

## Perspektiven der Brennstoffzelle im zukünftigen Energiesystem



**Wir  
gestalten  
Zukunft**

**VDI/VDE-Statusreport**

Bild: © Monty Rakusen/Getty Images



# Zusammenfassung

## Mit dem Versprechen einer umweltfreundlichen und effizienten Stromerzeugung werden Brennstoffzellentechnologien seit der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts erforscht.

Die technische Entwicklung verlief jedoch nicht gradlinig und führte zu unterschiedlichen Anwendungsschwerpunkten, die von der Raumfahrt über den Einsatz in Straßenfahrzeugen bis hin zu einem heute sehr breiten Einsatzspektrum in den Bereichen Energie und Verkehr reichen. Vor dem Hintergrund der aktuell stattfindenden Transition des Energiesystems wurden in diesem Statusreport der aktuelle Stand qualitativ analysiert und zukunftsweisende Anwendungsbereiche herausgearbeitet.

Die absehbare Dominanz von elektrischer Energie aus erneuerbarer Stromerzeugung macht saisonale Wasserstoffgroßspeicher und kurzfristig agierende Batteriespeicher zur Netzabsicherung notwendig. Das Stromnetz wird über deutlich höhere überregionale Transportkapazitäten verfügen und in der dezentralen Energieversorgung wird es verstärkt auf Flexibilität und Effizienz ankommen. Einer direkten Stromnutzung ist daher im Normalfall der Vorrang zu gewähren. Zukünftig notwendige Energieimporte beruhen verstärkt auf Wasserstoff und dessen Derivaten. Wenn wettbewerbsfähige Preisniveaus erreicht werden, kann von einer Verfügbarkeit von Wasserstoff als *Commodity* ausgegangen werden. Entsprechende Infrastrukturen sind derzeit im Aufbau. Brennstoffzellensysteme weisen daher mit ihrem hohen elektrischen Wirkungsgrad und gutem Teillastverhalten ein

hohes Anwendungspotenzial auf. Im Wettbewerb mit alternativen Technologien wird der tatsächliche Einsatz jedoch eine Funktion von Gesamtwirkungsgraden und Systemkosten sein.

Die Analyse der Anwendungsbereiche von Brennstoffzellen ergab ein heterogenes Bild: Einem breiten Spektrum an Einsatzoptionen in den Sektoren Energie und Verkehr steht eine nur begrenzte Verfügbarkeit in den jeweiligen Märkten gegenüber. Mögliche Ursachen dafür dürften in bisher nicht vollständig überzeugenden Produkten sowie starken und etablierten Wettbewerbstechnologien liegen. Darüber hinaus haben sich die aus der Energiesystemtransition resultierenden Anforderungen eventuell noch nicht in konkreten Spezifikationen für geeignete Systemtopologien und zugehörigen Komponenten niedergeschlagen. Aufgrund ihrer technologiespezifischen Eigenschaften können Brennstoffzellen zur Stabilisierung und Absicherung von Verteilnetzen beitragen – sowohl in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) im Wohn- und Gewerbeumfeld und in der Versorgung von Rechenzentren als auch in der kleinskaligen Rückverstromung. Im Verkehr ist der Einsatz von Brennstoffzellen in Bussen und Lkw sinnvoll; die Marktanteile batterieelektrischer Anteile dominieren jedoch. Zukunftsweisende Einsatzoptionen bestehen außerdem in der Stromversorgung an Bord von Schiffen und Flugzeugen, entweder für den Hauptantrieb oder zur Bordstromversorgung. Aufgrund der Umstellung der Energieversorgung zu kohlenstofffreien Kraft- und Brennstoffen ist zukünftig überwiegend von einem direkten Wasserstoffbetrieb auszugehen. Trotz der aktuell herausfordernden Situation für das Thema „Brennstoffzelle“ sehen die Autoren daher für die Technologien der Brennstoffzelle gute Aussichten für einen zukünftig verstärkten Einsatz für die umweltfreundliche sowie effiziente Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung.

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1 Hintergrund und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
1.1 Historie	3
1.2 Herausforderungen der Energiewende	4
<b>2 Brennstoffzellen im zukünftigen Energiesystem</b>	<b>7</b>
2.1 Optionen und Herausforderungen	7
2.2 Rückverstromung	8
2.3 Kraft-Wärme-Kopplung	8
2.4 Off-Grid-Anwendungen	9
2.5 Schienen- und Straßenverkehr	10
2.6 Schifffahrt	11
2.7 Luftfahrt	12
2.8 Fazit	12
<b>3 Brennstoffauswahl und infrastrukturelle Passfähigkeit</b>	<b>14</b>
<b>Autorenteam aus dem VDI/VDE-Fachausschuss Wasserstoff und Brennstoffzellen</b>	<b>16</b>
<b>Schrifttum</b>	<b>17</b>

# 1 Hintergrund und Zielsetzung

Brennstoffzellen stehen für eine saubere und effiziente Stromerzeugung in vielfältigen Anwendungen. Dies gilt auch und besonders unter den Bedingungen der Energiewende. Gegenüber früheren Entwicklungswellen haben sich die Anwendungsschwerpunkte von Brennstoffzellen zum Teil deutlich verlagert und liegen heute verstärkt bei der dezentralen und flexiblen Stromerzeugung, der Kraft-Wärme-Kopplung sowie im Verkehrsbereich bei schweren Nutzfahrzeugen.

