



Wasserstoff in der Mobilität

Mit steigendem Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien wächst der Bedarf an Speichertechnologien. Parallel steigt die Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen im Verkehrssektor. Über Sektorenkopplung werden beide Entwicklungen vereint und leisten einen Beitrag zur Erreichung der klimapolitischen Ziele des Pariser Übereinkommens. Dabei spielt Wasserstoff eine wichtige Schlüsselrolle. Obwohl seine Speicherung und sein Transport aufwändig sind, ist Wasserstoff ein vielseitig einsetzbares Medium, das die Sektorenkopplung nachhaltig gestalten kann.

- **Dennis Heusser**
Projektmanager Mobilität bei DKE
Tel. +49 69 6308-466
dennis.heusser@vde.com
- **Andrea Appel**
Projektmanagerin Neue Technologien und Services bei VDE
Tel. +49 6308-293
andrea.appel@vde.com
- **Next Generation DKE & VDE Young Net**
Dr. Annette Frederiksen; Carl Giest
Than Ngochi; Batuhan Ayaz
- **Dr. David Urmann**
Projektmanager Health bei DKE
- **Dr. Wolfgang Klebsch**
Senior Project Manager Neue Technologien und Services bei VDE
- **Johannes Koch**
Leiter Nat. Normungspolitik & Kooperationen bei VDE DKE
- **Dr. Ralf Petri**
Geschäftsbereichsleiter Mobility bei VDE
- **Ninmar Lahdo, Artur Schmidt**
Projektmanager Mobility bei DKE
- **Hannah Pontzen**
Werkstudentin Mobility bei DKE

Wasserstoff – ein besonderes Atom

Wasserstoff ist nicht nur das erste Element des Universums, es ist mit einem Massenanteil von etwa 75% auch dessen häufigstes Element, besitzt die geringste Dichte und der gravimetrische Heizwert ist dreimal so hoch wie der von Diesel. Unter Normalbedingungen ist Wasserstoff ein farb- und geruchloses Gas. Es kommt meist nicht einzeln, sondern als feste Bindung in Form eines Wasserstoffmoleküls (H₂) vor. In chemisch gebundener Form mit Sauerstoff ist es in nahezu allen organischen Verbindungen enthalten. Trotz großen Volumens sind vor allem die hohe gravimetrische Energiedichte im Vergleich zu Erdöl, die Nutzung von erneuerbaren Energien und die vielen Anwendungsmöglichkeiten u.a. im Verkehrssektor entscheidende Faktoren für Wasserstoff als vielseitigen Energieträger.

Durch den Einsatz chemischer oder elektrischer Energie wird die molekulare Wasserstoffverbindung gelöst. Wasserstoff kann in großen Mengen entweder gasförmig in Druckbehältern oder in flüssigem Aggregatzustand gespeichert werden. Außerdem wird es für die Herstellung von CO₂ neutralen e-Fuels genutzt. Die Verflüssigung von Wasserstoff findet allerdings erst bei -252° statt. Im gasförmigen Zustand, auf 700 Bar komprimiert für Brennstoffzellen-PKW und auf 350 Bar für Nutzfahrzeuge, wird Wasserstoff auf der Straße zu den Tankstellen befördert. Langfristig wird auf Pipelines gesetzt. Eine entsprechende Tankstelleninfrastruktur wird gerade errichtet. Während fossile Energieträger an ihre geografischen Vorkommen gebunden sind,

kann die Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien theoretisch auch überall dort erfolgen, wo dieser benötigt wird.

Derzeit wird Wasserstoff vorwiegend mittels Reformierung aus fossilen Energieträgern gewonnen. Die kostengünstige Herstellungsmethode erzeugt allerdings auch klimaschädliche Treibhausgase. Lediglich ein geringer Anteil wird mittels Elektrolyse hergestellt, d.h. durch den Einsatz von elektrischem Strom. Die Herstellung mittels Elektrolyse ist zwar teurer, jedoch auch deutlich umweltfreundlicher – wenn der Strom aus erneuerbaren Energiequellen kommt. Zudem bietet sie den großen Vorteil, dass Fluktuationen erneuerbarer Energien wie etwa Solar- und Windkraft ausgeglichen und die Netzstabilität unterstützt werden. Besteht bspw. durch temporär hohe Windkrafteinpeisung ein Stromüberschuss (Stromnachfrage niedriger als Stromangebot), kann durch Zuschalten der Elektrolyse dieser Strom zur Wasserstoffproduktion genutzt werden. Der so gewonnene Energieträger kann je nach Bedarf für die spätere Nutzung gespeichert werden.

