

***Original manuscript***  
of the Proceedings:

Taube, K.; Bellosta von Colbe, J.; Jepsen, J.; Pistidda, C.; Klassen, T.;  
Dornheim, M.:

**Speicherung erneuerbarer Energien mittels Wasserstoff in  
Metallhydriden**

In: Konferenz für Nachhaltige Energieversorgung und Integration von  
Speichern, NEIS 2013. Hamburg (D), 12.-13.09.2013. 155-159.

ISBN: 978-3-86818-043-5

DOI: -

# Speicherung erneuerbarer Energien mittels Wasserstoff in Metallhydriden

(Dr. Klaus Taube, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Deutschland, klaus.taube@hzg.de)

K. Taube, J. Bellosta von Colbe, J. Jepsen, C. Pistidda, T. Klassen, M. Dornheim

Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Institut für Werkstofforschung, Werkstofftechnologie, Abt. Nanotechnologie  
Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht

## Kurzfassung

Die Speicherung intermittierend zur Verfügung stehender erneuerbarer Energien (Wind, Sonne) über die Wasserstoffroute stellt eine Möglichkeit dar, diese Energie im MWh Maßstab bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen. Hierzu bedarf es effizienter und kostengünstig Elektrolyseure oder auch direkter photoelektrischer oder -katalytischer Verfahren zur Wasserstoffherzeugung. Insbesondere aber muss dieser Wasserstoff vor der Rückverstromung oder stofflichen Nutzung energieeffizient und kostengünstig zwischengespeichert werden. Der vorliegende Beitrag diskutiert den Stand der Technik bei der Speicherung von Wasserstoff in Metallhydriden und zeigt Vor- und Nachteile dieser Technologie gegenüber der Druck- und Flüssigwasserstoffspeicherung auf.

## 1 Einleitung

Eine der bis heute nicht zufriedenstellend gelösten technischen Herausforderungen der Wasserstofftechnologie ist die Speicherung des Wasserstoffs und anwendungsgerechte Bereitstellung für mobile und stationäre Anwendungen. Die Speicher sollen eine möglichst hohe Kapazität bei möglichst geringem Gewicht und Volumen und eine anwendungsgerechte Beladungszeit aufweisen. Z.B. werden für Automobile 3 min für eine volle Tankfüllung von ca. 5 kg H<sub>2</sub> gefordert. Dieser Wert ist allerdings für stationäre Anwendungen von geringer Bedeutung ist, da dort der Tank i.A. so dimensioniert werden kann, dass er den erzeugten Wasserstoff entsprechend aufnehmen kann. Der Wasserstoff muss zuverlässig und bedarfsgerecht möglichst unabhängig vom Füllstand des Speichers im Außentemperaturbereich zwischen -40°C und +50°C geliefert werden. Dabei muss er eine hohe Sicherheit gegen unkontrolliertes Austreten des Wasserstoffs durch Verletzung der Tankhülle, Feuer usw. aufweisen. Der Energieaufwand für Speicherung und Entladung sollte einen möglichst geringen Anteil des als Wasserstoff gespeicherten Energieäquivalents betragen, d.h. die Speicherung möglichst energieeffizient sein. Und die Tanks sollten durch möglichst einfache, kostengünstige Produktionsverfahren und Werkstoffe herstellbar sein, um die Zielgröße von 500 €/kg gespeicherten Wasserstoff für das gesamte Tanksystem [1] zu erreichen.

Bisher erfüllt keine der heutigen Wasserstoffspeichertechnologien alle diese Forderungen gleichzeitig. Der vorliegende Beitrag diskutiert den Stand von Forschung, Technik und kommerzieller Verfügbarkeit der reversiblen Wasserstoffspeicherung in Festkörper-Metall-Wasserstoff-Verbindungen (Metallhydriden) mit Blick auf diese Ziele.

## 2 Eigenschaften der Metallhydride

I.A. werden 3 Klassen von Metallhydriden (MH) unterschieden [2]:

(i) Raumtemperatur (RT) – oder auch Tieftemperatur – Hydride: Wasserstoffabgabetemperatur unterhalb von ca. 30 – 50°C (manche MH schon bei -80°C), ca. 10 – max.

