

# Die HyCS-Technologie

## Energiespeicherung auf Basis von Eisenmassen und Wasserstoff

**Matthias Rudloff und Thorsten Lutsch**

Speicher, Wasserstoff, Energiewende, Erneuerbare Energie, Transport, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Damit die Energiewende gelingen kann, müssen die volatil gewonnenen Energiemengen aus Windkraft und Photovoltaik (PV) durch Speicherung für Zeiten geringer Energieproduktion bis hin zur „Dunkelflaute“ verfügbar gemacht werden.

Die Umwandlung der elektrischen Energie in Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und dessen Speicherung sind dazu eine relevante Option. Dabei muss insbesondere die H<sub>2</sub>-Speicherung effizient, kompakt und kostengünstig werden. Im Folgenden wird die innovative HyCS-Technologie zur Energiespeicherung auf Basis von Eisenmassen und H<sub>2</sub> beschrieben und marktverfügbaren Technologien der H<sub>2</sub>-Speicherung gegenübergestellt. Des Weiteren werden zwei Anwendungsfälle erläutert.

## The HyCS technology – Energy storage based on iron masses and hydrogen

For the energy transition to succeed, the volatile amounts of energy generated from wind and solar power must be made available for periods of low energy production up to “dark lows” by storage systems.

The conversion of power into hydrogen (H<sub>2</sub>) and its storage are a relevant option. H<sub>2</sub> storage must become efficient, compact and cost-effective. The following describes the innovative HyCS technology for energy storage based on iron and H<sub>2</sub> and compares it to existing H<sub>2</sub> storage technologies. In addition, two use cases are described.

### 1. Die HyCS-Technologie

Das HyCS® Speicherverfahren der AMBARtec GmbH besteht im Kern aus einem Eisenmassespeicher und somit aus einem gut verfügbaren, kostengünstigen und nachhaltigen Material, welcher durch zyklische Reduktion und Oxidation des Eisens (Fe) das Potenzial zur Freisetzung arbeitsfähigen Wasserstoffes bietet, der dann direkt genutzt oder in Brennstoffzelle, Verbrennungsmotor oder Gasturbine wieder in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

Bei der Speicherbeladung (**Bild 1**) wird H<sub>2</sub> mit leichtem Überdruck (< 0,5 bar) in den Speicher gebracht. Restwassergehalte oder Gasverunreinigungen aus der Elektrolyse sind hierbei unschädlich, so dass Aufbereitungsstufen bei der H<sub>2</sub>-Erzeugung eingespart werden können. Im Speicher nimmt der Wasserstoff bei der endothermen Reduktion des FeOx Sauerstoff auf und wird als Wasser-

dampf wieder freigesetzt. Dieser kann kondensiert und das Wasser der Elektrolyse zur erneuten H<sub>2</sub>-Produktion zur Verfügung gestellt werden. Das führt zu einer deutlichen Senkung der Betriebskosten. In trockenen Regionen, die wegen der geringen Kosten für PV-Strom für die H<sub>2</sub>-Herstellung prädestiniert sind, vermindert das eines der Hauptprobleme beim Aufbau einer internationalen H<sub>2</sub>-Wirtschaft: die Wasserbereitstellung. Wird der freigesetzte Dampf einer Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse (SOEC) direkt wieder zugeführt, erhöht sich der Wirkungsgrad der SOEC um 10-15 %-Punkte.

Der gefüllte Speicher enthält somit kein H<sub>2</sub> (was Vorteile bei Genehmigung- und Zertifizierung hat, da keine großen H<sub>2</sub>-Mengen gelagert werden), sondern das Potenzial zur Bereitstellung von H<sub>2</sub>.

Die Entladung erfolgt durch Zuführung von Wasserdampf. Das reaktive Fe im Speicher bindet den Sauer-

stoff des Wassers, ein H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Gemisch mit über 90 Vol.-% H<sub>2</sub> verlässt den Speicherbehälter. Dieses wird gekühlt und die Wärme wird zur Bereitstellung des Dampfes genutzt.

Je nach angestrebter Nutzungsart kann der Wasserstoff mit einem Druck von bis zu 100 bar zur Verfügung gestellt werden. Erst für höhere Drücke, z. B. für Tankstellen, wird ein H<sub>2</sub>-Verdichter benötigt. Für die Nutzung in alkalischen- oder PEM-Brennstoffzellen ist eine marktverfügbare Wasserabscheidung erforderlich, bei Nutzung zur Stromerzeugung in Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren ist der Wasseranteil aufgrund der daraus resultierenden erhöhten spezifischen Wärmekapazität des heißen Arbeitsmediums vorteilhaft.

