

Brennstoffzellentechnologie für zukünftige Energie- und Antriebssysteme

AUF DEM WEG ZUR KLIMANEUTRALITÄT

1. Einleitung

Im Pariser Klimaabkommen verpflichten sich alle Vertragspartner, die Erderwärmung deutlich unter 2°C zu halten, und es sollen weitere Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5°C zu begrenzen. Richtwert dabei sind die Temperaturwerte aus dem vorindustriellen Zeitalter. Klimagase sollen weltweit verringert und vom Klimawandel besonders betroffene Länder gegen die Folgen des Klimawandels gestärkt werden. Die Vertragsparteien, zu denen fast alle großen Industrienationen zählen, müssen nationale Klimaschutzpläne erarbeiten und umsetzen. Bis 2025 beabsichtigen die Industrieländer, jährlich 100 Milliarden US-Dollar für Klimaschutzmaßnahmen in Entwicklungsländern zur Verfügung zu stellen. Zudem hat die Europäische Union den sogenannten Green Deal verabschiedet, mit dem sie ihren Beitrag zum weltweiten Klimaschutz leisten will. Dieser sieht vor, dass die EU bis 2050 klimaneutral arbeitet, wirtschaftet, reist, fährt und lebt.

Autoren:

Michele Bozzolo, System-Ingenieur Brennstoffzellensysteme
Georg Fink, System-Ingenieur Brennstoffzellensysteme
Dr. Philippe Gorse, Leiter Technologie Brennstoffzellen
Benjamin Oszfolk, System-Ingenieur Brennstoffzellensysteme

Titelbild:

Das erste Brennstoffzellenmodul wird derzeit bei Rolls-Royce Power Systems auf dem Prüfstand getestet. Auf der Basis dieser Brennstoffzellenmodule aus der Automobilproduktion wird ein Demonstrator entwickelt, der zur Energieversorgung von Rolls-Royce Power Systems am Stammsitz in Friedrichshafen beitragen wird.

Um den Temperaturanstieg zu stoppen, gehört die Dekarbonisierung der weltweiten Wirtschaft zu den dringendsten Aufgaben, das heißt, eine CO₂-neutrale Wirtschaft wird angestrebt. Im Fokus steht hierbei neben dem Industrie- und Energiesektor auch die Mobilität, sei es mit Auto, Lkw, Zug, Flugzeug oder Schiff. Außer den CO₂-Emissionen

sollen auch Methan und die Schadstoffemissionen wie Stickoxide, Schwefeldioxid sowie Feinstaub, die bei der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen entstehen, immer weiter reduziert werden. Deshalb ist es wichtig, in naher Zukunft durch den Ausbau erneuerbarer Energien und Power-to-X-Technologien alternative Kraftstoffe verfügbar zu machen, Verbrennungsmotoren für alternative Kraftstoffe vorzubereiten und alternative Energie- und Antriebssysteme mit Brennstoffzellen zu entwickeln.

2. Zero-Emission-Brennstoffzellentechnik:

Ein logischer Schritt in Richtung Zukunft

Rolls-Royce Power Systems steht seit vielen Jahrzehnten für erstklassige Antriebs- und Energielösungen sowie die umfassende Unterstützung seiner Produkte über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Technologische Innovationen zu entwickeln und umzusetzen sowie die Vorteile der Digitalisierung gezielt zu nutzen, sind die treibenden Kräfte, durch die ein zukunftsfähiges Portfolio bereitgestellt werden kann. Die Antriebe und Energiesysteme der Zukunft müssen beitragen als Lösungen zu den gesellschaftlichen Herausforderungen Klimawandel, erhöhter Energiebedarf sowie Mobilitäts- und Energieansprüche einer wachsenden Weltbevölkerung. Die Elektrifizierung von Antriebssystemen als ein möglicher Pfad in



Green- und High-Tech-Programm

Das Programm „Green- und High-Tech“ von Rolls-Royce Power Systems konzentriert sich auf die Entwicklung neuer Technologien und Systeme zur Dekarbonisierung und Effizienzsteigerung, sei es durch alternative Kraftstoffe, Elektrifizierung oder Digitalisierung. Immer sind es integrierte Systemlösungen, die es ermöglichen, am besten den ökologischen Aspekt mit den betriebswirtschaftlichen Notwendigkeiten in Einklang zu bringen. Das „Green- und High-Tech-Programm“ ist Teil der Strategie Power Systems 2030, in der der Wandel zum nachhaltigen Systemlösungsanbieter beschrieben ist. Bereits heute kommen die sauberen und technologisch hochmodernen Lösungen von Rolls-Royce Power Systems in den Bereichen Infrastruktur und Marine weltweit zum Einsatz.

Richtung Ressourcenschonung und Umweltfreundlichkeit erfordert robuste und gleichermaßen flexible, kosteneffiziente und skalierbare Produkte.

In diesem Sinne ist es für Rolls-Royce Power Systems nur konsequent, das Portfolio um die Brennstoffzelle zu erweitern und die Entwicklungsaktivitäten Zug um Zug um verschiedene Anwendungsbereiche auszubauen. Denn das Potenzial der Brennstoffzellentechnologie überzeugt, ebenso wie Wasserstoff als Speichermedium im Kontext des Gesamtenergiesystems. Starke Argumente, um diese Technologie einzusetzen und voranzutreiben sind die hohe Zuverlässigkeit, Skalierbarkeit und die Möglichkeit, erneuerbare Energien nutzen zu können. Durch ihren modularen Aufbau können Brennstoffzellensysteme in ihrer Leistung sehr gut am Bedarf ausgerichtet werden; attraktiv sind sie zudem durch ihren geringen Wartungsaufwand und niedrige laufende Kosten. Ein weiterer Vorteil: Die Brennstoffzellentechnik ist marktreif und damit tauglich für den kommerziellen Einsatz. Der sich schnell entwickelnde Markt bietet gute Wachstumschancen für die Zero-Emission-Brennstoffzellentechnik.