25 g H<sub>2</sub> / kg (= 1 - 2,5 Gew.%), ca. 40 – mehr als 100 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> auf Speichermaterialebene.

(ii) Mitteltemperatur – Hydride: Abgabetemperatur 50 – 200°C, ca. 35 – 60 g H<sub>2</sub> / kg, ca. 40 – 60 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

(iii) Hochtemperatur – Hydride: Abgabetemperatur >200°C, ca. 60 – >100 g H<sub>2</sub> / kg, ca. 40 – >100 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

Bei der Wasserstoff-Beladung geben Metallhydride durch die chemische Beladereaktion Wärme ab, bei der Entladung muss diese Wärme wieder zugeführt werden – vorzugsweise durch nicht genutzte Verlustwärme aus Brennstoffzellen oder anderen Quellen. Der Tank übernimmt dann einen Teil der Kühlung. Beladendruck und –zeit hängen nicht nur vom jeweiligen Metallhydrid, sondern auch stark von jeweiliger Beladetemperatur und –druck ab, da nur unterhalb der sogenannten Gleichgewichtstemperatur bzw. oberhalb des Gleichgewichtsdrucks Metallhydride Wasserstoff aufnehmen, darüber bzw. darunter ihn jedoch abgeben. Zusätzlich steigt der Gleichgewichtsdruck mit der Temperatur des Hydrids. Die Beladzeit hängt also auch stark von der Effizienz der Kühlung während der Beladung ab – eine Überhitzung führt dazu, dass der Tank Wasserstoff langsamer aufnimmt oder gar nicht mehr beladen werden kann.

Die Notwendigkeit der Wärmezufuhr zur Wasserstoffabgabe bedingt eine inhärente Sicherheit der Metallhydride gegen unkontrollierte Wasserstofffreisetzung – wird der Wasserstoff zu schnell freigesetzt, kann der Tank im Extremfall so stark abkühlen, dass die Wasserstofffreigabe zum Erliegen kommt. I.A. wird der Wasserstoff also nicht explosionsartig freigegeben.

### 2.1 Raumtemperaturhydride

RT-Hydride sind i.A. Metalllegierungen, die den Wasserstoff in Zwischengitterplätzen einlagern. Daher ist seine Bindungsenergie relativ gering. Für die Wasserstoffentladung (Desorption) müssen bei RT-Hydriden ca. 3 – 4 kWh/(kg H<sub>2</sub>) an Wärme (entsprechend ca. 10% der im gespeicherten Wasserstoff enthaltenen chemischen Energie) zur Verfügung gestellt werden, um die Bindung des Wasserstoffs im Metallgitter aufzuheben. Das dabei notwendige Temperaturniveau von RT ist kompatibel mit

z.B. Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen. Der Beladendruck liegt bei gängigen RT-Hydriden bei Umgebungstemperatur im Bereich 10 – 30 bar. Je nach Legierungszusammensetzung sind Entladedrücke von weniger als 1 bar bis hinauf zu mehreren 100 bar bei Raumtemperatur, aber auch Arbeitstemperaturen ab -30°C mit akzeptablem Entladedruck möglich. Typische Beladezeiten liegen im Bereich von 10 – 60 min. Auf Grund ihrer gegenüber Druckwasserstoffspeichern z. T. mehr als doppelt so hohen Volumen bezogenen Kapazität, allerdings verbunden mit relativ hohem Gewicht, liegt ihr Hauptanwendungsbereich in der stationären, kompakten Niederdruck-Wasserstoffspeicherung. Durch geeignete konstruktive Leichtbau-Maßnahmen sind sie aber auch für manche mobile Anwendungen geeignet, und können hier ihre Vorteile des niedrigen Beladungsdrucks (direkt mit Hochdruck-Elektrolyseuren beladbar ohne energie-, kosten- und wartungsintensive Kompressoren), der hohen volumetrischen Kapazität und der inhärenten Sicherheit gegen explosionsartige Wasserstoffabgabe im Vergleich zu Hochdruck- oder Flüssigwasserstofftanks einbringen.