### 1.2 Vergleich mit marktverfügbaren H<sub>2</sub>-Speichertechnologien

Um im Wettbewerb mit nicht H<sub>2</sub>-basierten Speichersystemen wie batterieelektrischen Lösungen bestehen zu können, müssen H<sub>2</sub>-Speicher effizient, kompakt und nachhaltig sein.

**Bild 2** zeigt, welche Energiemenge in 1 kg und in 1 l Speicher zwischengelagert werden kann. Es wird deutlich, dass alle H<sub>2</sub>-basierten Systeme erheblich kompakter sind als die LiOH-Batterien.

Für die Speicherung von H<sub>2</sub> kommen folgende Möglichkeiten prinzipiell in Frage:

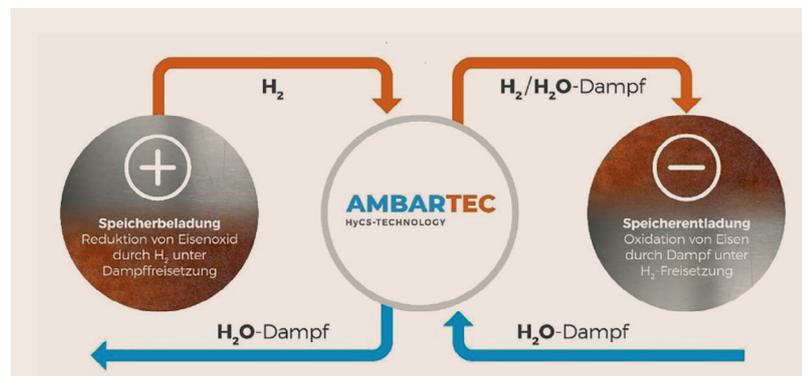
- Druckgasspeicher: 100 bar in langen Röhren, 200 bar in Gasflaschen, 350 bis 700 bar in Fahrzeugtanks, Kavernen z. B. in Salzstöcken für große Mengen. Bei Druckgasspeichern handelt es sich um bewährte Technologie mit großem Platzbedarf
- Flüssig-H<sub>2</sub> bei -253 °C: kompakt, teuer, energieintensiv, hohe Verluste
- Metallhydride: weder besonderer Druck noch Temperatur erforderlich (Umgebungsbedingungen), im Forschungsstadium, sehr langsame Entladung. Hier: basierend auf der technologisch erprobten und zyklens stabilen Legierung TiVMn
- Speicherung in einem Öl (LOHC, z. B. Fa. Hydrogenious): Umgebungsbedingungen, leicht handhabbar, moderater Wirkungsgrad, umweltgefährdende Stoffe, hoher Energiebedarf bei Entladung
- Speicherung mittels Eisenmassen mit der HyCS-Technologie (z. B. Fa. AMBARtec): sehr kompakt, hoher Wirkungsgrad, in Entwicklung.

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme sind in **Tabelle 1** qualitativ dargestellt. Eine hohe volumetrische Speicherdichte bietet insbesondere Vorteile, wo Platz relevant ist, z. B. beim Transport mit Fahrzeugen (LKW, Schiff) oder bei Tanksystemen in Fahrzeugen.

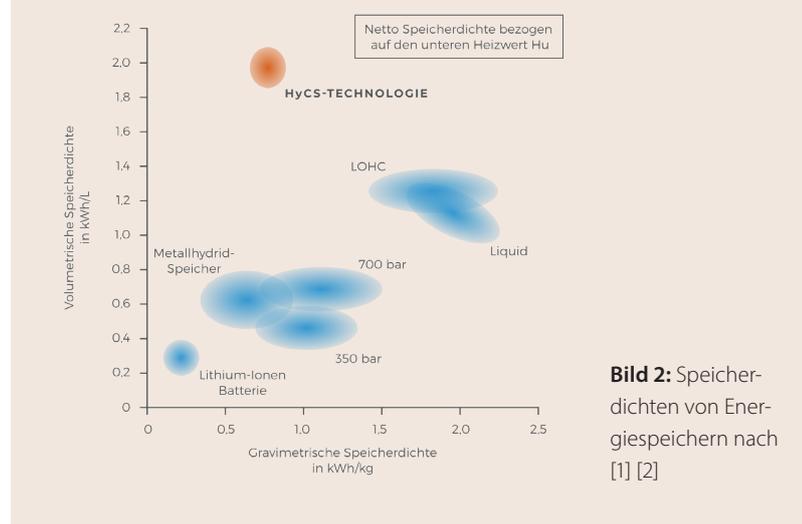
Nachteil der H<sub>2</sub>-Systeme ist, dass der Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad geringer ist als bei batterieelektrischen Energiespeicherlösungen. Während bei LiOH 85-95 % der eingespeicherten Energie wieder als elektrische Energie genutzt werden kann, sind es bei den heute marktverfügbaren H<sub>2</sub>-Systemen lediglich 30-35 % (**Bild 3**).

