

31. Energie-Symposium

GRÜNE ENERGIE FÜR DIE MOBILITÄT: SPEICHERFORMEN UND ANFORDERUNGEN AN INFRASTRUKTUR UND KRITISCHE ROHSTOFFE

Peter Drews-Walking

¹ Technische Hochschule Lübeck, Wissenschaftszentrum Elektromobilität, Leistungselektronik und dezentrale Energieversorgung (EMLE), Lübeck

ABSTRACT

Bei der Diskussion um die Nutzung erneuerbarer Energien für die Mobilität wird oft die Effizienz, also der Gesamtwirkungsgrad well-to-wheel, in den Vordergrund gestellt oder sogar zum einzigen Kriterium erhoben.

Dabei haben der Ausbau der erforderlichen Infrastruktur bzw. die Nutzung vorhandener Infrastruktur und der Bedarf und die Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und das Tempo der Umsetzung.

Letztlich spielen auch die erzielbaren Reichweiten und erforderlichen Tank- bzw. Ladezeiten eine wichtige Rolle für den praktischen Einsatz.

Für den Einsatz in Schwellenländern ist überdies die technologische Komplexität der Herstellung, Verteilung und Verwendung entscheidend.

Dieser Artikel soll sowohl die Verfahren zur Nutzung regenerativ erzeugter elektrischer Energie über Batterien, Wasserstoff und seiner Derivate als auch die Verfahren zur Nutzung biologisch erzeugter Kraftstoffe im Hinblick auf die genannten Kriterien beleuchten.

31. Energie-Symposium

1. ENERGIEDICHTE DER FÜR DIE MOBILITÄT NUTZBAREN SPEICHER

Tabelle 1 zeigt die Energiedichte der für die Mobilität geeigneten Energiespeicher [1].

Tabelle 1: Energiedichte mobiler Speicher

	volumetrisch kWh/l	gravimetrisch kWh/kg	Tank Ge-wicht kg	Tank Inhalt	Inklusive Tank kWh/kg	Wir-kungs-grad well-to-wheel
Wasserstoff, Metallhydrid	5,3	2				
Wasserstoff, LOHC	2,0 (1,0)	2,0	2 x 4	40 l		16 - 20
Wasserstoff, flüssig	2,4	33,3	140	120 l / 8 kg	1,9	25 - 35
Wasserstoff, 700 bar	1,3	33,3	100	120 l / 4 kg	1,3	25 - 35
Wasserstoff, 350 bar	0,8	33,3				25 - 35
Wasserstoff, 200 bar	0,6	33,3	58	0,74 kg	0,42	25 - 35
Ammoniak	3,2	5,4				
Erdgas, 200 bar	2	18,8	58		1,67	12 - 20
Erdgas, flüssig	5,8	18,8				12 - 20
Methanol	4,3	5,4	4	40 l		12 - 20
Diesel	10	11	4	40 l		12 - 20
Benzin	8,5	11	4	40 l		12 - 20
Lithium-Cobaltdioxid-Akku	0,45	0,11 – 0,16				70 - 80
Lithium-Polymer-Akku		0,1 – 0,15				70 - 80
Lithium-Eisen-Phosphat-Akku		0,08 – 0,14				70 - 80
Lithium-Titanat-Akku		0,09				70 - 80
Natrium-Ionen-Akku		0,15				70 - 80

Die in Tabelle 1 in den linken Spalten dargestellten Werte sind zunächst nur die Werte des jeweiligen Mediums, ohne Tank, mit Ausnahme der Werte für die Akkumulatoren. Bei LOHC kommt ein zweiter Tank für den entladenen LOHC hinzu, so dass sich die volumetrische Energiedichte halbiert.

Die beiden rechten Spalten zeigen typische Gewichte für Tanks, bei Wasserstoff bei 700 bar für etwa 500 km Reichweite entsprechend 120 l, und die daraus resultierende gravimetrische Energiedichte.