**Bild 1:** 8 Metallhydrid basierte H<sub>2</sub>-Tankmodule zur Speicherung von per Photovoltaik und Elektrolyse erzeugten Wasserstoffs vor der Rückverstromung (im Hintergrund) © Abengoa Hidrógeno, Sevilla, Spanien (Partner im BOR4STORE Projekt [6])

Verschiedene Sorten von RT-Hydriden sind kommerziell, z. T. bis in den Tonnenmaßstab, verfügbar. Einzelmodul-Tanks im Größenbereich von wenigen Normlitern bis ca. 5.000 – 10.000 NI Wasserstoff (**Bild 1**) werden angeboten. Für militärische Anwendungen auf U-Booten sind jedoch bereits Speichermodule mit einem wesentlich größeren Fassungsvermögen realisiert worden. Typische Kosten der Speichermaterialien selbst liegen gegenwärtig im Bereich um die 100 €/kg, da bis auf spezielle militärische Anwendungen noch keine großindustrielle Herstellung etabliert ist (was im Übrigen für alle für die Wasserstoffspeicherung geeigneten Metallhydride gilt. S. auch Kapitel 3).

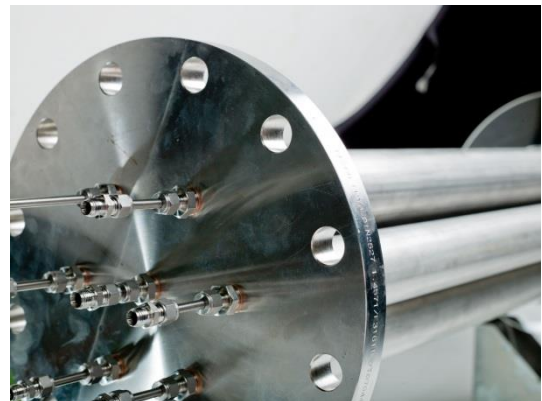
## 2.2 Komplexe Hydride: Natrium-Alanat

Im Mitteltemperaturbereich bei Temperaturen zwischen

100 und 200°C sind verschiedene sog. komplexe Hydride bekannt, die den Wasserstoff chemisch molekular binden. Natrium-Alanat (NaAlH<sub>4</sub>) ist das am weitesten entwickelte komplexe Hydrid. Bei seiner Arbeitstemperatur von ca. 120° - 160°C kann die erforderliche Desorptionswärme von ca. 4 bzw. 6 kWh/(kg H<sub>2</sub>) z.B. durch Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen aufgebracht werden.

Im Rahmen des Europäischen STORHY-Projekts wurde am HZG Europas größter Wasserstofftank für dieses Material mit insgesamt 8 kg NaAlH<sub>4</sub>-Pulver gebaut und im HZG HyTech-Labor getestet [3] (**Bild 2**). Der Tank (7 Einzelröhren von knapp 1 m Länge) hat ein Fassungsvermögen von ca. 4.500 NI Wasserstoff. Durch die auf kurze Beladungszeit optimierte Konstruktion kann er in weniger als 10 min auf 80% der Maximalkapazität beladen werden.

NaAlH<sub>4</sub> wird noch nicht kommerziell angeboten, da es gegenwärtig nur in kg Mengen auf Basis von hochreinen Rohstoffen synthetisiert wird. NaAlH<sub>4</sub> hat jedoch ein sehr hohes Potenzial für niedrige Produktionskosten, da die Weltmarktpreise für die Ausgangsstoffe Na und Al nur wenige €/kg betragen. Preise in einer industriellen Serienproduktion durch Hochenergiemahlen von unter 20 €/kg scheinen realistisch und Tanks für weniger als 500 €/kg gespeicherten Wasserstoff realisierbar.



