

Gaswirtschaftlicher Beirat

Optionen zur kleinskaligen (Zwischen-)Speicherung von Wasserstoff – Bewertung verschiedener Technologien für gewerbliche und häusliche Anwendungen

Abschlussbericht



Impressum

Abschlussbericht

Optionen zur kleinskaligen (Zwischen-) Speicherung von Wasserstoff – Bewertung verschiedener Technologien für gewerbliche und häusliche Anwendungen

Laufzeit

01.04.2023 bis 31.10.2023

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Michael Kühn
michael.kuehn@dbi-gruppe.de
T +49 3731 4195-326

Kontakt

DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
Halsbrücker Straße 34
D-09599 Freiberg
www.dbi-gruppe.de

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Motivation und Zielsetzung	6
2 Optionen zur H ₂ -Speicherung	7
2.1 Methodik und Hinweise	7
2.2 Technologiesteckbriefe	7
2.3 Übersicht zu betrachteten Speichertechnologien	19
3 Bewertung an beispielhaften Anwendungsfällen	21
3.1 H ₂ -Tankstelle (gasförmiger H ₂)	21
3.1.1 Randbedingungen	21
3.1.2 Bewertung	21
3.2 Gebäudeenergieversorgung: Mehrfamilienhaus	23
3.2.1 Randbedingungen	24
3.2.2 Bewertung	26
3.3 Industrieller Anwender	28
3.3.1 Randbedingungen	28
3.3.2 Bewertung	29
4 Empfehlungen	32
5 Zusammenfassung / Fazit	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: berechneter zeitlicher Verlauf der Wasserstoffmenge im Speicher, Beispiel Mehrfamilienhaus mit optimierter EE-Nutzung	25
Abbildung 2: Bereitstellung der benötigten Wärmeenergie im Mehrfamilienhaus mit optimierter EE-Nutzung	25
Abbildung 3: berechneter zeitlicher Verlauf der Wasserstoffmenge im Speicher, Beispiel Mehrfamilienhaus mit wasserstoffbasierter Wärmeversorgung	26
Abbildung 4: berechneter zeitlicher Verlauf der Wasserstoffmenge im Speicher, Beispiel industrieller Anwender	29
Abbildung 5: berechnete Wasserstoffbilanz als Differenz zwischen Erzeugung und Bedarf des industriellen Anwenders, positive Werte bedeuten Wasserstoffüberschuss	29
Abbildung 6: Bewertungsmatrix zur Speicherauswahl	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Eigenschaften der Speichersystem	19
Tabelle 2: Bewertung der Speicherverfahren am Beispiel der Tankstelle (+: passend/vorteilhaft; -: nicht passend/nachteilig; o: mit Vor- und Nachteilen verbunden)	23
Tabelle 3: Bewertung der Speicherverfahren am Beispiel des Mehrfamilienhauses (+: passend/vorteilhaft; -: nicht passend/nachteilig; o: mit Vor- und Nachteilen verbunden)	28
Tabelle 4: Bewertung der Speicherverfahren am Beispiel des industriellen Nutzers (+: passend/vorteilhaft; -: nicht passend/nachteilig; o: mit Vor- und Nachteilen verbunden)	31

1 Motivation und Zielsetzung

Im Rahmen der Energiewende erlangt Wasserstoff zunehmend Bedeutung in verschiedenen Anwendungsbereichen, sei es in der stofflichen Nutzung, der Mobilität oder der Energiewirtschaft. Angesichts der Bestrebungen, erneuerbare Energien auch für gewerbliche und häusliche Anwendungen verstärkt in den Markt zu bringen, steigen vor dem Hintergrund der schwankenden Verfügbarkeit die Anforderungen bezüglich entsprechender Speicherung. Batterieelektrische Systeme können in gewissem Umfang tageszeitliche Schwankungen ausgleichen, weisen aber zur Pufferung saisonaler Schwankungen Nachteile auf, was Kosten, Verfügbarkeit sowie entsprechend Rohstoffbedarf betrifft. Alternativ bietet sich zur saisonalen Speicherung Elektrolysewasserstoff an, der, insbesondere so lange noch kein flächendeckendes Wasserstoffnetz mit entsprechenden großskaligen Speicherkapazitäten umgesetzt ist, dezentral gespeichert wird. An die entsprechenden Speichersysteme bestehen, abhängig vom Anwendungszweck, unterschiedliche Anforderungen, z.B. bzgl. Kapazität und Flexibilität/Dynamik. Für eine effiziente Nutzung sind geeignete Lösungen erforderlich. Für deren technische Umsetzung bestehen diverse technische Lösungsansätze, die teils dem Stand der Technik entsprechen, teils aber auch noch im F&E-Stadium sind. Diese Lösungsansätze wurden im Rahmen der Studie analysiert und für beispielhafte Anwendungsfälle bewertet.

Die Studie ist auf die nachfolgenden Schwerpunkte ausgerichtet:

- Recherche und Analyse von Optionen zur H₂-Speicherung unter Berücksichtigung von Verfahren nach Stand der Technik und Ansätzen aus F&E
- Erstellung von Technologieübersichten mit wesentlichen Parametern, beispielsweise zu Funktionsprinzip, typischen Kapazitäten, Dynamik, Energiebedarf, Speicherdichte, Wasserstoffqualität und TRL
- Bewertung der Eignung von Speichertechnologien vor dem Hintergrund technischer Parameter und anwendungsbezogener Anforderungen für beispielhafte Anwendungsfälle
- Ableitung von Empfehlungen bzgl. der Speichertechnologien nach Anwendung (Bedarf, Kapazität)

Die Ergebnisse sollen eine Entscheidungshilfe bzgl. Wasserstoffspeicherung in Umsetzungsprojekten bieten.

2 Optionen zur H₂-Speicherung

2.1 Methodik und Hinweise

Zur Wasserstoffspeicherung sind verschiedene Ansätze bekannt, die teils technisch etabliert, teils noch in Entwicklung sind. Aufbauend auf einer Literaturrecherche wurden relevante Optionen zur H₂-Speicherung ermittelt. Dabei wurden auch Daten zu Funktionsweise und Betrieb erhoben, um einerseits eine Technologieübersicht und andererseits die spätere Bewertung anhand von Anwendungsbeispielen zu ermöglichen. Die Technologieübersicht ist im folgenden Kapitel in Steckbriefform gegeben. Darin werden die Funktionsweise und Besonderheiten des Verfahrens beschrieben und tabellarische Übersichten zu wesentlichen Parametern gegeben. Dazu gehören:

- Die technische Reife des Verfahrens, angegeben als *Technology Readiness Level* (TRL) auf einer Skala von 1 bis 9
- Typische Kapazitäten, also verfügbare/übliche Speichergrößen
- Speicherdichten, sowohl gravimetrisch als auch volumetrisch, bezogen auf das Speichermedium, ohne Peripherie, bezogen auf den Brennwert
- Betriebsbedingungen und Energiebedarf bei Ein- und Ausspeicherung

Zusätzlich erfolgt eine Einschätzung zu folgenden Punkten:

- Dynamik, umfasst die Fähigkeit des Systems auf zeitliche Änderungen der eingespeicherten bzw. entnommenen Menge zu reagieren sowie zwischen Ein- und Ausspeichermodus zu wechseln
- Transportfähigkeit, als Möglichkeit zum Austausch bzw. zur Belieferung von Anwendern
- Gefahrenpotential für Mensch und Umwelt
- Anbieter im relevanten Größenbereich ohne Anspruch auf Vollständigkeit

2.2 Technologiesteckbriefe

Die Technologiesteckbriefe werden auf den folgenden Seiten dargestellt.

H₂-Speicher: Druckspeicher

Die derzeit technisch etablierteste Form der Speicherung findet unter Verwendung von Druckbehältern statt. Seit dem 19. Jahrhundert werden Druckspeicher dafür verwendet, Gase unterschiedlicher Art zu transportieren und über definierte Zeiträume zu lagern. Es gibt vier unterschiedliche Druckbehälter-Typen zur Speicherung des Wasserstoffs. Alle Tankdesigns eint, dass sie H₂ sicher und flexibel speichern können.

Funktionsweise

Die Speicherung des gasförmigen H₂ erfolgt über Komprimierung. Dabei wird der Druck im Speicherbehälter mittels eines Verdichters auf eine definierte Druckstufe erhöht. Die Speicherkapazität richtet sich hierbei nach dem eingestellten Druck. Die Ausspeicherung erfolgt über die Expansion des Gases. Der ausgespeicherte H₂ entspricht hierbei der gleichen Qualität wie beim Einspeichern, sofern die Behälter nur für Gase einer Art und Reinheit verwendet werden. Zum Einsatz kommen Behälter unterschiedlicher Bauart.

- Typ I Speicher: druckbeaufschlagte Stahlzylinder, 150 - 300 bar
- Typ II Speicher: Stahlzylinder innenseitig mit Fiberglas oder Kohlefaser beschichtet, 100 - 1000 bar
- Typ III Speicher: dünnwandige Stahlzylinder mit Fiberglas oder Kohlefaser ummantelt, 300 - 700 bar
- Typ IV Speicher: mit Fiberglas oder Kohlefaser umhüllte Kompositmaterialien, 300 - 700 bar

TRL	> 9
Typische Kapazitäten	klein- bis großskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 1,0 - 1,7 MWh/m ³
- gravimetrisch	~ 39,4 kWh/kg
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	-40 - 80 °C
- Druckbereich	200 - 1 000 bar
- Energiebedarf	~ 1,0 - 3,3 kWh/kg H ₂
H ₂ -Ausspeicherung	
- Temperaturbereich	-40 - 80 °C
- Druckbereich	< Speicherdruck
- Energiebedarf	k.A.

Besonderheiten

Die klassischen metallummantelten Flaschen (Typ 1, 200/300 bar) sind im industriellen Sektor am verbreitetsten. Diese können als Bündel (12 Flaschen) oder Trailer (mehrere Dutzende) zusammengeschlossen werden, um die Kapazität zu erhöhen. Behälter aus Kompositmaterialien finden aufgrund ihres geringeren Gewichts verstärkt in der Mobilität Anwendung. Weiterhin existieren große Speichertanks aus Stahl mit mehreren tausend Kubikmetern Einspeichervermögen.

Der Nachteil an Druckbehältern sind ihre Größe und Eigengewicht. Die gravimetrische Speicherdichte komprimierten Gases ist aufgrund der geringen Dichte und des Eigengewichts der Flasche sehr gering, die volumetrische Speicherdichte ein wenig besser. Höhere Speicherdrücke bis über 700 bar sind möglich, jedoch mit einem entsprechenden Aufwand für die Verdichtung verbunden.

Dynamik	hoch
Transportfähigkeit	hoch, bei transportablen Behältern
Gefahrenpotential	Berstgefahr, Materialermüdung
Anbieter	diverse Anbieter für Druckbehälter

Fazit

Die Nutzung von Druckbehältern ist Stand der Technik und sowohl für kleinskalige (Flaschen) und großskalige Anwendungen (stationäre Tanks) geeignet.

Literatur

Bolle, F.-W., et al.: WaStrAK NRW „Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung“ - Phase I. Band I: Kompendium Wasserstoff 2022.
 Zhao, L., et al.: Review on studies of the emptying process of compressed hydrogen tanks. In: Int. J. Hydrog. Energy 46 (2021) 43, S. 22554-73.
 Yang, M., et al.: A review of hydrogen storage and transport technologies. In: Clean Energy 7 (2023) 1, S. 190-216.
 Wolf, E.: Large-Scale Hydrogen Energy Storage: Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing 2015.
 Miguel, N. de, et al.: Compressed hydrogen tanks for on-board application: Thermal behaviour during cycling. In: Int. J. Hydrog. Energy 40 (2015) 19, S. 6449-58.
 Andersson, J., et al.: Large-scale storage of hydrogen. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 23, S. 11901-19.



H₂-Speicher: Flüssiger Wasserstoff

Eine Form der Reinstwasserstoff-Speicherung ist neben komprimiertem Gas die Speicherung als Flüssigkeit (LH₂). Dabei wird H₂ stark abgekühlt, komprimiert und in Cryo-Tanks abgefüllt. In flüssiger Form hat H₂ seine höchste Dichte (70 kg/m³ bei 1 bar).

Funktionsweise

Mittels des Linde-Hampson-Verfahrens wird gasförmiges H₂ auf unter -253 °C heruntergekühlt. Unter diesen Bedingungen geht Wasserstoff in den flüssigen Zustand über. Der Prozess wird mittels flüssigen Stickstoffes und Heliums gekühlt, da sich Wasserstoff bei Expansion erwärmt. Unterhalb -202 °C kann H₂ entsprechend dem herkömmlichen Linde-Verfahren mittels Expansion und Kompression auf die nötige Temperatur abgekühlt werden, da sich der Joule-Thompson-Effekt umkehrt. Zu beachten ist jedoch, dass eine ortho-para-Spinumwandlung im Laufe des Verflüssigungsprozesses stattfinden muss.

Für die Lagerung des LH₂ werden spezielle Cryo-Tanks genutzt die eine nicht vermeidbare Erwärmung und somit Verdampfung des LH₂ (Boil-off) verringern.

Zur Ausspeicherung wird LH₂ erwärmt, wodurch er wieder in die Gasphase übergeht.

TRL	> 9
Typische Kapazitäten	klein- bis großskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 2,8 MWh/m ³ H ₂
- gravimetrisch	~ 39,4 kWh/kg H ₂
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	< -253 °C
- Druckbereich	~ 1,5 bar
- Energiebedarf	~ 10,0 kWh/kg H ₂
H ₂ -Ausspeicherung	
- Temperaturbereich	> -253 °C
- Druckbereich	20 bar
- Energiebedarf	k.A.

Besonderheiten

LH₂ zeichnet sich durch seine deutlich höhere volumetrische Speicherdichte im Vergleich zur komprimierten Form aus. Jedoch sind der energetische Aufwand H₂ zu verflüssigen, die ortho-para-Spinumkehr durchzuführen und H₂ im flüssigen Zustand zu halten, für eine Vielzahl an Anwendungsbereichen stark limitierend.

Verluste durch in die Gasphase übergehendes H₂, sogenanntes Boil-off-Gas, sind insbesondere für die Langzeitspeicherung problematisch, zu rechnen ist mit einem Verlust von 1 - 5 Vol-% pro Tag. Die entsprechende Auslegung von Cryo-Tanks für Langzeitspeicheranwendung ist herausfordernd und mit hohem technischem Aufwand verbunden. Die Gasverluste können durch doppelwandige, vakuumisolierte Tankdesigns stark vermindert werden. Jedoch führen äußere Einflüsse, wie Bewegung oder direkte Sonneneinstrahlung zu deutlichen Gasverlusten. Eine Nutzung des Boil-off-Gases ist möglich, eine Rückverflüssigung jedoch nur bei größeren stationären Anlagen sinnvoll möglich.

