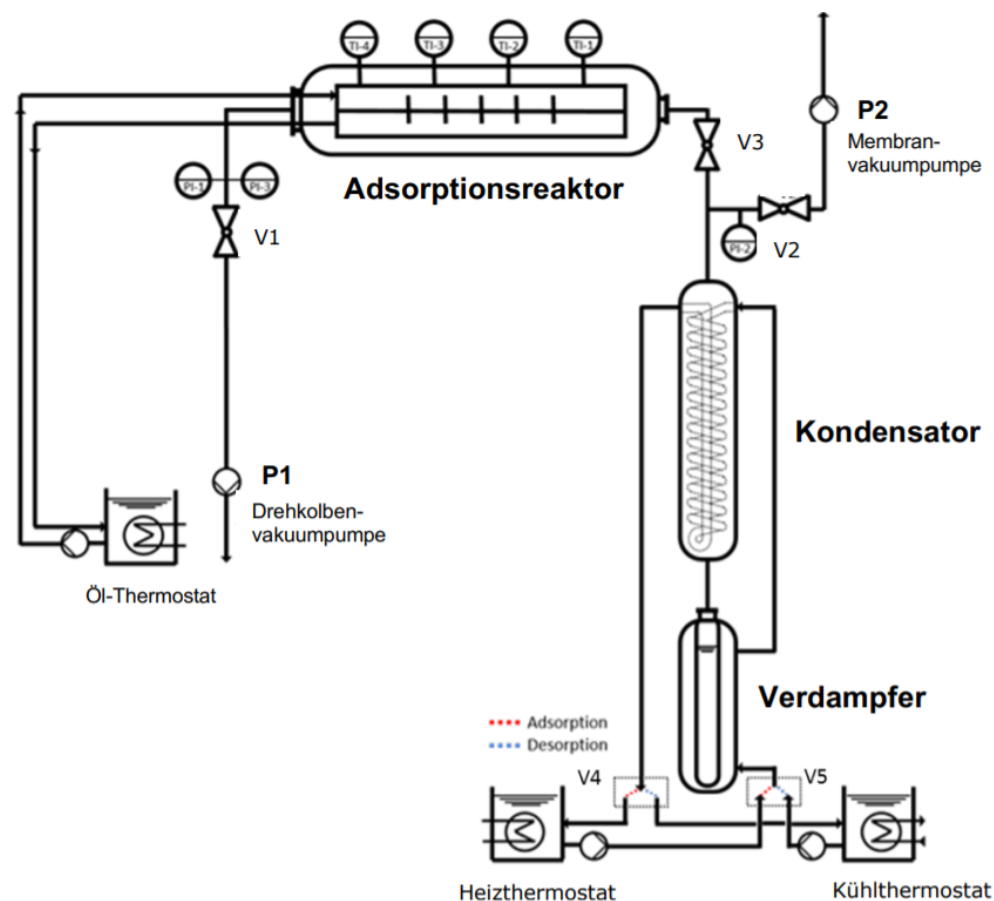


Abbildung 1: Versuchsstand Sorptionsspeicher [Barz 2020]

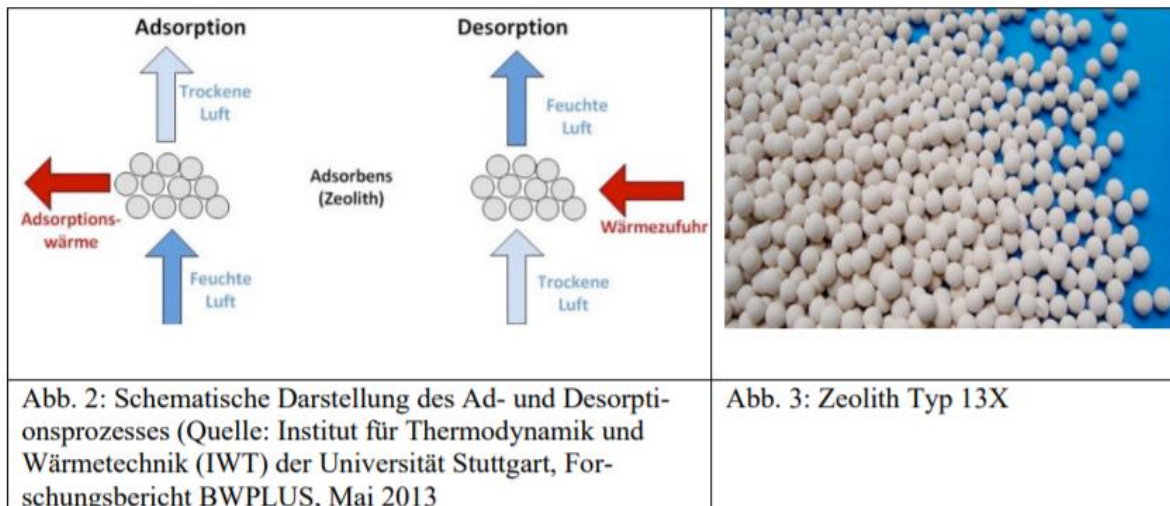


Abbildung 2: Darstellung Ad- und Desorptionsprozesse, [Barz 2020]

Im Rahmen des Versuchs sind folgende Parameter zu untersuchen und zu diskutieren:

1. Maximal mögliche Beladung des Adsorbers, anhand der eingestellten Versuchsparameter.
2. Tatsächliche Beladung des Adsorbers, anhand des aus dem Verdampfer aufgenommenen Wasserdampfes.
3. Nutzungsgrad ($\eta = \text{gespeicherte Energie} / \text{nutzbare Energie}$) des Speichers.
4. Temperaturverläufe im Adsorptions-/Desorptionsreaktor während der Be- und Entladung des Speichers.

