

H₂-Speicher

Energiespeicher (ESP), Laborversuch

1. Dezember 2021

Verfasser:	Jonas Fuhrmann	560960
	Constantin Nölte	561439
	Abdoualkahar Ameziane	560241
	Filip Tandara	579676
	Martin Teichert	564191
	Jana Deichsel	564440
Studiengang:	Regenerative Energien	
Semester:	WiSe 2021/22	
Prüfer:	Dipl.-Ing. (FH) S. Kupzok M.Sc.	

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
1 Einleitung	3
2 Vorbereitungsaufgaben	3
2.1 Was ist ein Metallhydrid?	3
2.2 Erläutern sie kurz die Funktionsweise eines Metallhydridspeichers	3
2.3 Welche Vorteile hat ein Metallhydridspeicher gegenüber einem Druckspeicher?	3
2.4 Benennen Sie potentielle Einsatzgebiete für Metallhydridspeicher	3
2.5 Berechnen Sie für den Metallhydridspeicher mit Hilfe der technischen Daten aus 3.	3
2.6 Die Entladung des Speichers erfolgt über eine Brennstoffzelle im Direktbetrieb an einer elektronischen Last. Welche Stromstärke ist an der Last einzustellen, um dem Speicher einen Wasservolumenstrom von 5,5 l/min zu entziehen.	5
2.7 Entwickeln Sie qualitativ aus der Konzentration-Druck-Isotherme eines MHS die Van't-Hoff-Gerade. Was beschreibt der Anstieg der Geraden?	5
2.8 Gegeben sei ein Hydridspeicher mit einer Füllung TiFeH_2 . Berechnen Sie die Wasserstoffspeicherkapazität des Materials in Gewichtsprozent.	6
3 Versuchsdurchführung und -aufbau	6
4 Auswertung	7
4.1 Anlagen-, Stoffwert- und Messdaten	7
4.2 Zeitlicher Verlauf von Temperatur und Druck sowie dem Volumenstrom und der gespeicherten H_2 -Mengen	12
4.3 Temperaturverlauf bei Be- und Entladung	15
4.4 Einfluss von Volumenstrom und Temperatur auf die Lade- und Entladegeschwindigkeit des Speichers	15
4.5 Ladezustand des Speichers in %	16
4.6 Volumenstromkurven die ein- bzw. ausgespeicherte Masse Wasserstoff je Messabschnitt	17
4.7 Volumetrische und gravimetrische Speicherdichte und Energiespeicherdichte für den Speicher mit und ohne Peripherie	17
4.8 Massenbezogene Beladung des Metallhydrids im Speicher	17
4.9 Verlauf der Belade-Leistung des Speichers und Belade-Energie	17
4.10 Energiebilanz für Ladung und Entladung und Wirkungsgrad	18
5 Fazit	19
6 Hinweis zur Versuchsanleitung	19

Abbildungsverzeichnis

1 Qualitative Entwicklung der Van't-Hoff-Geraden aus dem Konzentrations-Druck-Diagramm (Druck wird dabei meist logarithmisch dargestellt)	5
2 Speichertemperatur und Druck im Speicher	13
3 Volumenstrom in l/min	13
4 Wasserstoffbeladung in g	14
5 Speichertemperatur und Druck im Speicher	14
6 Volumenstrom in l/min	15
7 Belade-Leistung und kumulierte Belade-Energie des Metallhydridspeichers	18
8 Vereinfachtes Energieflussdiagramm für die Beladung und Entladung des Metallhydridspeichers	19

1 Einleitung

Metallhydridspeicher leisten einen entscheidenden Beitrag zur Energiewende und stellen somit eine Alternative dar, den Wasserstoff auch ohne hohe Drücke, sicher und platzsparend zu speichern. Der Ziel des Versuches ist es mittels Grundlagen, die Speicherfähigkeit und Funktionsweise eines Metallhydridspeicher zu untersuchen. Zu Beginn des Versuches wird der Speicher geladen und dann entladen. Währenddessen heizt sich der Speicher beim Beladen auf und kühlt sich bei der Entladung wieder ab. Durch Wärmeab- und zufuhr wird das Verhalten des Speichers auf Temperaturschwankungen untersucht. Hierbei wird die entstandene Temperatur und der daraus resultierende Druck, sowie die Lade- und Entladegeschwindigkeiten betrachtet und grafisch dargestellt. Mittels der Messdaten werden im weiteren Verlauf des Versuches die Massen- und Energiespeicherdichte des Metallhydridspeicher bestimmt, um somit einen Systemwirkungsgrad zu ermitteln.

2 Vorbereitungsaufgaben

2.1 Was ist ein Metallhydrid?

Ein Metallhydrid ist eine Verbindung aus einem Metall oder einer Metallegierung mit Wasserstoff.

2.2 Erläutern sie kurz die Funktionsweise eines Metallhydridspeichers

Damit es zur Bildung von Metallhydriden kommt, wird Wasserstoff in einem Metall oder einer Metallegierung gelöst gespeichert. Der Wasserstoff wird an der Oberfläche der Kristallstruktur in deren Zwischenplätze adsorbiert und somit wird das Wasserstoffmolekül Teil des Elektronengases des Metalls. Dies geschieht mittels Druckerhöhung, bei welcher Wärme entsteht. Sofern im weiteren Verlauf Wasserstoff benötigt wird, so kann durch Drucksenkung und Wärmezufuhr der Wasserstoff wieder ausgetrieben werden. Dieser Wasserstoff kann anschließend in einem BHKW oder in einer Brennstoffzelle verwendet werden.

2.3 Welche Vorteile hat ein Metallhydridspeicher gegenüber einem Druckspeicher?

Metallspeicher weisen eine höhere Energiedichte auf. Durch ihre kompakte Bauweise sind sie platzsparender. Zudem weisen sie keine Diffusionsverluste auf und haben eine höhere Sicherheit durch einen geringeren Speicherdruck.