Dynamik	niedrig, Cryoprozesskette
Transportfähigkeit	hoch, Flüssigkeit in Cryo-Tanks
Gefahrenpotential	hoch, niedrige Temperaturen, Entstehung von Boil-off-Gas
Anbieter	Linde, Nippon Gase, Air Liquide, Gasido

Fazit

LH₂ eignet sich als Speicheroption, ist jedoch mit einem großen technischen Aufwand zur Verflüssigung verbunden. Aufgrund der Boil-off-Verluste wird LH₂ insb. als Lösung für Transport und Kurzzeitspeicherung angesehen und nicht als Langzeitspeicher.

Literatur

Andersson, J., et al.: Large-scale storage of hydrogen. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 23, S. 11901-19.

H₂-Speicher: Adsorptionsspeicher

Adsorptionsspeicher, auch Oberflächenspeicher genannt, sind Materialien, welche Wasserstoff rein über physikalische Bindung an ihrer Oberfläche anlagern. Technisch etabliert im Bereich der Gasreinigung, lässt sich das Prinzip der Adsorption auch auf die H₂-Speicherung übertragen. In Frage kommen eine Reihe an möglichen Adsorbentien wie Aktivkohle, Fullerene und kohlenstoffbasierte-Nanoröhrchen, sowie Metall-organische Gerüstverbindungen, engl. metalorganic Frameworks (MOF).

Funktionsweise

Adsorptionsspeicher basieren auf der rein physikalischen Bindung der Wasserstoffmoleküle an der Oberfläche der Adsorbentien (Physisorption).

Das H₂-Molekül nähert sich der Oberfläche des Adsorbens an und wird durch unterschiedlich elektronegative Oberflächengruppen polarisiert und elektrisch angezogen. Diese sogenannten Van-der-Waals-Kräfte sind sehr schwach, führen jedoch zur Anlagerung der H₂-Moleküle an der Oberfläche. Der Schritt der Adsorption ist exotherm und wird durch niedrige Prozesstemperaturen und hohe Drücke begünstigt.

Die Lagerung der Speichermaterialien erfolgt unter tiefkalten Bedingungen.

Eine H₂-Auspeicherung erfolgt durch Wärmezufuhr, welche die pyhsikalische Bindung aufbricht und zur Desorption der H₂-Moleküle führt.

TRL	4 - 5
Typische Kapazitäten	Labormaßstab
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 1,6 - 2,0 MWh/m ³ Ads.
- gravimetrisch	~ 1,8 - 4,3 kWh/kg Ads.
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	-196 °C oder tiefer
- Druckbereich	10 - 100 bar
- Energiebedarf	~ 13,0 kWh/kg H ₂
H ₂ -Auspeicherung	
- Temperaturbereich	k.A.
- Druckbereich	k.A.
- Energiebedarf	k.A.

Besonderheiten

Entscheidend ist die Auswahl der Adsorbentien, da sich über ihre spezifische Oberfläche direkt die Speicherdichte des Systems einstellen lässt. Werte liegen zwischen 1,8 kWh/kg für poröse Materialien bis hin zu 4,3 kWh/kg für MOFs.

Durch die exotherme Adsorption ist eine ständige Kühlung während der Adsorption notwendig, während für die Desorption ständig Wärme zugeführt werden muss. Hieraus ergibt sich ein nicht unerheblicher Energieaufwand, der auch zukünftig zu Gesamtwirkungsgraden von deutlich unter 80% führen wird. Je nach Komplexität der Adsorbentien können verschiedene Anwendungsgebiete in Betracht gezogen werden. So lassen sich kohlenstoffbasierte-Nanoröhrchen im kleinskaligen Bereich aufgrund ihrer mildereren Prozessbedingungen besser anwenden, wohingegen MOFs für den Einsatz im H₂-Transport und stationären Anwendungen geeignet sind.

Dynamik	niedrig, tiefkalte Bedingungen
Transportfähigkeit	stationär, mobile Anwendungen angedacht
Gefahrenpotential	Oxidationsanfällig
Anbieter	diverse FuE-Einrichtungen

Fazit

Die adsorptive H₂-Speicherung weist vielversprechende Eigenschaften auf, ist aber aufgrund der herausfordernden Herstellungs- und Prozessbedingungen technisch noch nicht ausgereift.

Literatur

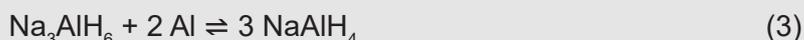
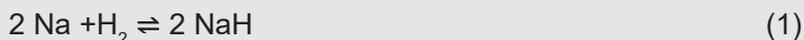
- Xu, Z., et al.: Techno-Economic Analysis of Hydrogen Storage Technologies for Railway Engineering: A Review. In: Energies 15 (2022) 17, S. 6467.
- Paz, L., et al.: Dynamics of Hydrogen Storage through Adsorption: Process Simulation and Energy Analysis. In: Processes 11 (2023) 10, S. 2940.
- Berenguer-Murcia, Á., et al.: Hydrogen Storage in Porous Materials: Status, Milestones, and Challenges. In: Chemical record 18 (2018) 7-8, S. 900-12.
- Andersson, J., et al.: Large-scale storage of hydrogen. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 23, S. 11901-19.

H₂-Speicher: Metallhydride

Wasserstoffspeicher in festem Aggregatzustand gelten als sicherste Art der Speicherung und haben das Potential, höchste volumetrische Speicherdichten zu erreichen. Es können intermetallische Verbindungen, aber auch elementare Metalle als Hydrid-Donor fungieren. Wo anfänglich noch Eisen, Titan und Nickelverbindungen im Fokus der Forschung standen, haben sich nun komplexe Alkali- und Erdalkali-Leichtmetallhydride, wie z.B. NaAlH₄ oder LiBH₄ neben Magnesium als Wasserstoffspeicher empfohlen.

Funktionsweise

Die Einspeicherung bzw. Bildung der komplexen Hydride (hier am Beispiel NaAlH₄) erfolgt über eine dreistufige Reaktion bei erhöhtem Druck und für die einzelnen Teilreaktionen charakteristischen Temperaturen von 425 °C (1), 260 °C (2) und 230 °C (3):



Zur Freisetzung des H₂ wird bei niedrigen Drücken die Temperatur wieder auf 425 °C erhöht und der Ablauf der Reaktionen umgekehrt. Ein weiteres Hydrid ist LiH, welches sich durch eine höhere gravimetrische Speicherdichte auszeichnet. Zur Ausspeicherung werden jedoch 680 °C benötigt. Die vollständige Dehydrierung läuft nickel- oder vanadiumkatalysiert ab.

TRL	7
Typische Kapazitäten	kleinskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 0,4 - 4,9 MWh/m ³
- gravimetrisch	~ 0,7 - 3,9 kWh/kg
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	bis zu 680 °C
- Druckbereich	bis zu 100 bar
- Energiebedarf	k.A.
H ₂ -Ausspeicherung	
- Temperaturbereich	bis zu 680 °C
- Druckbereich	< 1 - 100 bar
- Energiebedarf	~ 1,0 kWh/kg H ₂ (AlH ₃)

Besonderheiten

Bei einfachen Metallhydriden wird H₂ an der Oberfläche disproportioniert und diffundiert unter Volumenzunahme in das Material hinein. Ein Vorteil dieser Speicherform ist, dass theoretisch eine Vielzahl potentieller verschiedener H₂-Speichermaterialien zur Verfügung stehen. Je nach Metallhydridverbindung variieren die Betriebsbedingungen deutlich. Somit steigt ihr technisches Potential für Anwendungen verschiedenster Art.

Dank der festen Phase besitzen Metallhydride zwar eine sehr große volumetrische, jedoch nur eine sehr geringe gravimetrische Speicherdichte. Aufgrund ihrer Zusammensetzung sind sie weiterhin mit hohen Materialkosten (seltene Erden, aufwendige Herstellung) verbunden. Bei richtiger Lagerung können diese Verbindungen aber für Langstreckentransporte oder als Langzeitspeicher Verwendung finden. Ihre niedrigen Ausspeicherraten und anspruchsvollen Betriebsbedingungen (Temperaturen, Volumenzunahme) lassen eine flächendeckende Anwendung jedoch sehr unwahrscheinlich erscheinen.

Dynamik	hoch
Transportfähigkeit	hoch, Feststoff
Gefahrenpotential	stark reaktiv gegenüber Oxidationsmitteln
Anbieter	diverse internationale Kleinanbieter

Fazit

Die hydridische H₂-Speicherung weist vielversprechende Eigenschaften auf, aber ist momentan nur im kleinskaligen Maßstab verfügbar und noch nicht vollständig ausgereift.

Literatur

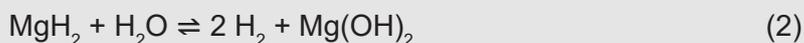
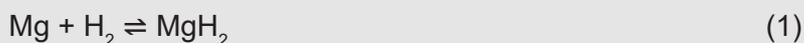
- Klopčič, N., et al.: A review on metal hydride materials for hydrogen storage. In: Journal of Energy Storage 72 (2023), S. 108456.
 Xi, S., et al.: Hydrogen Release: Thermodynamic and Kinetic Studies of NaBH₄ Activated by Different Zeolite Nanoparticles. In: Energy Fuels 34 (2020) 8, S. 10218–24.
 Orimo, S.-I., et al.: Complex hydrides for hydrogen storage. In: Chemical reviews 107 (2007) 10, S. 4111–32.
 Andersson, J., et al.: Large-scale storage of hydrogen. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 23, S. 11901–19.
 Sandrock, G.: A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view. In: Journal of Alloys and Compounds 293-295 (1999), S. 877–88.

H₂-Speicher: Wasserstoffpaste

Die Erfindung des Fraunhofer-Zentrum für Energiespeicher und Systeme (ZESS) ist ein chemischer H₂-Speicher, welcher sich durch eine besonders hohe Speicherdichte auszeichnet. Konzipiert für PEM-Brennstoffzellen-Anwendungen, wird dieser metallische Speicher besonders für die Automobilbranche interessant.

Funktionsweise

Magnesium-Pulver wird mit Wasserstoff bei rund 2 bar und 180 °C hydridisch beladen (1). Dabei wird H₂ dissoziativ chemisorbiert und an die Oberfläche der Magnesiumpartikel gebunden. Mit geringen Mengen eines Nickelsalzes dotiert, erfolgt anschließend die Nassvermahlung zu einer homogenen Paste (Anteil MgH₂ rund 70 Mass-%). Unter Luft- und Feuchtigkeitsausschluss kann die Paste abgefüllt, transportiert und aufbewahrt werden. Die Freigabe des gebundenen Wasserstoffs erfolgt mittels Hydrolyse (2).



Das entstehende Magnesiumhydroxid wird anschließend durch Erwärmung und Verdüsung zu reinem Magnesium umgewandelt. Diese Aufbereitung erfolgt in einem gesonderten Prozessschritt.

TRL	5
Typische Kapazitäten	kleinskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 1,9 MWh/m ³ Paste
- gravimetrisch	~ 3,9 kWh/kg Paste
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	180 °C
- Druckbereich	2 bar
- Energiebedarf	k.A.
H ₂ -Ausspeicherung	
- Temperaturbereich	k.A.
- Druckbereich	k.A.
- Energiebedarf	k.A.

Besonderheiten

Die Wasserstoffpaste ist langzeitstabil, somit findet kein Boil-off bzw. das Absinken der Kapazität über eine gewisse Zeit statt. Weiterhin kommt es bei der Wasserstoffeinspeicherung zu einer Volumenzunahme von rund einem Drittel, welche bei der technischen Auslegung berücksichtigt werden muss. Die Anforderungen an die Wasserstoffqualität sind hierbei hoch, da Verunreinigungen Nebenreaktionen mit Magnesium eingehen können. Bei der Hydrolyse wird Wasserstoff als einziges gasförmiges Produkt gewonnen, weswegen von einer hohen Reinheit ausgegangen werden kann.

Eine Aufbereitung des H₂ in Form von Trocknung kann möglicherweise nötig sein. Die Vorteile der Powerpaste liegen in ihren moderaten Prozessbedingungen, in ihrer schnellen Kinetik, ihrer Sicherheit, ihrer Wiederverwendbarkeit und ihren geringen Kosten für Recycling und Beladungsinfrastruktur.

Dynamik	hoch, steuerbare Reaktion
Transportfähigkeit	hoch, Paste
Gefahrenpotential	gering, mögliche Unverträglichkeit bei Hautkontakt
Anbieter	Fraunhofer ZESS

Fazit

Für große Kapazitäten ist die Wasserstoffpaste aufgrund ihrer Speicherdichte nicht ausgelegt. Für kleinskalige Anwendungen hingegen kann sie eine legitime Alternative zu den herkömmlichen Speichermethoden darstellen.

Literatur

Yang, M., et al.: A review of hydrogen storage and transport technologies. In: Clean Energy 7 (2023) 1, S. 190–216.
Vogt, M., et al.: POWERPASTE FOR OFF-GRID POWER SUPPLY.

H₂-Speicher: Metalloxide

Neben der gasförmigen und flüssigen Speicherung von Wasserstoff existieren Systeme zur langfristigen Speicherung des Wasserstoffs in Feststoffen. Hierfür eignen sich Materialien, welche beladen bei moderaten Temperaturen und Drücken stabil und lagerfähig sind. Diese Kriterien können durch bestimmte Metalloxide erfüllt werden, welche H₂ als chemisches Potential, also nicht elementar, speichern können.

Funktionsweise

Metalloxid-basierte Speicherverfahren nutzen die Reduktions- bzw. die Oxidationsreaktion der jeweiligen Metalle (Me) nach Gleichung (1). Als geeignetes Material wird u.a. Fe angesehen, auf welches sich die folgenden Angaben beziehen.



Das vorliegende Metalloxid wird zunächst mittels H₂ reduziert und das entstandene H₂O aus dem System entfernt. Somit wird das elementare Metall bzw. Metalloxid zum „Speichermedium“ (chemisches Potential), welches in fester Form gelagert werden kann.

Die Ausspeicherung erfolgt über die Rückreaktion, und der damit einhergehenden Oxidation des Metalls durch Wasserdampf. Diese Reaktion ist stark exotherm und selbsterhaltend. Das entstehende Gas muss aufgrund von ggf. nicht umgesetzten H₂O getrocknet werden, liegt aber darüber hinaus als reines Gas vor.