Durch eine clevere thermische Integration in die vor- und nachgelagerten Systeme SOEC und SOFC kann mit dem HyCS-Speicher ein Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad von bis zu 66 % erzielt werden (**Bild 4**). Die Nutzung als Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Anlage auf einem Temperaturniveau über 90 °C ist ebenso möglich und erhöht den Nutzungsgrad nochmals deutlich.

Im Vergleich mit anderen H<sub>2</sub>-Speichersystemen verspricht die HyCS-Speichertechnologie einerseits einen um den Faktor 2 bis 5 geringeren Bauraum, andererseits eine Verdopplung des Strom-zu-Strom-Wirkungsgrades in der Kette „erneuerbare Stromerzeugung–H<sub>2</sub>-Erzeugung–H<sub>2</sub>-Speicherung–Rückverstromung“. Außerdem lassen sich die Kosten der elektrolytischen H<sub>2</sub>-Erzeugung um bis zu 30 % senken, wobei bei der Speicherbeladung das für die Elektrolyse benötigte, enthärtete Wasser zurückgegeben wird, was besonders für die H<sub>2</sub>-Erzeugung



**Bild 1:** Verfahrensbild

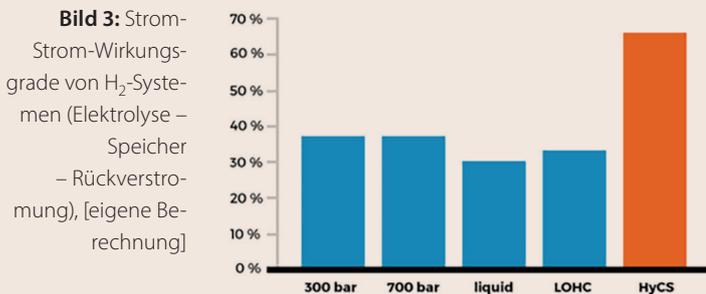


**Bild 2:** Speicherdichten von Energiespeichern nach [1] [2]

Tabelle 1: Kriterien zur Bewertung von Wasserstoffspeichern (qualitativ)

	Druck			Flüssig	Metallhydrid	LOHC	HyCS*
	100 bar	200 bar	Kaverne				
	(Erd)Röhren	Flaschenbündel					
Energiebedarf Be-/Entladung	gering	mittel	mittel	gering	mittel	mittel	mittel
Verluste	gering	gering	mittel	gering	gering	gering	sehr gering
Platzbedarf	sehr hoch	gering	sehr hoch	gering	gering	gering	sehr gering
Gewicht (incl. Peripherie)	mittel	mittel	-	gering	gering	gering	gering
Transportmenge jeLKW	-	gering	-	mittel	mittel	mittel	mittel
Umweltgefährdung	gering	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	gering
Wirkungsgrad Strom-Strom	mittel	mittel	mittel	gering	mittel	gering	sehr hoch
Investitionskosten	gering	mittel	hoch	gering	gering	mittel	mittel
Reifegrad	hoch	hoch	mittel	hoch	gering	mittel	gering

\* Nutzung mit SOEC und SOFC



in sonnenreichen, aber trockenen Regionen enorme Vorteile bietet.