Die klassischen Energieträger Diesel und Benzin setzen mit ihrer gravimetrischen Energiedichte von 11 kWh/kg und volumetrisch 10 bzw. 8,5 kWh/l einen schwer zu übertreffenden Maßstab. Sie müssen allerdings synthetisch hergestellt werden – PtL = Power to Liquid – um klimaneutral, also CO2-neutral zu sein und somit kein zusätzliches CO2 in die Atmosphäre auszustoßen. Von der eingesetzten regenerativ aus Wind, Sonne und Wasserkraft erzeugten elektrischen Primärenergie bleibt dann

31. Energie-Symposium

allerdings nur ein Well-to-Wheel-Wirkungsgrad von 12 bis 20% übrig. Synthetisch erzeugtes Benzin und Diesel erfordert keine Investitionen in die Infrastruktur, die vorhandene kann weiter genutzt werden.

Biomethan als CO₂-neutraler Ersatz für Erdgas und Methanol haben dabei den Vorteil, dass sie auch biologisch hergestellt werden können. Diese Verfahren benötigen geringere Investitionen und sind technologisch einfacher, so dass sie auch in Schwellenländern mit weniger intensiver Flächennutzung eingesetzt werden könnten. In unseren dicht besiedelten Ländern können sie durch die Verwertung biologischer Abfälle wie Gülle und Tierkot Probleme unserer intensiven Landwirtschaft lösen.

Für Methanol kann die vorhandene Benzin-/Diesel-Infrastruktur genutzt werden, für Biomethan gibt es bereits eine 200 bar-Infrastruktur von etwa 1000 Tankstellen für PKW in Deutschland, für flüssiges Biomethan – LNG bzw. LBM – etwa 160 Tankstellen für den Schwerlastverkehr (Stand 2/2023) und 5000 zugelassene LKW in Deutschland (Stand 4/2022) mit Reichweiten bis 1600 km.

Methanol und Biomethan können in leicht modifizierten Ottomotoren eingesetzt werden, ein Übergang zu Brennstoffzellen ist aber möglich und würde den Wirkungsgrad verdoppeln, also in den Bereich des Wasserstoffs bringen von 25 bis 35%.

Wasserstoff ist CO₂-frei, hat einen Wirkungsgrad von 25 bis 35% und bereits eine Infrastruktur von etwa 100 H₂-Tankstellen für PKW mit 700 bar. Die etwa 100 kg schweren Druckgastanks lassen allerdings die Energiedichte auf 1,3 kWh/kg und 1,3 kWh/l sinken, etwa ein Achtel von Diesel. Die verfügbaren PKW, in Deutschland zur Zeit der Hyundai Nexo und der Toyota Mirai, haben Tankinhalte von etwa 5 kg und bei einem typischen Verbrauch von 1kg H₂ pro 100 km Reichweiten von etwa 500 km. Busse und LKW sind verfügbar, für den Fernverkehr noch in der Anfangsphase. Das Tankstellennetz für die zur Zeit favorisierte Variante von 350 bar besteht bislang in Deutschland aus etwa 10 Tankstellen.

Batterien haben den höchsten Wirkungsgrad von 70 bis 80%, tragen aber mit ihrer niedrigen Energiedichte von 0,45 kWh/l und bis zu 0,16 kWh/kg erheblich zum Fahrzeuggewicht bei. Immerhin lassen sie sich bei PKW platzsparend im Unterboden unterbringen. Die Entwicklung schreitet rasch voran, Kapazitäten von 40 bis 60 kWh sind heute üblich und auch 100 kWh keine Seltenheit. Das reicht unter idealen Bedingungen von etwa 20 Grad und vorsichtiger Fahrweise bei etwa 100 km/h für Reichweiten von 300 bis 600 km. LKWs für den Zubringerbereich bis 200 km Reichweite sind bereits im Einsatz, ebenso Linienbusse für den Stadtverkehr. Für den LKW-Fernverkehr werden erste Fahrzeuge mit 500 km Reichweite angeboten. Ob die langen Ladezeiten von über 2 Stunden bei 150 kW Ladeleistung und der noch schwache Ausbau von Schnellladesäulen für LKW mit 150 kW und mehr ihren Einsatz praktikabel machen, muss sich noch zeigen.

