

Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences

Labor Regenerative Wärmetechnik (Ü)

Versuchsanleitung zum Laborversuch

„Adsorptionswärmespeicher“

Verfasser

Name	Matrikelnummer
Yousef Mahmoud	565158
Jonas Gebel	564569
Jonathan Wellnitz	584298
Moharram Nashwan	546057
Simon Holthaus	584294

Laboringenieurin

Prof. Dr. Asnakech Laß-Seyoum

Fachbereich 1
Ingenieurwissenschaften – Energie
und Information Studiengang
Regenerative Energien

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
b	m	Breite
HG	W	Enthalpiestrom Abgas
Hu	W	Enthalpiestrom Brennstoff
HL	W	Enthalpiestrom Verbrennungsluft
A	m ²	Fläche
HU	Wh/kg	Heizwert
h	m	Höhe
dh	dm	Höhendifferenz
l	m	Länge
λ	-	Luftüberschusszahl
m	kg	Masse
\dot{m}	g/s	Massenstrom
Br / Wasser	kg/s	Massenstrom Brennstoff / Wasser
L_{min}	kg/kg	Mindestluftbedarf
Q_{Nutz}	W	Nutzwärme
$\vartheta_{rück}$	°C	Rücklauftemperatur
c_p	kJ/(kgK)	spezifische Wärmekapazität
T	K	Temperatur
ϑ_{vor}	W	Verlustwärme
\dot{v}	m ³ /h	Volumenstrom
α	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient
d_z	dm	Zylinderdurchmesser

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Formelverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	III
1 Einführung.....	4
2 Versuchsaufbau	4
3 Versuchsdurchführung	5
4 Messwerte.....	6
5 Ergebnisse	9
5.1 Adsorption	9
5.2 Desorption	10
5.3 Berechnung	11
6 Fazit	14
7 Literaturverzeichnis	XV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:Versuchsstand Sorptionsspeicher [1]	5
Abbildung 2 Darstellung der Adsorption Messwerte	9
Abbildung 5 Darstellung der Desorption Messwerte	10
Abbildung 3 Isoteren-Diagramm [2]	11
Abbildung 4 Adsorptionsenthalpie, Wasserbeladungs Diagramm [2]	12

Formelverzeichnis

Formel 1 tatsächliche Beladung des Adsorbens.....	11
Formel 2 Wärmemenge	12
Formel 3 freigesetzte Wärmemenge	13
Formel 4 Wirkungsgrad	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Adsorptionsmesswerte.....	6
Tabelle 2 Desorptionsmesswerte	7

1 Einführung

Ziel des Laborversuchs ist der Aufbau und das Betriebsverhalten eines Adsorptionsspeichers beim Be- und Entladen in der Praxis zu erforschen, sowie die damit verbunden technischen Hintergründe zu vermitteln. In diesem Bericht wird zuerst der Versuchsaufbau beschrieben, anschließend wird die Versuchsdurchführung erläutert. Aufbauend dazu werden die Messwerte dargestellt und anschließend diskutiert.

2 Versuchsaufbau

In dem Laborexperiment "Adsorptionswärmespeicher" wird ein Wärmespeicher auf seine thermochemische Speicherfähigkeit hin untersucht. Mit Hilfe von Zeolith wird die Wärme des Adsorptionswärmespeichers nahezu verlustfrei gespeichert und über einen bestimmten Zeitraum wieder freigegeben. Der Lagertank ist mit einem Kondensator, einem Verdampfer und einem Adsorptionsreaktor ausgestattet. Für den Versuch werden außerdem ein Thermoölerhitzer und ein Kühler verwendet. Um den Druck im Adsorptionsreaktor weiter zu reduzieren, wird eine Vakuumpumpe eingesetzt. Das Adsorptionsmittel besteht aus Zeolith X13 mit den folgenden Eigenschaften. In Abbildung 1 wird der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

max. Beladung von ca. $0,25 \text{ kg}_{H_2O} / \text{kg}_{Zeolith}$

Dichte von $650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bei einer Nutztemperatur von 60°C