2.4 Benennen Sie potentielle Einsatzgebiete für Metallhydridspeicher

Mögliche Einsatzgebiete der Metallhydridspeicher sind U-Boote, stationäre Speichersysteme sowie die der mobilen Anwendung (für größere Fahrzeuge, bei denen das Gewicht vernachlässigbar ist).

2.5 Berechnen Sie für den Metallhydridspeicher mit Hilfe der technischen Daten aus 3.

1. *Die im Speicher enthaltene Masse an Metallhydrid sowie die Masse des Speicherbehälters ohne das Metallhydrid.*

Zunächst wird die Masse des Wasserstoffs, welche maximal in den Speicher aufgenommen werden kann, bestimmt.

$$m = V \cdot \rho \quad (1)$$

$$m_{\text{H}_2} = V_{\text{Speicher}} \cdot \rho_{\text{H}_2, 273\text{K}} \quad (2)$$

$$m_{\text{H}_2} = 0,9 \text{ m}^3 \cdot 0,0899 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,08091 \text{ kg} \quad (3)$$

Damit lässt sich nun die Masse des Eisen-Titan-Hybrides bestimmen.

$$m_{\text{FeTi}} = \frac{m_{\text{H}_2}}{\frac{m_{\text{H}_2}}{m_{\text{FeTi}}}} \quad (4)$$

$$m_{\text{FeTi}} = \frac{80,91 \text{ g}_{\text{H}_2}}{0,018 \text{ g}_{\text{H}_2} / \text{kg}_{\text{FeTi}}} = 4,495 \text{ kg}_{\text{FeTi}} \quad (5)$$

Zuletzt wird damit die Masse des Speicherbehälters bestimmt.

$$m_{\text{Speicherbehälter}} = m_{\text{gesamt}} - m_{\text{FeTi}} - m_{\text{H}_2} \quad (6)$$

$$m_{\text{Speicherbehälter}} = 6546 \text{ g} - 4495 \text{ g} - 81 \text{ g} = 1970 \text{ g} \quad (7)$$

2. Die Gesamtspeichermasse jeweils bei einem Ladezustand von 0, 25, 50 und 70%.

Die Gesamtspeichermasse ergibt sich mit dem Ladezustand LZ durch:

$$m_{\text{gesamt}} = m_{\text{Speicherbehälter}} + m_{\text{FeTi}} + m_{\text{H}_2, \text{max}} \cdot LZ \quad (8)$$

Tabelle 1: Übersicht der Gesamtspeichermasse abhängig vom Ladezustand

LZ	m_{gesamt}
0%	6465 g
25%	6485 g
50%	6506 g
75%	6526 g

3. Die theoretische Ladezeit des leeren Speichers bis zur Vollbeladung, wenn mit Nennvolumenstrom geladen wird.

Über den Nennvolumenstrom lässt sich die theoretische Ladezeit errechnen. Diese kann wie folgt berechnet werden:

$$t_{100\%} = \frac{V_{\text{max}}}{\dot{V}_{\text{Nenn}}} \quad (9)$$

$$(10)$$

$$t_{100\%} = \frac{900 \text{ l}}{5 \frac{\text{l}}{\text{min}}} = 180 \text{ min} \quad (11)$$

2.6 Die Entladung des Speichers erfolgt über eine Brennstoffzelle im Direktbetrieb an einer elektronischen Last. Welche Stromstärke ist an der Last einzustellen, um dem Speicher einen Wasservolumenstrom von 5,5 NI/min zu entziehen.

Wird das erste Faraday'sche Gesetz nach der Stromstärke um, ergibt sich die folgende Berechnungsformel:

$$V_{H_2} = \frac{V_m \cdot I_{\text{theoretisch}} \cdot t}{z \cdot F} \quad (12)$$

$$I_{\text{theoretisch}} = \frac{V_{H_2} \cdot F \cdot z}{t \cdot V_m} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot F \cdot z}{V_m} \quad (13)$$

$$(14)$$

Wird die Zellenanzahl n der Brennstoffzelle berücksichtigt, ergibt sich folgende Formel:

$$I_{\text{theoretisch}} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot F \cdot z}{V_m \cdot n} \quad (15)$$

Der einzustellende Strom I ist bei einem angenommenen Umsatzwirkungsgrad von 95% um 5% geringer als $I_{\text{theoretisch}}$.

$$I = 0,95 \cdot I_{\text{theoretisch}} = 0,95 \cdot \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot F \cdot z}{V_m \cdot n} \quad (16)$$

$$I = 0,95 \cdot \frac{5,5 \frac{1}{\text{min}} \cdot 96485 \text{ As} \cdot 2}{22,4 \frac{1}{\text{mol}} \cdot 47} = 0,95 \cdot 16,8 \text{ A} = 15,96 \text{ A} \quad (17)$$

$$(18)$$

2.7 Entwickeln Sie qualitativ aus der Konzentration-Druck-Isotherme eines MHS die Van't-Hoff-Gerade. Was beschreibt der Anstieg der Geraden?

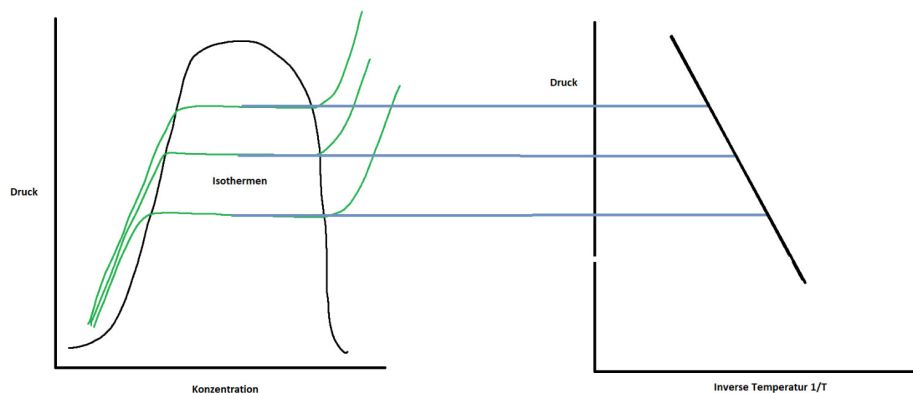


Abbildung 1: Qualitative Entwicklung der Van't-Hoff-Geraden aus dem Konzentrations-Druck-Diagramm (Druck wird dabei meist logarithmisch dargestellt)

Aus der Steigung der Geraden lässt sich die Reaktionsenthalpie ablesen.