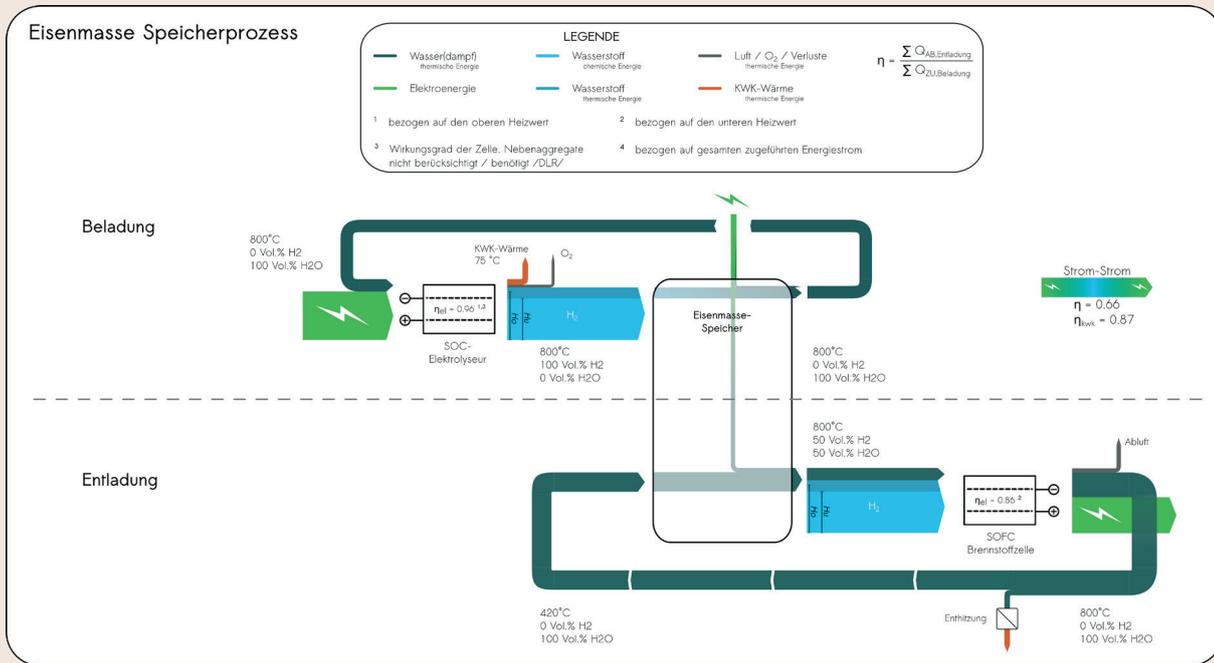
Damit kann das Verfahren einen signifikanten Beitrag zur kostengünstigen und effizienten dezentralen Speicherung von erneuerbarer Energie zur Überbrückung von „Dunkelflauten“ und damit zur Stabilisierung des Energiesystems sowie zur Sektorenkopplung leisten und zusätzlich den interkontinentalen H<sub>2</sub>-Transport insbesondere aus sonnenreichen, trockenen Regionen voranbringen.

## 2. Anwendungsfälle

**Anwendungsfall 1: Internationale H<sub>2</sub>-Transporte**  
Ausgehend von der hohen Speicherdichte bietet sich die Nutzung der HyCS-Technologie für den effizienten Trans-

port von H<sub>2</sub> an. Um eine komplett auf erneuerbaren Energien basierende Energiewirtschaft in Deutschland zu realisieren, wird nach Expertenmeinung mindestens 50 % des benötigten grünen H<sub>2</sub> importiert werden müssen. Bis zu einer Entfernung von 3.000-4.000 km ist dazu die Pipeline das bevorzugte Transportmittel. Für H<sub>2</sub> aus den Regionen mit günstiger Erneuerbarer Energie im Nahen Osten, im südlichen Afrika (Namibia) oder in Südamerika (Chile, Argentinien) kommt für den Transport das Schiff in Frage. Diskutiert wird hier bisher neben Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>) Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Kohlenwasserstoffe (CnHm). Während NH<sub>3</sub> und CnHm für bestimmte Anwendungen direkt genutzt werden können (Düngemittel, Dieselmotoren, Flugbenzin) müssen die für reine H<sub>2</sub>-Anwendungen unter Wirkungsgradverlust umgewandelt werden. LH<sub>2</sub> benötigt für die Kühlung auf unter -253°C (Verflüssigung) bis zu 65 % der im H<sub>2</sub> enthaltenen Energie. Außerdem liegen die Boil-off-Verluste bei ca. 0,5 %/Tag entsprechend 10 % bei einer Reisezeit von 20 Tagen.

Für das weltweit erste LH<sub>2</sub>-Transportschiff, die Suiso Frontier, wird eine Transportkapazität von 80 t H<sub>2</sub> angegeben. Um diese Menge zu transportieren, werden 134 HyCS 20' Container benötigt. Ein World Scale Containerschiff kann über 20.000 20' Container transportieren. Diese Schiffe incl. der gesamten Containerlogistik können unmittelbar genutzt werden, um den H<sub>2</sub>-Import sukzessive ohne große Infrastrukturinvestitionen hochzufahren.



**Bild 4:** Sankey Diagramm: Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad mit HyCS-Speicher

### Anwendungsfall 2: Erhöhung des Eigenversorgungsanteils von kommunalen Liegenschaften mit PV-Strom mit Hilfe der HyCS-Speichertechnologie

Photovoltaik (PV)-Anlagen amortisieren sich auf kommunalen Gebäuden wie Rathäusern oder Kindergärten oft bereits nach wenigen Jahren, da der Stromverbrauch vor allem in Zeiten erfolgt, wo die Solarstromproduktion hoch ist und so ein hoher Eigenverbrauchsanteil realisiert werden kann.