theoretische Energiedichte von 177 kWh/m^3

Im Reaktor befinden sich 500 g des Zeoliths

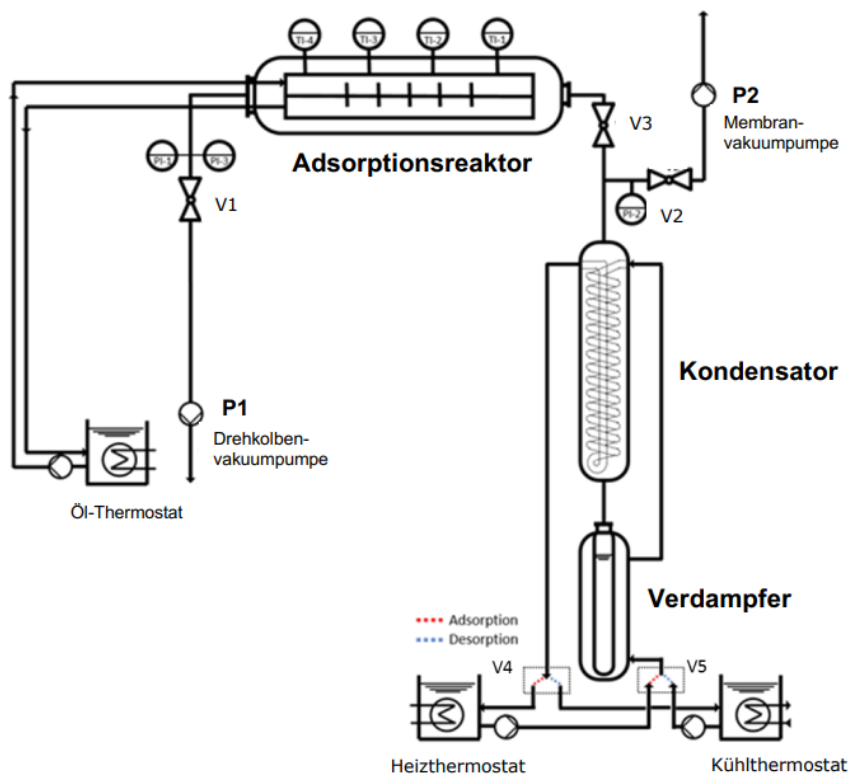


Abbildung 1: Versuchsstand Sorptionsspeicher [1]

3 Versuchsdurchführung

Hier wird die Wassertemperatur im Thermostat auf 30°C eingestellt. Die Vorlaufverbindung zwischen Heizungsthermostat und Verdampfer muss an den Ventilen V4 und V5 (3-Wege-Ventile) eingestellt werden. Der Anfangsdruck im Adsorptionsreaktor beträgt $P1 = 1 \text{ mbar}$ und $P2 = 42,2 \text{ mbar}$. Darüber hinaus wird die Temperatur des Ölthermostats zu Beginn der Prüfung aufgezeichnet. Die gemessenen Werte für den Freiheitsgrad von T1 bis T4 und die Drücke P1 und P4 sind nachstehend aufgeführt. Die Messdaten sind mehr als 20 Minuten lang, wobei alle Wassermoleküle gleich sind, d.h. verdampfen können, und die Ölthermostatterperatur etwa 10 Minuten nach dem Ende des Tests eingestellt wird.

Vor Beginn eines Versuchs müssen die Ventile erneut überprüft und eingestellt werden. Der Druck im Reaktor sollte ($p1$) 4mbar nicht überschreiten. Der Druck im rechten Teil des Systems muss gleich dem Dampfdruck bei der entsprechenden Temperatur sein, und der Kühlthermostat wird auf 8 °C eingestellt, nachdem der Druck $p1$ höher als $p2$ ist und die ersten 30 Minuten des Absorptionsprozesses aufgezeichnet wurden.

4 Messwerte

Die Messwerte der Adsorptions- und Desorptionsversuche sind in Tabelle 1 und 2 dargestellt. Die Werte in den Tabelle 1 und 2 bilden die Datengrundlage für die Diagramme.