TRL	8 - 9
Typische Kapazitäten	kleinskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 3,9 MWh/m ³ Fe pell.
- gravimetrisch	~ 2,0 kWh/kg Fe
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	400 - 900 °C
- Druckbereich	gering
- Energiebedarf	~ 9,0 kWh/kg H ₂
H ₂ -Ausspeicherung	
- Temperaturbereich	100 - 500 °C
- Druckbereich	gering
- Energiebedarf	~ 2,0 kWh/kg H ₂

Besonderheiten

Die Lagerung des reduzierten Metalls sollte unter Ausschluss von O₂ sowie Feuchtigkeit erfolgen, da es sonst zur ungewollten Oxidation kommt. Genaue Speicherdichten hängen stark vom eingesetzten Material und dessen physischer Form ab. So weisen Fe-Pellets z.B. eine Speicherdichte von 100 kg/m³ auf. Mit zunehmender Anzahl an Speicherzyklen, kann es bedingt durch Sintereffekte zu einer Abnahme der Speicherdichte kommen. Der Funktionsnachweis für das Verfahren wurde erbracht und erste kleinskalige Anlagen in Containergröße sind kommerziell verfügbar.

Derzeit stehen verschiedene Materialien im Fokus der Forschung, mit dem Ziel Kapazitäten zu erhöhen und Beständigkeit gegen Sinterung zu erreichen. Besonders von Interesse sind verschiedene Eisenspezies, da diese zum Einen recht preisgünstig hergestellt werden können und zum anderen häufig auf der Erde vorkommen. Neben Fe-basierten Materialien werden auch Zink, Zinn, Germanium und Molybdän im Hinblick auf ihr Speicherpotential untersucht.

Dynamik	hoch durch steuerbare Reaktion
Transportfähigkeit	hoch, Feststoff
Gefahrenpotential	exotherme Reaktion mit O ₂ und H ₂ O
Anbieter	AMBARtec AG

Fazit

Auch wenn die H₂-Speicherung mittels Metalloxiden erst am Anfang der Kommerzialisierung steht, kann sie eine Alternative insbesondere für die kleinskalige Speicherung darstellen. Der apparative Aufwand ist im Vergleich zu anderen Verfahren geringer.

Literatur

- Yamamura, T., et al.: Design and Evaluation of Hydrogen Energy Storage Systems Using Metal Oxides. In: Energy Fuels 36 (2022) 17, S. 9745–56.
 Bock, S., et al.: Natural iron ores for large-scale thermochemical hydrogen and energy storage. In: Energy Convers Manage 267 (2022), S. 115834.
 Brinkman, L., et al.: Thermochemical Hydrogen Storage via the Reversible Reduction and Oxidation of Metal Oxides. In: Energy Fuels 35 (2021) 22, S. 18756–67.
 AMBARtec AG: HyCS®-Technologie: einfach und wirkungsvoll. URL: <https://www.ambartec.de/technologie/>. Abrufdatum 06.11.2023.

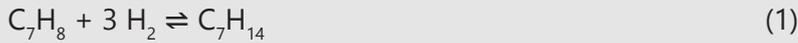


H₂-Speicher: Flüssige Speichermedien

Flüssige organische Speichermedien zur Wasserstoffspeicherung, engl. liquid organic hydrogen carriers (LOHC) zeichnen sich dadurch aus, dass H₂ chemisch an eine bereits flüssige Verbindung gebunden wird und das Reaktionsprodukt ebenfalls in flüssiger Form vorliegt. Es existiert eine Reihe von Stoffsystemen welche sich als LOHCs eignen, zu diesen gehören u.a. Toluol/Methylcyclohexan (TOL/MCH) und Dibenzyltoluol/Perhydro-Dibenzyltoluol (DBT/PDBT). Beispielhaft sei nachfolgend das System TOL/MCH beschrieben.

Funktionsweise

Die Einspeicherung des H₂ erfolgt über die Hydrierung von TOL nach Gleichung (1) als exotherme Reaktion bei erhöhtem Druck.



Flüssiges MCH lässt sich in entsprechend geeigneten Behältern zwischenlagern oder transportieren, was dem Stand der Technik entspricht.

Die Ausspeicherung von H₂ ist über die endotherme Rückreaktion bei Temperaturen bis 400 °C möglich. Als Produkt entsteht neben H₂ wieder TOL, welches wiederum für die Einspeicherung zur Verfügung steht.

Eine Aufbereitung, sowohl für das zurückgewonnene H₂ und TOL ist notwendig, da Rückstände vom Edukt bzw. Nebenprodukten wie Benzen enthalten sein könnten.

Weitere LOHC-Systeme z.B. auf Basis von Bezytoluen (BT) weisen einen ähnlichen Prozessablauf auf.

TRL	8 - 9
Typische Kapazitäten	klein - mittelskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 1,7 MWh/m ³ MCH
- gravimetrisch	~ 2,4 kWh/kg MCH
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	100 - 200 °C
- Druckbereich	20 - 30 bar
- Energiebedarf	< 1,0 kWh/kg H ₂
H ₂ -Ausspeicherung	
- Temperaturbereich	200 - 400 °C
- Druckbereich	1 - 3 bar
- Energiebedarf	~ 11,2 kWh/kg H ₂

Besonderheiten

LOHCs bieten den Vorteil, ähnliche Eigenschaften wie Erdölprodukte zu besitzen, entsprechend kann vorhandene Infrastruktur zur Lagerung und zum Transport von Chemikalien genutzt werden. Eine Eignung als Langzeitspeicher ist gegeben, da keine Boil-off-Verluste auftreten. Entsprechend der Eigenschaften der jeweiligen chemischen Verbindung sind diese als Gefahrstoff zu behandeln und nötige Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen.

Sofern die Reaktionen in der Gasphase stattfinden, ist mit einem entsprechenden Energieaufwand für die Verdampfung zu rechnen. Verluste an H₂ und Speichermedium treten durch ungewollte Nebenreaktionen sowie die ggf. notwendige Aufreinigung auf. LOHCs sind wiederverwendbar jedoch müssen Verluste ersetzt werden.

Dynamik	niedrig
Transportfähigkeit	hoch
Gefahrenpotential	chemische Verbindungen ggf. brennbar, gesundheitsschädlich, Gewässer schädigend
Anbieter	Chiyoda Corp. (TOL/MCH), Hydrogenious (BT)

Fazit

Jeweilige Prozessschritte sind technisch ausgereift, werden jedoch momentan nur kleinskalig angewendet, mit großskaligen Projekten in Planung. Eine zentrale Einspeicherung inkl. Stoffaufbereitung und dezentrale Ausspeicherung ist ein mögliches Anwendungsszenario.

Literatur

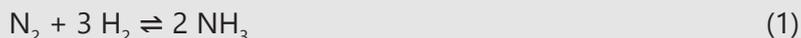
- Andersson, J., et al.: Large-scale storage of hydrogen. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 23, S. 11901-19.
- Raab, M., et al.: Comparative techno-economic assessment of a large-scale hydrogen transport via liquid transport media. In: Int. J. Hydrog. Energy 46 (2021) 21, S. 11956-68.
- Niermann, M., et al.: Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) – techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain. In: Energy Environ. Sci. 12 (2019) 1, S. 290-307.
- Aziz, M., et al.: Comparison of liquid hydrogen, methylcyclohexane and ammonia on energy efficiency and economy. In: Energy Procedia 158 (2019), S. 4086-91.
- Abdin, Z., et al.: Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers. In: iScience 24 (2021) 9, S. 102966.

H₂-Speicher: Ammoniak

Die Synthese von Ammoniak (NH₃) ist eine der ältesten im industriellen Maßstab angewendeten chemischen Reaktionen. Als Bulk Chemikalie produziert, ist Ammoniak die am meisten verwendete Stickstoffchemikalie der Welt. Insbesondere durch den etablierten Herstellungsprozess und aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften wird Ammoniak als potentielles Speicher- und Transportmedium für Wasserstoff angesehen.

Funktionsweise

Grundlage für die NH₃-Synthese bildet das Haber-Bosch-Verfahren, bei dem ein H₂/N₂-Gemisch in Anwesenheit eines Katalysators, z.B. Fe, nach (1) umgesetzt wird. Dabei handelt es sich um eine exotherme Reaktion, welche typischerweise bei 300 - 350 °C und hohen Drücken stattfindet.



Große Mengen NH₃ werden flüssig bei atmosphärischem Druck und -33 °C in isolierten Tanks gelagert, kleinere Mengen in unter Druck stehenden Stahlbehältern.

Die Freisetzung des H₂ erfolgt über die thermokatalytische Zersetzung bei > 650 °C unter zur Hilfenahme von Katalysatoren. Neben Edelmetallen, z.B. Ru, welche eine Zersetzung bei moderaten Temperaturen ermöglichen, erfordern unedle Metalle wie z.B. Ni, Co, Fe weit höhere Temperaturen > 900 °C.

Entsprechend den geforderten Wasserstoffqualitäten, ist eine Abtrennung von nicht umgesetztem NH₃ und dem reaktionsbedingt entstehendem N₂ notwendig.

TRL	> 9
Typische Kapazitäten	großskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 4,9 MWh/m ³ NH ₃ fl.
- gravimetrisch	~ 7,0 kWh/kg NH ₃ fl.
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	300 - 600 °C
- Druckbereich	200 - 350 bar
- Energiebedarf	~ 2,0 - 4,0 kWh/kg H ₂
H ₂ -Auspeicherung	
- Temperaturbereich	350 - > 950 °C
- Druckbereich	gering
- Energiebedarf	~ 6,3 kWh/kg H ₂

Besonderheiten

Ein großer Vorteil ist die etablierte Technologie zur NH₃-Synthese, welche aufgrund der anlagentechnischen Komplexität, u.a. die N₂-Bereitstellung über Luftzerlegung, fast ausschließlich großtechnisch durchgeführt wird. Somit ist dieses Verfahren für eine zentrale H₂-Einspeicherung geeignet, während sich die Auspeicherung über die thermokatalytische Zersetzung ebenfalls für dezentrale Anwendungen eignet. Hinsichtlich der Auspeicherung ist mit der Entwicklung effizienterer Niedertemperaturprozesse zu rechnen. Hohe H₂-Reinheiten erfordern eine entsprechende Aufreinigung und können zu deutlich höheren Kosten und technischem Aufwand

führen. Eine direkte Verwendung des NH₃ ist möglich.

Die Verflüssigung von Ammoniak ermöglicht, verbunden mit der hohen Speicherdichte, ~ 17,7 Ma.-%, hohe H₂-Kapazitäten. Lagerung und Transport mittels Schiff, Pipeline oder LKW sind Stand der Technik. Ein Problem ist neben der korrosiven Wirkung die Toxizität von NH₃. Es handelt sich hierbei um eine giftige und gewässerschädigende Substanz, die sich sowohl in organischen als auch anorganischen Medien löst.

Fazit

Ammoniak ist ein vielversprechendes Speichermedium für Wasserstoff. Aufgrund des technischen Aufwandes ist eine Anwendung jedoch eher im mittleren bis großtechnischen Maßstab zu erwarten und nicht für kleinskalige Anwendungen.

Dynamik	reaktionsbedingt niedrig
Transportfähigkeit	hoch im flüssigen Zustand
Gefahrenpotential	toxisch, korrosiv, flüchtig
Anbieter	diverse kommerzielle Anbieter

Literatur

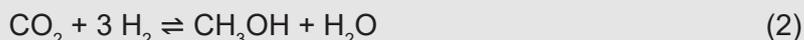
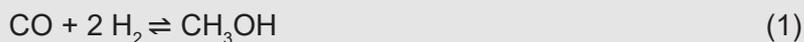
- Aziz, M., et al.: Comparison of liquid hydrogen, methylcyclohexane and ammonia on energy efficiency and economy. In: Energy Procedia 158 (2019), S. 4086-91.
Klerke, A., et al.: Ammonia for hydrogen storage: challenges and opportunities. In: J. Mater. Chem. 18 (2008) 20, S. 2304.
Grinberg Dana, A., et al.: Nitrogen-Based Fuels: A Power-to-Fuel-to-Power Analysis. In: Angewandte Chemie (International ed. in English) 55 (2016) 31, S. 8798-805.
Giddey, S., et al.: Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media. In: ACS Sustainable Chem. Eng. 5 (2017) 11, S. 10231-39.
Andersson, J., et al.: Large-scale storage of hydrogen. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 23, S. 11901-19.

H₂-Speicher: Methanol

Die Methanolsynthese ist seit 100 Jahren als industrieller Prozess bekannt und etabliert. Als Basischemikalie findet Methanol (MeOH) direkt Anwendung oder wird zur Synthese höherwertiger Produkte genutzt. In Folge der Hinwendung zu regenerativen und CO₂-neutralen Energien rückt Methanol als Energieträger und CO₂-Senke in den Fokus. Darüber hinaus ist ein Einsatz als potentielles Speicher- und Transportmedium für H₂ denkbar.

Funktionsweise

Die Synthese von Methanol erfolgt über ein Synthesegas-Gemisch bestehend aus H₂/CO/CO₂ entsprechend der Reaktionen (1) & (2). Durch die exothermen Reaktionen fällt eine große Menge Abwärme an. Genutzt wird für die Hydrierung typischerweise ein Katalysator auf Basis von Cu/Zn/Al₂O₃.



Die Speicherung des Methanols geschieht in geeigneten Lagerbehältern bei Umgebungsbedingungen als Flüssigkeit.

Die Rückgewinnung des Wasserstoffs erfolgt mittels endothermer Dampfreformierung. Dabei kommen u.a. Cu-haltige Katalysatoren zum Einsatz. Durch zusätzlich eingebrachtes Wasser kann die Ausbeute des Wasserstoffs bis auf 7,4 kWh/kg erhöht werden. Entsprechend des Verwendungszweckes und benötigter H₂-Qualität muss das Produktgas von Nebenprodukten und nicht umgesetzten Edukten befreit und getrocknet werden.

TRL	> 9
Typische Kapazitäten	großskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 3,9 MWh/m ³ MeOH
- gravimetrisch	~ 5,0 kWh/kg MeOH
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	220 - 280 °C
- Druckbereich	20 - 80 bar
- Energiebedarf	~ 3,2 kWh/kg H ₂
H ₂ -Auspeicherung	
- Temperaturbereich	90 - 420 °C
- Druckbereich	gering
- Energiebedarf	~ 6,7 kWh/kg H ₂

Besonderheiten

Da es sich bei der Methanolsynthese um einen etablierten Prozess handelt, stehen entsprechende Anlagen im industriellen Maßstab kommerziell zur Verfügung. Eine große Herausforderung besteht in der Bereitstellung der benötigten Edukte, weshalb sich Methanolsynthesen aktuell hauptsächlich an Chemiestandorten im Verbund mit anderen CO bzw. CO₂ bereitstellenden Anlagen befinden. An Konzepten für kleinskalige dezentrale Anlagen wird jedoch gearbeitet. Gleiches gilt für die Ausspeicherung mittels Reformierung. Da die Entstehung von Nebenprodukten bei der Ausspeicherung des H₂ unvermeidlich ist, stellt die Aufreinigung des Produktgases

einen wichtigen ökonomischen, ggf. mit hohem technischem Aufwand verbundenen, Faktor dar.