Andere kommunale Gebäude wie Betriebshöfe oder Freibäder verfügen oft über große Flächen, die aber aufgrund des geringen Eigenverbrauchs nicht wirtschaftlich für PV-Strom genutzt werden können. Hier bietet sich die Speicherung und/oder Veredlung der Energie an, um sie

- a) in Zeiten zu nutzen, wo die Sonne nicht scheint und/oder
- b) für andere Anwendungen/Sektoren wie die Wärmeerzeugung oder die Mobilität nutzbar zu machen.

Für die Kurzzeitspeicherung über wenige Stunden bieten sich batterieelektrische Speicher z. B. auf Lithium-Ionen (LiOH) Basis an. Ihre Grenzen erreichen diese Systeme, wenn größere Energiemengen für längere Zeit gespeichert werden sollen. Sie werden dann sehr groß, sind spezifisch sehr teuer und benötigen große Mengen der wenig nachhaltigen Rohstoffe Lithium und Cobalt.

Deutlich kompakter ist dabei die Speicherung von Energie mittels Wasserstoff. Dabei wird in einer Elektrolyse aus dem Strom H<sub>2</sub> produziert, dieses wird dann gespeichert und bei Bedarf wieder in Strom umgewandelt („Rückverstromung“). Für letzteres kommen Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren in Frage.

Je nach Anwendungsfall kann also eine Energiespeicherung mittels H<sub>2</sub> sinnvoll sein. Dies gilt insbesondere, da die Speicherung nicht unbedingt am gleichen Ort wie die Stromerzeugung stattfinden muss. Seit Anfang 2021 ist es möglich, grünen Strom unter bestimmten Bedingungen kostenlos durchs öffentliche Netz zu leiten, wenn damit eine Elektrolyse zur Herstellung grünen Wasserstoffs betrieben wird. Damit kann dann faktisch die Solarenergie vom Dach des Betriebshofes beispielsweise in ein Krankenhaus oder ein Wohnquartier transportiert werden. Dort wird sie in H<sub>2</sub> umgewandelt und bei Bedarf zur Senkung der Strom- und Wärmekosten genutzt. Auch eine H<sub>2</sub>-Tankstelle könnte dort betrieben werden.

Der wirtschaftliche Nutzen ist am höchsten, wenn der teure Strombezug aus dem Netz reduziert werden kann. Deshalb ist ein möglichst hoher Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad anzustreben. Die HyCS-Technologie mit einem elektr. Wirkungsgrad von über 65 % und ihrer Fähigkeit zur Integration als KWK-Anlage eröffnet hier ganz neue Horizonte.



Bild 5: HyCS-Versuchsanlage

### 3. Zusammenfassung und Entwicklungsstand

Das Prinzip, mit Hilfe von Eisenmassen reaktive energiereiche Gase bereitzustellen, wurde bereits in den 1970iger Jahren z. B. in Magdeburg großtechnisch angewandt. Die Dresdener Firma AMBARtec GMBH hat nun das Prinzip für konkrete dezentrale Anwendungen weiterentwickelt und nutzbar gemacht. Seit Anfang 2022 wird die Technologie in einer Versuchsanlage (Bild 5) demonstriert, die Lieferung erster kommerzieller Einheiten ist ab 2023 geplant. Lösungen für großtechnische Anwendung, z. B. zur Bereitstellung von Synthesegas können individuell entwickelt werden.

#### Literatur

- [1] *Wasserscheid, P. et al.*: Neue Option für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffzügen durch Nutzung der LOHC-Technologie? - Abschlussbericht zum kleinen Forschungsprojekt (Zuwendungsbescheid Nr. 07 05 / 89375 / 130 / 2017 vom 2.3.2017), ISBN 978-3-95806-386-0
- [2] *Povel, R. et al.*: Flottenerprobung H<sub>2</sub>-Fahrzeuge in Berlin, In K. Ledjeff (Hrsg.): Neue Wasserstofftechnologien – Konkrete Nutzung unter Wasser, auf der Erde, im Weltall, ISBN 3-7880-7327-6, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1989

#### Autoren



**Matthias Rudloff**  
 AMBARtec GmbH |  
 Dresden |  
 Tel.: 49 172 511 7009 |  
 post@amartec.de |  
 www.ambartec.de



**Dr. Thorsten Lutsch**  
 AMBARtec GmbH |  
 Dresden |  
 post@amartec.de |  
 www.ambartec.de