Tabelle 1 Adsorptionsmesswerte

Messzeit [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T_Öl [°C]	pR [mbar]	pV [mbar]
0.00	28,1	28	28,1	28,1	24,9	0,2	41,9
1.00	57,5	31,6	28,2	28,1	25,1	0,5	42,61
2.00	90,7	88,4	34,4	35,3	25,5	2,1	44,73
3.00	101	99,5	68,4	49	25,9	2,6	43,32
4.00	108,2	106	105,1	95,4	26,3	3,3	39,78
5.00	110,5	107,5	106,5	104,1	26,9	4	39,07
6.00	112,3	108,5	108,1	106,8	27,4	4,2	36,24
7.00	112,3	107,7	104,7	102,1	27,8	4,9	39,07
8.00	112,6	107,3	104,8	101,8	28,2	5,1	37,66
9.00	112,6	106,7	104	102,3	28,6	6,5	34,83
10.00	112,1	105,4	102,1	100,6	29	6,1	34,83
11.00	111,7	104,3	100,5	98,9	29,5	8,1	34,83
12.00	111,2	103	98,8	96,8	29,8	8,7	34,83
13.00	110,9	102	97,2	95,1	30,2	8,9	34,12
14.00	110,2	100,3	95,1	92,5	30,5	10,6	33,41
15.00	109,4	98,7	92,9	89,8	30,8	10,9	31,99
16.00	108,4	96,9	90,6	87,1	30,9	12,3	32,7
17.00	105,7	93,5	86,3	82,3	31,2	13,1	29,87
18.00	106,3	93,1	86,2	81,6	31,3	14,3	39,07
19.00	104,8	90,9	83,8	79,1	31,6	14,5	36,24
20.00	104,6	89,7	82,5	77,4	32	15,3	39,07
21.00	103,2	87,8	80,5	75,2	32,4	16,1	37,66
22.00	101,6	85,7	78,5	73,1	32,8	17,1	34,83
23.00	100,6	84,4	77,2	71,7	33,2	17,7	34,83
24.00	98,6	82,3	75,1	69,6	33,5	18,4	34,83
25.00	97,3	81	73,8	68,4	34	18,8	34,83
26.00	95,6	79,3	72,2	66,9	34,6	19,3	34,12
27.00	93,9	77,8	70,8	65,6	35,1	20	39,78
28.00	92	76,1	69,3	64,3	35,6	20,5	42,61
29.00	90,2	74,5	67,9	63	36,1	20,9	43,32
30.00	88,4	73,2	66,8	62	36,8	21,4	44,73

Tabelle 2 Desorptionsmesswerte

Messzeit [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T_Öl [°C]	pR [mbar]	pK [mbar]
0.00	28,4	28,6	28,3	26,8	27	2,85	10,6
1.00	28,5	28,7	28,5	27,2	32	2,85	11,7
2.00	28,9	29,3	28,9	29,8	39,2	2,15	13,7
3.00	28,8	30	29,3	34,1	45,5	4,98	15,4
4.00	29,5	32,2	30,6	38,9	51,4	5,69	34,2
5.00	30,8	34,7	32,8	43,8	56,7	6,39	34,8
6.00	32,3	37,4	35,5	48,8	61,9	3,56	35,8
7.00	34	40,2	38,4	53,3	66,7	5,69	37,1
8.00	36	43	41,5	57,5	71,4	5,69	38,4
9.00	37,9	45,8	44,5	62,2	75,9	5,69	39,8
10.00	39,8	48,7	47,6	66,2	80,2	5,69	41,1
11.00	41,8	51,8	50,8	70,1	84,3	5,69	42,1
12.00	43,6	54,7	53,7	74,1	88,4	6,39	43,4
13.00	45,7	57,7	56,7	78,1	92,4	8,52	44,3
14.00	47,7	60,7	59,7	81,7	96,2	6,39	45,3
15.00	49,7	63,7	62,7	85,1	99,8	7,81	46,1
16.00	51,7	66,8	65,7	88,7	103,2	8,52	46,8
17.00	53,9	69,9	68,6	91,7	106,7	8,52	47,7
18.00	56,1	73	71,6	94,2	109,7	9,93	48,4
19.00	58,4	76,1	74,6	97	112,6	9,22	49,2
20.00	60,6	79,1	77,5	99,3	115,3	9,93	49,7
21.00	62,8	82	80,3	101,7	118,1	10,64	50,4
22.00	65	84,9	83	104,1	120,9	10,64	51,1
23.00	67,2	87,7	85,7	106,2	123,4	9,93	51,6
24.00	69,6	90,6	88,4	108,4	125,8	11,35	52,1
25.00	71,8	93,3	90,9	110,5	128,2	11,35	52,7
26.00	74	96	93,4	112,4	130,4	12,05	53,1
27.00	76,2	98,5	95,8	114,3	132,7	14,18	53,6
28.00	78,5	101,1	98,3	116,7	135	12,05	54
29.00	80,7	103,5	100,5	118,9	137,6	15,59	54,4
30.00	82,8	105,9	102,8	121,4	140	14,18	54,9
31.00	85,8	109,4	106,6	123,6	142,6	16,3	58,6
32.00	85,8	109,1	107,6	125,4	145,1	16,3	40,3
33.00	87,8	111,2	108,5	127,6	147,5	16,3	40,6
34.00	89,8	113,2	110,2	129,8	149,8	17,72	40,1
35.00	91,8	115,2	112,1	131,9	152,1	18,42	40
36.00	93,9	117,4	114,1	133,6	154,3	17,72	40,2
37.00	96	119,4	116,1	136	156,4	19,84	40,4
38.00	98,1	121,4	117,9	137,9	158,4	17,72	40,8