2 Versuchsauswertung Adsorptionsversuch

1. Stellen Sie die Messwerte in einem geeigneten Diagramm (p , T über die Versuchszeit) dar und diskutieren Sie den Verlauf.

Für die Darstellung der einzelnen Messpunkte wurde ein Punktdiagramm (Abbildung 3) gewählt, da nur Minutenwerte bekannt sind und streng genommen nicht bekannt ist, wo die Werte zwischen zwei einzelnen Messpunkten liegen. Für eine bessere Übersichtlichkeit ist der Druck auf der Sekundärachse angegeben und die Punktarten für Temperatur und Druck anders dargestellt.

Während die Temperatur der vier Sensoren zum ersten Zeitpunkt überall gleich ist, steigen sie innerhalb weniger Minuten stark an. Zwischen den Temperaturen lässt sich über den gesamten Zeitraum ein gleicher Trend beobachten, jedoch mit einem Versatz: das Temperaturniveau der Messreihen sinkt von T1 zu T4 ab. Dies lässt sich an der größer werdenden Entfernung der Messpunkte vom Verdampfer mit der Reihenfolge T1, T2, T3, T4 erklären.

Um Minute 10 haben die Temperaturen ihre Höchststände erreicht und fallen nun im gleichen Trend Versatz bis zum Versuchsende ab. Zu beobachten ist, dass der Versatz, also der Temperaturunterschied zwischen den einzelnen Messpunkten geringer wird und sich die Temperaturen angleichen.

Während der zu Beginn erzeugte Druckunterschied zwischen Verdampfer Reaktor hoch ist, wird dieser mit Verlauf der Zeit niedriger. Der Reaktordruck steigt phasenweise für einige Minuten stärker und darauffolgend wieder schwächer an. Ab Minute 40 steigt der Reaktordruck relativ

konstant an. Der Verdampfendruck sinkt zunächst leicht und bewegt sich auf einem relativ konstanten Niveau. Die beiden Drücke nähern sich immer weiter an, sodass am Versuchsende ein geringer Druckunterschied von weniger als 5 bar vorherrscht.