In Zukunft ist davon auszugehen, dass mit größer werdenden Produktionskapazitäten die Herstellungskosten sinken und dieser Teil der Wasserstoffproduktion deutlich wachsen wird. Sowohl Speicherung als auch Transport sind zwar aufwendig, gegenüber Strom lässt sich Wasserstoff jedoch über einen längeren Zeitraum und in größeren Mengen wesentlich besser transportieren und speichern. Unterschieden wird zwischen der stofflichen Nutzung von Wasserstoff in der Industrie und der Nutzung als Energieträger. Wie bei vielen Speichermedien, kann auch bei Wasserstoff die Energie entweder über einen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle umgewandelt werden.

Derzeit wird vor allem der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellensystemen erprobt. Diese werden in Transportmitteln, für die portable Stromversorgung von Elektrogeräten sowie in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Kleinkraftwerken als saubere und nachhaltige Energieoptionen genutzt. Besonders für die Erreichung einer CO₂-neutralen Mobilität von morgen kann Wasserstoff als Energiespeicher daher – bei der Sektorkopplung – eine bedeutende Rolle spielen.

Die Brennstoffzellentechnologie

Die Idee der Brennstoffzelle entstand bereits im 19. Jahrhundert in Form der „Galvanischen Gasbatterie“. Ihr Funktionsprinzip wird auch in der modernen Brennstoffzelle genutzt. Durch die chemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff (oder anderen Brennstof-

fen) in der Brennstoffzelle entsteht elektrischer Strom und Wärme. Diese Reaktionswärme kann zum Heizen genutzt werden. Nach Aufteilung des Wasserstoffs in zwei Protonen und zwei Elektronen gelangen die Protonen durch den Elektrolyten auf die Sauerstoffseite, wo ein Elektronenmangel herrscht. Dabei machen sie einen Umweg über einen Stromkreis. Aus Protonen, Elektronen und Sauerstoff entsteht Wasser. Es gibt verschiedene Technologien, die sich vor allem in ihren verwendeten Anoden-, Kathoden-, Membran- sowie Katalysator- und Elektrolyt-Materialien unterscheiden. Als Teil eines Fahrzeugantriebs wandelt die Brennstoffzelle den mitgeführten Wasserstoff in Antriebsstrom für den Elektromotor um. Es handelt sich hier um eine kontrollierte Reaktion des Wasserstoffs mit Luftsauerstoff, bei der Wasserdampf entsteht. Ein großer Vorteil dieser Art der Energiegewinnung ist, dass keine Abgase und Lärm entstehen oder bewegliche Teile benötigt werden. Als Antrieb für Transportmittel bietet die Brennstoffzellentechnologie gegenüber herkömmlich und batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen einige Vorteile hinsichtlich der systemischen Gesamtbilanz an CO₂-Emissionen, Reichweite und Ladezeit. Durch die längere Energiewandlungskette im Vergleich zu batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen wird jedoch auch mehr Primärenergie benötigt, da höhere Umwandlungsverluste auftreten.

Grüne Mobilität mit Wasserstoff

Wird Wasserstoff für den Antrieb von Brennstoffzellen aus erneuerbaren Energien wie Wasser, Wind oder Sonne gewonnen („grüner Wasserstoff“), handelt es sich bei der Brennstoffzellentechnologie um ein klimafreundliches Antriebskonzept. Es eignet sich insbesondere für die Anwendung in Verkehrsträgern, die in absehbarer Zeit schwer elektrifizierbar sind, wie bspw. Fern-, Schwerlast- oder Schiffsverkehr. Zu der Frage, wie Brennstoffzellen mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien versorgt werden können, existieren bereits erste Konzepte. So betreibt das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) seit März 2012 eine Wasserstoff-Tankstelle, die über Solaranlagen mit Energie für die Wasserstoffherstellung vor Ort versorgt wird. Zunächst wird Wasserstoff erzeugt, aufbereitet und verdichtet, bevor er komprimiert und in einem Hochdrucktank gelagert wird.