Bei der Lagerung von Methanol sind aufgrund der Toxizität und Brennbarkeit entsprechende Vorschriften zu beachten und geeignete Lagerbehälter zu verwenden. Eine Kontamination mit Methanol kann zu Gesundheitsschäden führen.

Dynamik	reaktionsbedingt niedrig
Transportfähigkeit	hoch im flüssigen Zustand
Gefahrenpotential	brennbar, toxisch, korrosiv, flüchtig
Anbieter	diverse kommerzielle Anbieter

Fazit

Methanol ist als potentielles Speichermedium für Wasserstoff geeignet. Aufgrund des technischen Aufwandes ist eine Anwendung jedoch eher im mittleren bis großtechnischen Maßstab zu erwarten, während der Einsatz dezentraler kleinskaliger Anlagen potentiell zu aufwendig ist.

Literatur

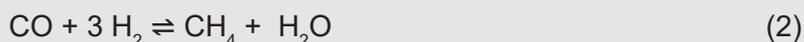
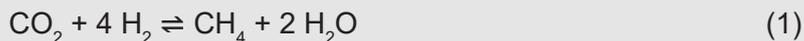
- Niermann, M., et al.: Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) – techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain. In: Energy Environ. Sci. 12 (2019) 1, S. 290–307.
- Abdin, Z., et al.: Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers. In: iScience 24 (2021) 9, S. 102966.
- Andersson, J., et al.: Large-scale storage of hydrogen. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 23, S. 11901–19.
- Niermann, M., et al.: Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 13, S. 6631–54.

H₂-Speicher: Methanisierung

Zur Zeit als Energieträger genutztes natürliches Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan. Technisch ist es unter Nutzung von Wasserstoff möglich, synthetisches Methan zu erzeugen. Hierraus ergibt sich die Möglichkeit Methan als Wasserstoffspeicher sowie Kohlenstoffsенke zu nutzen.

Funktionsweise

Die Einspeicherung des H₂ erfolgt unter Druck über die hoch exotherme Reaktion nach Gleichung (1) bzw. Gleichung (2) unter Anwesenheit von Katalysatoren wie Ni oder Ru. Aufgrund der Exothermie ist eine Ständige Kühlung notwendig.



Durch die unvollständige Umsetzung und die Entstehung von Wasser als Nebenprodukt ist eine Aufbereitung und Trocknung des Produktgases notwendig. Für die physische Speicherung des CH₄ können entsprechende Druckbehälter oder das ggf. vorhandene Erdgasnetz genutzt werden.

Eine Rückgewinnung des H₂ kann über die etablierte Dampfreformierung oder alternative Prozesse, z.B. Pyrolyse geschehen. Als Option besteht darüber hinaus die direkte Nutzung des CH₄.

TRL	7 (CO ₂ -basiert)
Typische Kapazitäten	großskalig
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	speicherabhängig
- gravimetrisch	~ 9,9 kWh/kg CH ₄
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	300 - 700 °C
- Druckbereich	bis zu 30 bar
- Energiebedarf	< 2,4 kWh/kg H ₂
H ₂ -Auspeicherung	
- Temperaturbereich	> 700 °C
- Druckbereich	ab 1 bar
- Energiebedarf	~ 8,7 kWh/kg H ₂

Besonderheiten

Neben der beschriebenen thermokatalytischen Umsetzung existieren weitere Ansätze zur Methanisierung z.B. über biologische oder plasmabasierte Prozesse. Allen Prozessen gemein ist jedoch, dass neben H₂ entsprechend stöchiometrische Mengen an CO₂ bzw. CO bereitgestellt werden müssen, dies ist je nach Verfügbarkeit mit höherem Aufwand verbunden. Eine Einbindung in eine vorhandene CO₂-Infrastruktur z.B. bei vorhandenen Industrieanlagen ist sinnvoll.

Eine theoretische Prozesskette, welche das Ziel hat H₂ wieder auszuspeichern, ist aufwendig. Zum einen

liegt dies am Methanisierungsprozess selbst aber auch am Ausspeicherprozess, welcher z.B. im Bezug auf die Dampfreformierung einen eigenen industriellen Prozess darstellt. Aus diesem Grund handelt es sich vor allem um mittel- und großskalige Industrieanlagen. An der Umsetzung im kleinskaligen Bereich, z.B. Dampfreformierung, wird gearbeitet.

Dynamik	niedrig
Transportfähigkeit	hoch, Druckbehälter oder Leitungsnetz
Gefahrenpotential	explosiv
Anbieter	diverse industrielle Anbieter

Fazit

Die Umwandlung von H₂ zu CH₄ und dessen Speicherung ist mit einem energetischen und apparativen Aufwand verbunden, welcher die Vorteile durch die Speicherung als CH₄ wieder aufwiegt.

Literatur

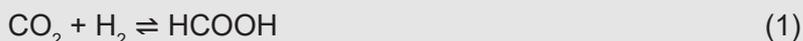
Tao, P.: Techno-economic Comparison of Three Electrified Hydrogen Production Technologies in The Context of Sweden 2023.
 Bell, D. A.: Coal Gasification and its Applications 2011.
 Chandel, M., et al.: Synthetic Natural Gas (SNG): Technology, Environmental Implications, and Economics 2009.

H₂-Speicher: Ameisensäure

Ameisensäure als einfachste Carbonsäure findet z.B. Anwendung als Lebensmittelzusatzstoff. Als Herstellungsprozess kommen z.B. die Carbonylierung von Methanol und anschließende Hydrolyse des Methylformiates oder der Säureaufschluss von Formiaten zum Einsatz. Darüber hinaus wird im FuE-Bereich der Ansatz über die Hydrierung von CO₂ verfolgt. Dieses Verfahren würde die Nutzung von Ameisensäure zur H₂-Speicherung ermöglichen.

Funktionsweise

Da die direkte Hydrierung (1) thermodynamisch nicht begünstigt ist, wird eine spezielle Reaktionsführung in der Flüssigphase notwendig. Hierbei handelt es sich um Ru- oder Rh-Komplexe, gelöst in Wasser, Basen oder Aminen.



Da die Ameisensäure als Produkt ebenfalls in flüssiger Form vorliegt, ist eine anschließende aufwendige thermische Trennung notwendig. Gelagert werden kann Ameisensäure unter normalen Bedingungen als Flüssigkeit in entsprechend geeigneten Behältern.

Die Ausspeicherung erfolgt über die thermodynamisch begünstigte Rückreaktion bei niedrigen Temperaturen unter Einsatz von Katalysatoren z.B. Pt. Eine Aufreinigung ist anschließend notwendig, um CO₂ und eventuelle Rückstände des Lösungsmittels abzutrennen.

TRL	4 - 5
Typische Kapazitäten	Labormaßstab
H ₂ -Speicherdichte	
- volumetrisch	~ 2,1 MWh/m ³
- gravimetrisch	~ 1,7 kWh/kg
H ₂ -Einspeicherung	
- Temperaturbereich	50 - 240 °C
- Druckbereich	1 - 100 bar
- Energiebedarf	~ 70,7 kWh/kg
H ₂ -Ausspeicherung	
- Temperaturbereich	< 100 °C
- Druckbereich	1 - 600 bar
- Energiebedarf	~ 4,3 kWh/kg H ₂

Besonderheiten

Ein Fokus der Entwicklung liegt momentan noch auf der Suche nach effektiven und langzeitstabilen Katalysatoren. Hervorzuheben ist der noch relativ niedrige Entwicklungsstand des Verfahrens sowie der hohe Energiebedarf für die Einspeicherung. Der Energiebedarf der Einspeicherung setzt sich hierbei zusammen aus der notwendigen elektrischen Energie von ~ 6,7 kWh/kg H₂ sowie der insb. für die Abtrennung und Aufbereitung der Ameisensäure benötigten Wärme in Höhe von ~ 64 kWh/kg H₂. Aufgrund der technischen Komplexität ist davon auszugehen, dass eine Einspeicherung in zentralen Großanlagen sinnvoll ist. Der hohe Energiebedarf steht einer Anwendung

insgesamt jedoch entgegen.

Die Speicherdichte ist im Vergleich mit weiteren chemischen Speichermedien gering. Als vorteilhaft kann der geringe Energiebedarf und die niedrige Temperatur von < 100 °C bei der Ausspeicherung angesehen werden.

Dynamik	niedrig
Transportfähigkeit	hoch
Gefahrenpotential	brennbar, korrosiv, toxisch
Anbieter	diverse FuE-Einrichtungen

Fazit

Aufgrund des aktuellen Entwicklungsstandes sowie Energiebedarfes ist die Verwendung von Ameisensäure als Speichermedium momentan nicht abzusehen. Mögliche Anwendungsfelder könnten jedoch in der dezentralen Ausspeicherung liegen.

Literatur

- Andersson, J., et al.: Large-scale storage of hydrogen. In: Int. J. Hydrog. Energy 44 (2019) 23, S. 11901–19.
Singh, A. K., et al.: Hydrogen energy future with formic acid: a renewable chemical hydrogen storage system. In: Catal. Sci. Technol. 6 (2016) 1, S. 12–40.
Müller, K., et al.: Hydrogen Storage in Formic Acid: A Comparison of Process Options. In: Energy Fuels 31 (2017) 11, S. 12603–11.
Mellmann, D., et al.: Formic acid as a hydrogen storage material - development of homogeneous catalysts for selective hydrogen release. In: Chem. Soc. Rev. 45 (2016) 14, S. 3954–88.

2.3 Übersicht zu betrachteten Speichertechnologien

Die zehn betrachteten Speichertechnologien decken ein breites Spektrum an Lösungsansätzen, technischen Parametern und Entwicklungsständen ab. Damit verbunden sind wesentliche Unterschiede in den Eigenschaften und Vor-/Nachteilen der Systeme. Ergänzend zu den Technologieübersichten wird nachfolgend eine Kurzübersicht zu den wesentlichen Parametern gegeben.

Tabelle 1: Übersicht Eigenschaften der Speichersystem

	Flüssige Speichermedien (LOHC)	Methanisierung	Ammoniak	Methanol	Ameisensäure
TRL	-	7 (CO ₂)	> 9	> 9	3 – 4 (CO ₂)
Typische Kapazitäten	klein – mittel-skalig	großskalig	industrieller Maßstab	industrieller Maßstab	labormaßstab
H₂-Speicherichte					
- volumetrisch	~ 1,7	speicherabhängig	~ 4,9	~ 3,9	~ 2,1
- gravimetrisch	~ 2,4	~ 9,9	~ 7	~ 5,0	~ 1,7
H₂-Einspeicherung					
- Temperaturbereich	100 – 200	300 – 700	300 – 600	220 – 280	50 – 240
- Druckbereich	20 – 30	bis zu 30	200 – 350	20 – 80	1 – 100
- Energiebedarf	< 1,0	< 2,4 kWh	~ 2,0 – 4,0	~ 3,2	~ 70,7
H₂-Auspeicherung					
- Temperaturbereich	200 – 400	> 700	350 – > 950 °C	90 – 420	< 100
- Druckbereich	1 – 3	ab 1	gering	gering	1 – 600
- Energiebedarf	~ 11,2	~ 8,7	~ 6,3	~ 6,7	~ 4,3

Tabelle 1: Übersicht Eigenschaften der Speichersystem (Fortsetzung)

	Druckspeicher	Flüssiger Wasserstoff	Adsorptions-speicher	Metallhydride	Wasserstoff-paste	Metalloxide
TRL	> 9	> 9	4-5	7	5	8-9
Typische Kapazitäten	Klein- bis großskalig	Klein- bis großskalig	Labormaßstab	Kleinskalig	Kleinskalig	kleinskalig
H₂-Speicherichte						
- volumetrisch	~ 1,0 - 1,7	~ 2,8	~ 1,6 - 2,0	~ 0,4 - 4,9	~ 1,9	~ 3,9
- gravimetrisch	~ 39,4	~ 39,4	~ 1,8 - 4,3	~ 0,7 - 3,9	~ 3,9	~ 2,0
H₂-Einspeicherung						
- Temperaturbereich	-40 - 80	< -253	< -196	bis zu 680	180	400 - 900
- Druckbereich	200 - 700	~ 1,5	10 - 100	bis zu 100	2	gering
- Energiebedarf	~ 1,0 - 3,3	~ 10,0	~ 13,0	k.A.	k.A.	~ 9,0
H₂-Auspeicherung						
- Temperaturbereich	-40 - 80	> -253	k.A.	bis zu 680	k.A.	100 - 500
- Druckbereich	< Speicherdruck	20	k.A.	< 1 - 100	k.A.	gering
- Energiebedarf	k.A.	k.A.	k.A.	~ 1,0	k.A.	~ 2,0

3 Bewertung an beispielhaften Anwendungsfällen

Zwischen den Speichertechnologien bestehen signifikante technische Unterschiede, die auch die möglichen Anwendungsmöglichkeiten und -bereiche beeinflussen. Nicht jede Speichertechnologie ist für konkrete Anwendungen geeignet. Nachfolgend werden die Speicherverfahren anhand von drei Beispielen, darunter eine Tankstelle, ein Mehrfamilienhaus und eine industrielle Anwendung, bewertet, um wesentliche Aspekte aufzuzeigen. Die Speicheroptionen „Methanisierung“, „Methanolsynthese“, „Ammoniaksynthese“ und „Ameisensäure“ wurden dabei angesichts der bestehenden Ähnlichkeit als „chemische Speicher“ zusammengefasst, ebenfalls wird die „Wasserstoffpaste“ den „Metallhydriden“ zugeordnet.