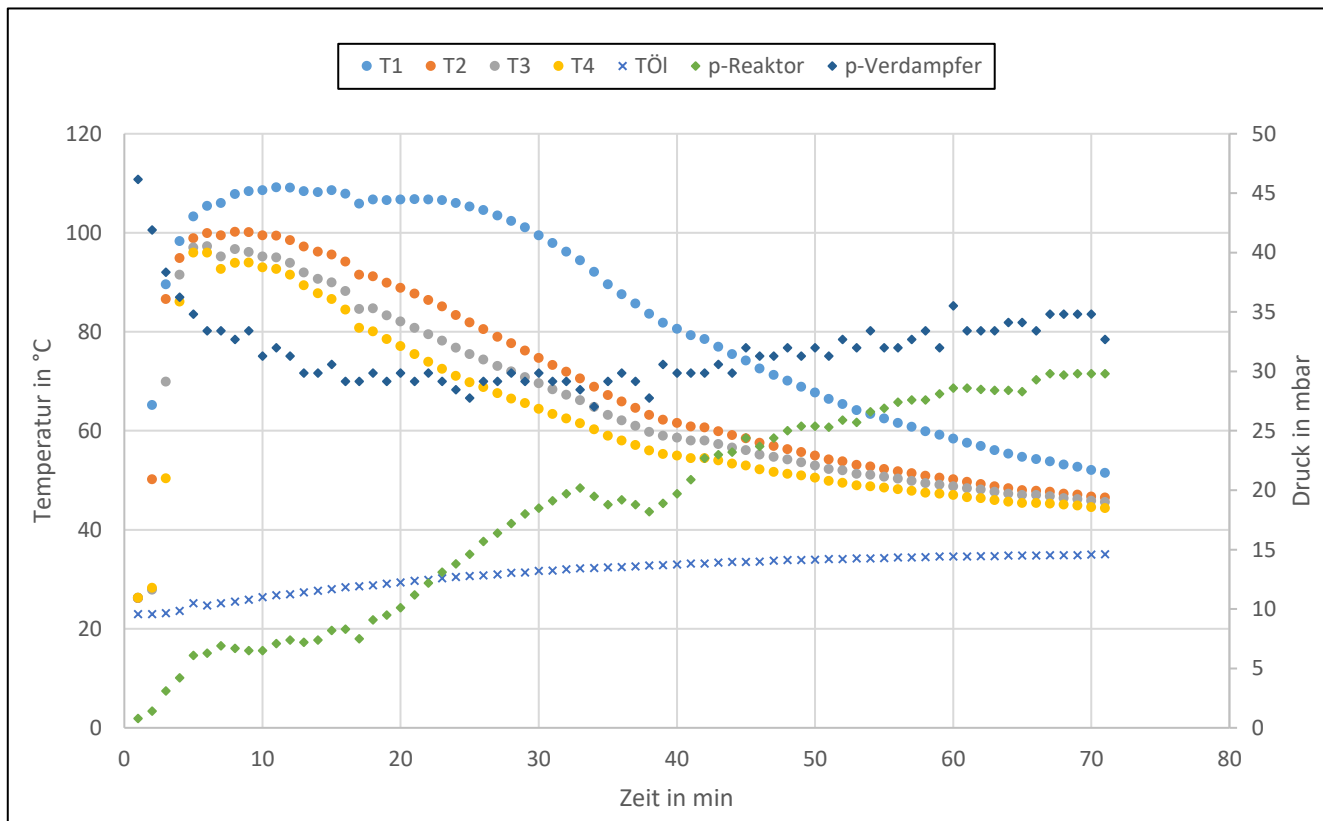


Abbildung 3: p,T-Diagramm der Messwerte

2. Bestimmen Sie die maximal mögliche Beladung des Zeoliths bei den eingestellten Versuchsparametern mit Hilfe des Isosteren Diagramms für den verwendeten Zeolith in der Anlage.

Die linke Begrenzungslinie im Isosteren-Diagramm definiert das gesättigt beladene Zeolith 13X. Die Beladungsgeraden nehmen von rechts nach links zu. Beim idealen Prozess sollten Kondensator und Verdampfer daher auf der Linie p_{sat} liegen (siehe Abbildung 4).

Im Temperatur- und Druckbereich der vorliegenden Adsorption kann die maximale Sättigung aufgrund der Umgebungsbedingungen jedoch nicht erreicht werden. Bei dem maximalen Druck (ca. 11 mbar im Reaktor) und der geringsten Temperatur (Raumtemperatur) kann eine maximale Beladung von ca. 0,27 kg $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$ Zeolith erreicht werden.

Die Messwerte ergeben, dass mit dem einhergehenden Druck- und Temperaturanstieg fast die maximale Beladung von **0,27 kg $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$ Zeolith** erreicht werden kann. Dies trifft auf die Messpunkte bei einem Druck von fast 30 mbar im Reaktor und ca. 45°C an den Messstellen im Adsorptionsreaktor zu.

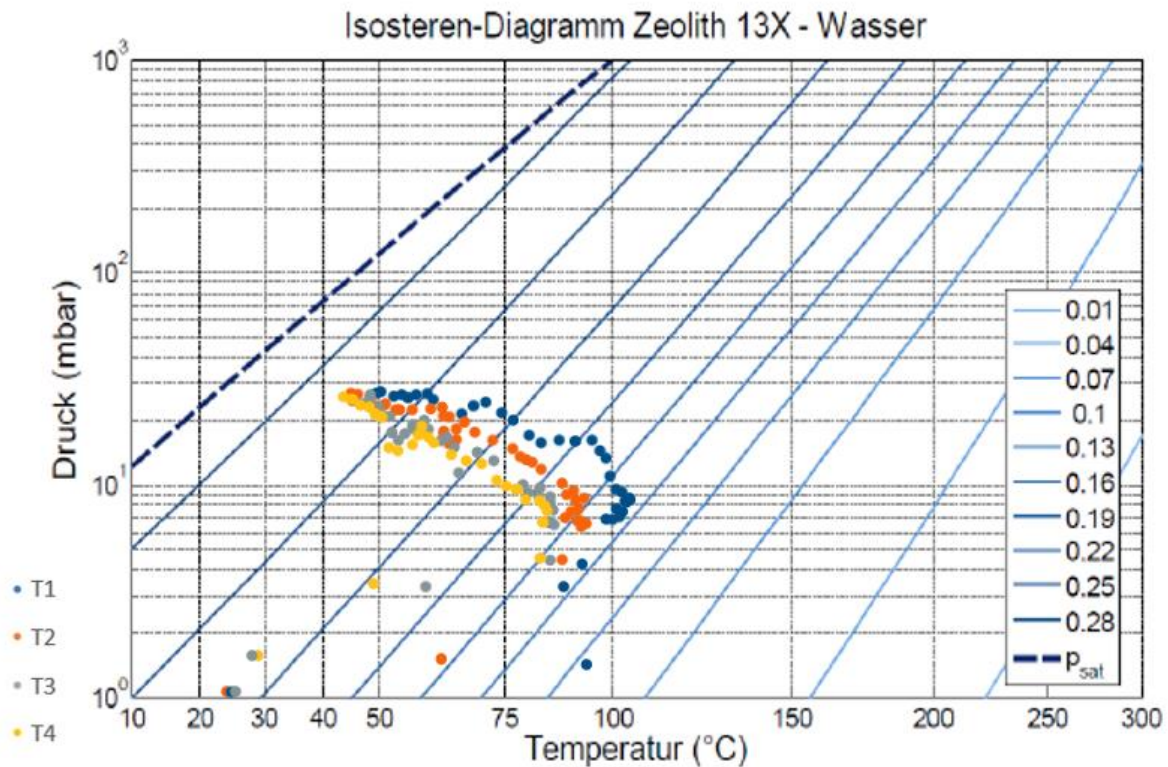


Abbildung 4: Isosterendiagramm Zeolith 13X-Wasser [Lanzerath 2013] mit Temperaturmessungen an den Stellen 1 bis 4 in °C und Druck im Reaktor in mbar