2.8 Gegeben sei ein Hydridspeicher mit einer Füllung TiFeH₂. Berechnen Sie die Wasserstoffspeicherfähigkeit des Materials in Gewichtsprozent.

Die maximale Speicherfähigkeit des Materials ergibt sich als Quotient der Massen des gespeicherten Wasserstoffs und des Eisen-Titan-Hybrids.

$$\rho_{\text{Sm,FeTi}} = \frac{m_{\text{H}_2, \text{max}}}{m_{\text{FeTi}}} = \frac{80,91 \text{ g}}{4495 \text{ g}} = 1,8\% \quad (19)$$

3 Versuchsdurchführung und -aufbau

Vor Beginn der Versuchsdurchführung werden die technischen Daten des zu untersuchenden Speichers sowie die Umgebungsbedingungen aufgenommen. Der Versuch des Metallhydridspeichers unterteilt sich in zwei Teilversuche. Im ersten Teil des Versuches wird eine Beladung des nahezu leeren Speichers vorgenommen. Im weiteren Verlauf des Versuches wird der Speicher wieder entladen.

Im Folgenden wird eine kurze Übersicht dargestellt, in welcher Reihenfolge die verschiedenen Schritte abgelaufen sind.

1. Beladung des Metallhydridspeichers:

- Abwiegen des Speichers
- Einstellen des Wasserstoff-Volumenstroms zu Beginn ($V_{\text{soll}} = 5 \text{ l/min}$)
- Aufnahme der Messwerte für Temperatur, Druck und Volumenstrom im Abstand von 30s
- erneutes Abwiegen des Speichers und Einstellen eines neuen Volumenstroms nach 5 min ($V_{\text{soll}} = 15 \text{ l/min}$)
- erneutes Abwiegen des Speichers nach der Beladungszeit (bevor der maximale Anlagendruck von 20 bar erreicht wird)
- Kühlung des Speichers mittels Eis für weitere 8 min ohne Beladung
- erneute Beladung während der Kühlung ($V_{\text{soll}} = 15 \text{ l/min}$)
- Druck des Speichers ist so stark abgesenkt, dass weitere Beladung problemlos möglich ist
- Abbruch der Beladung nach 10 min

2. Entladung des Metallhydridspeichers:

- Einstellen des Wasserstoff-Volumenstroms ($V_{\text{soll}} = 5 \text{ l/min}$)
- Entladung für 5 min sowie anschließendes Abwiegen des Speichers
- Erhöhung des Wasserstoff-Volumenstroms ($V_{\text{soll}} = 10 \text{ l/min}$)
- Entladung bis zur Druckabsenkung auf ungefähr 1,5 bar, wodurch die automatische Abschaltung der Brennstoffzelle eingeleitet wird
- Erwärmung des Speichers für 8 min in Wasserbad
- Entladung für 20 min bis zum wiederholten Minimaldruck

4 Auswertung

4.1 Anlagen-, Stoffwert- und Messdaten

Tabelle 2: Anlagen- und Speicherkenngrößen

Art des Speichers	Niedertemperatur-Metallhybrid-Speicher
Speichermaterial	FeTiH (Eisen-Titan-Hybrid)
Maximale Beladungsdichte Speicher	Ca. 0,018 g _{H₂} /g _{FeTi}
Maximale Speichermenge	900 l in Normliter
Innenvolumen	2,4 l
Gesamtvolumen	3,5 l
Speichertemperatur	-29 – 54°C
Brennstoffzellenart	NexaTM
Umsatzwirkungsgrad	95 %
Zellenanzahl	47

Tabelle 3: Umgebungsbedingungen und Stoffwerte Wasserstoff

Dichte Wasserstoff	0,0899 kg/m ³
Heizwert Wasserstoff	33,3 kWh/kg
Umgebungstemperatur Versuchsraum	23,9°C
Umgebungsdruck Versuchsraum	1014 hPa

Tabelle 4: Beladen des Speichers

Zeit in s	Speichertemperatur in °C	Druck Speicher in bar	Volumenstrom in Nl/min
0	25,30	8,32	13,50
10	25,50	8,61	13,50
20	25,60	8,86	14,30
30	26,00	9,15	14,70
40	26,00	9,46	15,00
50	26,20	9,78	16,50
60	26,30	10,12	17,15
70	26,80	10,58	19,40
80	27,10	10,97	20,80
90	27,40	11,46	21,00
100	27,60	12,05	20,50
110	28,10	12,82	21,00
120	28,60	13,35	21,00
130	29,20	13,83	21,00
140	29,70	14,15	21,00
150	30,10	14,50	13,25
160	30,30	14,95	17,25
170	30,60	15,50	21,00
180	31,20	16,01	21,00
190	31,40	16,65	20,40
200	31,60	16,82	11,80
210	32,60	17,22	13,50
220	32,50	17,61	15,50
230	33,30	18,20	15,50
240	34,00	18,42	15,40
250	34,70	18,71	15,40
260	35,20	19,18	14,05
270	35,00	19,53	14,25
280	35,40	19,87	13,50
290	35,20	20,19	12,75
300	35,50	20,49	12,70
310	35,70	20,76	11,50
320	35,90	20,90	10,50