3.1 H₂-Tankstelle (gasförmiger H₂)

3.1.1 Randbedingungen

Straßenfahrzeuge mit H₂-Antrieb sind derzeit überwiegend mit Tanksystemen für verdichteten gasförmigen Wasserstoff ausgestattet. Abhängig vom Fahrzeugtyp sind Systemdrücke von 350 bar oder 700 bar üblich. Der benötigte Wasserstoff wird teils vor Ort erzeugt oder auch angeliefert und an der Tankstelle zwischengespeichert. Der Wasserstoffabsatz ist abhängig von der Lage der Tankstelle und den vorhandenen Nutzern und spiegelt sich in der Tankstellenauslegung wider, z.B. bzgl. Anzahl an Zapfstellen, Druckniveaus und möglichem Wasserstoffdurchsatz. Letzterer kann im Bereich weniger kg bis hin zu mehreren Tonnen täglich je Station liegen. Trotz dieser Unterschiede gelten im Allgemeinen folgende Randbedingungen:

- Der Absatz fluktuiert abhängig vom Nutzerverhalten sowohl kurz- als auch längerfristig
- Der Wasserstoff ist in hoher Qualität bereitzustellen, entsprechend DIN EN 17124 bzw. DVGW Arbeitsblatt G260 (H₂, Gruppe D)
- Der Wasserstoff muss bei Start des Betankungsvorgangs unmittelbar zur Verfügung stehen

Für die konkrete Betrachtung wird eine größere Tankstelle mit Wasserstoffabsätzen bis zu einer Tonne täglich angenommen.

3.1.2 Bewertung

Die Anforderungen an die H₂-Bereitstellung wirken sich auch auf die H₂-Speicherung aus. Die Eignung der Speicheroptionen wird nachfolgend bewertet und ist in Tabelle 2 zusammengefasst

Druckspeicher

Die technisch weit entwickelten H₂-Druckspeichersysteme finden große Verbreitung an bestehenden Tankstellen. Sie ermöglichen die flexible, verlustfreie Bereitstellung von H₂ in unveränderter Qualität, wobei auch Wechsel zwischen Be- und Entladezyklen möglich sind. Die Einbindung einer lokalen H₂-Erzeugung ist ebenso möglich, wie die Anlieferung oder Kombinationen. Die Anlieferung von H₂ bzw. der Transport von abgesetzten Erzeugungseinheiten ist durch Tausch der Behälter (Trailer) oder Umfüllen möglich. Der vorhandene Systemdruck mindert den Verdichtungsaufwand für die Betankung. Es ist davon auszugehen, dass die benötigte Hilfsenergie (elektrisch) an den Standorten verfügbar ist. Eine Anwendung ist technisch möglich.

Flüssig-Wasserstoff

Die Bereitstellung von Flüssigwasserstoff ist insbesondere dann von Interesse, wenn an der Tankstelle ergänzend zu gasförmigem auch flüssiger Wasserstoff zur Verfügung gestellt werden soll. Die hohen Speicherdichten ermöglichen einen geringen Platzbedarf. Die Bereitstellung des gasförmigen Wasserstoff ist, begrenzt

durch die Leistung des Verdampfers, flexibel möglich, der Wechsel zwischen Ein- und Ausspeicherung hingegen eingeschränkt. Im Falle einer lokalen Erzeugung ist die Anwendung vor dem Hintergrund des technischen Aufwands zur Verflüssigung fraglich. Verluste durch Abdampfen sind nur bei unregelmäßiger bzw. geringer Abnahme zu erwarten und vor dem Hintergrund der erwarteten Abnahmemenge nicht relevant. Der Hilfsenergiebedarf ist auf elektrische Energie für Pumpen und Peripherie beschränkt, sofern Wasserstoff flüssig abgegeben oder Umweltwärme zur Verdampfung genutzt wird. Die Anwendung von Flüssigspeichern für Tankstellen ist prinzipiell möglich.

Adsorptionsspeicher

Auch wenn Adsorptionsspeicher eine langfristige, verlustfreie und sichere Lagerung von Wasserstoff in hoher Qualität ermöglichen, ist ihre Anwendbarkeit für die Versorgung einer Tankstelle als eingeschränkt anzusehen. Einerseits ist die technologische Reife gering und Beispielanwendungen sind nicht bekannt, andererseits sind realisierbaren Kapazitäten gering und der Aufwand, sowohl technisch als auch energetisch, hoch. Letzteres u.a. bedingt durch ein aufwendiges Thermomanagement. Eine Anlieferung von H₂ wäre gasförmig bzw. flüssig möglich, die Einspeicherung in das Adsorptionsmaterial wäre bedingt durch die geringe gravimetrische Energiedichte und die notwendige Kühlung des Systems vor-Ort erforderlich. Die Nutzung der Adsorptionsspeicher an Tankstellen wird nicht empfohlen.

Metallhydridspeicher

Für die Anwendung von Hydridspeichern sprechen neben der verlustfreien Speicherung über längere Zeiträume auch Sicherheitsaspekte und eine ausreichende Flexibilität bzgl. schwankender Entnahme bzw. Einspeisung. Ein häufiger, kurzfristiger Wechsel zwischen Ein- und Ausspeicherung, wie er an der Tankstelle nötig ist, ist allerdings herausfordernd, da die Betriebsbedingungen deutlich abweichen. Die Systeme sind somit nur bedingt für den Ausgleich der lokalen Erzeugung und die Bereitstellung größerer Wasserstoffmengen mit häufiger Anlieferung nutzbar. Des Weiteren ist von einem erhöhten Hilfsenergiebedarf auszugehen. Nachteilig ist auch, dass die Ausspeicherung bei geringerem Druck als die Einspeicherung erfolgt, die Bereitstellung an der Tankstelle erfordert somit zusätzlichen Verdichtungsaufwand. Entsprechend der mittleren technologischen Reife sind die Hydridspeicher eher in kleinskaligen Anwendungen relevant, Beispielanwendungen an Tankstellen bestehen nicht.

Metalloxidspeicher

Die Metalloxidspeicher ermöglichen die Lagerung größerer Wasserstoffmengen bei geringen Prozessdrücken. Bedingt durch die indirekte Lagerung als metallischer Feststoff sind auch die Anforderungen an Lagerbehälter etc. eher gering, eine sichere Lagerung ist möglich. Die zur Ein- und Ausspeicherung notwendigen Temperaturen und die erforderliche Hilfsenergie sind allerdings nachteilig für die Umsetzung im Zusammenhang mit einer Tankstelle. Da am Standort keine Abwärme bzw. kein Dampf zur Verfügung steht, muss die thermische Energie lokal bereitgestellt werden. Der Ausgleich von lokaler Erzeugung und Bedarf ist trotz der hohen Dynamik prinzipiell möglich, zumindest in Verbindung mit einem Pufferspeicher. Der technische Aufwand ist insgesamt allerdings als erhöht einzuschätzen, insbesondere, wenn Wasserstoff angeliefert und nur kurzzeitig gespeichert werden soll. Auch eine Anlieferung des reduzierten Metalls mit lokaler H₂-Freisetzung ist angesichts der geringen gravimetrischen Energiedichte fraglich. Eine Anwendung der metallischen Speicher in Verbindung mit der Tankstelle ist somit insgesamt nicht empfehlenswert.

LOHC

LOHC ermöglichen eine verlustfreie Lagerung von gebundenem Wasserstoff in ausreichender Menge auch über längere Zeiträume. Die Bereitstellung des gespeicherten Wasserstoffs ist allerdings mit technischem Aufwand verbunden, da neben der Freisetzung des Wasserstoffs auch eine entsprechende Aufbereitung nötig ist. In Verbindung mit dem ebenfalls hohen Aufwand zur Einspeicherung des H₂ ist eine Anwendung in einem kleinskaligen, dezentralen System nicht zielführend, zumal durch fluktuierende Erzeugung und Entnahme hohe Anforderungen an die Dynamik des Systems bestehen, sowohl bzgl. schwankender Abnahme als auch durch Wechsel zwischen Ein- und Ausspeicherphasen. Weiterer Nachteil sind die hohen Wandlungsverluste, die gegen eine Anwendung als Kurzzeitspeicher sprechen. Eine mögliche Option wäre die Anlieferung des beladenen LOHC aus einer zentralen Anlage mit dezentraler Wasserstofffreisetzung. Auch diese Lösung

erfordert allerdings die Bereitstellung der nötigen Prozesswärme vor Ort und den Rücktransport des entladenen LOHC. Eine Anwendung in Verbindung mit der Tankstelle ist fraglich.

„chemische“ Speicher

Die Speicherung von H₂ in Verbindungen wie Methan, Methanol oder Ammoniak ermöglicht hohe Speicherdichten, hohe Speicherkapazitäten und auch eine langfristige Speicherung. Nachteilig ist jedoch der vergleichsweise hohe technische Aufwand. Einerseits muss lokal erzeugter Wasserstoff mit CO₂ bzw. N₂ zu den Speichermedien umgesetzt werden, andererseits muss der Wasserstoff zur Nutzung wiederum freigesetzt und auf Brennstoffzellenqualität aufbereitet werden. Damit sind neben einer eingeschränkten Flexibilität, die ggf. zusätzliche Pufferspeicher erfordert, auch Wandlungsverluste und ein erhöhter Energiebedarf verbunden. Eine eher kurzfristige Speicherung des Wasserstoffs aus lokaler Erzeugung ist somit nicht zielführend, zumal Systeme im entsprechenden Maßstab (noch) nicht dem Stand der Technik entsprechen. Angesichts der hohen Speicherdichten ist die zentrale Erzeugung des Speichermediums mit Anlieferung und Wasserstofffreisetzung an der Tankstelle allerdings eine mögliche Nutzungsoption.

Fazit

An die Wasserstoffspeicherung an Tankstellen bestehen hohe Anforderungen, vor allem bzgl. Reinheit und Dynamik. Die technisch etablierten Druckspeicher sind unter den Randbedingungen sehr gut geeignet. LH₂-Speicher sind als weitere Option denkbar, insbesondere, wenn an der Tankstelle auch LH₂ abgegeben werden soll.

Tabelle 2: Bewertung der Speicherverfahren am Beispiel der Tankstelle (+: passend/vorteilhaft; -: nicht passend/nachteilig; o: mit Vor- und Nachteilen verbunden)

	Drucksp.	Flüssig-H ₂	Adsorptionssp.	Metallhydride	Metall-oxide	LOHC	chem. Sp.
<i>Kapazität</i>	+	+	-	-	O	+	+
<i>Systemdruck</i>	+	O	-	-	-	O	O
<i>Dynamik - fluktuierende Abnahme</i>	+	+	+	+	+	O	O
<i>Dynamik - Ein-/Ausspeisung</i>	+	-	-	-	O	-	-
<i>Speicherdauer / Verluste</i>	+	O	+	+	+	+	+
<i>Wandlungsverluste</i>	+	+	+	+	+	-	-
<i>Hilfsenergie</i>	+	O	-	-	-	-	-
<i>technischer Aufwand</i>	+	-	-	O	O	-	-
<i>Transportfähigkeit / Option H₂-Anlieferung</i>	+	+	-	O	O	O	+
<i>Ausgleich lokaler Erzeugung</i>	+	-	O	O	O	-	-
<i>Sicherheit</i>	+	+	+	+	+	O	O
<i>TRL</i>	+	+	-	O	+	+	O
<i>Beispielanwendungen</i>	+	+	-	O	-	-	-

3.2 Gebäudeenergieversorgung: Mehrfamilienhaus

Die Gebäudeenergieversorgung stellt, insbesondere bedingt durch die saisonalen Schwankungen im Wärmebereich, hohe Anforderungen an dezentrale Versorgungssysteme. Dies wird verstärkt durch die Einbindung erneuerbarer Energien, z.B. durch PV-Anlagen, die fluktuierend Energie bereitstellen. H₂-Systeme können hier durch Elektrolyse einen Beitrag zur Aufnahme überschüssiger Energie in den Sommermonaten leisten, während der erzeugte Wasserstoff gespeichert wird und somit zur Strom- und Wärmeversorgung in

erzeugungsschwachen Zeiten zur Verfügung steht. Dies kann einen wertvollen Beitrag zur Dekarbonisierung der Energieversorgung leisten. Eine Auslegung der H₂-Systeme ist dabei abhängig von der konkreten Zielsetzung.

3.2.1 Randbedingungen

Für die Betrachtung wurde beispielhaft ein Mehrfamilienhaus mittlerer Größe ausgewählt, das die nachfolgenden Merkmale aufweist:

- Grundfläche: ca. 700 m²
- 4 Etagen
- 32 Wohneinheiten
- Spezifischer Wärmebedarf: 120 kWh/(m²*a) inkl. Warmwasserbereitung
- Strombedarf: 64.000 kWh/a, verteilt nach Standardlastprofil
- Flachdach

Das Gebäude ermöglicht aufgrund der Struktur die Installation von PV-Anlagen auf Dach- und Giebelwandflächen. Die Dachanlage wird vollflächig liegend installiert, wodurch eine installierte Leistung von 140 kW erreicht wird. Zusätzlich ist vorgesehen, die obere Hälfte der nach Süden ausgerichteten Giebelwand mit senkrecht montierten PV-Modulen auszustatten, die mit einer Leistung von 12 kW auch in den Übergangs- und Wintermonaten einen Beitrag leisten können. Auf die Nutzung der unteren Giebelwandhälfte wird verzichtet, da von Beschattung durch andere Gebäude und somit geringe Erträge zu rechnen ist. Zusätzlich zu den PV-Anlagen sind auf der Dachfläche zwei Kleinwindkraftanlagen vorgesehen. Mit diesen Anlagen können unter Berücksichtigung beispielhafter Wetterdaten zusammen jährlich mehr als 160 MWh elektrische Energie bereitgestellt werden. Der Eigenbedarf an elektrischer Energie wird somit bilanziell übertroffen. „Überschüssige“ elektrische Energie kann zur H₂-Erzeugung genutzt werden. Dabei gilt, dass zunächst ein Kurzzeitspeicher (Akku) bedient wird, um Schwankungen von Erzeugung und Bedarf im Tagesverlauf weitestgehend auszugleichen, bevor per Elektrolyse Wasserstoff erzeugt wird. Der Wasserstoff wird lokal gespeichert und steht zur Strom- und Wärmeversorgung über Brennstoffzelle bzw. Spitzenlastkessel zur Verfügung. Abwärme von Elektrolyse und Brennstoffzelle kann im Gebäude genutzt werden. Zusammenfassend sind neben den EE-Anlagen die folgenden Komponenten vorhanden:

- Kurzzeitspeicher elektrische Energie (60 kWh)
- Wärmepumpe zur Wärmeversorgung aus überschüssiger elektrischer Energie
- Elektrolyse (15 kW)
- Brennstoffzelle (12 kW)
- Optional Spitzenlastkessel zu Wärmeversorgung

Das System kann mit unterschiedlichen Zielsetzungen betrieben werden. Einerseits fokussiert auf eine verbesserte Ausnutzung des eigeneerzeugten EE-Stroms, andererseits ausgerichtet auf die vollständige Versorgung des Gebäudes.