2. HEIZ- UND KLIMABEDARF - AUSWIRKUNG AUF DEN WIRKUNGSGRAD

Bei dem Vergleich des gesamten, Well-to-Wheel-Wirkungsgrads, wird in der Regel die bei allen Fahrzeugen mit Personenbeförderung benötigte Energie für Heizen und Klimatisierung des Innenraums außer Acht gelassen. Für den reinen Antrieb der Fahrzeuge ist der Abstand im Wirkungsgrad zwischen batterieelektrischem und Brennstoffzellenantrieb und erst recht Verbrennungsmotoren beeindruckend und favorisiert eindeutig den batterieelektrischen Antrieb.

Bei Batteriefahrzeugen muss aber die Energie für Heizen und Klimatisierung vollständig der Traktionsbatterie entnommen werden, während Brennstoffzellen- und Verbrennerfahrzeuge genügend Abwärme erzeugen. Bei Batteriefahrzeugen schrumpft dadurch und durch die bei Kälte schlechtere Leistung der Akkumulatoren die Reichweite beträchtlich. Messungen des ADAC [2] nach dem Green NCAP-Zyklus für Kurzstrecke – 23 km in 30 Minuten bei 23 und -7 Grad – ergaben einen Mehrverbrauch von 40 bis 100%, also bis zu einer Verringerung der Reichweite auf die Hälfte. Nach seinem eigenen

31. Energie-Symposium

Zyklus bei 0 und 20 Grad und gemittelt über Geschwindigkeiten von 30, 50, 80 und 120 km/h ermittelte der ADAC immerhin auch noch ein Mehrverbrauch von 20 bis 30%.

Im Extremfall, also 100% Mehrverbrauch, ergibt sich damit für das Batteriefahrzeug ein Gesamtwirkungsgrad von 35 bis 40%, der Abstand insbesondere zur Brennstoffzelle schrumpft damit deutlich.

3. INFRASTRUKTUR – VORHANDENE NUTZEN ODER NEUE BAUEN?

Bei normalen Temperaturen und Umgebungsdruck flüssige Kraftstoffe und Trägerstoffe wie LOHC können mit minimalem Aufwand die vorhandene Infrastruktur nutzen, also Pipelines, Tankwagen auf der Straße und Schiene, Tankschiffe und Tankstellen. Mit den flüssigen Kraftstoffen lassen sich Fahrzeuge direkt betanken, bei LOHC ist dies nur für Schiffe, Schienenfahrzeuge und LKW denkbar wegen der zwei Tanks für beladenen und entladenen LOHC und des für die Extraktion des Wasserstoffs nötigen Reaktors. Für PKWs ist die Belieferung der H2-Tankstellen möglich.

Wasserstoff benötigt außer der eben genannten LOHC-Variante Pipelines für Transport bei geringen Drücken, und Druckgas- oder Flüssiggas-Tankwagen oder Tankschiffe. Wasserstofftankstellen sind wegen der Kompression und Vorkühlung des Wasserstoffs sehr teuer, für PKW-Tankstellen werden etwa 1 Mio. Euro angesetzt.

Die Ladeinfrastruktur erfordert einen erheblichen Ausbau des Stromnetzes. Für das Laden zuhause in der Garage oder im Carport, dem komfortabelsten Szenario für Elektroautofahrer, lässt sich die Anforderung durch smartes Laden zu Zeiten mit großem Stromangebot im Netz etwas senken. Schnellladestationen, insbesondere Autobahntankstellen, die in Zukunft einen ähnlichen Durchsatz wie heute bei der Betankung von Fahrzeugen haben sollen, brauchen eine etwa fünfzehnfache Anzahl von Ladepunkten gegenüber Zapfsäulen wegen der fünffach längeren Ladezeit verglichen mit Betankung.

Für Betankungs- und Ladezeiten können folgende Werte angenommen werden [3]:

PKW: Flüssiger Kraftstoff 3 min., Wasserstoff 5 min., Strom 21 min.