Nationale und internationale Aktivitäten

Um die ersten Produkte bei der Markteinführung zu unterstützen, fördert die Bundesregierung seit den

1980er Jahren die Brennstoffzellentechnologie und hat 2016 verschiedene Initiativen mit dem Ziel der Marktvorbereitung im Regierungsprogramm „Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP) gebündelt. Mit der Fortsetzung des NIP-Programms II soll die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie bis zur Mitte des nächsten Jahrzehnts wettbewerbsfähig im Verkehrssektor und im Energiemarkt etabliert sein. Diesen Weg hat die Bundesregierung fortgesetzt und im Juni 2020 die nationale „Wasserstoffstrategie“ verkündet. Bis zum Jahr 2040 sollen in Deutschland Elektrolyseanlagen mit einer Gesamtleistung von 10 Gigawatt aufgebaut werden. Für den Aufbau einer nationalen Wasserstoffwirtschaft stehen Fördervolumina von insgesamt neun Milliarden Euro zur Verfügung. Die Europäische Kommission sieht in ihrer „Hydrogen Strategy“ das Ziel von 40 Gigawatt Elektrolyseure bis zum Jahr 2030 vor.

Es sind es vor allem asiatische Länder, die auf die Wasserstoff- und die Brennstoffzellentechnologie setzen. Japan entwickelte als erstes Land eine „Basic Hydrogen Strategy“. In China fahren bereits heute 5.000 Brennstoffzellenfahrzeuge und auch Südkorea will zu einem der wichtigsten Anbieter der Wasserstoffwirtschaft aufsteigen.

Status quo in Deutschland

Das Potential von Wasserstoff hat auch die deutsche Politik erkannt und notwendige Rahmenbedingungen gesetzt, um gemeinsam mit der Industrie die Marktaktivierung konsequent anzugehen. In Deutschland wird Wasserstoff bereits in vielen Anwendungen erprobt, um die Mobilität nachhaltiger und umweltfreundlicher zu gestalten. Meist handelt es sich um Pilotprojekte mit geringer Stückzahl, da die Produktion teuer und die Technologie noch nicht vollständig ausgereift und erst noch in die Serienproduktion überführt werden muss.

Seit Jahrzehnten experimentiert die Automobilindustrie mit der Brennstoffzellentechnologie. Das erste umgebaute Wasserstoffauto gab es bereits im Jahr 1978. Bis heute allerdings wurden nur einige wenige wasserstoffbetriebene Modelle zur privaten Nutzung angeboten. Dabei kann die Brennstoffzelle in Kombination mit dem Wasserstoffspeicher im PKW-Bereich Reichweiten von über 500 Kilometern ermöglichen, die vergleichbar mit Fahrzeugen mit einem eingebauten Verbrennungsmotor sind. Weitere Vorteile sind der gewohnte Tankprozess und die Rückgewinnung von Bremsenergie. Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen die Pufferbatterie vor allem, um die Lastspitze beim

Beschleunigen abzufangen und das Anfahren und Beschleunigen zu unterstützen. Aufgrund hoher Herstellungskosten und der Verwendung von Edelmetallen wie Platin sind die Modelle im oberen Preissegment zu finden und damit teurer als herkömmliche Fahrzeuge. Da Fahrzeuge und Tankstellen möglichst zeitgleich eingeführt werden müssen, spricht man auch vom „Henne-Ei-Problem“, das hinderlich ist für eine schnelle Marktdurchdringung. Weltweit zählt Deutschland zu den Ländern mit den meisten Wasserstoff-Tankstellen, aktuell sind 90 eröffnet (Stand: Januar 2021).

Auch im Güter- und Personenverkehr gibt es erste Pilotprojekte mit brennstoffzellenbetriebenen Flurförderfahrzeugen (Gabelstapler, Schlepper usw.). Auch eine Umrüstung batterieelektrischer Fahrzeuge ist möglich. Beide Varianten stehen in Deutschland noch vor der Markteinführung und werden primär in Pilot- und Förderprojekten zur Marktaktivierung eingesetzt. Aktuell sind rund dreihundert Fahrzeuge im Einsatz. Bei der „Clean Energy Partnership“ werden Omnibusse mit Wasserstoffverbrennungsmotor sowie Brennstoffzellenhybridbusse im Öffentlichen Nahverkehr eingesetzt. Zwar bieten sie gegenüber Elektrobussen eine deutlich höhere Reichweite, kosten jedoch auch etwa doppelt so viel wie vergleichbare Dieselbusse.