Tabelle 5: Speicher im Eiswasser

Zeit in s	Druck Speicher in bar	Speichertemperatur in °C
0	17,97	31,40
10	16,80	30,20
20	15,84	30,30
30	15,18	29,60
40	14,59	28,90
50	14,09	27,10
60	13,65	27,10
70	13,27	26,40
80	12,80	25,60
90	12,57	25,10
100	12,26	24,60
110	11,96	24,10
120	11,71	23,50
130	11,44	23,10
140	11,22	22,70
150	10,99	22,50
160	10,75	22,20
170	10,56	21,80
180	10,35	21,40
190	10,17	21,00
200	10,00	20,80
210	9,81	20,60
220	9,64	20,30
230	9,48	20,00
240	9,37	19,90
250	9,22	19,60
260	9,08	19,40
270	8,94	19,10
280	8,82	18,80
290	8,69	18,60
300	8,57	18,20
310	8,46	18,00
320	8,34	17,80
330	8,22	17,60
340	8,11	17,30
350	8,03	17,00
360	7,93	16,90
370	7,84	16,60
380	7,74	16,40

Tabelle 6: Beladen des Speichers im Eiswasser

Zeit in s	Speichertemperatur in °C	Druck Speicher in bar	Volumenstrom in Nl/min
0	12,3	11,5	10,3
10	14,5	13,4	12,5
20	11,7	13,5	12,5
30	12,7	12,8	4,0
40	12,6	12,5	3,2
50	12,7	12,1	1,0
60	12,6	11,9	1,0
70	12,7	14,7	21,0
80	13,0	15,1	21,0
90	13,3	14,5	16,0
100	13,4	14,5	13,0
110	13,7	15,5	21,0
120	14,0	14,6	10,0
130	14,1	13,9	0,0
140	14,3	13,7	2,0
150	14,2	13,6	0,0
160	14,3	13,4	0,0
170	14,4	13,3	8,4
180	14,2	15,5	21,0
190	14,3	14,9	6,0
200	14,2	15,0	15,0
210	14,4	16,6	15,0
220	14,5	17,2	21,0
230	14,6	17,3	21,0

Tabelle 7: Entladen des Speichers

Zeit in s	Speichertemperatur in °C	Druck Speicher in bar	Volumenstrom in Nl/min
0	25,20	11,84	5,00
30	25,20	11,37	5,05
60	25,10	10,90	5,05
90	24,90	10,45	5,10
120	24,70	10,04	5,10
150	24,40	9,62	5,10
180	24,20	9,31	5,10
210	23,80	8,99	5,10
240	23,60	8,64	5,10
270	23,30	8,31	5,10
300	22,80	8,02	5,10
Erhöhung des Volumenstroms			
0	22,00	6,66	12,00
30	21,50	5,98	12,45
60	20,50	5,23	12,85
90	20,00	4,65	13,25
120	19,20	4,10	13,15
150	28,20	3,54	14,00
180	17,40	3,10	13,10
210	16,60	2,68	13,20
240	15,70	2,03	0,00

Tabelle 8: Speicher im warmen Wasser

Zeit in s	Druck Speicher in bar	Speichertemperatur in °C	Wassertemperatur in °C
0	4,97	16,10	55,90
30	7,10	16,70	55,60
60	8,00	19,10	55,30
90	8,86	21,20	54,70
120	9,57	22,90	54,10
150	10,27	24,40	53,70
180	10,86	25,80	53,10
210	11,45	27,00	52,70
240	11,94	28,10	52,30
270	12,43	29,30	51,90
300	12,84	30,20	51,90
330	13,22	31,10	51,20
360	13,60	31,80	50,80
390	13,90	32,40	50,60
420	14,21	32,90	50,30
450	14,50	33,40	50,10
480	14,77	34,10	49,80

Tabelle 9: Entladen des Speichers im warmen Wasser

Zeit in s	Speichertemperatur in °C	Druck Speicher in bar	Volumenstrom in Nl/min
0	35,50	13,83	12,00
30	35,50	13,02	12,10
60	35,50	12,29	12,10
90	35,50	11,40	12,10
120	35,30	11,05	12,10
150	35,20	10,60	12,10
180	35,00	10,18	12,20
210	34,80	9,70	12,20
240	34,70	9,35	12,20
270	34,30	8,68	12,20
300	34,00	8,34	12,20
330	33,80	7,99	12,20
360	33,70	7,70	12,20
390	33,60	7,38	12,20
420	33,30	7,11	12,20
450	33,00	6,81	12,20
480	33,00	6,54	12,20
510	32,70	6,20	12,20
540	32,60	5,93	12,20
570	32,40	5,65	12,20
600	32,20	5,37	12,20
630	32,00	5,09	12,20
660	31,80	4,82	12,20
690	31,60	4,56	12,20
720	31,50	4,26	12,20
750	31,20	4,00	12,20
780	31,20	3,69	12,20
810	31,10	3,50	12,20
840	30,80	3,23	12,20
870	30,80	2,95	12,20
900	30,80	2,71	12,20
930	30,60	2,41	12,20

4.2 Zeitlicher Verlauf von Temperatur und Druck sowie dem Volumenstrom und der gespeicherten H₂-Mengen

Beladung:

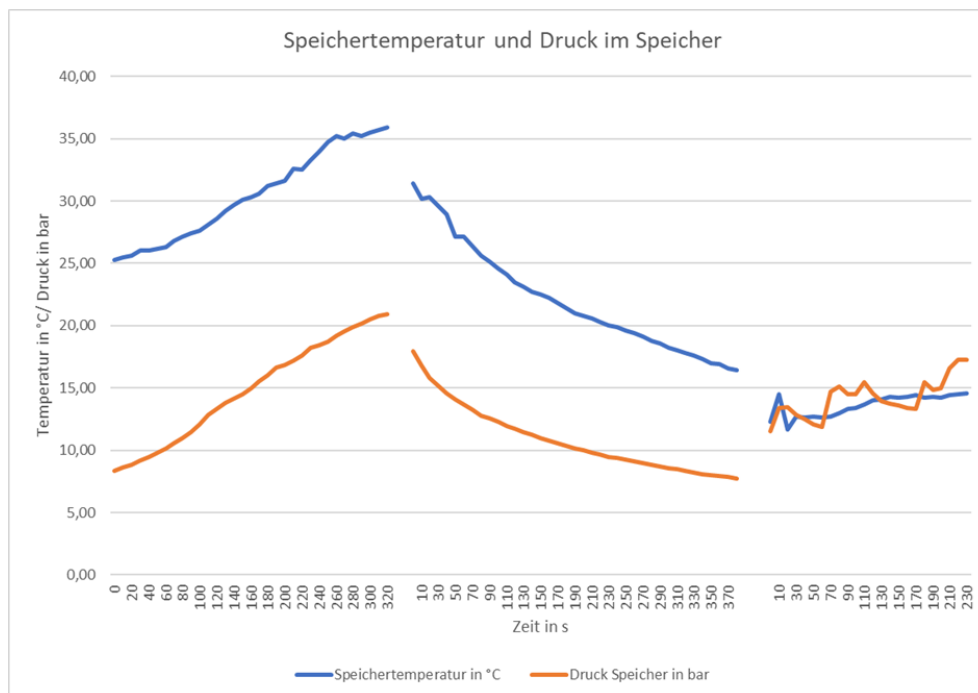


Abbildung 2: Speichertemperatur und Druck im Speicher

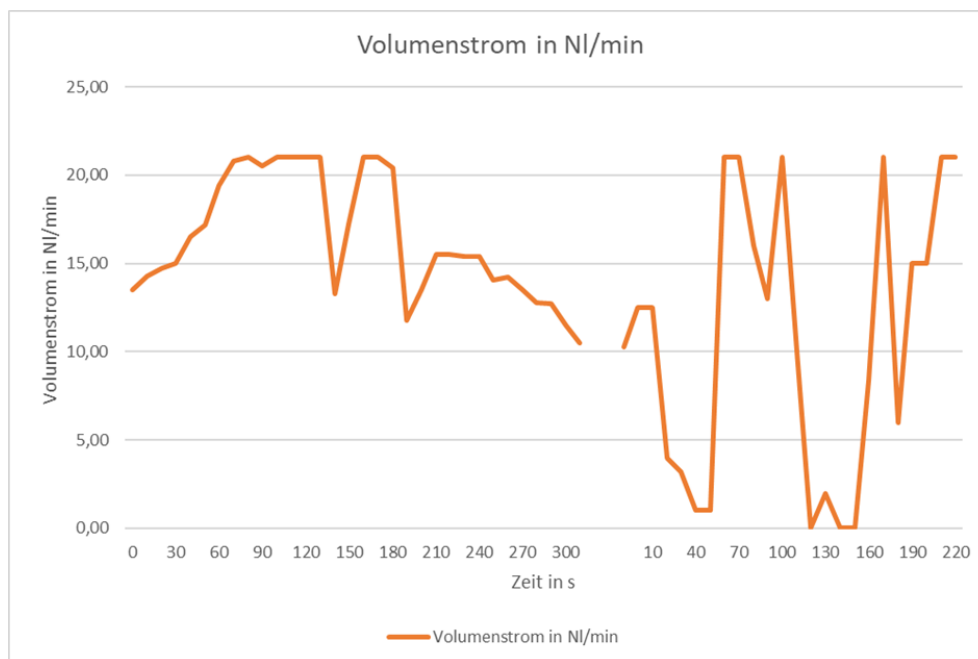
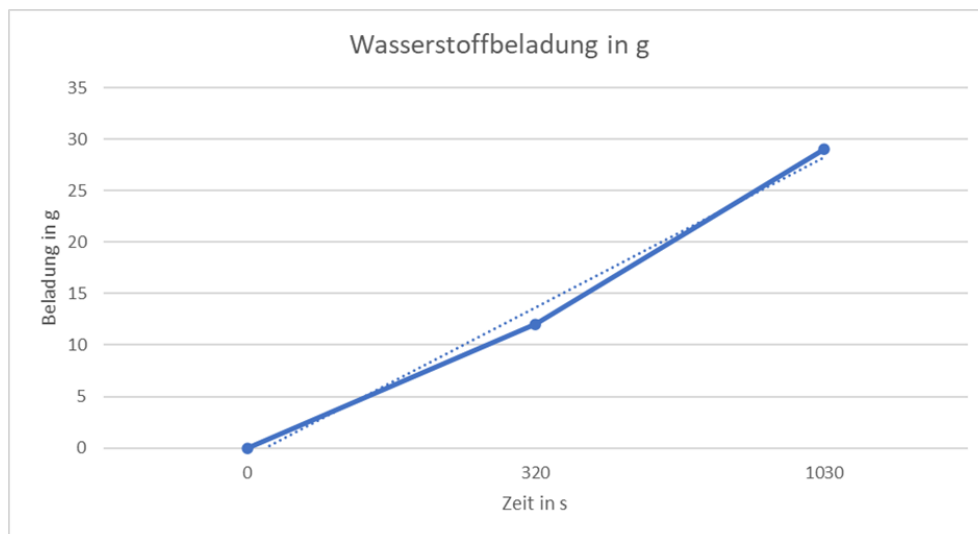
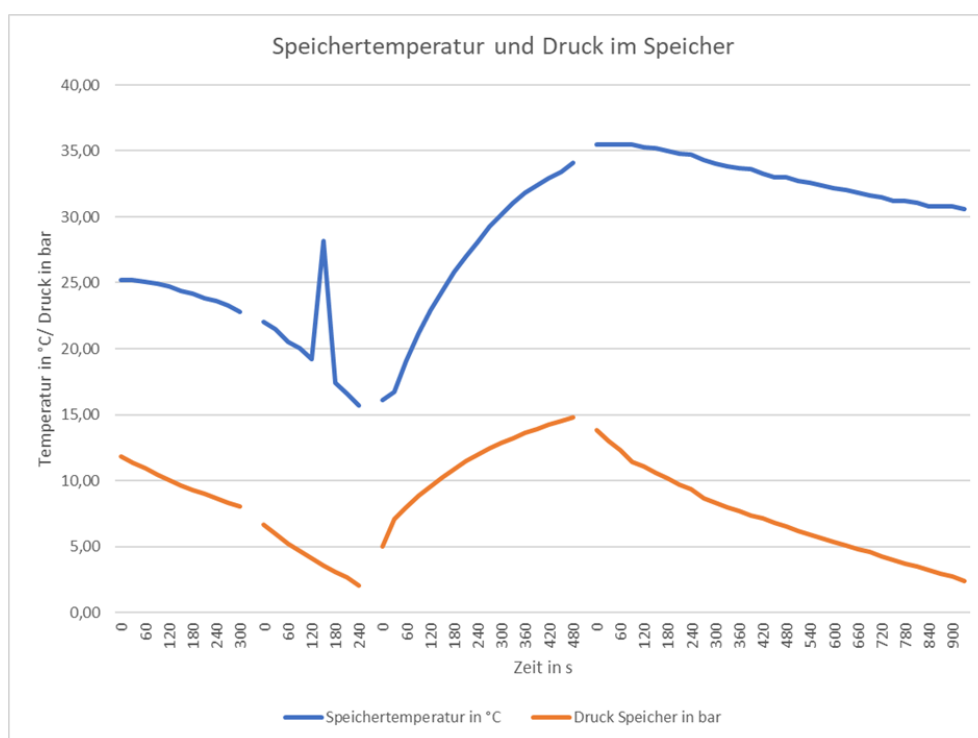