LKW: Flüssiger Kraftstoff 4 min., Wasserstoff 30 min., Strom 171 min.

Die Leistung der Zapf- und Ladesäulen ist dabei mit

16 l/min PKW, 110 l/min LKW, 60 g/s PKW, 120 g/s LKW, 350 kW PKW und LKW angenommen.

Um eine heutige Tankstelle mit 8 Dieselzapfpunkten zu ersetzen, wären 11 H2-Zapfpunkte erforderlich oder 30 Hochleistungsladesäulen.

Die erforderliche Leistung ist dabei 32 kW für Diesel, 1,4 MW für Wasserstoff und 10,5 MW für Strom. Der Jahresverbrauch eines solchen Ladeparks bei 24h-Verfügbarkeit und einer Auslastung von 55% beträgt 51 GWh und entspricht damit dem Verbrauch von 13.000 Einfamilienhäusern.

4. OFFSHORE H2-GENERATOR – BEISPIELPROJEKT ZUR SENKUNG VON INFRASTRUKTURKOSTEN

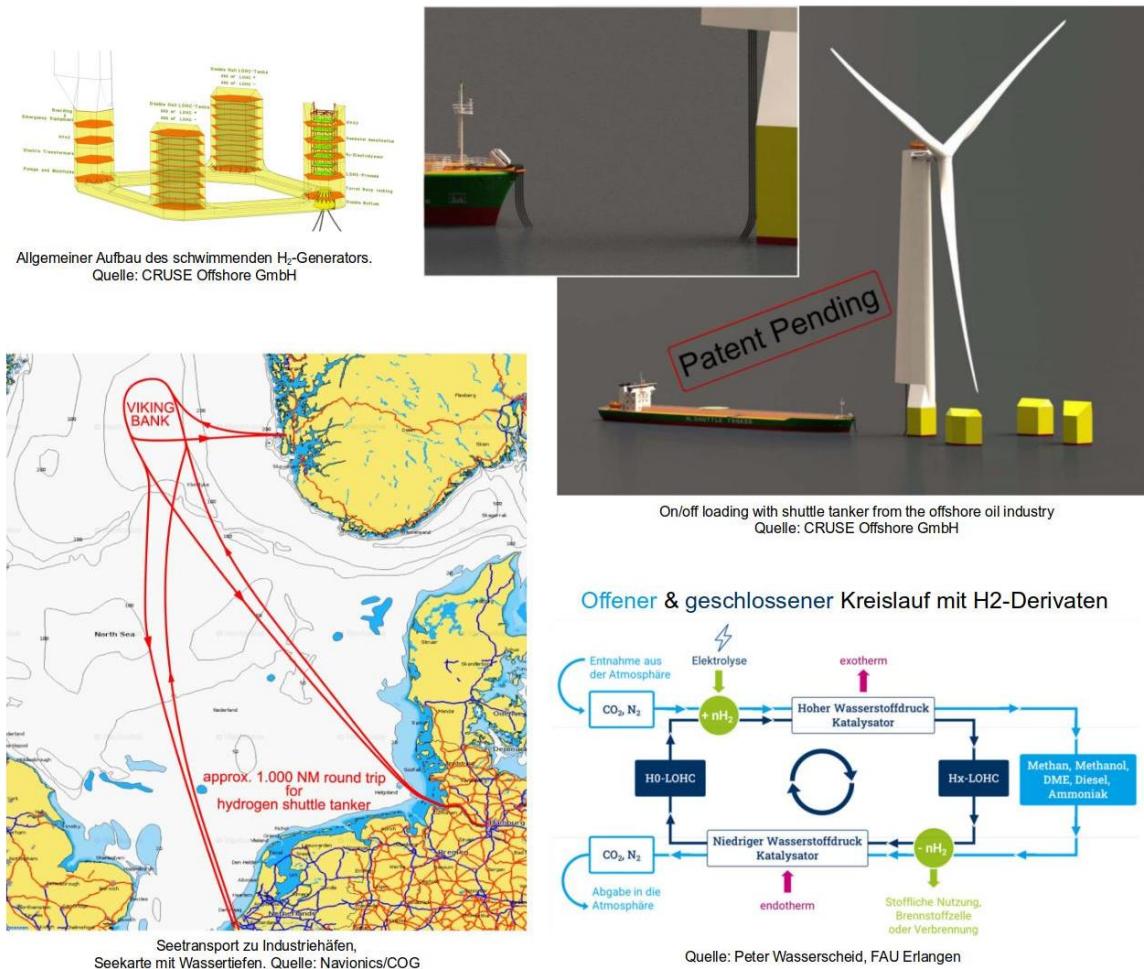
Wasserstoff wird im defossilisierten Energiesystem der Zukunft eine herausragende Rolle spielen. In manchen Bereichen ist die Defossilisierung gar nicht anders möglich, z.B. in der Stahl-, Glas- und Zementproduktion. Für die saisonale Speicherung der fluktuierenden Wind- und Sonnenenergie reicht die Kapazität der herkömmlichen Großspeicher wie Pumpspeicherseen und Druckluftspeicher bei weitem nicht aus. Da bei Wasserstoff mit der Elektrolyse nur ein Umwandlungsschritt vom Strom erforderlich ist, stellt er mit ausgespülten Salzkavernen, wie sie schon heute für Erdgas verwendet