Bei Fokus auf verbesserte Ausnutzung des EE-Stroms werden Überschüsse, die vor allem in den Sommermonaten anfallen, genutzt, um H₂ zu erzeugen. Die Nutzung des H₂ erfolgt ausschließlich zur Rückverstromung, womit eine vollständige Abdeckung des Strombedarfs möglich wird, ein Netzbezug ist nicht notwendig. Bedingt durch die zeitliche Verschiebung von Bedarf und Erzeugung ist eine saisonaler Wasserstoffspeicherung notwendig, die im konkreten Beispiel eine Speicherkapazität von 2.500 m³ bzw. ca. 225 kg erfordert. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, wird ab dem Frühjahr Wasserstoff eingespeichert, im zeitigen Sommer ist der Speicher vollständig gefüllt. Sodass keine signifikante Erzeugung mehr möglich ist. Die Ausspeicherphase beginnt im Herbst. Neben dieser saisonalen Komponente werden im Jahresverlauf aber auch kurze witterungsbedingte Phasen mit H₂-Bedarf ersichtlich, erkennbar an kurzzeitigen Abnahmen des Speicherinhalts.

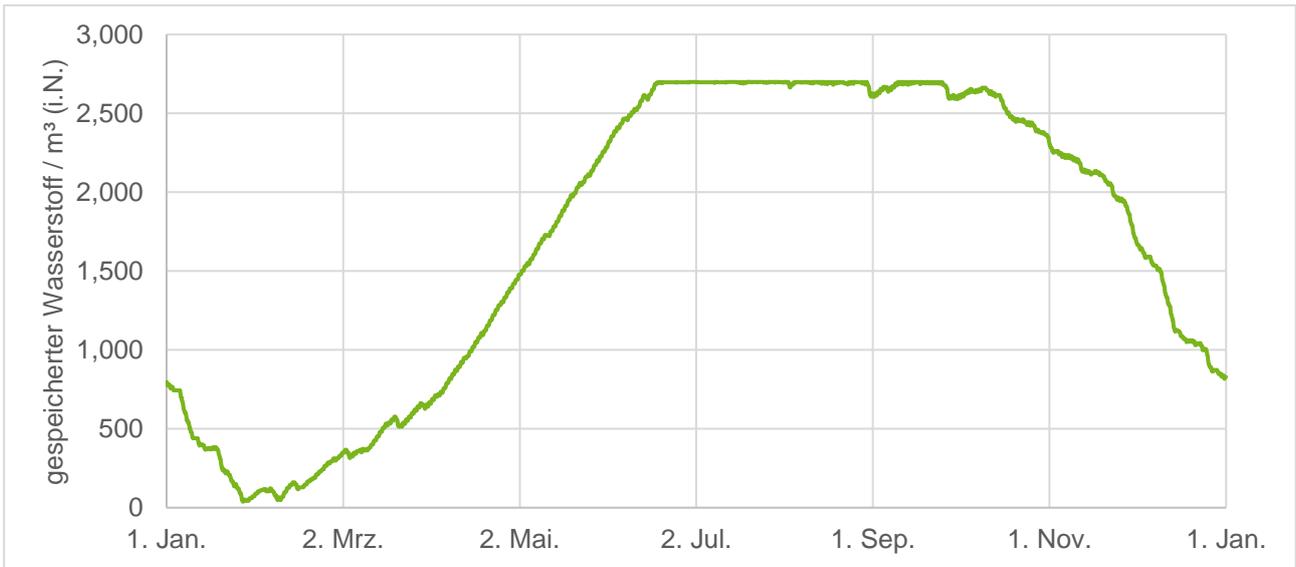


Abbildung 1: berechneter zeitlicher Verlauf der Wasserstoffmenge im Speicher, Beispiel Mehrfamilienhaus mit optimierter EE-Nutzung

Trotz Nutzung der Abwärme aus Elektrolyse und Brennstoffzelle kann allerdings nur ein geringer Teil des Wärmebedarfs gedeckt werden. In den Übergangs- und Sommermonaten könnte ein Teil des Defizits mittels Wärmepumpe aus überschüssigem EE-Strom bereitgestellt werden, insbesondere in den Wintermonaten verbleibt allerdings ein Defizit (Abbildung 2)

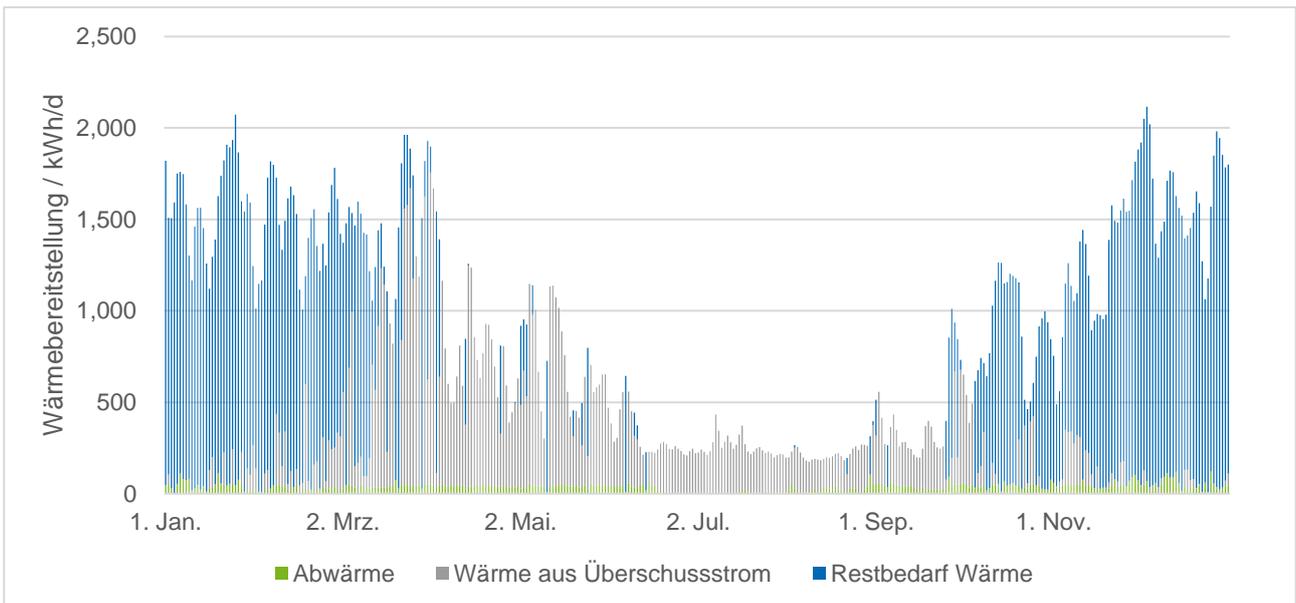


Abbildung 2: Bereitstellung der benötigten Wärmeenergie im Mehrfamilienhaus mit optimierter EE-Nutzung

Das verbleibende Defizit im Wärmebereich kann durch den optionalen Spitzenlastkessel gedeckt werden. Der damit verbundene Wasserstoffbedarf kann jedoch nicht durch lokale Erzeugung im Gebäude gedeckt werden. Die Anlieferung von Wasserstoff wird nötig. Daraus ergeben sich veränderte Anforderungen an den H₂-Speicher, der nun mehrmals jährlich befüllt und entladen wird. Das Speicherprofil geht von einem Saisonspeicher zunehmend zur Kurzzeitspeicherung über. Nur in den Sommermonaten ergeben sich Phasen, die überwiegend von der Einspeicherung eigenerzeugten Wasserstoffs geprägt sind (Abbildung 3).

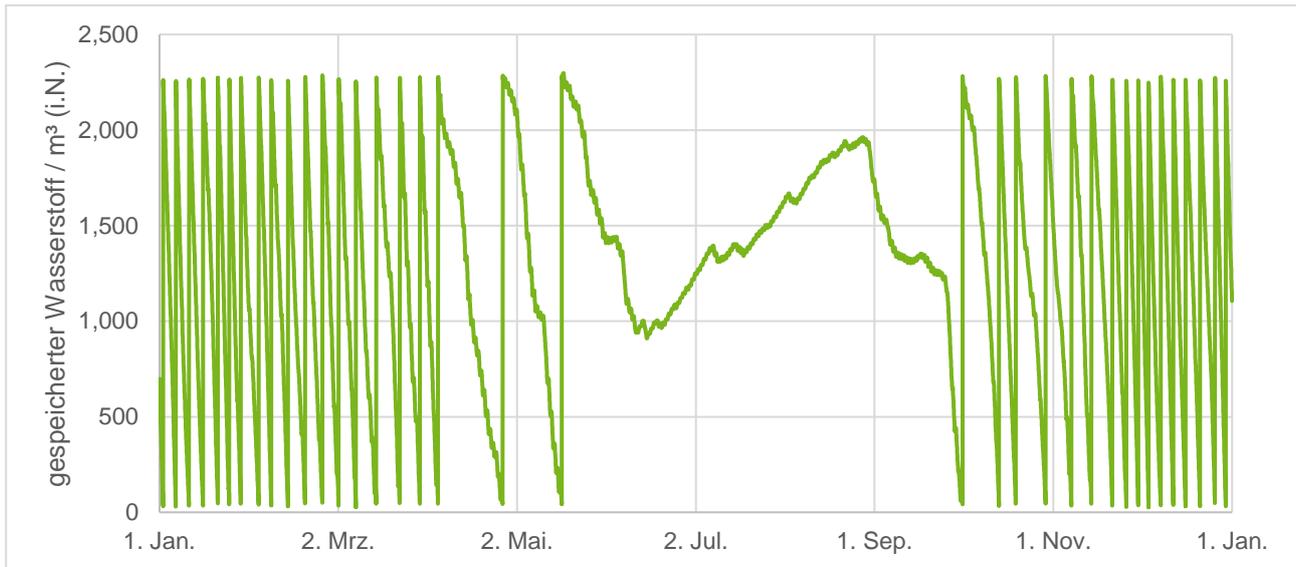


Abbildung 3: berechneter zeitlicher Verlauf der Wasserstoffmenge im Speicher, Beispiel Mehrfamilienhaus mit wasserstoffbasierter Wärmeversorgung

3.2.2 Bewertung

Wie zuvor beschrieben, ist die Wasserstoffspeicherung im Mehrfamilienhaus mit saisonalem Speicherbedarf bei gleichzeitig dynamischer Ein- und Ausspeicherung verbunden. Im Falle der wasserstoffbasierten Wärmeversorgung ist ergänzt auch die Anlieferung von Wasserstoff notwendig. Die Eignung der Speichertypen wird nachfolgend bewertet.

Druckspeicher

Die erforderliche Speicherkapazität von ca. 2.500 m³ (i.N.) bzw. 225 kg Wasserstoff könnte nach Stand der Technik z. B. durch Multi-Element-Gascontainer (MEGC) realisiert werden. Auch bei saisonaler Nutzung im Fall der optimierten EE-Nutzung ist eine verlustfreie Speicherung möglich. Die Lagerung ist technisch sicher umsetzbar, wobei die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen, die mit der Lagerung von H₂ in Drucktanks neben Wohngebäuden verbunden sind, standortabhängig zu bewerten sind. Die Belieferung mit Wasserstoff ist durch Austausch der Speicherbehälter oder durch Umfüllen möglich. Nachteilig ist die notwendige Verdichtung zur Einlagerung des vor Ort erzeugten Wasserstoffs, deren Energiebedarf das lokale Stromangebot und damit die Möglichkeiten zur Wasserstofferzeugung mindert. Beispielanwendungen sind in kleineren Maßstäben vorhanden. Eine Anwendung ist technisch möglich.

Flüssig-Wasserstoff

Flüssiger Wasserstoff bietet angesichts der hohen Speicherdichte einen Vorteil bzgl. Platzbedarf und ist damit für Anwendungen im Umfeld von Wohnbebauung attraktiv. Die Abdampfverluste der Speicher sind angesichts der notwendigen saisonalen Speicherung allerdings nachteilig. Da die Bedarfe in den Sommermonaten zu gering sind, ist mit Wasserstoffverlusten zu rechnen. Hinzu kommt, dass die Speicherung des lokal erzeugten Wasserstoffs eine Verflüssigungseinheit erfordern würde, die angesichts der geringen Durchsätze als zu aufwändig eingeschätzt wird. Die Anwendung ist im konkreten Fall nicht zu empfehlen.

Adsorptionsspeicher

Da Adsorptionsspeicher auch eine saisonale Speicherung ohne Wasserstoffverluste ermöglichen, sind diese in Verbindung mit geringen Speicherdrücken und der Möglichkeit zur dynamischen Entnahme für die Anwendung in Verbindung mit Mehrfamilienhäusern prinzipiell geeignet. Auch Sicherheitsaspekte sprechen nicht gegen die Anwendung. Die Temperierung der Speicher bedingt allerdings einen hohen technischen und energetischen Aufwand. Insbesondere die Bereitstellung der elektrischen Hilfsenergie zur Kühlung ist in Phasen

geringer EE-Erzeugung schwierig, es müsste mehr Energie gespeichert werden, um den Eigenbedarf zu decken. Auch angesichts der fehlenden Möglichkeit zum kurzzeitigen Wechsel zwischen Ein- und Ausspeisung und damit zum Ausgleich von Eigenerzeugung und -bedarf ist die Nutzung erschwert, bzw. nur in Verbindung mit Pufferspeichern möglich. Auch bei vollständig wasserstoffbasierter Versorgung des Gebäudes setzt die Speichergeschwindigkeit Grenzen bei der Aufnahme von Lieferwasserstoff. Eine Anwendung ist insgesamt nicht vorteilhaft, zumal die technische Reife noch nicht gegeben ist und bisher keine ausreichenden Kapazitäten bzw. Beispielanwendungen bekannt sind.

Metallhydridspeicher

Die Vor- und Nachteile der Metallhydridspeicher sind mit denen der Adsorptionsspeicher vergleichbar. Während die verlustfreie Langzeitspeicherung, Sicherheitsaspekte, moderate Systemdrücke und fehlende Wandlungsverluste für eine Anwendung sprechen, bestehen auch signifikante Nachteile. Diese betreffen vor allem den Hilfsenergiebedarf, die geringe Flexibilität für Ein-/Ausspeicherzyklen und die fehlende technische Reife bzw. Verfügbarkeit in der benötigten Größe. Auch wenn der technische Aufwand moderat ausfällt und prinzipiell auch eine Anlieferung von H₂, z.B. direkt als beladenes Speichermedium, möglich ist, ist eine Anwendung im konkreten Beispiel wenig empfehlenswert.