39.00	100,1	123,4	119,9	139,6	160,5	20,55	41
40.00	102,2	125,4	121,7	141,6	162,5	21,96	41,6
41.00	104,3	127,3	123,6	143,4	164,4	20,55	42,1
42.00	106,3	129,3	125,5	145	166,3	21,25	42,6
43.00	108,3	131,3	127,4	146,6	168,1	21,25	43
44.00	110,2	133,2	129,2	148,2	169,9	21,96	43,5
45.00	112,2	135	131,1	150,1	171,9	23,38	44,2
46.00	114	136,9	132,9	151,5	173,7	22,67	44,8
47.00	115,8	138,8	134,7	153,5	175,6	25,5	45,3
48.00	117,6	140,6	136,6	155,4	177,2	22,67	45,7
49.00	119,2	142,5	138,3	156,4	179	21,25	46,3
50.00	120,9	144,4	140,2	158	180,7	22,67	46,7
51.00	122,6	146,2	142	159,5	182,2	24,79	47,1
52.00	124,2	148,1	143,8	161	183,8	24,79	47,5
53.00	125,8	149,9	145,6	162,4	185,3	24,08	47,9
54.00	127,3	151,8	147,3	164,1	186,9	24,79	48,3
55.00	128,8	153,6	149,1	165,6	188,4	24,79	48,6

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Messwerte des Versuchs ausgewertet. Dafür wird zuerst auf die Adsorption und anschließend auf die Desorption eingegangen.

5.1 Adsorption

Die bei der Adsorption aufgenommenen Werte sind in Abbildung 2 als zwei Diagramme dargestellt.