31. Energie-Symposium

werden, den bei weitem kostengünstigsten Großspeicher dar.

Die Senkung der Erzeugungs- und Transportkosten von Wasserstoff spielt also eine wichtige Rolle. Ein interessantes Projekt, das im September 2023 startete und im Januar 2024 bei einer Veranstaltung der Erneuerbaren Energien Hamburg (EEHH) sowie im Juni 2024 an der Technischen Hochschule Lübeck vorgestellt wurde, ist der Offshore H2-Generator. Er verbindet mehrere Ideen zur Kostensenkung.

Abbildung 1: Offshore H2-Generator



Der Offshore-H2-Generator [4] wird im BMWK-Verbundvorhaben ProHyGen als Prototyp von schwimmenden autonomen Windkraft-Wasserstoff-Produktionsinseln für Offshore-Gebiete außerhalb der potenziellen Standorte für herkömmliche Offshore-Windparks entwickelt. Der Wasserstoff wird an LOHC gebunden und kann daher mit herkömmlichen Öl-Tankern abgeholt und über die Öl-Infrastruktur weiterverteilt werden, es ist keine Pipeline oder Stromnetzanbindung erforderlich.

Neben der Cruse Offshore GmbH und anderen Firmen sind die TU Hamburg und die FAU Erlangen-Nürnberg beteiligt.

Allein die Entkopplung vom Strom- und Gasnetz reduziert die Erzeugungskosten um 50%. Da die Windenergieernte mit der dritten Potenz von der Windgeschwindigkeit abhängt, bringt z.B. eine Erhöhung von 8 m/s auf 10 m/s eine Verdopplung der erzeugten Energie. Als schwimmende

31. Energie-Symposium

Windenergieinsel kann der Offshore-H2-Generator in Gebieten operieren, die für fundamentgebundene Windenergieanlagen nicht mehr möglich sind und dort wegen der höheren Windgeschwindigkeit und der stabiler wehenden Winde leicht die doppelte Energiemenge ernten, was zu einer weiteren Kostensenkung um bis zu 50% führt.

Die Nutzung von LOHC als Transportmedium ermöglicht die Weiternutzung der bestehenden Ölinfrastruktur in der postfossilen Ära. Die beim Aufladen des LOHC mit Wasserstoff entstehende Wärme wird für die Meerwasserentsalzung genutzt bevor das Wasser in den Elektrolyseur geht. Die zum Entladen des Wasserstoffs beim Verbraucher benötigte Wärme verbraucht etwa 30% des im LOHC gebundenen Wasserstoffs, bei Industrieprozessen kann jedoch auch die dabei oft anfallende Abwärme genutzt werden.