Metalloxidspeicher

Metalloxidspeicher sind vielversprechende Alternativen zur dezentralen Speicherung mit geringen Sicherheitsrisiken. Da ein nahatmosphärischer Betrieb möglich ist, kann auf die Verdichtung von Wasserstoff und somit auf einen kosten- und energieintensiven Zwischenschritt verzichtet werden. Dies ist insbesondere bei dezentralen Lösungen mit begrenzter Verfügbarkeit von EE-Strom, wie im Mehrfamilienhaus, interessant. Andererseits wird sowohl zur Ein- als auch zur Ausspeicherung thermische Energie benötigt, die im konkreten Beispiel nicht verfügbar ist. Die Bereitstellung ist aus EE-Strom oder durch Nutzung gespeicherten Wasserstoffs nötig – verbunden mit reduzierter Verfügbarkeit für die Gebäudeversorgung. Eine ergänzende Bereitstellung von Lieferwasserstoff ist auch in Form von metallischem Speichermedium möglich, das unkompliziert gelagert werden kann. Die geringe gravimetrische Energiedichte erhöht allerdings den Transportaufwand. Auch wenn die verfügbaren Kapazitäten, die technische Reife und die mögliche Dynamik des Systems eine Anwendung im Mehrfamilienhaus prinzipiell ermöglichen würden, ist dieser Speichertyp unter den konkreten Randbedingungen weniger geeignet.

LOHC

Die LOHC ermöglichen eine verlustfreie saisonale Speicherung bei niedrigen Systemdrücken. Die Speicherkapazitäten, die im Mehrfamilienhaus benötigt werden, können durch LOHC bereitgestellt werden. Angesichts der geringen Größe ist der technische Aufwand für Hydrierung, Dehydrierung und Aufbereitung des Wasserstoffs insgesamt aber als sehr hoch einzuschätzen. Damit verbunden ist auch eine eingeschränkte Dynamik bzgl. Ein-/Ausspeicherung, die einen Ausgleich von Erzeugung und Bedarf erschwert bzw. nur in Verbindung mit Pufferspeichern ermöglichen würde. Nachteilig sind weiterhin der Bedarf an Hilfsenergie und die Wandlungsverluste, insbesondere vor dem Hintergrund des begrenzten Energieangebots im Mehrfamilienhaus. Dieser Nachteil gilt auch bei Anlieferung von LOHC, die aber technisch möglich ist. Eine Anwendung wird nicht empfohlen, zumal die technische Reife in der benötigten Größenordnung als gering einzuschätzen ist und keine entsprechenden Referenzanlagen bekannt sind.

„chemische“ Speicher

Chemische Speicher bieten durch die hohe Speicherdichte und die Möglichkeit zur verlustfreien Speicherung auch im Bereich der notwendigen saisonalen Speicherung Potentiale. Der technische Aufwand ist im Verhältnis zur Kapazität aber hoch. Es sind Apparate zur Erzeugung des Speichermediums, zur Bereitstellung des Hilfsstoffs (CO₂, N₂) sowie zur Freisetzung und Aufbereitung des Wasserstoffs erforderlich, die vor Ort installiert und betrieben werden müssen. Auch die hohe Dynamik von H₂-Erzeugung und Bedarf setzt der Anwendung Grenzen. Die Anwendbarkeit zur Einspeicherung des lokal erzeugten Wasserstoffs ist für das konkrete Beispiel nicht gegeben. Die Anlieferung des Speichermediums mit Wasserstofffreisetzung und -nutzung im Gebäude ist aber technisch möglich.

Fazit

Die überwiegend saisonale Speicherung des Wasserstoffs in einer vergleichsweise geringen Größenordnung erschwert die Anwendung vieler Speichertechnologien. Wasserstoffdruckspeicher werden als vorteilhaft angesehen, wobei auch chemische Speicher eine Möglichkeit zur Wasserstoffversorgung bieten, wenn eine vollständig wasserstoffbasierte Versorgung mit externer Anlieferung von Wasserstoff gewünscht ist.

Tabelle 3: Bewertung der Speicherverfahren am Beispiel des Mehrfamilienhauses (+: passend/vorteilhaft; -: nicht passend/nachteilig; o: mit Vor- und Nachteilen verbunden)

	Drucksp.	Flüssig-H ₂	Adsorptionssp.	Metallhydride	Metall-oxide	LOHC	chem. Sp.
<i>Kapazität</i>	+	+	-	-	+	+	+
<i>Systemdruck</i>	-	+	+	O	+	+	+
<i>Dynamik - fluktuierende Abnahme</i>	+	+	+	+	+	O	O
<i>Dynamik - Ein-/Ausspeisung</i>	+	-	-	-	+	-	-
<i>Speicherdauer / Verluste</i>	+	-	+	+	+	+	+
<i>Wandlungsverluste</i>	+	+	+	+	+	-	-
<i>Hilfsenergie</i>	O	-	-	-	-	-	-
<i>technischer Aufwand</i>	+	-	-	O	-	-	-
<i>Transportfähigkeit / Option H₂-Anlieferung</i>	+	+	-	O	O	O	+
<i>Ausgleich lokaler Erzeugung</i>	+	-	-	-	O	-	-
<i>Sicherheit</i>	+	+	+	+	+	O	O
<i>TRL</i>	+	+	-	-	+	-	-
<i>Beispielanwendungen</i>	+	-	-	-	-	-	-

3.3 Industrieller Anwender

Wasserstoff findet in der Industrie breite Anwendung, einerseits als Basis für vielfältige Synthesen, andererseits als Hilfsstoff in der Produktion, z. B. als Schutzgas. Beispielhaft soll eine Anwendung als Hilfsstoff / Schutzgas betrachtet werden, die einen konstanten Wasserstoffbedarf von 50 m³/h aufweist. Eine entsprechende Skalierung ist auf Basis der Betrachtung möglich.

3.3.1 Randbedingungen

Der industrielle Anwender weist einen konstanten Bedarf von 50 m³/h (i.N.) Wasserstoff auf, der als Schutzgas genutzt wird und vollständig durch Elektrolyse bereitgestellt werden soll. Der benötigte Strom wird aus Windkraft und Fotovoltaik bereitgestellt, wobei die Elektrolyse prioritär versorgt wird. Verfügbarer Strom wird also bevorzugt für die Elektrolyse genutzt. Zusätzlich kann der Elektrolysebetrieb durch einen Kurzzeit-Stromspeicher vergleichmäßig werden, sodass der Elektrolyseur mit einer Leistung von 500 kW mehr als 4.000 Volllaststunden erreicht. Trotz der Kombination von Wind- und PV-Anlagen mit Kurzzeitspeicher treten jedoch Phasen mit unzureichender Erzeugung auf, insbesondere in den Herbst- und Wintermonaten, aber auch im Sommer. Dies spiegelt sich auch im Speicherbedarf wider.

Im gewählten Beispiel liegt ab Ende Januar, bedingt durch hohe Verfügbarkeit von Windstrom, überwiegend ein H₂-Überschuss vor, der zur Befüllung des Speichers genutzt werden kann. Bereits Anfang März ist der Speicher mit 31.000 m³ Wasserstoff vollständig gefüllt (Abbildung 4). Der H₂-Überschuss besteht dabei aber nur über den Zeitraum betrachtet. Es treten häufiger auch Phasen mit Wasserstoffdefizit auf, in denen eine

Bereitstellung von H₂ aus dem Speicher nötig wird (Abbildung 5). Gleiches gilt in den Sommermonaten, in denen eine hohe PV-Stromerzeugung eine ausreichende H₂-Erzeugung ermöglicht. Bereits ab August besteht überwiegend ein Wasserstoffdefizit, das durch gespeicherten Wasserstoff ausgeglichen wird, der Speicherstand sinkt ab. Auch in diesem Zeitraum treten aber Phasen mit Wasserstoffüberschuss und Einspeicherung auf.

Am Standort des Wasserstoffanwenders steht Abwärme zur Verfügung, die auch für die H₂-Speicherung genutzt werden kann.

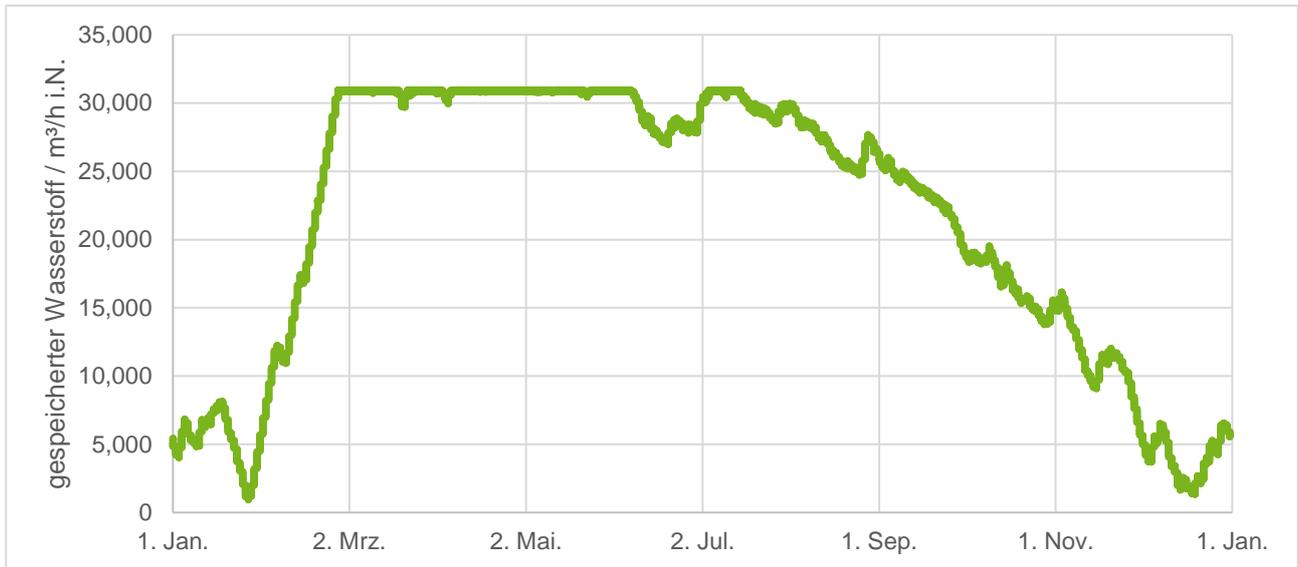


Abbildung 4: berechneter zeitlicher Verlauf der Wasserstoffmenge im Speicher, Beispiel industrieller Anwender

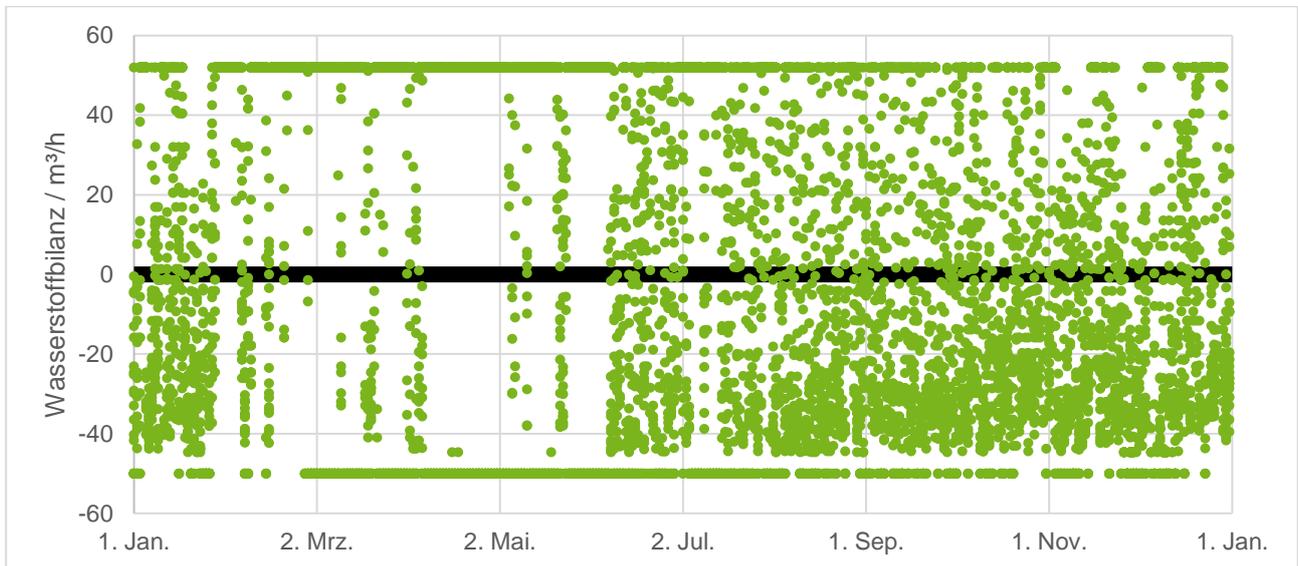


Abbildung 5: berechnete Wasserstoffbilanz als Differenz zwischen Erzeugung und Bedarf des industriellen Anwenders, positive Werte bedeuten Wasserstoffüberschuss

3.3.2 Bewertung

Mit der Speicherkapazität von 31.000 m³ (i.N.) bzw. 2,8 t Wasserstoff besteht seitens des industriellen Anwenders ein erhöhter Bedarf. Die Speicherprofile zeigen eine starke saisonale Speicherung, die allerdings von häufigen, kurzfristigen Wechsels zwischen Ein- und Auspeicherung überlagert wird. Die Eignung der Speicherarten für diese Bedingungen wird nachfolgend bewertet.

Druckspeicher

Der bestehende Speicherbedarf kann nach Stand der Technik z. B. durch mehrere MEGC oder Tanks bereitgestellt werden. Die häufigen Wechsel zwischen Ein- und Ausspeicherung sind nicht kritisch, zumal die Schwankungen in der gespeicherten Menge und damit die Druckschwankungen im Speicher gering sind. Andererseits sind auch bei der notwendigen saisonalen Komponente der Speicherung keine Wasserstoffverluste zu erwarten. Nachteilig ist, abhängig von der Systemauslegung, der Energiebedarf zur Verdichtung bei Einspeicherung, wozu zusätzliche elektrische Energie aufgewendet werden muss. Eine zusätzliche Anlieferung von Wasserstoff, z.B. bei Störung der Elektrolyse, ist möglich, sofern die Anlage dafür ausgelegt wird. Die Anwendung ist technisch möglich.

Flüssig-Wasserstoff

Die Speicherung in flüssiger Form ist aufgrund der hohen Energiedichte prinzipiell vorteilhaft. Die unvermeidbare Verdampfung von Wasserstoff im Speicher ist in der industriellen Anwendung weniger problematisch, da häufig kurze Phasen mit H_2 -Bedarf bestehen, in denen der verdampfte Wasserstoff genutzt werden kann, Verluste sind trotzdem nicht auszuschließen. Die zur Einspeicherung notwendige Verflüssigungseinheit erhöht den technischen Aufwand und den Energiebedarf, bei gleichzeitiger Einschränkung der Flexibilität des Gesamtsystems. Für den konkreten Fall ist die Flüssigspeicherung damit weniger geeignet, außer der Wasserstoffherzeugung und -nutzung erfolgen räumlich getrennt mit entsprechender Anlieferung des Wasserstoffs.