3. Die Brennstoffzelle als wichtiger Baustein der Energiewende

Brennstoffzellen funktionieren anders als Verbrennungsmotoren. Sie wandeln die chemische Energie eines Brennstoffs direkt in Elektrizität um, die sich zum Beispiel als Antriebsenergie für eine zunehmende Zahl an elektrifizierten Systemen nutzen lässt. Diese Umwandlung ist effizienter als bei Verbrennungsmotoren, da die thermomechanischen Zwischenschritte, die bei konventionellen Energiewandlern (Wärmeerkraftmaschinen) erforderlich sind, entfallen. Der größte Pluspunkt entsteht, wenn regenerativ erzeugter Wasserstoff als Brennstoff verwendet wird. Dann lässt sich der Ausstoß von Schadstoffen und klimaschädlichen Gasen zusammen auf null reduzieren. Auf diese Weise haben Brennstoffzellen ein enormes Potenzial, ein wesentlicher Technologiebaustein für die Dekarbonisierung von Antrieb und Energiesystemen zu werden.

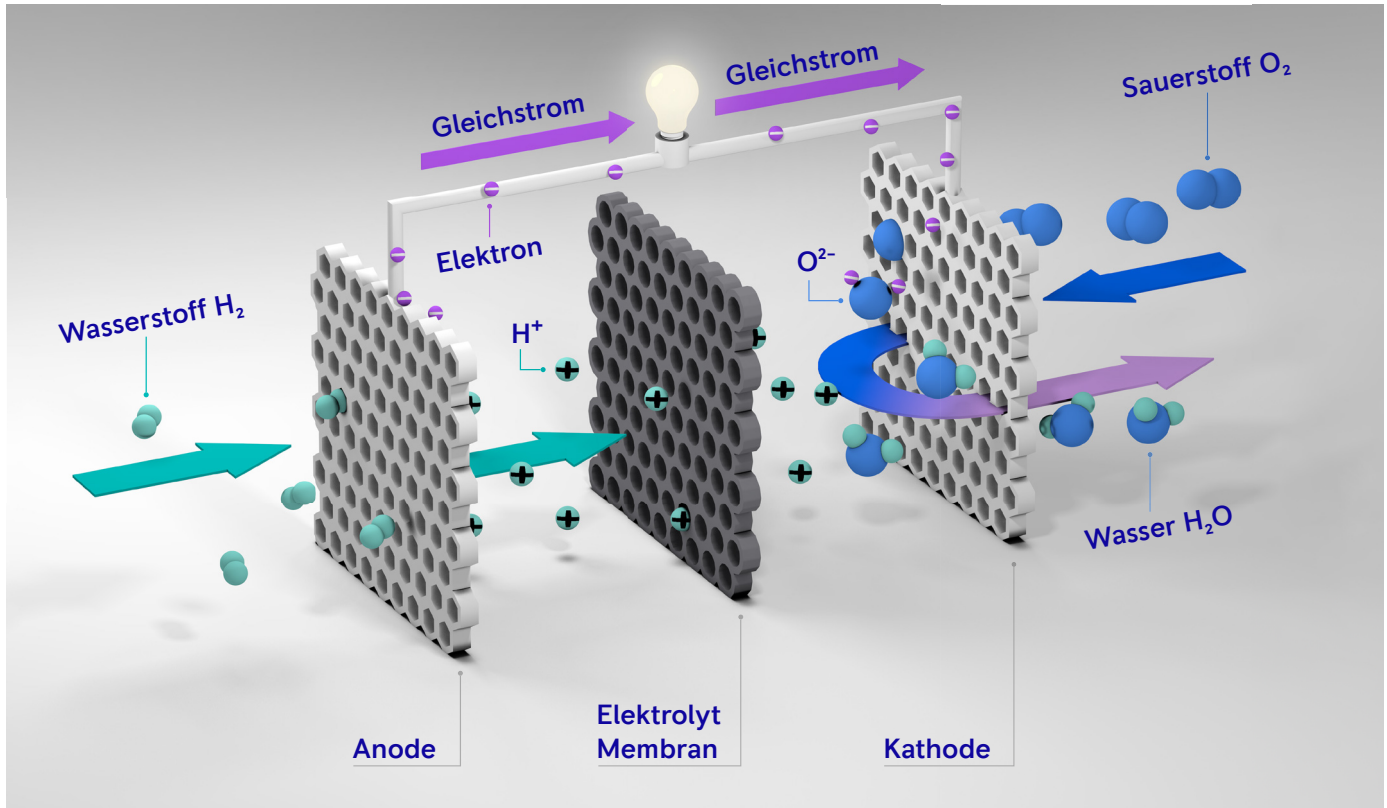
4. PEM – der Brennstoffzellentyp der Wahl

Für die Erweiterung und den Ausbau des Portfolios von Rolls-Royce Power Systems eignet sich die sogenannte Niedertemperatur-Proton Exchange Membran (Polymer-Elektrolyt-Membran-) Brennstoffzelle – auch PEM genannt – aktuell am besten. Diese Niedertemperatur-Brennstoffzelle verfügt über eine hohe Leistungsdichte und Dynamik, sodass bereits kleine Einheiten große Leistungen erzielen. Niedertemperatur-Brennstoffzellen haben Betriebs-Temperaturen bis rund 100 Grad Celsius, also typische Umgebungstemperaturen, während Hochtemperatur-Brennstoffzellen auf 250 bis 1.000 Grad Celsius kommen. Ein Vorteil der kompakten PEM-Brennstoffzelle verglichen mit anderen Typen ist, dass sie sich sekundenschnell einem geänderten Leistungsbedarf anpasst; ihr elektrischer Wirkungsgrad ist insbesondere im Teillastbereich sehr hoch. Da sie Luft und Wasserstoff sowie wasserstoffhaltige Gasgemische (durch Reformierung von z. B. Methanol, Benzin oder Erdgas) als Brenngas nutzen kann, ist das Einsatzfeld von PEM-Brennstoffzellen sehr breit.

Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, die chemische Reaktionsenergie eines zugeführten Brennstoffs und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie umwandelt. Dabei arbeitet sie leise und vibrationsarm. Ähnlich wie Batterien erzeugen auch Brennstoffzellen eine Gleichspannung. Im Gegensatz zu Batterien müssen bei einer Brennstoffzelle die Reaktionspartner jedoch kontinuierlich zugeführt werden. Bei der PEM-Brennstoffzelle läuft zwischen den Elektroden (Anode und Kathode) ein chemischer Prozess ab, bei dem die positiven Ionen (Protonen) von der Anode zur Kathode wandern und die Elektronen außen über einen elektrischen Leiter von

der Anode zur Kathode geleitet werden. Produkt dieses Prozesses ist elektrische Leistung, die sich abnehmen und nutzen lässt. Die Elektroden sind mit einem Katalysator aus Platin oder Palladium beschichtet und durch einen Elektrolyten voneinander getrennt. Ohne den Katalysator würden Wasserstoff und Sauerstoff nicht miteinander reagieren, um Wärme und Strom entstehen zu lassen. Der Elektrolyt besteht aus einer ionenleitenden Membran – wichtig ist, dass diese Membran für Protonen durchlässig und für Elektronen undurchlässig ist.



Der Name Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle deutet darauf hin, dass die Membran ein entscheidendes Merkmal dieser Brennstoffzelle ist. Diese besteht meist aus Kunststoff, ähnlich zu Teflon. Die wasserhaltige Polymermembran, die als Elektrolyt dient, lässt nur Protonen, also den positiv geladenen Atomkern des Wasserstoffs, von der Anode zur Kathode passieren. Der für diese Ionenleitung notwendige Wassergehalt der Membran ist verantwortlich für die Begrenzung der Betriebstemperatur auf maximal 100 Grad Celsius. Die erforderliche Menge an Edelmetall (z.B. Platin) für den Katalysator wurde in den vergangenen Jahren konsequent reduziert. Das führte bereits zu einer deutlichen Kostenreduktion und steht weiterhin im Fokus der Entwicklungsanstrengungen.

Für die Anwendungen von Rolls-Royce Power Systems sind die Kompaktheit der PEM-Brennstoffzelle, die sich aus der hohen Leistungsdichte ergibt, die hohe Skalierbarkeit, die Möglichkeiten des modularen Aufbaus sowie die daraus resultierende Flexibilität ideal. Brennstoffzellen können zum Beispiel direkt in batterie-elektrische oder elektrifizierte Energiesysteme integriert werden. Die Zelle erreicht einen hohen elektrischen Wirkungsgrad (ca. 50 Prozent), eine hohe Stromdichte und ist zudem sehr sicher anzuwenden. Sie bietet damit außer dem Einsatz in der stationären Stromversorgung – wie beispielsweise als Notstromaggregat oder als unterbrechungsfreie Stromversorgung – auch die notwendigen Voraussetzungen für den mobilen Einsatz in Schiffen.

Um die Leistungsdichte weiter zu erhöhen, werden heute teilweise Luftverdichter oder gar elektrische Turbolader in die Brennstoffzellensysteme eingebaut. Ähnlich wie beim Verbrennungsmotor pumpen die Verdichter oder Turbolader Luft mit einem Druck von zwei bis drei Bar in das Luftsystem. Mehrere einzelne Brennstoffzellen lassen sich zu einem Stack in Serie schalten, wodurch die Spannung ansteigt. Um mehr Leistung zu erreichen, können die Stacks aber auch parallel-geschaltet werden. Dadurch vervielfacht sich die entstehende Strommenge im Vergleich zur Serienschaltung.

In der Entwicklung und Anwendung von Brennstoffzellen greift Rolls-Royce Power Systems auf profundes Know-how und eine jahrelange Erfahrung zurück. Zwischen 1999 und 2011 wurden 26 Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Systeme (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle MCFC) in verschiedenen Anwendungsbereichen installiert und erfolgreich betrieben. Die Kombination aus Strom und Druckdampf nutzten Betriebe der Industrie sowie im Gesundheitssektor für unterschiedlichste Prozesse. Die Systeme liefen im Durchschnitt rund 22.000 Betriebsstunden, sämtliche Leistungsdaten und Erfahrungswerte wurden analysiert und dokumentiert. Während die Markt- und Rahmenbedingungen damals nicht die Voraussetzungen für eine Serienfertigung boten, stehen die Zeichen für den massenmarkttauglichen Einsatz der PEM-Brennstoffzelle als alternative Antriebsart heute auf grün.

5. Anwendungsbeispiele

5.1 Notstromversorgung von Rechenzentren

Durch ihre charakteristischen Merkmale eignen sich PEM-Brennstoffzellen für diverse Anwendungen, die aktuell mit Verbrennungsmotoren betrieben werden. Unter anderem könnten Brennstoffzellen für CO₂-freie Datacenter eine zentrale Rolle spielen.

Rechenzentren sind Teil der weltweiten sicherheitskritischen Infrastruktur, zu der unter anderem auch Krankenhäuser, Flughäfen oder die Telekommunikation gehören. Ein störungsfreier Ablauf ist hier unabdingbar. Kommt es zu einem Stromausfall, übernehmen aktuell in der Regel Diesel-Aggregate die Versorgung des Datacenters bis zur Wiederherstellung des regulären Betriebs. MTU-Notstromaggregate erfüllen die höchsten Abgasemissions-Standards und bieten größte Zuverlässigkeit bei geringstem Wartungsaufwand, dennoch entstehen bei der Verbrennung des fossilen Diesel-Kraftstoffs prinzipbedingt Abgase.

Übernehmen Brennstoffzellen die Ersatzstromversorgung – sei es als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) oder Netzersatzanlage (NEA) – entsteht nur Wärme und feuchte Abluft. Das Brennstoffzellensystem besitzt keine beweglichen Teile, was den mechanischen Wartungsaufwand minimiert. Auch im Vergleich der Wirkungsgrade punktet die Brennstoffzelle: Während beim Verbrennungsmotor die mechanische Energie durch einen zusätzlichen Generator in Strom umgewandelt werden muss, liefert die Brennstoffzelle direkt elektrische Energie. Ein weiterer Vorteil ist, dass sie sich hervorragend skalieren lässt: Mehr Module bedeuten mehr Leistung – Brennstoffzellensysteme lassen sich auch nachträglich einfach integrieren und