5. KRITISCHE RESSOURCEN

In den klassischen Automobilen mit Verbrennungsmotor wurden praktisch keine kritischen Ressourcen verbaut. Eisen als Stahl oder in anderer Form lässt sich praktisch vollständig recyceln, ebenso das in den Akkus verbaute Blei. Das in den modernen Automobilen mit den Katalysatoren hinzukommene Platin und die für die Elektronik verwendeten Materialien wie Palladium werden ebenfalls recycled.

Das in den Akkus der Elektroautos verwendete Lithium hingegen ist eine kritische Ressource. Es sind nur endliche Vorkommen bekannt, und je nach Hochlauf der Elektromobilität und Recyclinggrad kann in wenigen Jahrzehnten eine Verknappung eintreten. Zudem wird Lithium in einigen Ländern wie z.B. Chile unter hohem Wassereinsatz gerade in Gegenden gewonnen, in denen Wasserknappheit herrscht, so dass dortigen Bewohnern die Lebensgrundlage entzogen wird.

Das in den leistungsfähigsten Lithium-Akkus verwendete Cobalt wird überwiegend unter menschenverachtenden Bedingungen in Afrika gewonnen.

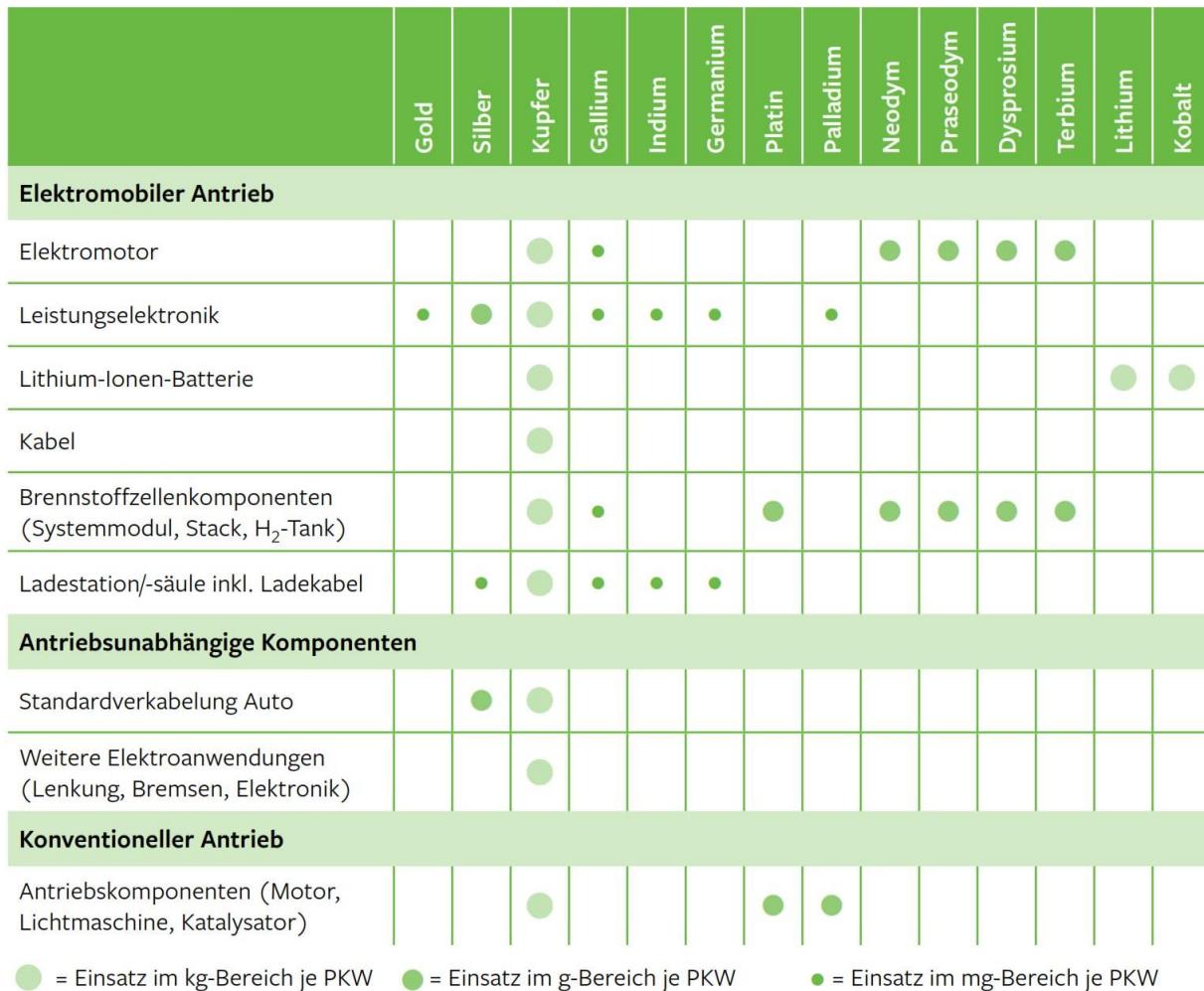
Andere Lithium-Akkus wie Lithium-Eisen-Phosphat-Akkus kommen ohne Cobalt aus.