3. Bestimmen Sie die tatsächliche Beladung des Adsorbens anhand des aus dem Verdampfer aufgenommenen Wasserdampfes (verbrauchtes Wasser).

Der Wasserstand beträgt zum Beginn des Versuches 420ml und sinkt im Laufe des Versuches auf 324,5 ml ab. Die vom Verdampfer aufgenommene Wassermenge ist die Differenz beider Beträge, 95,9 ml. Da sich im Reaktor 500g des Zeoliths befinden, beträgt die spezifische Beladung 191 ml Wasser pro kg Zeolith oder auch **0,191 kg H₂O/kg Zeolith**.

4. Bestimmen Sie die Adsorptionseenthalpie anhand der Kennlinie des Zeoliths.

Die Adsorptionseenthalpie des Zeoliths kann in Abb. 5 abgelesen, dafür wird der entsprechende Wert der Adsorptionskurve von Zeolith an der entsprechenden Stelle auf Teilaufgabe 3 abgelesen.

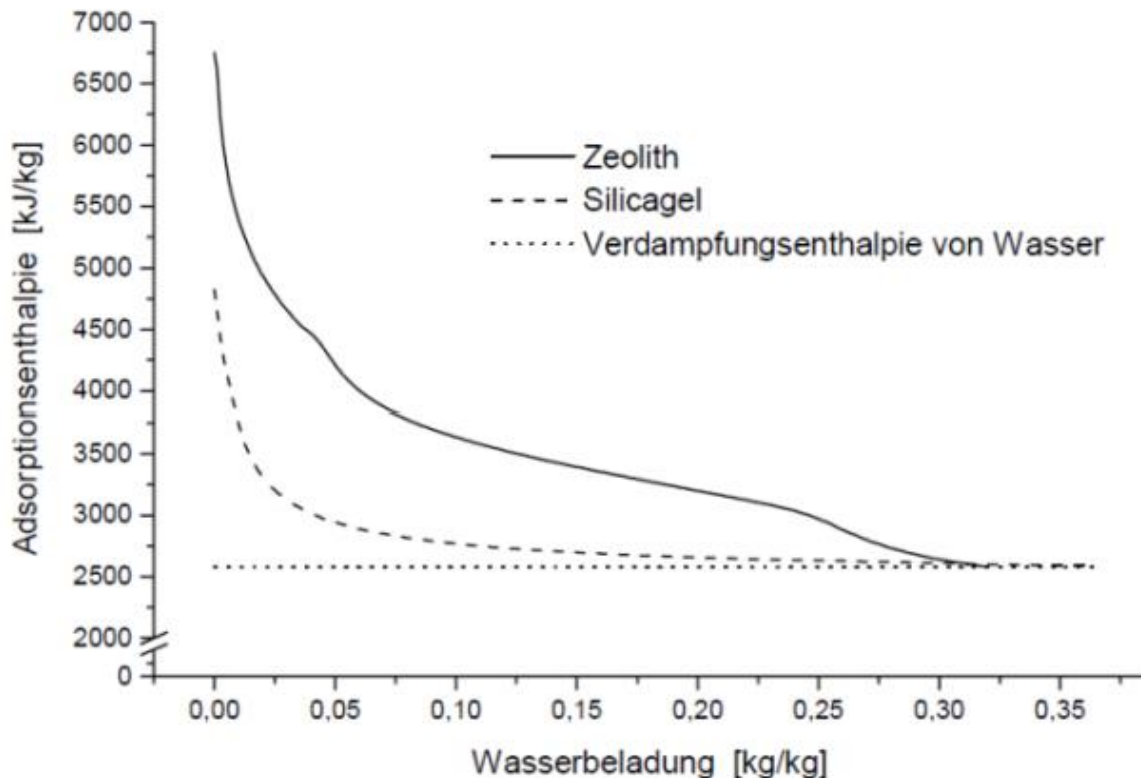


Abbildung 5: Differentielle Adsorptionenthalpie von Silicagel und Zeolith X13 [Barz 2020]

Bei einer Beladung von 0,191 kg H₂O/kg Zeolith ergibt sich eine Adsorptionenthalpie des Zeolith von ca. 3250 kJ/kg Zeolith. Die Verdampfungsenthalpie von Wasser ist konstant und liegt der Abbildung nach bei etwa 2600 kJ/kg. Mit den beiden Werten kann die Adsorptionenthalpie berechnet werden.

$$h_{ad} = h_z - h_w = (3250 - 2600) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Es ergibt sich ein Wert von 650 kJ/kg. Auf eine Zeolithmasse von 500 g bezogen beträgt diese somit $\frac{650 \text{ kJ/kg}}{0,5 \text{ kg}} = 325 \text{ kJ}$.