**Bild 2:** Bild der inneren, modularen Röhrenkonstruktion des HZG-STORHY-Tanks vor Montage der äußeren, im Testbetrieb mit Öl als Wärmetauschermedium durchströmten Hülle. Links Anschlussflansch. © HZG

## 2.3 Hochtemperatur Hydride

### 2.3.1 Mg basierende Legierungen

Im Arbeitstemperaturbereich von mehr als 200°C sind Magnesium-Hydrid (MgH<sub>2</sub>) und darauf basierende Legierungen (z.B. Mg-Ni-Hydrid) kommerziell verfügbar. Ihre Entwicklung wird bereits seit Mitte der 90er Jahre verfolgt. HZG konnte hier entscheidende Beiträge zur Nanostrukturierung und Katalyse für schnelle, im Bereich von weniger als 1 Minute liegende Beladezeiten liefern [4]. Die hohe Arbeitstemperatur von mehr als 300°C von reinem MgH<sub>2</sub> (ca. 7 Gew.%) kann durch die Legierung z.B. mit Nickel auf um die 250°C erniedrigt werden, leider einhergehend mit einer Reduktion der Kapazität auf um

die 5 Gew.% und weniger. Mg-Legierungen lassen sich schon bei RT bei wenigen bar  $H_2$ -Druck beladen. Wg. der starken Wasserstoff-Mg-Bindung können jedoch erhebliche Wärmeleistungen frei werden. Beispielsweise müssten bei einer Beladezeit von 3 min und einer Menge von 5 kg Wasserstoff knapp 1 MW an Wärme abgeführt werden (Reaktionswärme ca.  $10 \text{ kWh}/(\text{kg } H_2)$ ).

$MgH_2$  basierende Tanks sind geeignet für die Integration z.B. mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC, MCFC). Tanksysteme für die stationäre  $H_2$ -Speicherung werden heute mit einer Speicherkapazität von 5 kg  $H_2$  (und mehr bei Zusammenschaltung von Modulen) auf dem Markt angeboten. Es wird auch der Ansatz verfolgt, die bei der Hydrierung des Mg entstehende Wärme zwischenspeichern und dann für die Wasserstoffabgabe wieder zu nutzen. Der dafür erforderliche Wärmespeicher senkt allerdings die effektive Kapazität des Gesamtsystems ganz erheblich. Die Integration derartiger Tanks in Wind-Energie- bzw. Photovoltaik-Anlagen wird in laufenden Projekten untersucht (z.B.  $H_2$ -Tankstelle am Flughafen Berlin-Brandenburg).

### 2.3.2 Reactive Hydride Composites (RHC)

Um eine Lösung für das Problem der hohen Reaktionswärme von  $MgH_2$  zu finden, entwickelten in 2004 unabhängig voneinander Gruppen am Helmholtz-Zentrum Geesthacht [5], an den HRL-Laboratories, USA, und am KIST, Korea, das Konzept der sogenannten Reactive Hydride Composites (RHC). Diese weisen die hohe Speicherkapazität von Magnesiumhydrid auf oder übertreffen sie sogar deutlich, während - je nach Komposit - die Reaktionsenthalpie bis auf ca. die Hälfte von  $MgH_2$  abgesenkt werden kann. Im Komposit reagieren zwei Hydride während der Wärmeaufnahme erfordernden (endothermen) Wasserstoffabgabe unter Wärmeabgabe (exotherm) miteinander. Somit wird die Gesamtreaktionswärme deutlich verringert. Das weltweit am meisten untersuchte Lithiumborhydrid-Magnesiumhydrid RHC (theoretisch 11,5 Gew.%) weist gegenüber  $MgH_2$  (ca.  $10 \text{ kWh}/(\text{kg } H_2)$ ) eine Reaktionswärme von nur noch ca.  $6 \text{ kWh}/(\text{kg } H_2)$  auf, ist vollständig wiederbeladbar und sehr gut zyklierbar.