Natrium-Ionen-Akkus kommen gänzlich ohne kritische Rohstoffe aus. Sie sind weniger leistungsfähig, aber auch weniger empfindlich, z.B. gegen Tiefentladung. Natrium kommt im Meersalz (Natriumchlorid) in praktisch unerschöpflicher Menge vor, so dass sich Recyclen nicht lohnt. Erste PKWs mit Natrium-Ionen-Akkus werden bereits in Serie hergestellt. [5]

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die in einem PKW verwendeten Ressourcen und ihre Größenordnung, Kilogramm, Gramm, Milligramm. [6]

31. Energie-Symposium

Abbildung 2: Ressourcen-Einsatz im Automobil



Quelle: BUCHERT et al. 2011a; ergänzt durch TREFFER 2011, überarbeitet

6. WELCHE SPEICHERFORM FÜR WELCHE ANWENDUNG?

Batterien, Li-Ionen oder Na-Ionen

- PKW: großes Angebot an verfügbaren Modellen
komfortabel für Pendler mit eigenem Carport / eigener Garage
öffentliches Ladenetz noch dünn, speziell das Schnelladenetz
Ladezeiten (mindestens 20 min.) betragen ein Mehrfaches verglichen mit Tankzeiten
- Transporter und LKW bis 500 km Reichweite verfügbar, Ladezeiten länger als bei PKW
- Busse: zunehmend im Einsatz im Stadtverkehr
- Bahn: ideal für teilelektrifizierte Strecken, Stromabnehmer für Oberleitungsabschnitte

H2 350 bar

- für LKW, Busse und Bahn, bereits im Einsatz, einige Tankstellen vorhanden

H2 700 bar

- PKW-Tankstellennetz vorhanden, etwa 100 in Deutschland weitere in Westeuropa, Südkorea
- 2 Modelle lieferbar, Toyota Mirai und Hyundai Nexo, Honda F-Cell im europäischen

31. Energie-Symposium

Ausland

- gut geeignet für Langstrecken-PKW, ideal als Plug-In-Hybrid,
wie der nur in Kleinserie gebaute Mercedes GLC F-Cell

H₂ flüssig

- für LKW möglich
- für Luftfahrt bis Mittelstrecke favorisiert

LOHC

- Infrastruktur - bleibt wie bei Benzin, Diesel etc.
- > einfache Belieferung der industriellen Anwendungen, Abwärmenutzung möglich
- PKW: Belieferung von H₂-Tankstellen, keine direkte Verwendung
- LKW: ähnlich, mobile Anwendung machbar, aber schwierig
- Bahn: mobile Anwendung möglich, bei Lokomotiven z.B. als externer Tender-Tankwagen
bei Triebzügen: Gewicht und Platzbedarf mit bestehenden Druckgas-Lösungen vergleichbar

Ammoniak

- Antrieb im Frachtschiffverkehr, schon heute als Zusatzkraftstoff zum Schweröl oder Diesel
Etablierte Prozesse, als Fracht seit Jahrzehnten auf den Weltmeeren unterwegs

Methanol - synthetisch oder Biomethanol

- Infrastruktur - bleibt wie bei Benzin, Diesel etc.
- Nutzung in Verbrennungsmotoren schon heute möglich, weicher Übergang zu
Brennstoffzellen

Bioethanol

- in Brasilien seit Ende der 70er Jahre ein Erfolg
Biokraftstoffe deutlich preiswerter als synthetische!