5. Bestimmen Sie die an den Thermalölkreislauf abgegebene Wärmemenge

Thermalöl „Avia Thermafluid B“: (5 Liter im Kreislauf, Dichte bei 20 °C = 863 kg/m³, Dichte bei 40 °C = 850 kg/m³, spezifische Wärmekapazität bei 20 °C = 1,88 kJ/(kg*K), spezifische Wärmekapazität bei 40 °C = 1,95 kJ/(kg*K))

In der folgenden Betrachtung wird davon ausgegangen, dass das Thermalöl keine Wärme an die Umgebung abgegeben hat. Die Mitteltemperatur des Öls über den gesamten Zeitraum beträgt ca. 31,2 °C. Aufgrund der Nähe zum Mittelwert von 30 °C wird für eine einfachere Betrachtung der Mittelwert für diese Temperatur betrachtet. Für die spez. Wärmekapazität ergibt sich so ein Wert von 1,915 kJ/(kg*K) und für die Dichte ein Wert von 856,5 kg/m³.

Die vom Öl aufgenommene Wärme wird durch $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ berechnet. Die Masse errechnet sich nach $m = V \cdot \rho$.

Mit einer Temperaturdifferenz von 12,1 K und der Annahme einer perfekten Durchmischung des Öls ergibt sich eine aufgenommene Wärmemenge von 99,23 kJ über die Dauer des Versuches

6. Bestimmen Sie den Nutzungsgrad (an den Thermalölkreislauf übertragene Wärmemenge bezogen auf die beim Adsorptionsversuch freigesetzte Wärmemenge) und diskutieren Sie das Ergebnis.

Der Nutzungsgrad beschreibt die tatsächliche Energieausbeute der Adsorption und wird durch den Quotienten der an den Thermalölkreislauf übertragenen Wärmemenge und der beim Adsorptionsversuch freigesetzten Wärmemenge berechnet. Der Nutzungsgrad ist $\eta = \frac{99,23 \text{ kJ}}{325 \text{ kJ}} = 0,305$. Dies entspricht 30,5 Prozent. Das bedeutet, dass in dem Versuch lediglich 30,5 Prozent der freigesetzten Wärme nutzbar war.

3 Versuchsauswertung Desorptionsversuch

Eine vollständige Desorption (energetische Beladung des Zeoliths) ist mit den an der Versuchsanlage möglichen Prozessparametern erst nach 240 Minuten erfolgt. Im Rahmen des Desorptionsversuches werden nur die ersten 30 Minuten des Desorptionsvorganges untersucht.

Stellen Sie die Messwerte (T1 bis T4 und P1 und P2) in einem geeigneten Diagramm (p, T über die Versuchszeit) dar und diskutieren Sie den Verlauf der ersten 30 Minuten des Desorptionsversuches.