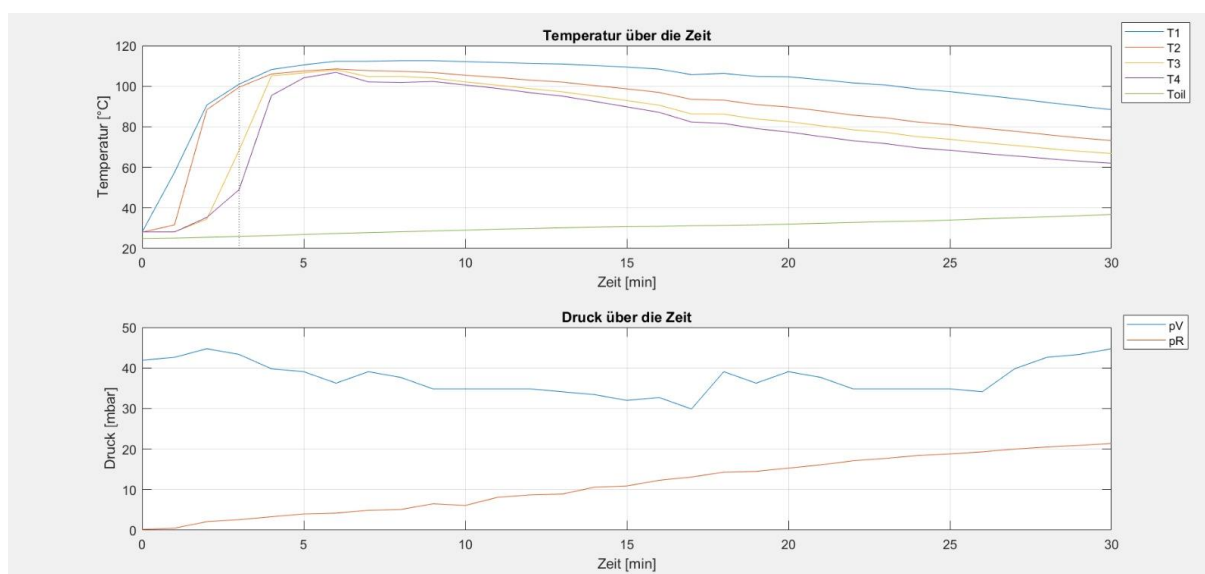


Abbildung 2 Darstellung der Adsorptions Messwerte

Im „Temperatur über die Zeit“ Diagramm aus Abbildung 2 wird ein starker Temperaturanstieg bei den T1; T2; T3 und T4, dabei ist T1 schneller im Temperaturanstieg, T2; T3 und T4 steigen später an. Dieser Anstieg ist in den ersten 5 Minuten deutlich. Insgesamt kann an den Temperaturanstiegen eine Angleichung der Temperaturen und der Versatz der Messpunkte beobachtet werden. Die Höchsttemperatur wird nach Minute 9 erreicht bei T 1, T2-4 erreichen diese bei Minute 6. Die Höchsttemperaturen liegen zwischen 107 °C oder 112 °C. Nach dem Erreichen der Höchsttemperatur fällt diese kontinuierlich ab. Die Temperatur des Öls hingegen steigt über den gesamten Versuch kontinuierlich an. Beim Start des Versuchs hat das Öl eine Temperatur von 25 °C und bei Ende des Versuchs 37 °C. Dieser kontinuierliche Temperaturanstieg lässt sich durch die Wärmeabnahme aus dem Reaktor erklären.

Im unteren Diagramm in Abbildung 2 wird der Druck über die Zeit dargestellt, im Diagramm wird ersichtlich, dass sich die beiden Drücke kontinuierlich angleichen. Ein

Ansteigen des Verdampfendruck lässt sich durch Undichtigkeiten erklären. In Minute 17 wird der Verdampfendruck durch das Regulieren des Heizthermostats möglich, dadurch ergibt sich eine höhere Wassertemperatur und somit ebenfalls ein höherer Druck. Dieser Effekt ist auch im Temperaturdiagramm sichtbar durch einen Knick in den Linien.

5.2 Desorption

Die bei der Desorption aufgenommenen Werte sind in Abbildung 3 als zwei Diagramme dargestellt.