Ziel des vorliegenden Statusreports ist es, die Rolle der Brennstoffzellentechnologien angesichts vielfältiger Herausforderungen bei der Transformation des deutschen Energiesystems herauszuarbeiten. Dazu sollen potenzielle Einsatzfelder identifiziert und dem Stand der Brennstoffzellentechnik gegenübergestellt werden. Nachfolgend wird im Abschnitt 1.1 die Historie der Brennstoffzellenentwicklung kurz zusammengefasst, bevor im Abschnitt 1.2 auf die „große Linie“ der Energiewende eingegangen wird. Beide Elemente sind für die Herausarbeitung sinnvoller Anwendungsbereiche der Brennstoffzellen notwendig. Im weiteren Verlauf werden in Abschnitt 2 potenzielle Einsatzfelder abgeleitet, um diese anschließend über eine Diskussion der spezifischen Einsatzbedingungen zu plausibilisieren.

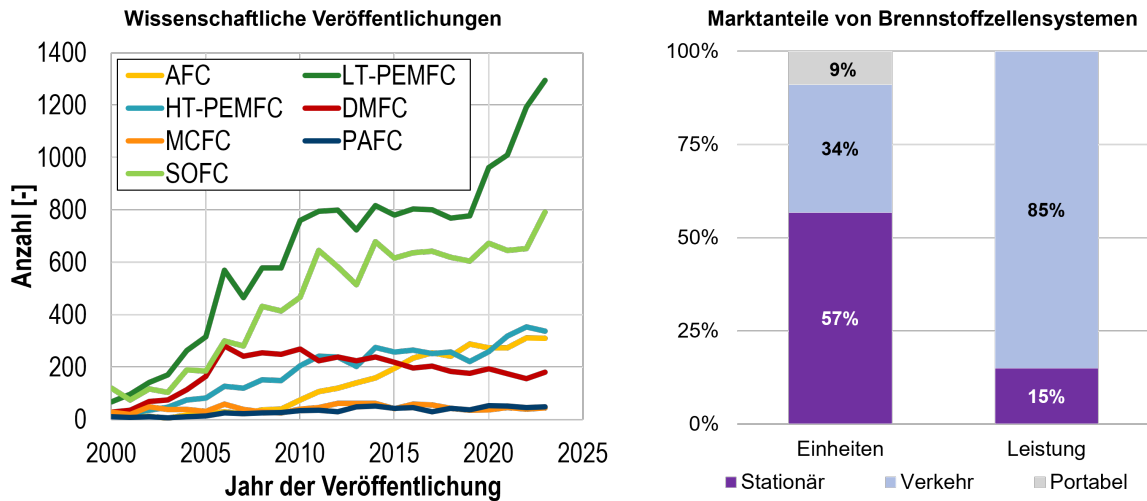
## 1.1 Historie

Die Beweggründe für die Entwicklung von Brennstoffzellen haben sich im Laufe der Zeit stark verändert. In der Raumfahrt zählten ab den 1960er-Jahren die hohen Leistungs- und Energiedichten sowie die – im Vergleich zu anderen Optionen – langen Lebensdauern der Brennstoffzellen zu den entscheidenden Vorteilen. Aktuell werden Brennstoffzellen für den Einsatz in der geplanten bemannten Artemis-Mission zum Mond entwickelt. [1; 2] Mit Beginn der 1990er-Jahre wurde der emissionsfreie Betrieb von Brennstoffzellensystemen ausschlaggebend für eine intensive Entwicklung elektrischer Fahrzeugantriebe mit Brennstoffzellen, insbesondere aufgrund der besonderen Abgasgesetzgebung in Kalifornien. Im Zuge dessen

wurden auch Brennstoffzellenantriebe mit Systemen zur Brenngaserzeugung zur Nutzung von Methanol und höheren flüssigen Kohlenwasserstoffen getestet. Aufgrund hoher Systemkomplexität und reduzierter Wirkungsgrade wurden solche Varianten letztlich nicht zur Marktreife entwickelt. Seither werden hauptsächlich Fahrzeuge mit Wasserstoff im Tank und Sauerstoff aus der Umgebungsluft zur Einsatzreife gebracht. Aktuelle Entwicklungen im maritimen Bereich greifen das Konzept der Nutzung von Methanol oder Ammoniak in Brennstoffzellen mit vorgelagerter Brenngaserzeugung wieder auf, da hier der Energiespeicherdichte hohe Bedeutung zukommt.