Vorteile von Brennstoffzellensystemen auf einen Blick

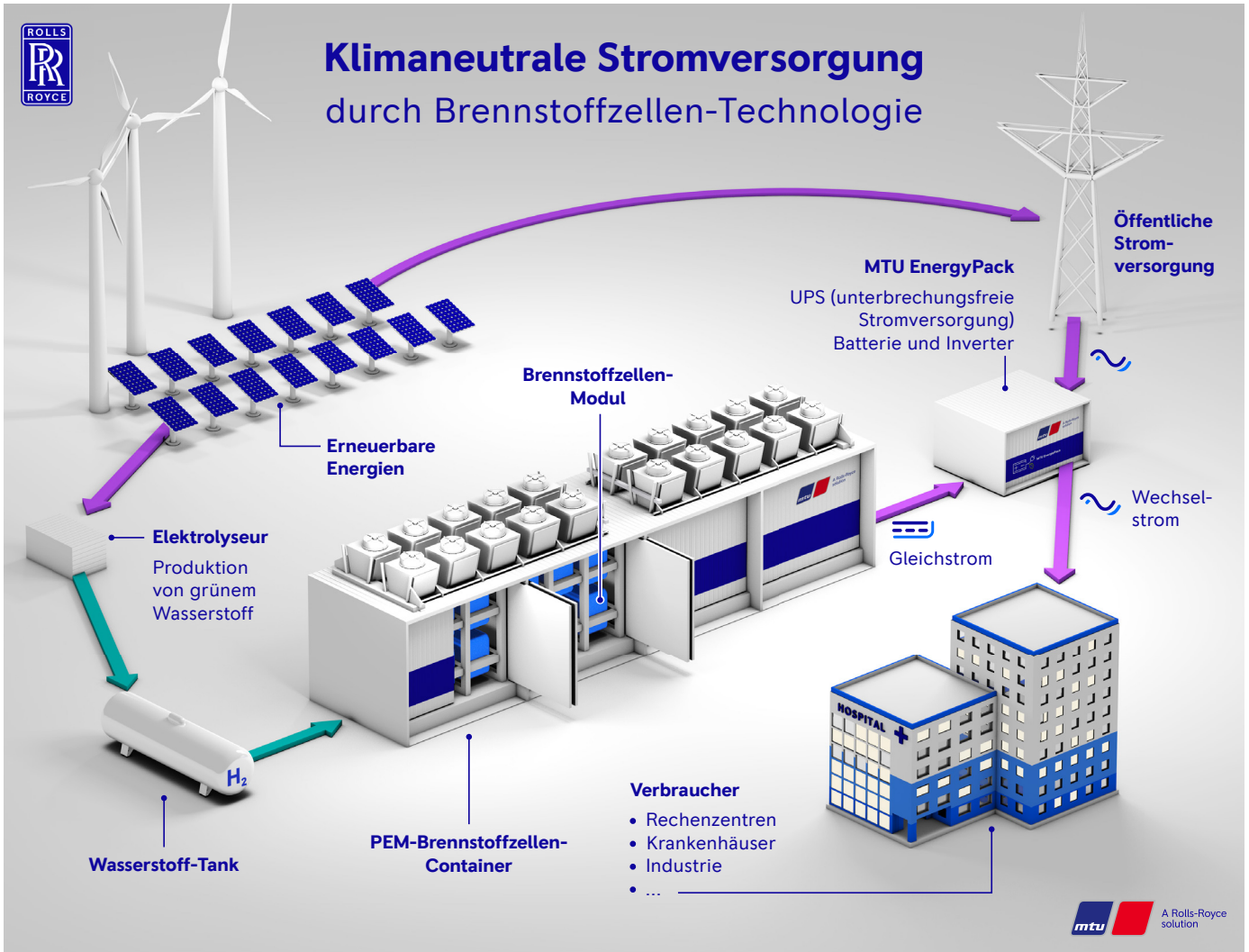
- Hoher elektrischer Wirkungsgrad (ca. 50 Prozent, zum Vergleich: Dieselaggregat ca. 40 Prozent)
- Beim Betrieb mit reinem Wasserstoff keine Emissionen außer Wasserdampf – kein Kohlenstoffdioxid, keine Stickoxide, keine Feinstaub
- Geräuscharmer Betrieb
- Wartungsarme Technik (keine beweglichen Teile im Brennstoffzellen-Stack)
- Keine Vibrationen
- Wichtige Technologie für unabhängige Systeme zur dezentralen Energieversorgung
- Wichtige Technologie für reichweitenstarke Elektromobilität mit hohem Leistungsbedarf und kurzen Tankzeiten
- Klimaneutral, wenn bei der Erzeugung Strom aus erneuerbaren Energien verwendet bzw. „grüner“ Wasserstoff für den Betrieb genutzt wird

wachsen mit, wenn sich ein Rechenzentrum vergrößert. Das macht Brennstoffzellensysteme zu einer langfristigen und zukunftssicheren Investition.

Folgendes Szenario zeigt die Brennstoffzelle als integralen Bestandteil eines vollständig CO₂- und Schadstoff-emissionsfreien Datacenters:

Der Grundstrombedarf eines Rechenzentrums könnte in Zukunft durch Solar- und Windkraftanlagen abgedeckt werden. Stünde ausreichend „grüner“ Strom zur Verfügung, ließe sich per Elektrolyse aus Wasser Wasserstoff herstellen und vor Ort speichern. Alternativ ließe sich der Wasserstoffbedarf über ein in Zukunft vorhandenes Versorgungsnetz decken und zum Betrieb der Brennstoffzelle einsetzen: Sie würde bei einem Stromausfall unmittelbar die Versorgung des Datacenters zur Aufrechterhaltung der Infrastruktur übernehmen.

Rolls-Royce Power Systems macht die Brennstoffzellentechnologie zukünftig für seine Kunden verfügbar. Für die CO₂- und Schadstoff-freie Notstromlösung werden bis zu sechs Module zu einem Brennstoffzellensystem integriert. Die Module bestehen aus den Stacks mit mehreren hundert Brennstoffzellen und den Versorgungsleitungen für Luft, Wasserstoff und Kühlung. Der modulare Aufbau ermöglicht es, die Leistung an den Bedarf anzupassen. In einen FC-Container können bis zu 24 Module eingebaut werden.



Rolls-Royce Power Systems strebt zukünftig an, eine integrierte komplette Notstromlösung anzubieten. Dazu gehören das Brennstoffzellensystem, ein UPS-System, die Batterien sowie die Wasserstoffinfrastruktur. Die Lösung wird schwarzstartfähig sein, d. h. autonom die Stromerzeugung wiederherstellen können und über zwei Megawatt Leistung liefern.