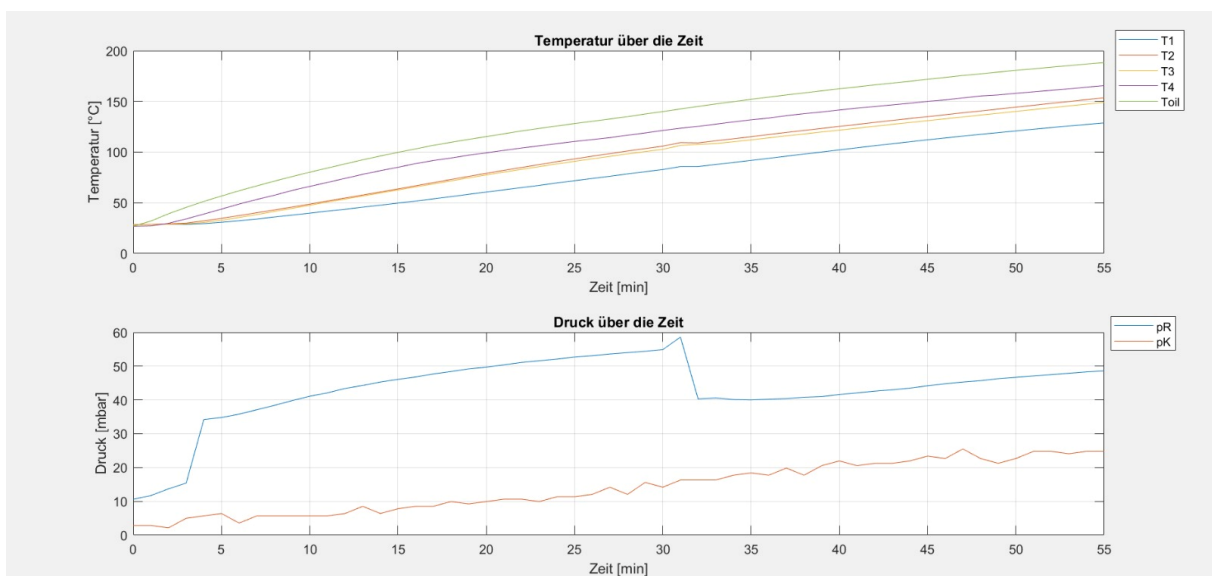


Abbildung 3 Darstellung der Desorption Messwerte

Aus dem "Temperatur über die Zeit" Diagramm ist zu erkennen, dass die Temperatur im Reaktor sich stetig erhöht je höher die Temperatur des Öls ist. Dabei ist die Temperatur T1 des Reaktors zu jedem Zeit Punkt aufgrund der Wärmeabgabe an Zeolith viel kleiner als die Temperatur T4 auf der anderen Seite des Reaktors. Wird das "Druck über die Zeit" Diagramm betrachtet, fällt auf, dass aufgrund der Wärmezufuhr durch Öl sich den Druck im Reaktor erhöht. Dabei ist einen sprunghaften Anstieg im Reaktordruck (pR) zwischen der Minute 3 und 33 mbar zu sehen. Dies kann sich durch den freigesetzten Wasserdampf, der aufgrund der Temperaturerhöhung vom Zeolith entsteht, erklären. Die Druckerhöhung im Reaktor verursacht einen Druckdifferenz, der ebenso zur stetigen Erhöhung des Kondensatordrucks (pK) führt.

5.3 Berechnung

Die maximale Beladung des Zeoliths wird anhand des Isosteren-Diagramms bestimmt. In Abbildung 4 ist das Diagramm und die markierte Stelle dargestellt.

Dafür wird die durchschnittliche Reaktortemperatur und der Reaktordruck bei der max. Beladung des Zeoliths (Minute 30) für die Bestimmung der Beladung zu Grunde gelegt. Anhand dieser Parameter kann mit Hilfe der unten aufgeführten Grafik eine maximale Beladung von ca. $0,24 \frac{g_{H_2O}}{g_{Zeolith}}$ bestimmt werden.

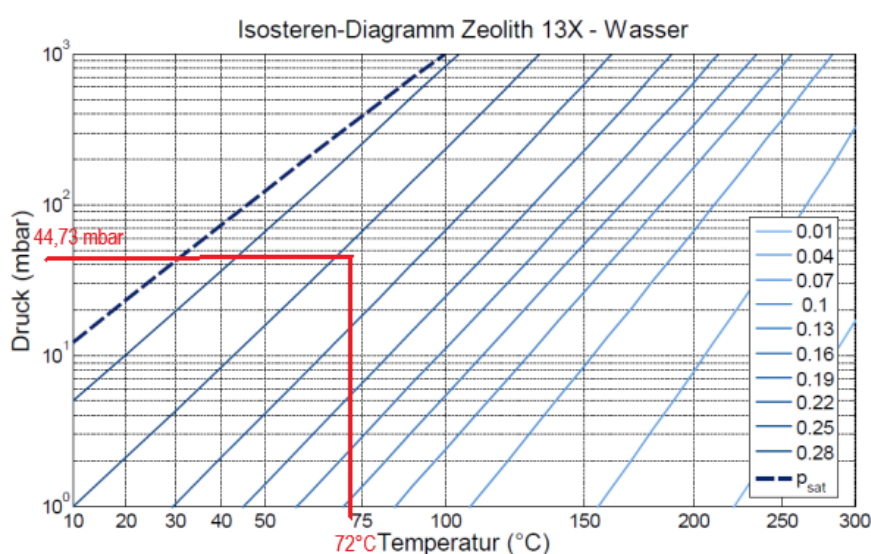


Abbildung 4 Isoteren-Diagramm [2]