Adsorptionsspeicher

Wie in den bereits betrachteten Beispielen „Mehrfamilienhaus“ und „Tankstelle“ weisen die Adsorptionsspeicher Vorteile auf, z. B. in der saisonalen Speicherung ohne Wasserstoffverluste, geringen Speicherdrücken, Sicherheitsaspekten und der Möglichkeit zur dynamischen Entnahme. Der Hilfsenergiebedarf und die fehlende Möglichkeit zum kurzzeitigen Wechsel zwischen Ein- und Ausspeicherung, die insbesondere im Industriebetrieb häufig nötig ist, um Eigenerzeugung und -Bedarf auszugleichen, sprechen allerdings gegen die Anwendung. Ebenso die geringe technische Reife und die bisher unzureichenden Kapazitäten bzw. fehlende Beispielanwendungen.

Metallhydridspeicher

Analog zu den Adsorptionsspeichern bestehen wesentliche Vorteile der Hydridspeicher in der Möglichkeit zur Langzeitspeicherung, moderaten Prozessdrücken und der möglichen Dynamik bzgl. Entnahmemengen. Die begrenzte Dynamik zum Wechsel zwischen Ein- und Ausspeicherung, wie sie im Industriebetrieb erforderlich ist, erfordert allerdings Pufferspeicher. Benötigte thermische Hilfsenergie kann ggf. aus der vorhandenen Abwärme bereitgestellt werden, sodass darin kein Nachteil besteht. Die geringe technische Reife, die fehlenden Referenzanlagen und die eher geringen Kapazitäten sprechen allerdings gegen eine Anwendung.

Metalloxidspeicher

Im Gegensatz zu den Anwendungen im Mehrfamilienhaus bzw. an der Tankstelle ist am Standort des industriellen Anwenders Abwärme verfügbar, die zur Deckung des thermischen Hilfsenergiebedarfs genutzt werden kann. Der vergleichsweise hohe Hilfsenergiebedarf der Metalloxidspeicher ist im konkreten Beispiel somit nicht von Nachteil. Die Speicher können am Standort betrieben werden und ermöglichen eine verlustfreie Speicherung, auch zur Abdeckung der saisonalen Komponente des Speicherprofils. Kurzfristige Schwankungen in der Wasserstoffabnahme können dabei durch den Speicher abgedeckt werden. Kurzzeitige Wechsel zwischen Ein- und Ausspeicherung sind hingegen problematisch, weshalb ein Pufferspeicher vorgesehen werden sollte, z. B. als kleiner Druckspeicher. Die Integration von Lieferwasserstoff ist ebenso möglich, z. B. durch die Anlieferung von reduziertem Speichermaterial. Da die technische Reife gegeben ist und die benötigte Kapazität abgedeckt werden kann, ist eine Anwendung aus technischer Sicht denkbar.

LOHC

LOHC bieten mit der verlustfreien saisonalen Speicherung bei niedrigen Systemdrücken und ausreichenden Speicherkapazitäten Vorteile für die Wasserstoffspeicherung. Selbst im Industriebetrieb, der unter den betrachteten Beispielen den größten Wasserstoffbedarf aufweist, ist der technische Aufwand für Hydrierung, Dehydrierung und Aufbereitung des Wasserstoffs aber als sehr hoch zu bewerten. Die erforderliche Dynamik

mit häufigen Wechseln zwischen Ein- und Ausspeicherzyklen erfordert zwingend Pufferspeicher. Im Gegensatz zu den anderen Beispielen ist der hohe Hilfsenergiebedarf aber nicht von Nachteil, da im Industriebetrieb ausreichend Abwärme zur Verfügung steht, um zumindest den Bedarf an thermischer Energie zu decken. Nichtsdestotrotz wirken sich die hohen Wandlungsverluste nachteilig aus. Deshalb und angesichts der geringen Anlagengröße sind LOHC trotz gegebener technischer Reife nicht bevorzugt.

„chemische“ Speicher

Die Speicherung des H₂ in chemischen Verbindungen bietet den Vorteil der hohen Energiedichte, ist allerdings, bedingt durch die Bereitstellung der Hilfsstoffe (N₂, CO₂), die Herstellung des Speichermediums und die Freisetzung des Wasserstoffs mit hohem technischem Aufwand verbunden. Angesichts der geringen Kapazität und der Dynamik mit häufigen Wechseln zwischen Ein- und Ausspeisung sind die Bedingungen für die Speicherung in chemischen Verbindungen wenig geeignet.

Eine mögliche Anwendung ergibt sich gegebenenfalls, wenn das vom Anwender benötigte Schutzgas neben Wasserstoff auch Stickstoff enthalten soll. Ein entsprechendes Gemisch könnte direkt aus Ammoniak (NH₃) gewonnen werden, sodass Ammoniak als Speichermedium für Wasserstoff einen Vorteil bietet. Die aufwendige Erzeugung spricht allerdings gegen eine kleinskalige Erzeugung vor Ort, die Anwendung wäre eher bei Belieferung aus einer größeren Anlage interessant.

Fazit

Auch für die Anwendung im Beispiel „industrielle Nutzung“ zeigen sich Druckspeicher als geeignet, um eine ausgeglichene Versorgung zu ermöglichen. Auch Metalloxidspeicher sind in Verbindung mit kleinem Pufferspeicher technisch geeignet. Bei einer Anlieferung von H₂ von einem externen Erzeugungsstandort wären auch Flüssigwasserstoff und chemische Speicher technisch möglich, letztere insbesondere dann, wenn ohnehin Stickstoff-Wasserstoffgemische benötigt werden.

Tabelle 4: Bewertung der Speicherverfahren am Beispiel des industriellen Nutzers (+: passend/vorteilhaft; -: nicht passend/nachteilig; o: mit Vor- und Nachteilen verbunden)

	Drucksp.	Flüssig-H ₂	Adsorptionssp.	Metallhydride	Metall-oxide	LOHC	chem. Sp.
<i>Kapazität</i>	+	+	-	-	+	+	+
<i>Systemdruck</i>	-	+	+	O	+	+	+
<i>Dynamik - fluktuierende Abnahme</i>	+	+	+	+	+	O	O
<i>Dynamik - Ein-/Ausspeisung</i>	+	+	-	-	-	-	-
<i>Speicherdauer / Verluste</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Wandlungsverluste</i>	+	+	+	+	+	-	-
<i>Hilfsenergie</i>	-	-	-	-	O	O	-
<i>technischer Aufwand</i>	+	-	-	O	O	-	-
<i>Transportfähigkeit / Option H₂-Anlieferung</i>	+	+	-	O	O	+	+
<i>Ausgleich lokaler Erzeugung</i>	+	-	-	-	O	-	-
<i>Sicherheit</i>	+	+	+	+	+	O	O
<i>TRL</i>	+	+	-	-	+	+	o
<i>Beispielanwendungen</i>	+	-	-	-	-	o	o

4 Empfehlungen

Mit jeder Anwendung sind spezifische Anforderungen an die Speichersysteme verbunden, sodass eine Einzelfallbewertung empfohlen wird. Neben den Anforderungen an die Speicher und den Eigenschaften der Systeme sind dabei auch die Randbedingungen vor Ort entscheidend. Dies zeigt sich zum Beispiel in der möglichen Nutzung von vorhandener Abwärme oder Synergien mit Prozessen. Nur unter Beachtung sämtlicher Faktoren kann eine optimale Speicherauswahl getroffen werden. Dementsprechend sollten zur Auswahl von Speichersystemen wesentliche Fragen geklärt werden. Dazu gehören u.a. folgende Punkte:

- Benötigte Kapazität / Speichergröße
- Notwendige H₂-Ausspeiserate zur Nutzung
- Übliche Dauer der Einlagerung (Speicherdauer)
- Notwendige Dynamik der Speicherlösung
 - o Bzgl. schwankender Entnahme
 - o Bzgl. Wechseln zwischen ein- und Ausspeicherung
- Wasserstoffbereitstellung vor Ort, durch Anlieferung oder als Kombination
- Eventuelle Transportentfernungen
- Qualitätsanforderungen an H₂
- Vorhandenes bzw. benötigtes Druckniveau
- Verfügbarkeit von Abwärme
- Verfügbarkeit von Hilfsstoffen
- Räumliche Gegebenheiten
- Sicherheitstechnische Anforderungen
- Mögliche Synergien mit anderen Anlagen/Prozessen

Trotz der vielfältigen Einflussfaktoren ist eine erste Eingrenzung der möglichen Speichertypen aber anhand der Anforderungen möglich, z. B. durch Eingrenzung der Speicherdauer, der benötigten Kapazität, der erforderlichen Dynamik und der Notwendigkeit von Transporten. Diese Eingrenzung, die für kleinskalige Systeme nachfolgender Matrix zu entnehmen ist, soll als Orientierung für die Auswahl von Speichersystemen dienen.

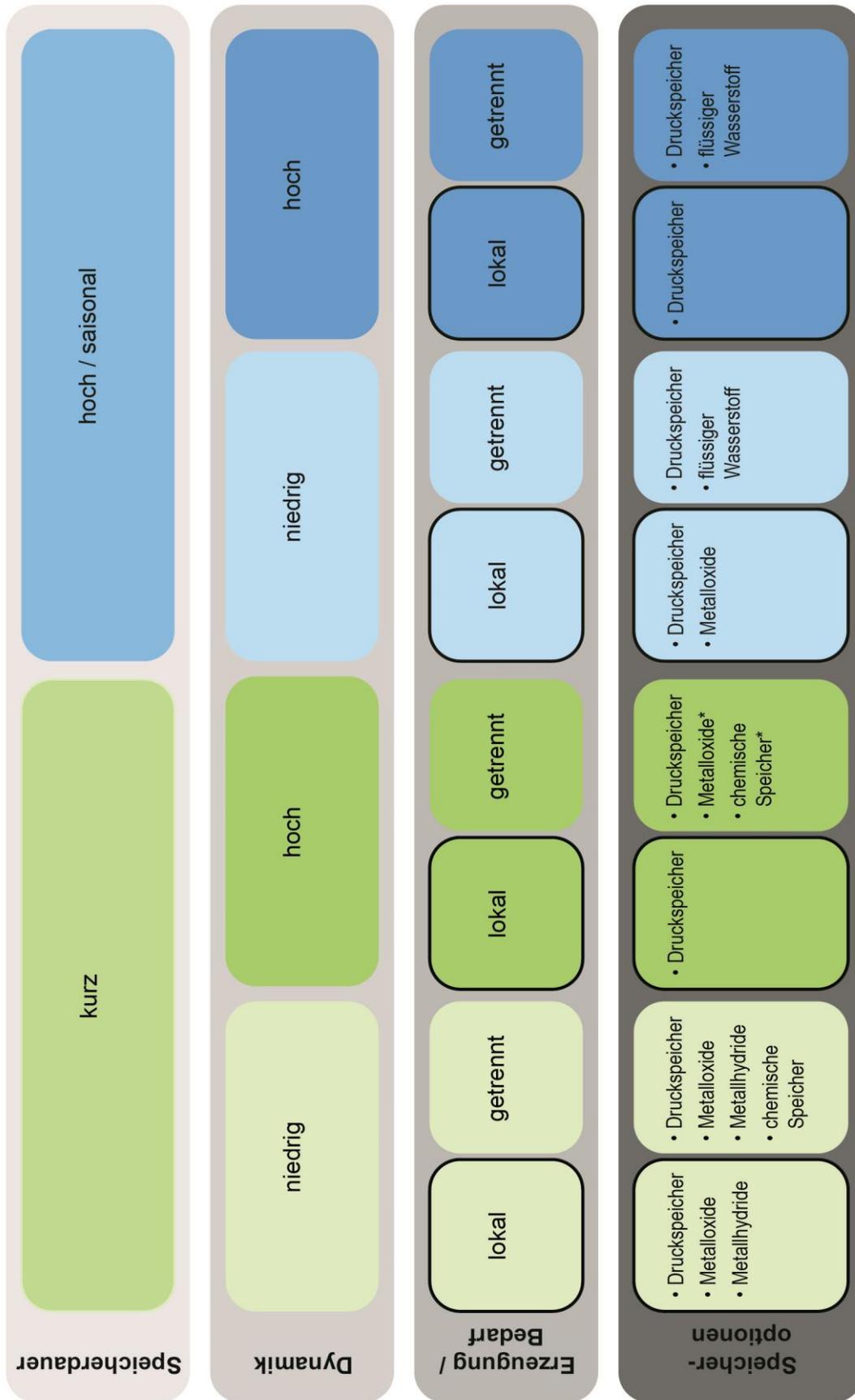
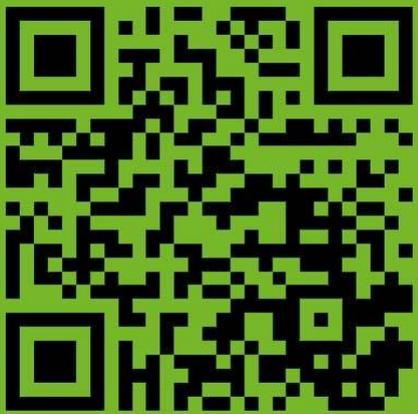


Abbildung 6: Bewertungsmatrix zur Speicherauswahl

5 Zusammenfassung / Fazit

Im Rahmen der Studie wurden Technologien zur Wasserstoffspeicherung untersucht, wobei ausgehend von Literaturdaten elf Optionen näher betrachtet und in Form von Steckbriefen beschrieben wurden. Die Daten bildeten die Basis zur Bewertung der Speichertechnologien für drei beispielhafte Anwendungsfälle, eine Tankstelle, ein Mehrfamilienhaus und ein Industriebetrieb. Die Bewertung zeigt, dass die technischen Möglichkeiten der Speicher und die Anforderungen seitens der Anwendung zwingend gemeinsam zu betrachten sind, um eine geeignete Speichertechnologie auszuwählen. Auch wenn in allen drei Anwendungsfällen Druckspeicher als geeignet erscheinen, eröffnen die konkreten Randbedingungen auch technische Möglichkeiten für weitere Optionen. Trotz der vielfältigen Einflussfaktoren ist eine erste Eingrenzung der technischen Optionen anhand von wesentlichen Anwendungsdaten möglich, wie in einer vierstufigen Entscheidungsmatrix gezeigt wird.

Scannen Sie den QR-Code,
um mehr über die DBI-Gruppe
zu erfahren!



info@dbi-gruppe.de

DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
Halsbrücker Straße 34
09599 Freiberg