Die Wirtschaftlichkeit der Brennstoffzelle lässt sich zukünftig steigern, wenn der produzierte Stromüberschuss gespeichert und bei Spitzenlasten eingesetzt wird. Eine alternative Möglichkeit ist, 20 bis 30 Prozent des erzeugten Stroms ins Netz einzuspeisen und so von der dezentralen Einspeisevergütung zu profitieren. Neben dem wirtschaftlichen Vorteil wird so das Netz insgesamt entlastet und Leistungsspitzen verringert.

Rolls-Royce und die Daimler Truck AG planen eine Kooperation zur CO₂-neutralen Notstromversorgung von sicherheitskritischen Einrichtungen wie beispielsweise Rechenzentren mit stationären Brennstoffzellengeneratoren. Diese sollen emissionsfreie Alternativen zu Dieselmotoren bieten, die bislang als Notstromaggregate oder zur Abdeckung von Spitzenlasten eingesetzt werden. Die Daimler Truck AG und Rolls-Royce haben hierfür eine entsprechende Absichtserklärung unterzeichnet. Ende 2019 hatten Rolls-Royce Power Systems und Lab1886, die Innovationseinheit von Daimler für neue Geschäftsmodelle, bereits ein Pilotprojekt vereinbart, um auf der Basis von Brennstoffzellenmodulen aus der Automobilproduktion einen Demonstrator zum Einsatz dieser Technologie für die stationäre Energieversorgung zu entwickeln. Er wird Anfang 2021 in Betrieb gehen und zur Energieversorgung von Rolls-Royce Power Systems am Stammsitz in Friedrichshafen beitragen.

5.2 Demand Response

Für die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist ein hohes Maß an Flexibilität gefragt, denn Stromerzeugung und Strombedarf müssen ausgeglichen und Versorgungssicherheit gewährleistet werden. Vor allem in Mitteleuropa scheint die Sonne nicht dauerhaft und auch die Windenergie ist durch Wettereinflüsse limitiert – es gibt also Zeiten, in denen naturgegeben nicht genug Strom produziert werden kann, um die gesamte Nachfrage zu decken. Und es gibt Zeiten, in denen mehr Strom aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt wird, als aktuell nötig ist. Dann ist es einerseits wichtig, dass Energieverbraucher kurzfristig reagieren und unmittelbar oder für einen längeren Zeitraum die Nachfrage reduzieren können. Andererseits müssen Energieversorger kurzfristig (mehr) Strom liefern oder ihre Lieferung reduzieren können. Überschüssiger Strom kann auch in Form von Wasserstoff gespeichert werden und bei Bedarf kurzfristig über ein Brennstoffzellensystem wieder als Strom zur Verfügung gestellt werden. Dieses Lastenmanagement oder Demand Response durch intelligente Stromnetze wird mit entscheidend sein für ein erfolgreiches Umstellen der Energieversorgung auf nachhaltige Produktionsweisen.



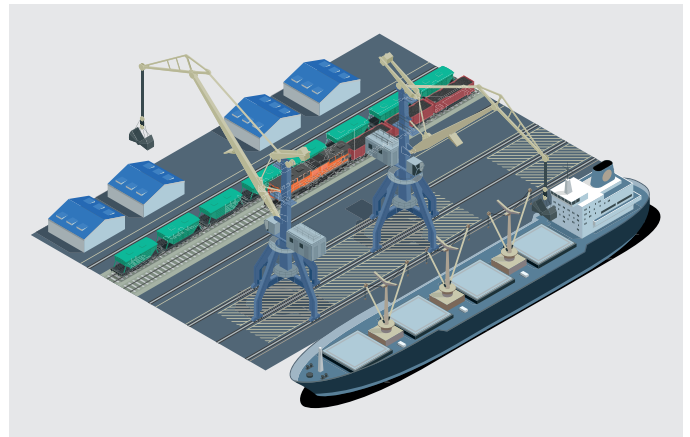
Demand Response

Eine Demand-Response-Lösung auf Basis der PEM-Brennstoffzelle in Kombination mit Batterien ist ideal dafür geeignet, Netze zu stabilisieren und Leistungsspitzen abzufedern. Verbraucher können das System nutzen, um ihre Kapazitäten auch bei geringer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu decken. Der PEM-Brennstoffzellen-Generator bietet die Chance, auch in lokal operierende Systeme oder an sogenannte Microgrids angeschlossen zu werden.

5.3 Onshore Power

Die Umweltbelastung in Häfen ist hoch. Das liegt nicht nur am Abgas erzeugenden Schiffsverkehr, sondern auch an den in den Häfen liegenden Schiffen, die ihren Strombedarf zumeist mithilfe von Dieselgeneratoren an Bord decken. Auch das verursacht hohe Luftschadstoff- und Lärmemissionen, was insbesondere bei Hafenanlagen, die in dicht besiedelten Gebieten liegen, eine hohe Belastung für die Anwohner ist.

Bordstrom lässt sich grundsätzlich auch durch einen Landanschluss bereitstellen. In vielen Häfen sind jedoch entsprechend leistungsstarke Landstromanschlüsse für die Versorgung von großen Schiffen, die mehrere hundert Kilowatt oder sogar mehrere Megawatt Bordstromleistung benötigen, bislang nicht vorhanden. Diese Landstromversorgung kann alternativ auch emissionsfrei bereitgestellt werden – zum Beispiel mithilfe wasserstoffbetriebener PEM-Brennstoffzellen. Das geräuschlose und komplett emissionsfreie Brennstoffzellensystem ließe sich in einen Container mit einer maximalen Größe von 14 Metern integrieren, inklusive der Kühlungssysteme auf dem Dach und dem Wasserstofftank. Die Größe der Containerlösung entspricht der bestehender Dieselgeneratoren und lässt sich leicht in die bestehende Infrastruktur des Hafens integrieren. Auch hier bietet die Modularität den Vorteil, dass die Brennstoffzeleinheiten Schritt für Schritt an den Bedarf anpassbar sind.