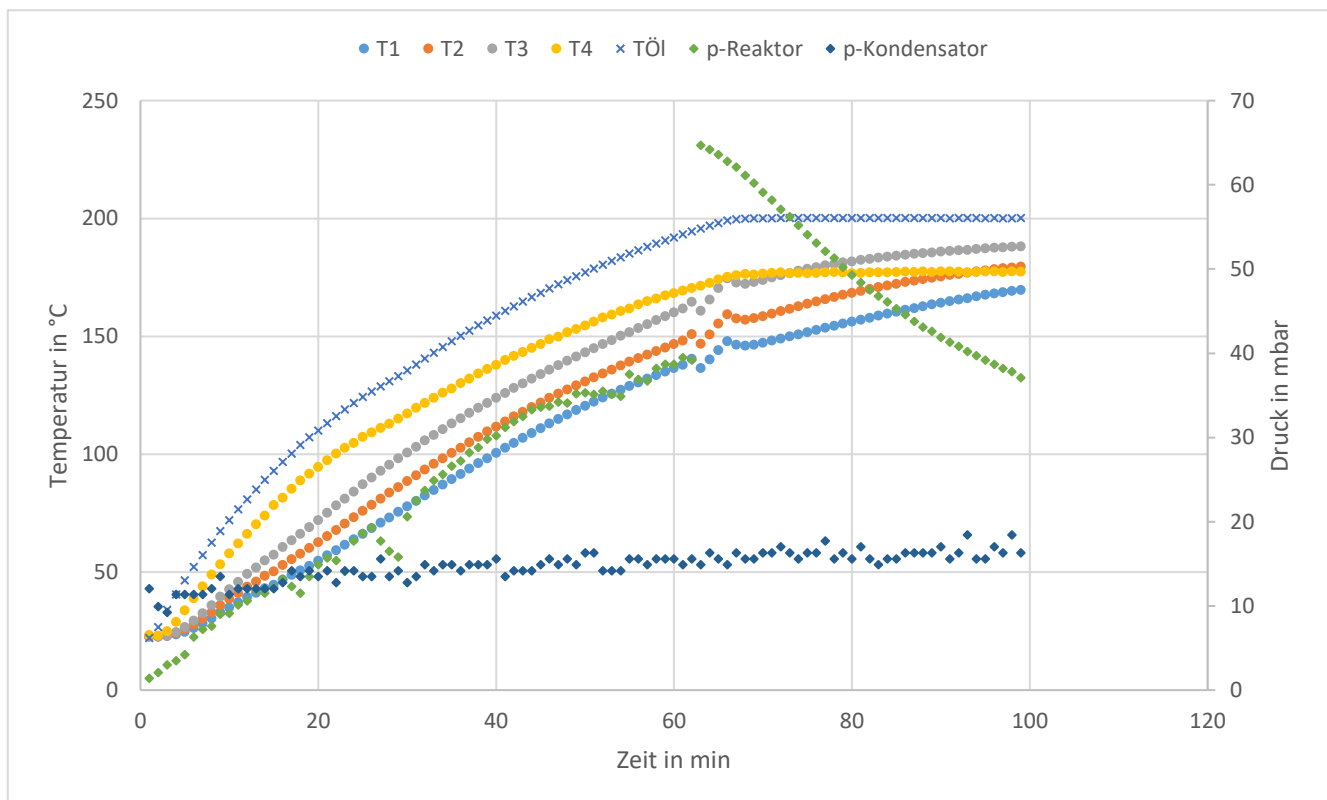


Abbildung 6: p,T – Diagramm der Desorption

Unter der Desorption versteht man das Ausleiten des in den Zeolithen gespeicherten Wasserdampfs mittels eines erzeugten **Druckunterschiedes** zwischen Absorber und Kondensator. Dieser Vorgang wird im Bereich der thermochemischen Speicherung auch als "Laden" bezeichnet.

Um den erforderlichen Druckunterschied zu erzeugen, wird mittels eines Ölthermostats am Ende des Adsorptions-Reaktors eine Temperaturerhöhung erzeugt. Abbildung 6 zeigt das p,T –

Diagramm der Desorption über der gesamten Messreihe von 100 Minuten, Abbildung 7 zeigt den geforderten Abschnitt der ersten 30 Minuten, welcher im Folgenden näher betrachtet wird: Die zum Zeitpunkt $t=0$ s des hier betrachteten Desorptionsvorgangs befinden sich alle Messpunkte auf einem niedrigen Temperaturlevel um die Raumtemperatur. Die angestrebte Desorptionstemperatur ist 185°C . Im Verlauf des Versuchs steigen die Temperaturen der Messpunkte mit vergleichbarem Trend und relativ konstanten Versatz an, was für ein gleichmäßiges „Laden“ spricht. Nach ca. 15 Minuten kehrt sich die Druckdifferenz zwischen Reaktor und dem Kondensator um, so dass der Reaktordruck höher als der Kondensatordruck ist. Über dem gemessenen Zeitraum steigt die Ladetemperatur weiter an und sorgt für das bessere Austreiben des zuvor gespeicherten Wasserdampfes. Dieser angestrebte Druckunterschied steigt im Verlauf des Versuchs weiter an.