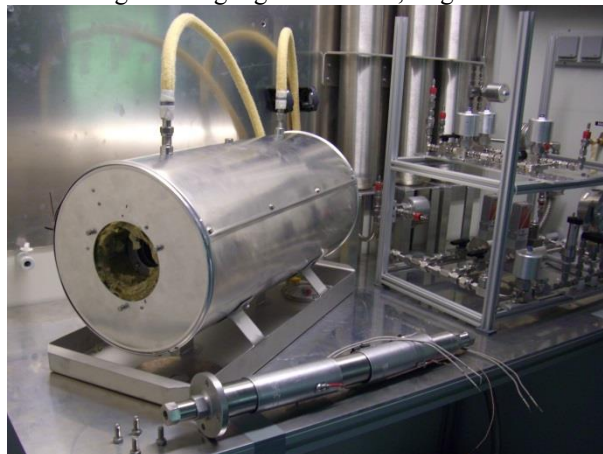
Die  $H_2$ -Abgabereaktion ist allerdings kinetisch stark behindert, so dass gegenwärtig die praktische Arbeitstemperatur dieses Materials bei ca.  $350 - 400^\circ\text{C}$  liegt. Borhydrid basierende RHC - Tanks können daher mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC, MCFC) oder anderen geeigneten Wärmequellen wie mit Wasserstoff betriebenen Verbrennungsmotoren integriert werden.

**Bild 3** zeigt einen am HZG entwickelten RHC-Tank der 1. Generation. Er enthält ca. 250 g Lithiumborhydrid-Magnesiumhydrid-Speichermaterial. Er ist mit einer elektrischer Heizung (Bild vorn) oder alternativ über einen Wärmetauschermantel (große Röhre hinter dem Tank) zu beheizen. Es konnte bereits die Stabilität der Speichereigenschaften des Tanks über mehrere Zyklen nachgewiesen werden.

Die Materialkosten liegen je nach RHC derzeit bei  $>1000 - 10.000 \text{ €/kg}$ . Wie beim  $NaAlH_4$  sind die hohen Materi-

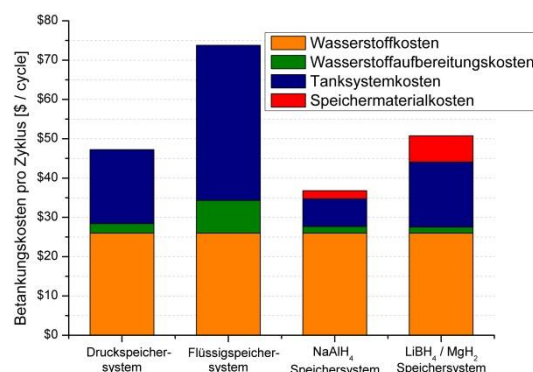
alkosten durch die bisher verwendete extreme Reinheit, d.h. aufwändige Reinigung der Rohstoffe, und Produktionsmengen allenfalls im kg Bereich bedingt. Zur Kostensenkung wird die Verwendung von Ausgangsmaterialien niedrigerer Reinheit und Recycling-Mg im EU-Projekt BOR4STORE [6] untersucht.

Bevorzugte Anwendungen dieses Speichermaterials liegen da, wo SOFC sinnvoll eingesetzt werden können. Dies sind stationäre Anwendungen wie Netz unabhängige Stromversorgungen, aber auch z.B. mobile On-Board-Zusatzenergieversorgungen für LKW, Züge oder Schiffe.



**Bild 3:** RHC-Tank der ersten Generation (vorn liegend). Hinten Öl versorgter Wärmetauschermantel. © HZG

## 3 Wirtschaftlichkeit



**Bild 4:** Kostenverteilung und Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Wasserstofftankssystem. Kapazität der Speicher  $4 \text{ kg } H_2$  (aus [7])