Hafen

Häfen sind prädestiniert für den Aufbau einer Versorgung durch Brennstoffzellensysteme: Sie werden entscheidende Knotenpunkte bei der Wasserstoffinfrastruktur sein und sind zum Teil schon an bestehende Versorgungsstrukturen angeschlossen.

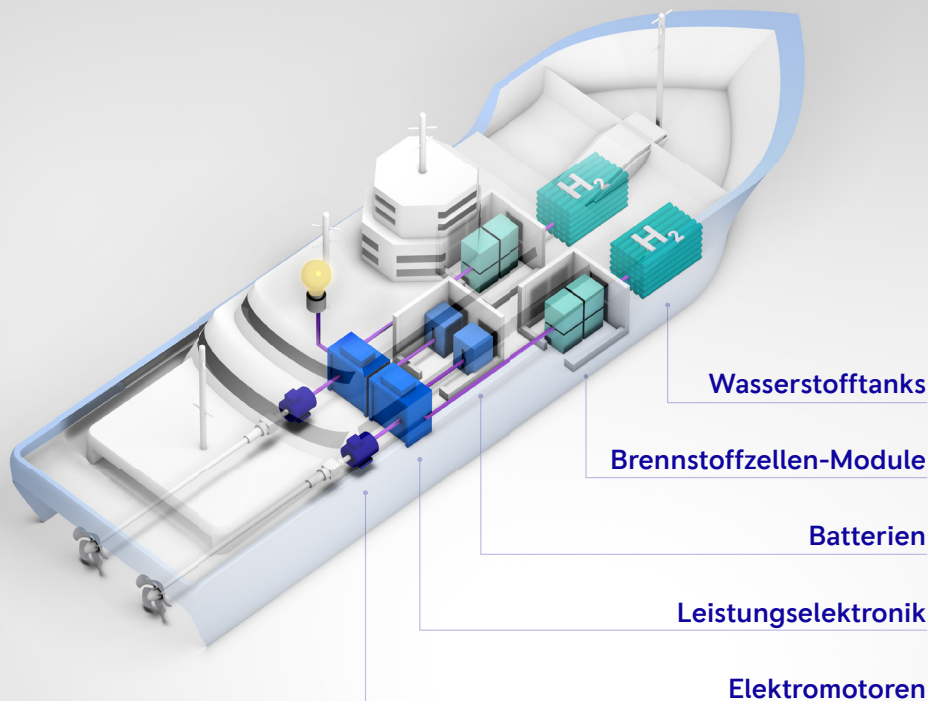
5.4 Brennstoffzellen für Schiffsantriebssysteme

Alternative Antriebe sind nicht nur für Autos und Lkw attraktiv und notwendig, sondern auch für Schiffe. Auch die Schifffahrt trägt mit 2 – 3 Prozent zu den weltweiten CO₂-Emissionen bei. Dieser Anteil wird bis 2050 entsprechend der Zunahme des weltweiten Handels deutlich steigen. Für Rolls-Royce Power Systems mit seiner langjährigen Tradition als Anbieter von Schiffsantriebssystemen ist es daher sehr wichtig, seinen Kunden auch zukünftig noch umweltfreundlichere Lösungen anzubieten. Onboard-Brennstoffzellen-Systeme vereinen zahlreiche Vorteile: Neben der Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit überzeugen Schiffsantriebe mit Brennstoffzellen durch einen hohen Komfort für die Passagiere und ihren hohen Grad an Modularität. Sie sind leise, erzeugen keine geruchsintensiven Abgase und sind nahezu vibrationsfrei. Der emissionsfreie Antrieb ermöglicht Fahrten in Meer-, See- und Flussbereichen, die mit anderen Systemen wegen Natur- und Umweltschutzaufgaben nicht befahren werden dürften.

Ein Brennstoffzellen-Antriebssystem für Schiffe besteht aus mehreren Elementen. Herzstück bildet die Brennstoffzelle, die Wasserstoff in elektrische Energie umwandelt. Diese wird über ein elektrisches Verteilnetz an Großleistungsverbraucher wie z. B. die Elektromotoren für den Antrieb der Propeller, Winschen etc. sowie an kleinere Verbraucher wie beispielsweise die Bordstromversorgung verteilt. In dieses elektrische Verteilnetz ist auch ein elektrischer Energiespeicher – typischerweise eine (Li-Ion-) Batterie eingebunden, um temporär Energie zu speichern. Diese Batterie erlaubt die zeitliche Entkopplung von Energieerzeugung und -verbrauch und eröffnet damit die Möglichkeit zum wirkungsgradoptimierten Betrieb der einzelnen Komponenten. Ein intelligentes Leistungs- und Energiemanagementsystem zur Ansteuerung der einzelnen Komponenten ist hierfür essenziell.



PEM-Brennstoffzellensystem für Schiffe



Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellensysteme eignen sich für den Einsatz auf Binnengewässern, wie Seen und Fjorde, aber auch für küstennahe Anwendungen und Hafenfähren, da die Schiffe regelmäßig an Land betankt werden können und die zurückzulegenden Routen mit dem Stand der Technik umsetzbar sind. Zu den Herausforderungen der Marktdurchdringung gehört, dass der benötigte Wasserstoff in größeren Tanks, entweder gasförmig oder verflüssigt, an Bord mitgeführt werden muss. Durch die noch fehlende Infrastruktur kommt der verlässlichen Wasserstoffversorgung eine

besondere Bedeutung zu. Erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit erfordern außerdem technische Lösungen für ein sicheres Handling des Kraftstoffs an Bord. Auch die Integration der Brennstoffzellensysteme an Bord muss unter marinespezifischen Randbedingungen sorgfältig geplant werden. Auch Methanol ist als Kraftstoff für PEM-Brennstoffzellen möglich: dazu wird das Methanol reformiert. Das heißt, aus Methanol entsteht Wasserstoff, der in der PEM-Brennstoffzelle eingesetzt werden kann. Der große Vorteil ist, dass Tanks für Methanol weniger Bauraum in Anspruch nehmen als für Wasserstoff.

Dadurch sind längere Tankintervalle oder größere Reichweiten der Schiffe möglich.