Im Vergleich zu Bussen und PKW ist der Einsatz von Brennstoffzellen in LKW weniger umfangreich erforscht. Die Technologie eignet sich für den Einsatz in LKW, denn durch die große Reichweite und das geringe Volumen von Brennstoffzellen können mit Diesel und Benzin betriebene LKWs gut ersetzt werden. Um die klimapolitischen Vorgaben der EU für LKW zu erfüllen, müssen die CO₂-Emissionen durchschnittlich um 15 Prozent bis 2025, bis 2030 um 30 Prozent gesenkt werden. Daher arbeiten deutsche Unternehmen an der Produktion von serienmäßigen E-LKW, die mit Brennstoffzellen betrieben werden. Hierzu zählt bspw. das Joint-Venture zwischen Daimler und Volvo mit dem Ziel, im Jahr 2039 keine LKWs mehr mit Dieselantrieb auszuliefern. Toyota und Hyundai sowie Start-Ups wie bspw. Nikola drängen auf den Markt.

Im Bahnbereich ist das Unternehmen Alstom weltweit der erste Hersteller, der mit Brennstoffzellen betriebene Züge produziert und seit 2018 auch den ersten Prototypen in Niedersachsen im Realbetrieb getestet hat. Eine Reichweite von 800 bis 1000 Kilometer ist laut Hersteller mit einer Tankfüllung möglich. Auch der Rhein-Main Verkehrsverbund setzt auf grünen Bahnverkehr und hat 27 Brennstoffzellenzüge bestellt, die ab Ende 2022 eingesetzt werden sollen. Die beiden

deutschen Konzerne Siemens Mobility und Siemens Energy planen ein ganzheitliches Wasserstoffsystem für die Schiene zu entwickeln und so die Dekarbonisierung der Energiesysteme weiter voranzutreiben. Dabei soll ein eigens von Siemens Mobility zu entwickelndes Elektrolyse- und Betankungslösung zur Schnellbetankung von Wasserstoffzügen eingesetzt werden. Eingesetzt wird die Brennstoffzelle auch bei der Deutschen Bahn (DB) als Netzersatzanlage.

Um die Schifffahrt in Zukunft klimafreundlich(er) zu gestalten, fördert die Bundesregierung Projekte mit Brennstoffzellen in Schiffen, wie bspw. das Schubschiff ELEKTRA. Deutsche Werften, Reedereien, Brennstoffzellenhersteller, Zulieferer usw. haben das Konsortium „e4ships“ gegründet. Auch die Unternehmen der Luftfahrtbranche wollen künftig Wasserstoff als Alternative für den Flugzeugantrieb testen. Der Flugzeugbauer Airbus und der Zulieferer ElringKlinger kooperieren in der Entwicklung von Brennstoffzellen für die Luftfahrt. Ziel von Airbus ist es, im Jahr 2035 ein brennstoffzellenbetriebenes Flugzeug auf den Markt zu bringen. Auch der Triebwerksbauer MTU Aero Engines plant mit der Technologie die Emissionen weiter zu reduzieren.

VDE für die Wasserstoffwirtschaft

Die DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE) befasst sich im Gremium [DKE/K 384](#) „Brennstoffzellen“ (seit 1999) mit verschiedenen Anwendungen der Brennstoffzelle. Als nationales Spiegelgremium zu IEC/TC 105 ist es mit der Ausarbeitung von Normen für Brennstoffzellentechnologien für ein breites Anwendungsgebiet zuständig, z. B.: stationäre Brennstoffzellen, Brennstoffzellen für den Transport (Brennstoffzellenantriebe und periphere Energieerzeugungssysteme) und tragbare Brennstoffenergieerzeugungssysteme. Zu dem oben genannten Gremium zählen aus dem Mobilitätsbereich bspw. Flurförderfahrzeuge, Gabelstapler, Baumaschinen, Bagger und Drohnen. Ausgenommen sind Anwendungen in Straßenfahrzeugen.

Auf internationaler Ebene befasst sich das Gremium in IEC 62282 mit verschiedenen Anwendungen der Brennstoffzelle und damit verbundenen Sicherheits- und Leistungsanforderungen. Dadurch konnten im Bereich der Brennstoffzellentechnologie bereits mehrere Projekte etabliert und Sicherheitsnormen wie DIN EN IEC 62282-2-100 oder DIN EN 62282-4-101 erarbeitet werden, die eine verlässliche und sichere Anwendung der Brennstoffzellentechnologie umsetzen.