Abbildung 3: Volumenstrom in NI/min

**Abbildung 4:** Wasserstoffbeladung in g

Entladung:

**Abbildung 5:** Speichertemperatur und Druck im Speicher

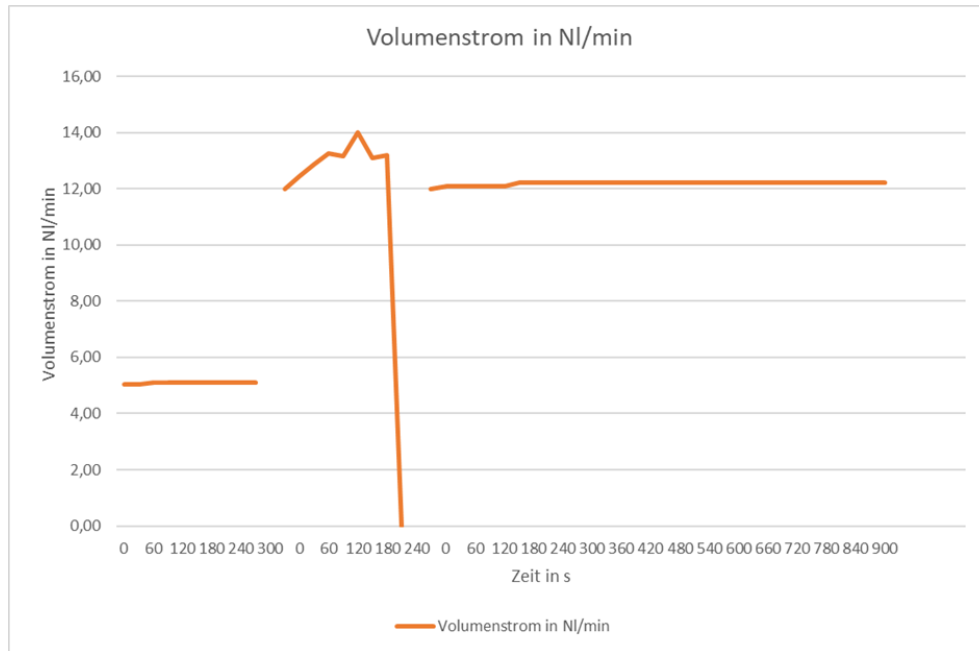


Abbildung 6: Volumenstrom in NI/min

4.3 Temperaturverlauf bei Be- und Entladung

Bei der Beladung steigt die Speichertemperatur mit größer werdender Beladungszeit an. Nach der ersten Beladung sinkt die Speichertemperatur durch Kühlung durch das Eiswasser wieder ab. Bei erneuter Beladung steigt die Speichertemperatur ebenfalls wieder an.

Die Entladung verhält sich entgegengesetzt. So sinkt die Speichertemperatur mit der Entladungszeit ab. Durch Erwärmung des Speichers mit heißem Wasser steigt die Speichertemperatur zwischenzeitlich wieder an, um bei erneuter Entladung wieder abzusinken.

In der Anwendung eines solchen Speichers ist es daher von enormer Wichtigkeit das während des Ladens und Entladens der Speicher extern gekühlt bzw. erwärmt wird, damit die maximale bzw. minimale zulässige Speichertemperatur weder über- noch unterschritten wird. Weiterhin könnte ohne externe Kühlung bzw. Heizen das vorhandene Speichervolumen nicht vollständig genutzt werden und könnte nur sehr langsam geladen werden.

Der Druckverlauf korreliert zum Temperaturverlauf, daher könnte es ohne externe Kühlung oder Heizung zu einer Drucküberschreitung der zulässigen Werte kommen. Dies könnte zur Zerstörung des Speichers führen.

4.4 Einfluss von Volumenstrom und Temperatur auf die Lade- und Entladegeschwindigkeit des Speichers

Der Volumenstrom steht in direkter Verbindung zur Lade- und Entladegeschwindigkeit des Speichers. So gilt: Umso höher der Volumenstrom, umso schneller lädt oder entlädt der Speicher sich. Mit steigenden Volumenstrom nehmen auch die Temperaturänderungen zu.

Deshalb gilt: Umso größer der Volumenstrom, umso größer die Temperaturänderung. So lässt sich eindeutig im Diagramm *Speichertemperatur und Druck im Speicher* erkennen, dass bei Vergrößerung des Volumenstromes im Entladevorgang die Speichertemperatur schneller abnimmt.