Um diese Herausforderungen zu lösen und Brennstoffzellenantriebe auf ein nächstes Level zu heben, ist es aus der Sicht von Rolls-Royce Power Systems wichtig, sich interdisziplinär und branchenübergreifend auszutauschen und zu vernetzen. Darum ist das Unternehmen für alle potenziellen Partner und Interessenten offen und bereits heute mit verschiedenen Technologiepartnern im Gespräch. Konkret unterstützt Rolls-Royce Power Systems beispielsweise Werften und Reedereien bei der Lösungsfindung für deren jeweils individuelle Anforderungen.

6. Ausblick

Mit Blick auf die Schadstoffemissions- und Klimaschutzvorgaben und die gesetzten Klimaziele gewinnt die Brennstoffzellentechnologie zunehmend an Bedeutung. Wenn es um den effizienten Einsatz erneuerbarer Energien für eine schadstoffarme und CO₂-freie Erzeugung von Elektrizität und Wärme geht, ist die Brennstoffzelle – im Vergleich zu anderen Systemen – Spitzenreiter beim Wirkungsgrad, was sie für verschiedene Einsatzbereiche interessant macht. Schon heute ist eine effiziente Energieversorgung mit Brennstoffzellen in dezentralen stationären Einrichtungen ebenso möglich wie ihr Einsatz für mobile Antriebe in Fahrzeugen und Schiffen.

Der große Pluspunkt wasserstoffbetriebener Brennstoffzellen: Der CO₂-Ausstoß von Schiffen oder stationärer Stromerzeugung sinkt auf null wenn grüner Wasserstoff genutzt wird. Die vorgelegten Wasserstoffstrategien, z.B. im EU Green Deal und die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung weisen darauf hin, dass der Ausbau der Infrastruktur auf der politischen Agenda steht und mit Nachdruck angegangen wird.

Rolls-Royce Power Systems treibt mit seiner neu gegründeten Unternehmenseinheit „Power Lab“ Zukunftstechnologien für den Marine- und Infrastrukturbereich voran. Zu den Schwerpunkten gehören Brennstoffzellensysteme und die Erzeugung und der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen. Ziel ist es, die Trends in den Märkten proaktiv zu bedienen und das Portfolio um neue Antriebs- und Energielösungen für eine klimaneutrale Zukunft zu erweitern.

EXKURS: Wasserstoff – ein nahezu unbegrenzt verfügbarer Energieträger

Wasserstoff hat den Vorteil, in nahezu unbegrenzten Mengen zur Verfügung zu stehen – allerdings stets chemisch verbunden mit anderen Elementen. Das größte nutzbare Vorkommen von Wasserstoff findet sich gebunden an Sauerstoff in Form von Wasser. Ob flüssig oder als Gas: Wasserstoff ist farblos. Wird er als grüner, grauer, blauer und türkiser Wasserstoff bezeichnet, bezieht sich das auf die Art der Erzeugung und die damit verbundenen direkten und indirekten CO₂-Emissionen. Idealerweise dient in PEM-Brennstoffzellen ausschließlich grüner Wasserstoff als Brennstoff, um gänzlich schadstofffrei elektrische Energie herzustellen. Bis aus erneuerbaren Energien große Mengen an Wasserstoff hergestellt werden können, kommen auch andere Wege infrage. In der Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben prüft Rolls-Royce Power Systems alle Varianten – immer mit Blick darauf, dass die Herstellung des Wasserstoffs maximal CO₂-neutral erfolgen kann.

Grüner Wasserstoff

Er entsteht in erster Linie durch Wasserelektrolyse, für die ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird. Darüber hinaus lässt sich auch durch die Vergasung und Vergärung von Biomasse sowie die Reformierung von Biogas grüner Wasserstoff erzeugen. Entscheidend ist, dass alle Herstellungsverfahren CO₂-neutral sind.

Grauer Wasserstoff

Er wird aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Das gängigste Verfahren ist die Dampfreformierung, die Erdgas unter Hitze in Wasserstoff und CO₂ umwandelt. Bei der Produktion von einer Tonne Wasserstoff entstehen rund 10 Tonnen Kohlenstoffdioxid, das in der Regel ungenutzt in die Atmosphäre abgegeben wird.

Blauer Wasserstoff

Er entspricht dem grauen Wasserstoff, was Ausgangsmaterial und Herstellungsprozess angeht. Allerdings wird hier das entstandene CO₂ gespeichert (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) oder unter dem Meeresgrund verpresst. Obwohl das CO₂ so nicht in die Atmosphäre gelangt, ist dieser Wasserstoff nicht vollständig CO₂-neutral, da bei der Produktion und Transport immer noch Klimagase in die Umwelt entweichen.

Türkiser Wasserstoff

Er ist das Ergebnis der Methanpyrolyse, die Methan thermisch in festen Kohlenstoff und Wasserstoff spaltet. Anstelle von CO₂ entsteht dabei fester Kohlenstoff. Dieser Wasserstoff ist nicht vollständig CO₂ neutral, da bei der Produktion und Transport immer noch Klimagase in die Umwelt entweichen.

Wie sicher ist Wasserstoff?

Wasserstoff ist unsichtbar, geruchslos, ungiftig, nicht korrosiv und nicht Wasser gefährdend. Auch entzündet er sich nicht selbst, ist aber im Gemisch mit Luft bei Konzentrationen von 4 bis 75 Volumenprozent ein leicht zündfähiges Gas. Vor diesem Hintergrund muss Wasserstoff auf sichere Weise erzeugt, gespeichert, transportiert und genutzt werden. Eine spezielle Eigenschaft von Wasserstoff ist seine hohe Flüchtigkeit. Diese ist ein großer Vorteil, denn bei einem bestimmten Mischungsverhältnis mit Luft sinkt die Explosionsgefahr rapide. Das Gefahrenpotenzial von Wasserstoff ist vergleichbar mit dem von Erdgas. Dementsprechend sind die Sicherheitsvorkehrungen ausgelegt, den Umgang regelt ein umfangreiches Normenwerk. Die europäische Industrie kann inzwischen nicht zuletzt dank spezieller Wasserstoffpipelines von insgesamt mehr als 1.500 km Länge auf umfassendes Infrastruktur-Know-how zurückgreifen.