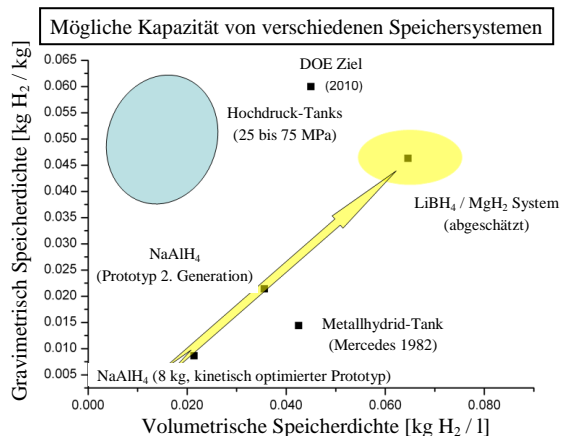
Ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Wasserstoffspeichersystemen ([7], Bild 4) zeigt, dass Metallhydride bereits heute einen wirtschaftlichen Vorteil aufweisen können. Dabei wurden die Kosten verglichen, welche bei einer Gesamtzahl von 1000 Zyklen (typisch für automobile Anwendungen) pro Betankungs-Zyklus mit  $4 \text{ kg } H_2$  anfallen: Wasserstoffkosten, dazugehörige Kompression und/oder Kühlung, Abschreibung pro Betankung für das Tanksystem - also die Kosten, welche später der Kunde effektiv je Betankung zu tragen hat.

Vorteilhaft sind vor allem die niedrigeren Wasserstoffaufbereitungs- und Tanksystemkosten des Natrium-Alanat-Speichers, bedingt durch die bezüglich Tempera-



tur und Druck wesentlich moderateren Speicherbedingungen. Hochdruck- und Flüssig-Speicher, welche bei 700 bar bzw.  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  den Wasserstoff speichern, erfordern sehr aufwändige Speichersysteme und damit hohe Investitionskosten. Zudem ist die Verflüssigung bzw. die starke Kompression mit hohem Energie- und Maschinenaufwand und damit weiteren Kosten verbunden. Dem gegenüber treten die zusätzlichen Kosten für das Speichermaterial in den Hintergrund. Bei den Kostenangaben für Metallhydridspeicher handelt es sich um erste Ergebnisse anhand von Prototypentanks. Die Daten zu Druck- und Flüssigspeichersystemen beruhen auf Herstellerangaben (Stand 2009).

## 4 Zusammenfassung und Ausblick



**Bild 5:** Auf Tank-System-Ebene erreichbare Gewicht und Volumen bezogene Speicherdichten von Metallhydriden und als Vergleich Hochdruck-Tanks.

**Bild 5** zeigt, dass mit der Metallhydrid-Speicherung von Wasserstoff höhere Volumen bezogene Speicherdichten als bei der 700 bar - Hochdruck-Speicherung (und auch Flüssig-Speicherung) bereits bei moderaten Drücken zwischen 10 und, je nach Speichermaterial, unter 50 bis max. 100 bar erreicht werden können. Der Verzicht auf aufwändige und Energie intensive Kompressionsstufen führt zu direkter Kostenersparnis durch geringeren Energieverbrauch und Wegfall von wartungsintensiven Komponenten des gesamten Speichersystems.

Durch die Integration des Tanks in den Energiehaushalt der Anwendung und Nutzung ohnehin vorhandener Abwärme zur Wasserstoffdesorption kann mit Metallhydriden eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz erreicht werden. Der Metallhydrid-Tank liefert dabei eine zusätzliche Kühlleistung z.B. für die Abwärme liefernde Brennstoffzelle (je nach Metallhydrid ca. 10 – 30% der erforderlichen Gesamtkühlleistung), und erlaubt somit die Verkleinerung des externen Kühlers. Dies kann somit beitragen, weitere Kosten zu sparen und Kühlprobleme gerade bei hohen Leistungen der Brennstoffzellen-zu mindern.