4.5 Ladezustand des Speichers in %

Um den aktuellen Ladezustand des Speichers zu bestimmen werden benötigt:

1. Maximale Menge an H₂ im Speicher
2. Leergewicht des Speichers (definiert als Metallhydridmasse + Speicherbehälter)
3. Aktuelles Gewicht des Speichers

Maximale Gesamtmasse Speicher: 6546 g

Maximale Menge H₂ im Speicher:

$$m_{\text{H}_2, \text{max}} = V \cdot \rho_{\text{H}_2} \quad (20)$$

$$m_{\text{H}_2} = 0,9 \text{ m}^3 \cdot 0,0899 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,08091 \text{ kg} = 80,9 \text{ g} \quad (21)$$

Leergewicht Speicher:

$$m_{\text{Sp, leer}} = m_{\text{Sp, max}} - m_{\text{H}_2, \text{max}} \quad (22)$$

$$m_{\text{Sp, leer}} = 6546 \text{ g} - 80,9 \text{ g} = 6465,1 \text{ g} \quad (23)$$

Ladezustände des Speichers nach verschiedenen Messabschnitten:

$$\text{Ladezustand (LZ)} = \frac{m_{\text{Sp}} - m_{\text{Sp, leer}}}{m_{\text{H}_2, \text{max}}} \quad (24)$$

a) Beginn:

$$LZ_{\text{Beginn}} = \frac{6481 \text{ g} - 6465,1 \text{ g}}{80,9} = 0,1965 = 19,7\% \quad (25)$$

b) Nach 1. Beladung:

$$LZ_{1. \text{ Beladung}} = \frac{6493 \text{ g} - 6465,1 \text{ g}}{80,9} = 0,3449 = 34,5\% \quad (26)$$

c) Nach 2. Beladung (mit Eiswasser):

$$LZ_{2. \text{ Beladung}} = \frac{6510 \text{ g} - 6465,1 \text{ g}}{80,9} = 0,5550 = 55,5\% \quad (27)$$

Das Gewicht beim Entladen des Speichers wurden bei dem Versuch leider nicht mit aufgenommen. Somit können hier keine Ladungszustände angegeben werden.

4.6 Volumenstromkurven die ein- bzw. ausgespeicherte Masse Wasserstoff je Messabschnitt

Tabelle 10: Übersicht der berechneten Ladezustände

	Gewicht gemessen (in g)	H ₂ -Zunahme gemessen (in g)	H ₂ -Zunahme berechnet (in g)	Abweichung H ₂ -Zunahme (in %)
Speicher leer	6465,1	-	-	-
Beginn	6481	-	-	-
1. Beladung	6493	12	8	33,3
2. Beladung	6510	17	3,8	77,6
1. Entladung	nicht aufgenommen	nicht aufgenommen	-	nicht berechenbar
2. Entladung	nicht aufgenommen	nicht aufgenommen	-	nicht berechenbar

Durch einen schwer konstant einstellbaren Volumenstrom während des Versuches lässt sich erkennen, dass die Abweichung der H₂-Zunahme aus den gemessenen Werten und aus den berechneten Werten der Volumenstromkurve sehr groß ist. Die gemessenen Werte spiegeln hierbei die realistischen Werte wider.

4.7 Volumetrische und gravimetrische Speicherdichte und Energiespeicherdichte für den Speicher mit und ohne Peripherie

Tabelle 11: Übersicht der berechneten Parameter zur Energiedichte

	Ohne Peripherie	Mit Peripherie
Volumetrische Speicherdichte in g _{H₂} /m _{Sp} ³	18708,33	12828,57
Gravimetrische Speicherdichte in g _{H₂} /kg _{Sp}	9,89	6,90
Energiespeicherdichte in MJ/kg _{Sp}	1,19	0,83

4.8 Massenbezogene Beladung des Metallhydrids im Speicher

Masse des FeTi:

$$m_{\text{FeTi}} = \frac{m_{\text{H}_2, \text{max}}}{\left(\frac{m_{\text{H}_2}}{m_{\text{FeTi}}}\right)_{\text{max}}} = \frac{80,91 \text{ g}}{0,018 \frac{\text{H}_2}{\text{FeTi}}} = 4495 \text{ g}_{\text{FeTi}} \quad (28)$$

Die massenbezogene Beladung des Metallhydrids ist der gravimetrischen Energiedichte des Speichers ähnlich. Innerhalb des Versuches wurde eine Beladung von 44,9 g_{H₂} erreicht, wenn davon ausgegangen wird, dass der Speicher zu Versuchsbeginn vollständig leer war. Dies entspricht einer massenbezogenen Beladung des Metallhydrids von 0,010 g_{H₂}/g_{FeTi}=44,9 g_{H₂}/4495 g_{FeTi}. Maximal wäre eine massenbezogene Beladung in Höhe von 0,018 g_{H₂}/g_{FeTi} möglich gewesen.

4.9 Verlauf der Belade-Leistung des Speichers und Belade-Energie

Die Beladeleistung kann mithilfe der volumetrischen Energiedichte des Wasserstoffs von 0,003 kWh/l beziehungsweise 10800 Ws/l bestimmt werden. Die Beladeenergie ergibt sich anschließend durch Multiplikation der Beladeleistung mit der Länge des entsprechenden Zeitintervalls. Die Beladeenergie ist in einem Zeitintervall somit direkt proportional zur Beladeleistung und würde keinen anderen Verlauf ergeben, weshalb stattdessen die kumulierte Beladeenergie in dWh=0,1 Wh dargestellt wird. Dieser Faktor wurde gewählt, um beide Verläufe möglichst gut in einem Diagramm ohne zweite Skala veranschaulichen zu können.