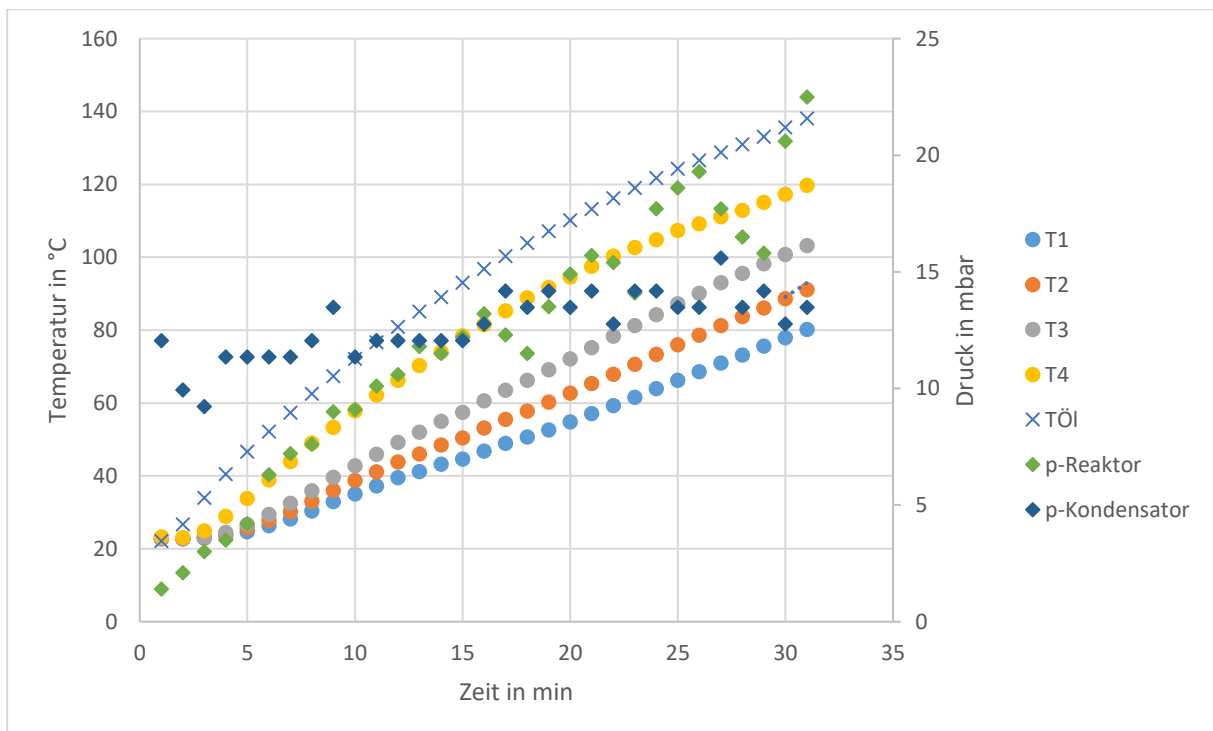


Abbildung 7: p,T – Diagramm der ersten 30 Minuten des Desorptionsvorgangs

4 Abschlussbetrachtung

Vergleichen und diskutieren Sie anhand der Ergebnisse des Versuches die energetische Speicherkapazität des untersuchten Sorptionsspeichers mit der eines konventionellen Wasserspeichers.

Die spezifische Adsorptionsenthalpie aus dem Versuch beträgt $h = 650 \text{ kJ/kg}$. Die spezifische energetische Speicherkapazität eines konventionellen Warmwasserspeichers ergibt sich aus der mittleren spezifischen Wärmekapazität und der Temperaturdifferenz nach der Formel

$$h = cp * \Delta T$$

Bei einer angenommenen mittleren spez. Wärmekapazität von $4,2 \text{ kJ/(kg*K)}$ für Wasser müsste die Temperaturdifferenz des Warmwasserspeichers für die gleiche spezifische Speicherkapazität bei $\Delta T = \frac{650 \text{ kJ/kg}}{4,2 \text{ kJ/(kg*K)}} = 154,7 \text{ K}$ liegen. Im konkreten Anwendungsfall ergeben sich so mehrere Probleme. Einerseits ist das benötigte Temperaturniveau sehr hoch, außerdem wäre für so einen großen Temperaturunterschied ein anspruchsvoller Druckspeicher nötig, um die Siedetemperatur des Wassers zu erhöhen. Da dies in der Praxis nicht gemacht würde, muss das Wasservolumen und somit die Masse für die gleiche Speicherkapazität erhöht werden. Die spezifische gewichtsbezogene Speicherdichte sinkt also. Zusätzlich kann ein Wasserspeicher nicht perfekt isoliert werden und verliert mit der Zeit an Wärmeenergie.

Literaturverzeichnis

- [Cordes, Brandes 2016] Tom Cordes, Mark Brandes: Ertüchtigung eines Laborversuchs zum Adsorptionswärmespeicher, Projektarbeit an der HTW Berlin, Juni 2016
- [Gantenbein, Frei 2000] Paul Gantenbein, Ueli Frei: Zeolithspeicher in der Solartechnik – Machbarkeit und Potentiale; Studie am Institut für Solartechnik SPF Hochschule Rapperswill, März 2000
- [Lanzerath 2013] Lanzerath, F.: Modellgestützte Entwicklung von Adsorptionswärmepumpen, Dissertation an der RWTH Aachen, 2013
- [Hauer 2002] Andreas Hauer: Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Systemen für energetische Anwendungen, Dissertation an der TU Berlin 2002
- [Barz 2020] Versuchsanleitung zum Laborversuch „Adsorptionswärmespeicher“, Version von April 2020