Hierzu zählt auch der Bereich der häuslichen Wärme- und Stromversorgung im Rahmen der KWK.

Auf nationaler Ebene gibt es einen interdisziplinären Gemeinschaftsausschuss von [VDE ETG](#) und [VDI GEU](#) für die Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen. Neben der Veröffentlichung relevanter Studien findet in den Gremien ein wertvoller interdisziplinärer Austausch zwischen den Experten statt. Die Normungs- und Standardisierungsaktivitäten mit speziellem Bezug zum Straßenverkehr laufen auf internationaler Ebene im Gremium ISO/TC 22 „Road Vehicles“. Diese Normen werden aktuell überarbeitet. Im Bereich der Schienenfahrzeuge wird die Brennstoffzelle auf internationaler Ebene u.a. im IEC/TC 105 „Fuel Cell Technologies“ und IEC/TC 9 „Electrical Equipment and Systems for Railway“ behandelt. Auch sind die Sicherheits-Normen DIN EN ISO 19884 und ISO 19880-1 zu erwähnen, die sich mit den Anforderungen für Auslegung und Herstellung von Flaschen und Druckbehältern für Wasserstoff sowie Handhabung, Einbau, Inspektion und Wartung von Zapfsäulen im gasförmigen Zustand von Wasserstoff befassen. Hier knüpft die Norm DIN EN 17127 an, die Anforderungen und Spezifikationen von Wasserstofftankstellen im Außenbereich enthalten soll. Weitere Normen für die Herstellung und Speicherung von Wasserstoff sind in Planung.

Tätigkeiten

Schwerpunkte in der Normungsarbeit zur Brennstoffzellentechnologie liegen in den Anwendungen von Brennstoffzellen-Energiesystemen als Mikro-, stationäre oder portable Brennstoffzellen. Für diese Normen werden sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfanforderungen erarbeitet sowie Festlegungen zur Ermittlung von Leistungs- und Kenndaten. Die vorrangige Normenreihe IEC 62282 wird zu diesem Zweck kontinuierlich gepflegt und erweitert, bspw. durch die erfolgte und national übernommene Revision des Teils 5-1 zur Sicherheit von portablen Brennstoffzellen-Energiesystemen. Auf internationaler Ebene gibt es Bestrebungen, einen neuen Standard zum Gebrauch von Brennstoffzellen-Energiesystemen in Arbeits- bzw. Baumaschinen, wie z. B. Baggern und Gabelstaplern, zu erarbeiten.

Die [VDE Studie](#) „Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen“ (Stand: Juli 2020) untersuchte die Wirtschaftlichkeit klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen mit dem Ergebnis, dass die Brennstoffzelle aufgrund ihrer Energie- und Tauschkosten im Vergleich mit Batterietriebzügen und Dieseltriebzügen aktuell

noch am teuersten und unwirtschaftlichsten ist. Die [VDE Studie](#) „Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV“ (Stand: Mai 2019) zeigte auf, dass Alternativen mit Elektromotor wie der Elektrotriebzug mit Oberleitung und der Batterie- und Brennstoffzellentriebzug sinnvolle Alternativen sind, um den Dieseltriebzug abzulösen. Die Untersuchung nach technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten von batterieelektrisch- und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen beleuchtet die [VDI VDE Studie](#) „Brennstoffzelle für die Elektromobilität von morgen“ (Stand: Juni 2019).

Ausblick

Die Wasserelektrolyse hat zusammen mit der Brennstoffzellentechnologie das Potential einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der Emission von Treibhausgasen zu leisten. Wasserstoff lässt sich mittels erneuerbarer Energien aus Wasser herstellen, transportieren und speichern, was Vorteile gegenüber Strom bietet. Dadurch ermöglicht die Brennstoffzelle vielseitige Einsatzmöglichkeiten in der Sektorenkopplung und bei Anwendungen im Verkehrssektor. Wasserstoff ist damit ein essenzielles Element der Mobilität von morgen. Weitere Anwendungen bspw. im Minensektor beim Abbau der Rohstoffe werden erprobt, um auch hier Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Chancen und Herausforderungen liegen in der Serienproduktion von Fahrzeugen und dem kontinuierlichen Aufbau einer Ladeinfrastruktur von Wasserstoff-Tankstelle.