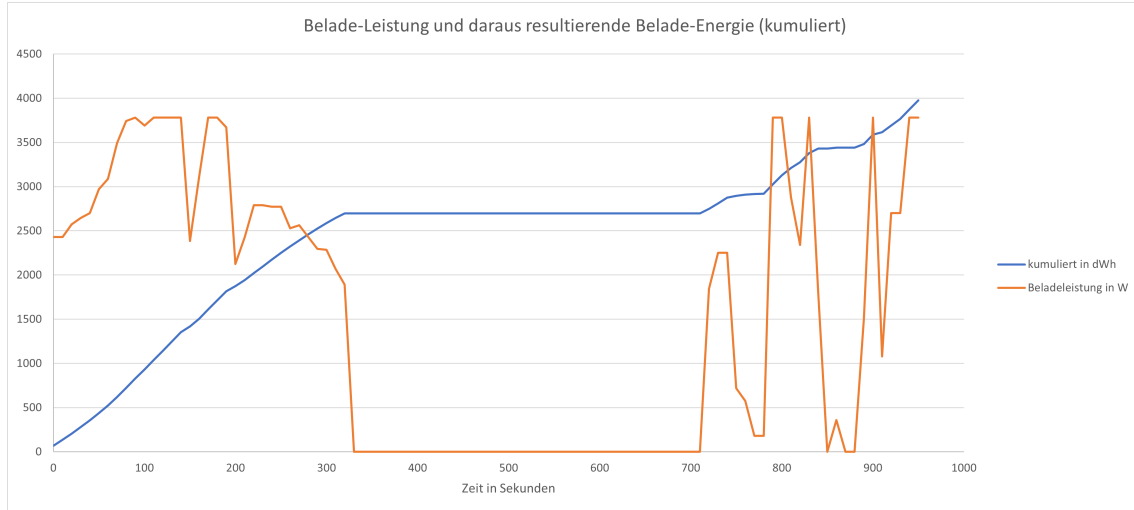


Abbildung 7: Belade-Leistung und kumulierte Belade-Energie des Metallhybridspeichers

4.10 Energiebilanz für Ladung und Entladung und Wirkungsgrad

Innerhalb des Versuches wurde lediglich die zugeführte und abgeführte Energie durch Wasserstoff gemessen. Die Annahmen zur benötigten Energie zum Kühlen oder Erwärmen des Speichers wurden der Versuchsanleitung entnommen. Insgesamt lässt sich über den gesamten Versuch folgende Energiebilanz aufstellen:

$$E_{\text{gespeichert}} = 3977 \text{ Wh} \quad (29)$$

$$E_{\text{Kühlung}} = 830 \text{ Wh} \quad (30)$$

$$E_{\text{Beladung,gesamt}} = 4807 \text{ Wh} \quad (31)$$

$$(32)$$

$$E_{\text{ausgespeichert}} = 824 \text{ Wh} \quad (33)$$

$$E_{\text{Erwärmung}} = 230 \text{ Wh} \quad (34)$$

$$E_{\text{Entladung,gesamt}} = 1054 \text{ Wh} \quad (35)$$

Daraus ergeben sich die Wirkungsgrade für die Beladung ($83\% = 3977/4807$) und für die Entladung ($78\% = 824/1054$). Werden die Wirkungsgrade kombiniert in einem Sankey-Diagramm für einen gesamten Speicherzyklus dargestellt, ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von $65\% = 83\% \cdot 78\%$.

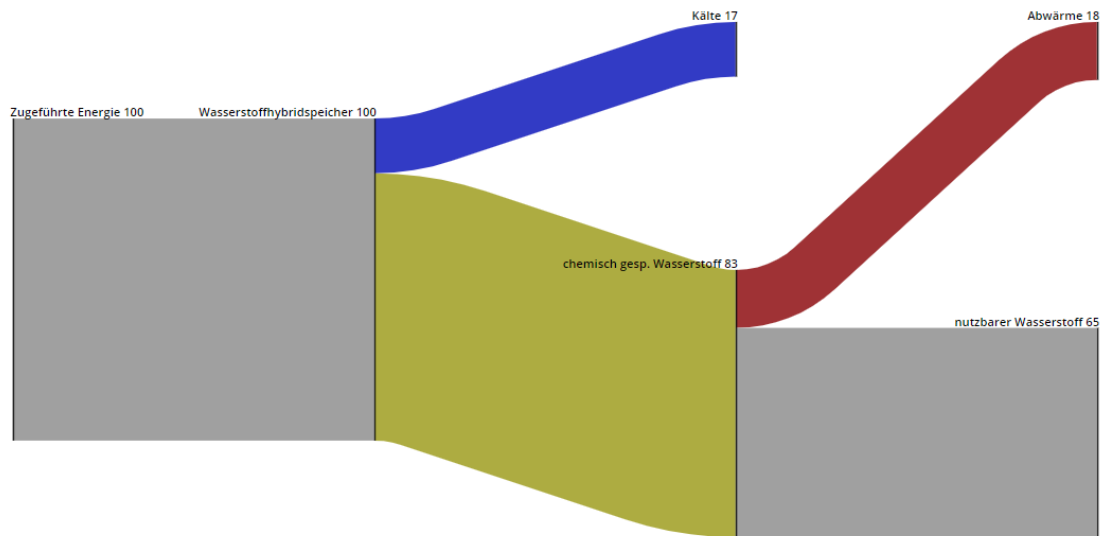


Abbildung 8: Vereinfachtes Energieflussdiagramm für die Beladung und Entladung des Metallhydridspeichers

5 Fazit

Der Laborversuch hat einen ersten Eindruck vermittelt, wie diese Technologie eingesetzt werden kann und welche Stärken und Schwächen Metallhydridspeicher aufweisen. Aufgrund des teilweise schwer regelbaren Volumenstroms besitzen die Ergebnisse für die Beladung des Speichers allerdings nur eine geringe Aussagekraft, was durch das Wiegen des Speichers deutlich wurde. Fälschlicherweise wurde nach dem Entladen des Speichers nicht das Gewicht notiert, sodass ein kleiner Teil der Auswertung nicht erfolgen konnte. Aufgrund des relativ gleichmäßigen Volumenstroms bei der Entladung, ist jedoch mit einem deutlich geringeren Fehler zu rechnen, als bei der Beladung des Eisen-Titan-Hybrid-Speichers.

6 Hinweis zur Versuchsanleitung

In der Versuchsanleitung werden die drei wichtigsten Kennzahlen zur Energiedichte eines Metallhydridspeichers definiert. Dabei wurden die Einheiten der volumetrischen und gravimetrischen Speicherdichte vertauscht, was bei der Auswertung zumindest kurzzeitig für etwas Verwirrung sorgte.