Anhang

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Messzeit [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T_Öl	pR[mbar]	pV[mbar]			
2	0.00	26,2	26,2	26,3	26,3	23	0,8	46,15		Zeit [min]	Wasserstand [ml]
3	1.00	65,2	50,2	27,9	28,3	23	1,4	41,9		0	420
4	2.00	89,6	86,6	69,9	50,4	23,2	3,1	38,36		10	409,28
5	3.00	98,3	94,9	91,5	86,1	23,6	4,2	36,24		20	389,52
6	4.00	103,3	98,9	97	96	25,2	6,1	34,83		30	377,33
7	5.00	105,4	99,9	97,3	96	24,7	6,3	33,41		40	352,94
8	6.00	106	99,5	95,2	92,7	25,2	6,9	33,41		50	340,06
9	7.00	107,8	100,2	96,7	93,9	25,5	6,7	32,7		60	328,45
10	8.00	108,4	100,1	96,1	94	25,9	6,5	33,41		70	324,5
11	9.00	108,6	99,5	95,2	93	26,4	6,5	31,29			
12	10.00	109,2	99,4	95	92,7	26,8	7,1	31,99			
13	11.00	109,1	98,5	93,9	91,5	27	7,4	31,29			
14	12.00	108,4	97,2	92	89,4	27,4	7,2	29,87			
15	13.00	108,2	96,2	90,7	87,8	27,7	7,4	29,87			
16	14.00	108,6	95,6	90	86,6	28	8,2	30,58			
17	15.00	107,9	94,2	88,2	84,5	28,4	8,3	29,16			
18	16.00	105,9	91,5	84,6	80,8	28,6	7,5	29,16			
19	17.00	106,7	91,2	84,7	80,1	28,8	9,1	29,87			
20	18.00	106,6	89,9	83,3	78,5	29,1	9,5	29,16			
21	19.00	106,7	88,9	82,1	77,1	29,4	10,1	29,87			
22	20.00	106,8	87,7	80,8	75,5	29,7	11,2	29,16			
23	21.00	106,7	86,4	79,5	73,9	29,9	12,2	29,87			
24	22.00	106,6	85,1	78,2	72,5	30,2	13,1	29,16			
25	23.00	106	83,4	76,8	71,1	30,5	13,8	28,46			
26	24.00	105,3	81,9	75,5	69,8	30,7	14,6	27,75			
27	25.00	104,6	80,5	74,4	68,8	30,8	15,7	29,16			
28	26.00	103,5	79	73,1	67,6	31	16,4	29,16			
29	27.00	102,4	77,7	72	66,5	31,3	17,2	29,87			
30	28.00	101,1	76,2	70,8	65,6	31,4	18	29,16			
31	29.00	99,5	74,7	69,6	64,4	31,7	18,5	29,87			
32	30.00	97,9	73,3	68,4	63,4	31,8	19,1	29,16			
33	31.00	96,2	71,9	67,3	62,5	32	19,7	29,16			
34	32.00	94,4	70,6	66,2	61,5	32,2	20,2	28,46			
35	33.00	92,1	68,9	64,8	60,3	32,3	19,5	27,04			
36	34.00	89,6	67,2	63,2	59	32,4	18,8	29,16			
37	35.00	87,6	65,9	62,1	58	32,5	19,2	29,87			
38	36.00	85,7	64,6	61	57,1	32,6	18,8	29,16			
39	37.00	83,6	63,2	59,8	56	32,8	18,2	27,75			
40	38.00	81,8	62,2	59	55,3	32,9	18,9	30,58			
41	39.00	80,6	61,6	58,6	55	33	19,7	29,87			
42	40.00	79,3	60,9	58	54,5	33,2	20,9	29,87			
43	41.00	78,5	60,7	58	54,5	33,2	22,7	29,87			
44	42.00	77	59,9	57,3	54	33,4	23	30,58			
45	43.00	75,5	59,1	56,6	53,4	33,5	23,2	29,87			
46	44.00	74,2	58,5	56,1	53	33,5	24,4	31,99			
47	45.00	72,6	57,6	55,2	52,2	33,6	23,7	31,29			
48	46.00	71,3	56,9	54,7	51,7	33,8	24,4	31,29			
49	47.00	70,1	56,3	54,2	51,3	33,9	25	31,99			
50	48.00	68,9	55,7	53,6	51	33,9	25,4	31,29			
51	49.00	67,7	55	53	50,5	34	25,4	31,99			
52	50.00	66,4	54,2	52,3	49,9	34,1	25,3	31,29			
53	51.00	65,4	53,8	52	49,5	34,1	25,9	32,7			
54	52.00	64,2	53,1	51,3	49	34,2	25,7	31,99			
55	53.00	63,4	52,8	51,1	48,8	34,2	26,6	33,41			
56	54.00	62,5	52,3	50,7	48,5	34,3	26,9	31,99			
57	55.00	61,6	51,8	50,3	48,2	34,4	27,4	31,99			
58	56.00	60,8	51,4	49,9	47,9	34,4	27,6	32,7			
59	57.00	59,9	50,9	49,4	47,5	34,5	27,6	33,41			
60	58.00	59,2	50,5	49,1	47,3	34,6	28,1	31,99			
61	59.00	58,4	50,2	48,8	47	34,6	28,6	35,53			
62	60.00	57,6	49,7	48,4	46,6	34,6	28,6	33,41			
63	61.00	56,9	49,2	48,1	46,4	34,7	28,5	33,41			
64	62.00	56,1	48,8	47,7	46	34,7	28,4	33,41			
65	63.00	55,4	48,4	47,3	45,7	34,8	28,4	34,12			
66	64.00	54,7	48	47	45,4	34,8	28,3	34,12			
67	65.00	54,3	47,9	47	45,4	34,8	29,3	33,41			
68	66.00	53,8	47,7	46,8	45,3	34,9	29,8	34,83			
69	67.00	53,2	47,3	46,4	45,1	34,9	29,7	34,83			
70	68.00	52,7	47,1	46,2	44,9	34,9	29,8	34,83			
71	69.00	52,1	46,7	45,9	44,6	35	29,8	34,83			
72	70.00	51,5	46,5	45,6	44,4	35,1	29,8	32,7			

Abbildung 8: Messwerte Gruppe 2