Methan - synthetisch oder Biomethan

- Druckgas 200 bar
- gut 700 Tankstellen
- PKW: Modelle vorhanden, in Deutschland keine Neuwagen mehr
- Nutzung in PKW realisiert, bi-fuel, Übergang zu Brennstoffzellen möglich
- flüssig, LNG oder LBM
- Tankstellennetz für LKW vorhanden, 160 Tankstellen für 5000 zugelassene LKW

Synthetische Kraftstoffe - Benzin, Diesel, Kerosin

- Infrastruktur und Fahrzeuge vorhanden -> CAPEX-Kosten nur für die Herstellungsanlagen
- derzeit einzige Lösung für Langstreckenflüge
- hoher Primärenergiebedarf -> hohe OPEX-Kosten

7. LITERATURVERZEICHNIS

[1] Quellen zu Tabelle 1:

J. Lehmann, T. Luschtinetz, Wasserstoff und Brennstoffzellen, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 2014

N. Muralidharan et al., Next-Generation Cobalt-Free Cathodes - A Prospective Solution to the Battery Industry's Cobalt Problem, Januar 2022

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen), Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor. Berlin 2017

31. Energie-Symposium

- [2] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-reichweite-winter/> - abgerufen am 15.10.2024
- [3] C. Gränitz, Boxenstopp: Strom oder Wasserstoff? Ein Technologievergleich der Energieübertragungssysteme, Vortrag beim H2-Forum Technologie der Erneuerbaren Energien Hamburg (EEHH) am 22.6.2022
- [4] J. Cruse, M. Abdel-Maksoud, P. Wasserscheid, H2-Lieferkette – nicht komplexer als Öl, Hansa International Maritime Journal, 03/2024
J. Cruse, M. Abdel-Maksoud, P. Wasserscheid, R. Banek, D. Wösten, M.S.D. Yoo, T. Böhm, Offshore H2-Generator, Vorstellung bei Erneuerbaren Energien Hamburg (EEHH) am 16.1.2024
- [5] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/feststoffbatterie/> - abgerufen am 15.10.2024
- [6] Rohstoffbedarf für Systemkomponenten von konventionellen, batterieelektrischen oder Anrieben mit Brennstoffzellen 2010 – Tabelle: SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) 2017: Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor. Berlin, S. 88
Übersichtsartikel mit Quellenangaben:
M. Randelhoff, Batterieelektrisch vs. Brennstoffzelle (H2) vs. Power-to-X im Straßenverkehr: Energieeffizienz, Wirkung auf das Energiesystem, Infrastruktur, Kosten und Ressourcen
<https://www.zukunft-mobilitaet.net/169895/analyse/elektroauto-brennstoffzelle-synthetische-kraftstoffe-ptx-ptl-kosten-infrastruktur-rohstoffe-energiebedarf-wirkungsgrad/> - abgerufen am 15.10.2024

31. Energie-Symposium

Impressum

Veröffentlicht 2024 im Tagungsband zum 31. Energie-Symposium
Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik
Hochschule Stralsund 13. bis 15.11.2024
Herausgeber Prof. Dr. rer. nat. Johannes Gulden – johannes.gulden@hochschule-stralsund.de
DOI 10.18453/rosdok_id00004683
Zweitveröffentlichung 2025 mit freundlicher Genehmigung des Herausgebers
unter der Open Access Lizenz CC BY-SA

Kontakt

Technische Hochschule Lübeck
Wissenschaftszentrum Elektromobilität, Leistungselektronik & dezentrale Energieversorgung – EMLE
Mönkhofer Weg 239 | 23652 Lübeck (Germany)
E-Mail: peter.drews@th-luebeck.de