Die tatsächliche Beladung des Adsorbens kann mit Hilfe der Formel 1 ermittelt werden.

$$x = \frac{\text{Masse des verdampften Wassers}}{\text{Masse des Adsorbens}}$$

Formel 1 tatsächliche Beladung des Adsorbens

Die verdampfte Masse des Wassers beträgt dabei was aufgrund der Dichte von Wasser auch der Masse in Gramm entspricht.

$$m_{H_2O(g)} = 420 \text{ ml} - 380 \text{ ml} = 40 \text{ ml}$$

Die Masse des Adsorbens (Zeolith) beträgt im Versuch 500g. Dadurch ergibt sich eine tatsächliche Beladung von $x = \frac{40 \text{ g}}{500 \text{ g}} = 0,08$.

Die Adsorptionsenthalpie kann mit Hilfe der untenstehenden Abbildung bestimmt werden. Dafür wird der Schnittpunkt von einer zur y-Achse parallele Linie bei der

tatsächliche Wasserbeladung von $x = 0,08$ mit dem Enthalpieverlauf des Zeoliths bestimmt. Für den Versuch ergibt sich damit eine Adsorptionseenthalpie von $h = 3750 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

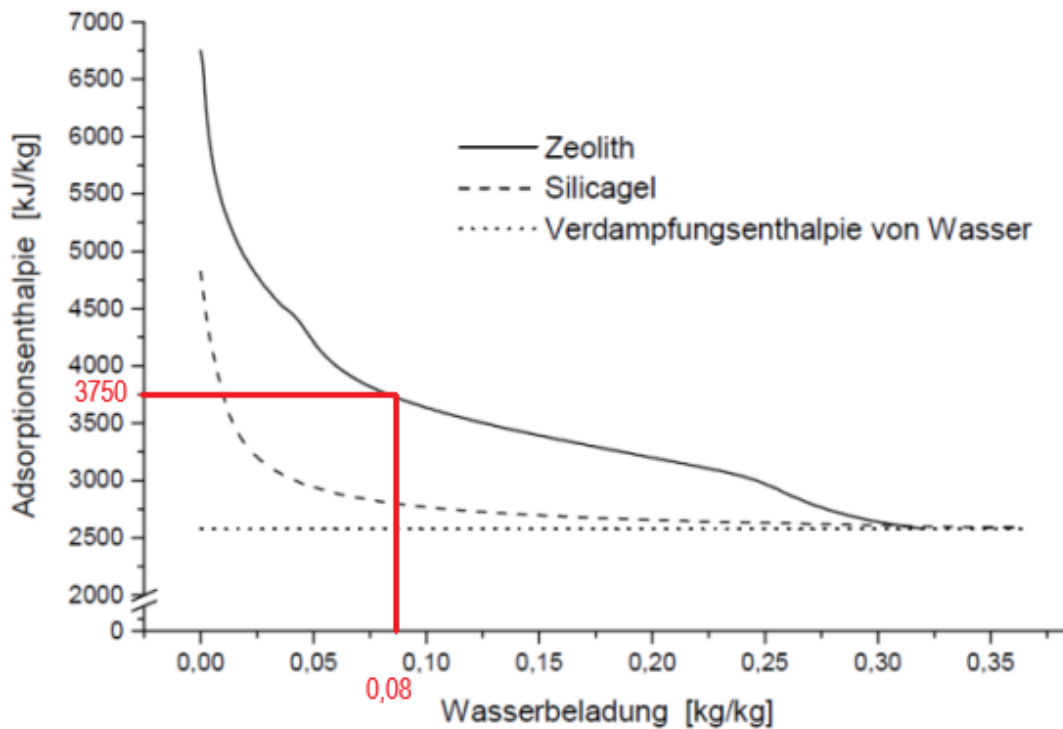


Abbildung 5 Adsorptionseenthalpie, Wasserbeladungs Diagramm [2]

Die an das Öl abgegebene Wärmemenge kann mit Hilfe der Formel 2 ermittelt werden.

$$Q = m_{\text{öl}} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Formel 2 Wärmemenge