Modellrechnungen zeigen, dass Metallhydridtanks trotz hoher Kosten für die Metallhydride selbst bereits heute für Anwendungen mit hoher Wiederbeladezyklenzahlen wie z.B. in der stationären Energiespeicherung durch Ein-

sparung von Kompressoren für die Beladung und Erzielung hoher Speicherkapazität wettbewerbsfähig wären. Die Schwerpunkte der gegenwärtigen Forschungsaktivitäten im Bereich der Metallhydride liegen weltweit in den Bereichen

- **Bau, Test und Anwendungsintegration von Tanks** basierend auf den entwicklungsmäßig weitgehend abgeschlossenen RT-Hydriden, Natrium-Alanat und Magnesium-Hydrid mit dem Schwerpunkt auf stationären Anwendungen,
- der Weiterentwicklung von **Materialien mit höherer Kapazität** (RHC, aber auch Amid/Imid basierte Materialien, Borhydride and Komposite) und
- Bau von **Prototyp-Tanks** für bestimmte Anwendungen (z.B. im FCH JU SSH2S-Projekt: Untersuchung z.T. modifizierter Amide/Imide und darauf basierender Komposite; Integration mit HT-PEM-Brennstoffzelle als Prototyp für eine LKW-APU; im von HZG koordinierten BOR4STORE-Projekt [6]: Entwicklung von Borhydrid basierten Materialien; Integration mit einer Festkörperoxid-Brennstoffzelle als Prototyp für stationäre, netzunabhängige Stromversorgungen),
- **Kostenreduktion** der Speichermaterialien durch Verwendung von kostengünstigen Ausgangsstoffen (niedrigere Reinheit, Recycling-Werkstoffe, Abfallmaterialien z.B. aus der Müllverbrennung) und
- **Hochskalierung** kostengünstiger Produktionsverfahren der Speichermaterialien. Das langfristige Ziel von Tank-Investitionskosten von ca. 500 €/kg gespeicherten Wasserstoff in der Serie erfordert Materialkosten von weniger als 40€/kg bei einer Kapazität von 10 Gew.%!

Zusammenfassend sind gegenwärtig als Anwendungen mit besonders hohem Einsatzpotenzial für Metallhydride

- die **großskalige Energiespeicherung**, z.B. in netzunabhängigen Anwendungen unter Ausnutzung der hohen Speicherdichten und der mit Hochdruck-Elektrolyseuren kompatiblen Beladedrücke (keine separaten Kompressoren erforderlich!),
- Anwendungen unter **Ausnutzung der besonders hohen Volumen bezogenen Speicherdichte**, aber nachrangigem Gewicht des Speichertanks für stationäre und quasi-mobil Anwendungen (z.B. Eisenbahn, Schiff oder Lastkraftwagen), und
- weitere z.T. bereits als Prototyp realisierte Anwendungen, z.B. nur durch Wärme angetriebene **Wasserstoffkompressoren** und **Kühlaggregate**, **Speicherung von Prozesswärme** unter Ausnutzung der hohen Reaktionswärmen mancher Hydrierungsreaktionen zu nennen.

## 5 Literatur

- [1] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), 2009 Call for Proposals, SP1-JTI-FCH.2009.2.4 Improved solid state hydro-gen storage systems
- [2] Helmut Buchner, „Energiespeicherung in Metallhyd-

- riden“, Springer 1982, ISBN 3-211-81703-4
- [3] José M. Bellosta von Colbe, et al., Int. J. Hydrogen Energy, 37 (3), (2012), 2807–2811, DOI: [10.1016/j.ijhydene.2011.03.153](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.153),
- [4] DE 197 58 384.9-41, erteilt, Prioritätsdatum 23.12.1997  
EP 1169263 B1, erteilt, Prioritätsdatum 17.9.1999
- [5] EP 05 739 531, erteilt, Prioritätsdatum 30.3.2005

- [6] BOR4STORE - Fast, reliable and cost effective boron hydride based high capacity solid state hydrogen storage materials <http://www.bor4store.eu>. 1.4.2012 – 31.3.2015.
- [7] J. Jepsen, et al., Int. J. Hydrogen Energy. 37 (5) (2012) 4204 - 4214. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2011.11.141](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.141)

## 6 Anhang

**Tabelle 1:** Übersicht über die wesentlichen Materialeigenschaften verschiedener ausgewählter Metallhydriden, zum Vergleich typische Werte für Hochdruck- und Flüssigwasserstoffspeicherung:

Spezielle Eigenschaften hängen stark vom jeweiligen Metallhydrid ab.