Wasserstoff ohne Sauerstoff ist nicht explosiv. Die Lagerung in Tanks ist an sich also zunächst ungefährlich. Sicherheitsventile sorgen dafür, dass der Wasserstoff bei Überdruck kontrolliert abgelassen wird und sich verflüchtigt. Austretender Wasserstoff lässt sich durch eine Zündquelle entflammen und abfackeln, ohne eine Explosion zu verursachen.

Rolls-Royce Power Systems nimmt 2021 auf dem Werksgelände in Friedrichshafen einen Demonstrator mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen zur Stromerzeugung in Betrieb und wird damit unter anderem Sicherheitsvorkehrungen unter verschiedensten Bedingungen testen. Der Demonstrator erfüllt alle Kriterien des Explosions- und Brandschutzes sowie die gängigen Bauvorschriften. Rolls-Royce Power Systems installiert ein mehrstufiges Sicherheitssystem, das zunächst den Austritt vermeidet, dann automatisch abschaltet und lüftet. Die Brennstoffzellensysteme werden so konstruiert, dass der Wasserstoff nicht mit den Zündquellen in Kontakt treten kann.

Internationale Wasserstoffstrategien

Die Förderung des Bundes und der Europäischen Union sowie die weltweiten Bestrebungen zahlreicher Regierungen und Unternehmen, die Brennstoffzelle und deren angeschlossene Technologien voranzutreiben, bieten Rolls-Royce Power Systems ein ideales Umfeld, um eigene Systemlösungen mit Brennstoffzellen zu entwickeln.

Es besteht Konsens in **Europa**, dass Wasserstoff bis 2030 wettbewerbsfähig werden soll, um dadurch die Energiewende in Europa und das gemeinsame Ziel, in allen Sektoren in 30 Jahren CO₂-neutral zu werden, zu erreichen. Geplant ist, die Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien bis 2024 mit finanzieller Unterstützung auf bis zu eine Million Tonnen zu steigern, bis 2030 auf zehn Millionen Tonnen. Dazu sollen in der EU Elektrolyseure mit einer Leistung von mindestens 6 Gigawatt bis zum Jahr 2024 entstehen, bis zum Jahr 2030 sogar 40 Gigawatt. Die von der EU-Kommission gegründete Europäische Allianz für sauberen Wasserstoff unterstützt diese Strategie.

Deutschland will mit einer nationalen Wasserstoffstrategie Vorreiter bei der Produktion und Nutzung von Wasserstoff werden. Klimaneutral hergestellter Wasserstoff gilt dabei als nachhaltiger Ansatz, um Schwerlaste, Schiffe und Industrieprozesse zu betreiben. Doch noch reichen die Ressourcen aus erneuerbaren Energien hierzulande nicht aus, um Wasserstoff in den erforderlichen Mengen zu produzieren. Im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie wurden deswegen Allianzen mit Drittstaaten vereinbart. Geplant ist, die Erzeugung und Anwendung von Wasserstoff mit insgesamt neun Milliarden Euro zu fördern. Die Strategie der Bundesregierung sieht vor, bis zum Jahr 2030 Produktionsanlagen von bis zu fünf Gigawatt Gesamtleistung einschließlich der benötigten Windkraftanlagen zu bauen. Elektrolysekapazitäten von zehn Gigawatt sollen bis 2040 entstehen – eine Leistung, die in etwa der von zehn Atomkraftwerksblöcken entspricht.

Als eines der ersten Länder der Welt führte **Japan** im Jahr 2017 die bestehenden Wasserstoffprojekte seiner Auto- und Technikkonzerne in eine dezidierte nationale Wasserstoffstrategie zusammen. Die Ziele sind ambitioniert: Bis zum Jahr 2030 will das Land eine globale Lieferkette und einen großen Markt für Wasserstoff aufbauen. Geplant sind 800.000 Brennstoffzellenfahrzeuge und 5,3 Millionen stationäre Brennstoffzellen für die Heißwasser- und Stromgewinnung im Wohnsektor.

Im Bereich der Brennstoffzellenentwicklung gehen Unternehmen und Verbände in **China** eine Vielzahl nationaler und internationaler Kooperationen ein. So wird Weichai Power, Chinas größter Motorenhersteller, bis 2030 über 5 Milliarden Euro in die Brennstoffzellenentwicklung investieren und kooperiert dafür mit Ballard und Bosch. Auf politischer Ebene wurde im Februar 2018 die National Alliance of Hydrogen and Fuel Cell (NAHFC) gegründet, ein von der chinesischen Regierung unterstützter Zusammenschluss von Firmen aus der Energiewirtschaft und der Fahrzeugindustrie.

Südkorea hat 2019 eine Roadmap vorgelegt, die das Land zum Weltmarktführer für Wasserstofftechnologien führen soll. Vorgesehen ist, bis 2040 über 6 Millionen Brennstoffzellenfahrzeuge auf die Straße zu bringen und 1.200 Tankstellen zu bauen, um so die Energieunabhängigkeit zu sichern und eine weltweite Führungsrolle in der Wasserstofftechnologie zu übernehmen.

Quellenverzeichnis

<https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/klimafinanzierung/roadmap-zur-erreichung-des-klimafinanzierungsziels/>

<https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/sicherheit-von-wasserstoff>

<https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/brennstoffzellen/pem-brennstoffzelle>

<https://www.energie-experten.org/heizung/brennstoffzelle.html>

<https://www.dw.com/de/wasserstoffstrategie-deutschland-will-wasserstoff-land-nummer-eins-werden/a-53770326>

<https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>

<https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/brennstoffzellentypen>

<https://www.bundestag.de/resource/blob/651446/d226ff9ff67a3c29d893859121cfc5fe/WD-8-041-19-pdf-data.pdf>

<https://www.now-gmbh.de/de/bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/aufbau-wasserstoff-tankstellennetz>

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200610-globale-fuehungsrolle-bei-wasserstofftechnologien-sichern.html>

https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/HandelundVertrieb/SMARD/Aktuelles/smardaktuelles_node.html

<https://www.enbw.com/energie-entdecken/mobilitaet/brennstoffzellenantrieb/>

https://www.h2bz-hessen.de/mm/Stationre_BZ-Anwendungen_WEB.pdf

<https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/cpn-planungsleitfaden-brennstoffzellen-esv.pdf>