Wird die Masse des Öls $m_{\text{öl}}$ durch die Gleichung $m_{\text{öl}} = V \cdot \rho$ ersetzt so folgt daraus $Q = V_{\text{öl}} \cdot \rho_{\text{öl}} \cdot c_p \cdot \Delta T$. Das Volumen des Öls im Kreislauf beträgt $V_{\text{öl}} = 5 \text{ l} = 0,005 \text{ m}^3$, der Mittelwert der Dichte liegt bei $\rho_{\text{öl}} = 856,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, die spezifische mittlere Wärmekapazität $c_p = 1,915 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ und die Temperaturdifferenz $\Delta T = 36,8^\circ\text{C} - 24,9^\circ\text{C} = 11,9 \text{ K}$. Wird dies in die Formel 2 eingesetzt, so ergibt sich für die abgegebene Wärmemenge $Q = 0,005 \text{ m}^3 \cdot 856,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,915 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 11,9 \text{ K} = 97,59 \text{ kJ}$.

Die beim Versuch freigesetzte Wärmemenge lässt sich mit Hilfe der Formel 3 bestimmen.

$$Q = m_{\text{Zeolith}} \cdot h_{\text{Zeolith}}$$

Formel 3 freigesetzte Wärmemenge

Damit ergibt sich eine Wärmemenge von $Q_{\text{Abgabe}} = 0,5 \text{ kg} \cdot 3750 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1875 \text{ kJ}$. Die vom Öl aufgenommene Wärmemenge beträgt $Q_{\text{Aufnahme}} = 97,59 \text{ kJ}$. Der Nutzungsgrad kann dementsprechend wie in Formel 4 gezeigt berechnet werden und ist 5,2 %.

$$\eta = \frac{Q_{\text{Aufnahme}}}{Q_{\text{Abgabe}}} = \frac{97,59 \text{ kJ}}{1875 \text{ kJ}} = 0,052 = 5,2 \%$$

Formel 4 Wirkungsgrad

Dieser Nutzungsgrad ist recht gering, jedoch erfolgt die Temperaturabgabe vom Reaktor an das Öl stark zeitverzögert. Daraus lässt sich schlussfolgern, die Öltemperatur noch einmal zu einem späteren Zeitpunkt hätte gemessen werden müssen. Aus der dann gemessenen, höheren Öltemperatur würde sich folglich auch ein höherer Nutzungsgrad ergeben.

6 Fazit

Die energetische Speicherkapazität von Wasser beträgt ca. 60 kWh/m^3 , die von Zeolith liegt dagegen bei ca. 177 kWh/m^3 . Ein weiterer Unterschied liegt in der Art des Speichers. Ein Wasserspeicher ist ein sensibler Wärmespeicher und gibt über die Zeit seine Energie an die Umgebung ab, daher muss dieser kontinuierlich mit Energie versorgt werden. Dies geschieht nicht bei einem latenten Wärmespeicher wie Zeolith. Dieser wird einmal beladen und speichert die Energie bis zur Entladung. Jedoch ist dafür der speicher- und Entladevorgang bei Zeolith aufwändiger und kostenintensiver als der beim einem Wasserspeicher. Ebenso sind die Anschaffungskosten höher bei einem Latenten Wärmespeicher als die bei einem konventionellen Wasserspeicher. [3] [4]

Auffällig ist der geringe Wirkungsgrad von 5,2 % dieses Versuchs. Dieser Nutzungsgrad ist gering, jedoch erfolgt die Temperaturabgabe vom Reaktor an das Öl stark zeitverzögert. Daraus lässt sich schlussfolgern, die Öltemperatur noch einmal zu einem späteren Zeitpunkt hätte gemessen werden müssen. Aus der dann gemessenen, höheren Öltemperatur würde sich folglich auch ein höherer Nutzungsgrad ergeben.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Sabine Kupzok Versuchsanleitung zum Laborversuch „Adsorptionswärmespeicher (S4)
- [2] Sabine Kupzok Versuchsanleitung zum Laborversuch „Adsorptionswärmespeicher (S8)
- [3] Sabine Kupzok Laboreinführung zum Adsorptionswärmespeicher. FB1/SoSe2022
- [4] Vorlesungsunterlagen_ Thermochemische Speicher