	Gewicht bezogene Material-Kapazität [Gew.-%]	Volumen bezogene Material-Kapazität [kg H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	Arbeitstemperatur <sup>a)</sup> [°C]	Technischer Beladedruck <sup>b)</sup> [bar]	Realisierte Beladezeiten [min]	Desorptionswärme / Kompressionsenergie / Kühlenergie [kWh/kg H <sub>2</sub> ]	Bemerkungen
<b>Nieder-Temperatur-Hydride</b>							
z.B. FeTi-, Ti,Zr,Mn,V,Fe CrMnTi-, LaNi <sub>5</sub> Legierungen	1 – ~2	bis > 100	-80 – 50	20 – 30	10 – 60	3 – 4	Tanks kommerziell verfügbar vom g bis kg H <sub>2</sub> -Bereich, Tankmodule für mehrere 100 kg H <sub>2</sub> für militärische Anwendungen realisiert
<b>Mittel-Temperatur-Hydride</b>							
Natrium-Alanat NaAlH <sub>4</sub>	4,5	40	120 – 160	100	< 10	4 – 6	Kommerziell nicht verfügbar, Tanks für einige 100 g bis kg H <sub>2</sub> realisiert (HZG; UTRC, USA)
Imide/Amide based materials, e.g.	5 – 7	40 – 70	150 – 200	50	n.v.	n.v.	Kommerziell nicht verfügbar, Tank in Entwicklung (EU Projekt SSH2S <a href="http://www.ssh2s.eu">http://www.ssh2s.eu</a> )
<b>Hoch-Temperatur-Hydride</b>							
Magnesiumhydrid MgH <sub>2</sub> , Mg-Ni-alloys	7	~ 80	300	< 30	< 5	10	Tanks kommerziell verfügbar, bis ca. 5 kg H <sub>2</sub> je Modul, höhere Kapazität durch Zusammenschalten entsprechend vieler Module
Lithiumborhydrid – Magnesiumhydrid RHC	10	60 – 100	350 – 400	50	60	6	Tanks kommerziell nicht verfügbar, Tanks für einige 10 g H <sub>2</sub> realisiert (HZG), größerer Tank in Entwicklung (EU Projekt BOR4STORE <a href="http://www.bor4store.eu">http://www.bor4store.eu</a> )
<b>Hochdruck- und Flüssigwasserstoffspeicherung</b>							
700 bar Hochdruck-Tank	4	25 <sup>c)</sup>	RT	800	3	4,4 <sup>d)</sup>	Entsprechender Stand wie Brennstoffzellenfahrzeuge, Tanks kommerziell verfügbar, Wasserstoff wird vor der Beladung auf -40°C gekühlt, um Überhitzung der Tanks zu vermeiden
Flüssigwasserstofftank	~ 6	35 <sup>c)</sup>	-253°C	-	-	15,2 <sup>e)</sup>	Prototypen-Fahrzeuge, großvolumige stationäre Speichersysteme kommerziell etabliert. Tanks kommerziell verfügbar. Problem: Boil-off
Cryo-Hochdrucktanks	~6	43 <sup>c)</sup>	-253°C	300	-	15,2 <sup>e)</sup>	Prototypen-Tanks. Kein Boil-off – wird von äußerer Druckhülle aufgefangen.

<sup>a)</sup> Arbeitstemperatur hängt stark vom jeweils ausgewählten Metallhydrid ab.

<sup>b)</sup> hängt stark von der Temperatur ab. I.A. je höher die Temperatur des Hydrids, je kürzer die Beladung, aber auch je höher der Beladedruck.

<sup>c)</sup> für Tanksystem

<sup>d)</sup> Energie, die notwendig ist, den Wasserstoff auf über 800 bar Beladedruck zu komprimieren

<sup>e)</sup> Energie, die notwendig ist, den Wasserstoff auf -253°C abzukühlen