Seit Mitte der 2010er-Jahre wird ein deutlicher Wandel hin zu emissionsfreien Elektroantrieben mit Batterien vollzogen. Aufgrund der nochmals höheren Antriebs-effizienz, deutlicher Fortschritte der Batterietechnik hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte, spezifischer Kosten sowie einer inzwischen großen Modellvielfalt über nahezu alle Fahrzeugkategorien hinweg liegt hier derzeit der Schwerpunkt bei der Umsetzung der Antriebswende als Teil der Verkehrswende. Bei schweren Nutzfahrzeugen und Bussen hingegen werden in zunehmendem Maß und komplementär zu Elektroantrieben mit Batterien auch solche mit Brennstoffzellen eingesetzt.

Ausgelöst durch den Entwicklungsschub bei Brennstoffzellen für den Einsatz in Straßenfahrzeugen wurden seit Anfang der 2000er-Jahre weltweit zahlreiche Forschungs- und Umsetzungsprogramme initiiert, die ein breites Anwendungsspektrum adressieren: neben Fahrzeugantrieben insbesondere Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie portable Stromerzeuger. Das wissenschaftliche Interesse an den zugehörigen Technologien ist bis heute ungebrochen, wie Bild 1 (links) zeigt. Besonders hohe Publikationsraten lassen Niedertemperatur-Brennstoffzellen mit Polymermembran (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) und Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit keramischem Elektrolyten (solid oxide fuel cell, SOFC) erkennen. Für die wichtigsten Anwendungen zeigt Bild 1 (rechts) einen Marktüberblick.



**Bild 1. Wissenschaftliche Veröffentlichungen zum Thema Brennstoffzellen und Marktanteile von Brennstoffzellensystemen nach Anwendungsbereich (Literatursuche über <https://www.sciencedirect.com/>, „Advanced search“ fuel cell types mentioned in title, summary or author-specific keywords)**

AFC: alkaline fuel cell  
 HT: high temperature  
 LT: low temperature  
 PEMFC: proton exchange membrane fuel cell

MCFC: molten carbonate fuel cell  
 SOFC: solid oxide fuel cell  
 DMFC: direct methanol fuel cell  
 PAFC: phosphoric acid fuel cell

Seriengefertigte Pkw, Busse und Nutzfahrzeuge machen bezogen auf die Anzahl der verkauften Einheiten etwa ein Drittel aller Brennstoffzellensysteme weltweit aus und dominieren bezüglich der kumulierten elektrischen Leistung mit rund 85 %. Die heutige Gesamtflotte umfasst weltweit knapp 100.000 Fahrzeuge. [3] Der Schwerpunkt der entsprechenden Fahrzeugbestände liegt in Asien. Während Brennstoffzellen-Pkw besonders in Südkorea und Japan zu finden sind, verfügt China bei Nutzfahrzeugen und Bussen mit Brennstoffzellen über die bei Weitem höchsten Anteile von ca. 98 % beziehungsweise 82 % der weltweiten Flotte. [3]

Im Bereich der stationären Stromerzeugung ist vor allem der mithilfe des japanischen Regierungsprogramms ENE-FARM erreichte Bestand an Brennstoffzellensystemen in der Gebäudeenergieversorgung hervorzuheben. Dieser lag Ende 2024 bei 300.000 Geräten; der Zielwert für 2030 wird mit 5,3 Millionen Einheiten angegeben. [4] Investitionszuschüsse gibt es aktuell noch für Systeme mit SOFC-, jedoch nicht mehr mit PEMFC-Technologie. [4]

Es lässt sich festhalten, dass Brennstoffzellen für vielfältige Anwendungen im Verkehr sowie für den stationären und portablen Einsatz ent-

wickelt wurden. Aktuelle Marktdaten belegen, dass Brennstoffzellensysteme vor allem in der stationären Strom- und Wärmeversorgung, hier oft auch mit Erdgas, verwendet werden. Ein weiteres größeres Anwendungsfeld der Technologie ist der Verkehr. Seit einigen Jahren stellt sich das Potenzial im Fahrzeugeinsatz jedoch deutlich eingeschränkt dar und hat sich von Pkw zu schweren Nutzfahrzeugen und Bussen, Schiffen und Flugzeugen verschoben.

## 1.2 Herausforderungen der Energiewende

Nachfolgend soll, soweit für den vorliegenden Statusreport relevant, auf Energiewendeaspekte eingegangen werden. Ziel ist es, die grundsätzliche Richtung der Systemanpassungen darzustellen, insbesondere hinsichtlich zukünftiger Ausprägungen der Strom- und Wärmeerzeugung sowie der Energiespeicherung. Dafür werden auch Ergebnisse aus aktuellen Studien und Planungsdokumenten herangezogen, die sich mit der Dimensionierung von Systemkomponenten der zukünftigen Energieversorgung und -nutzung beschäftigen.

Zentrale Säule der Energiewende ist die Erzeugung und Nutzung von Strom aus Fotovoltaik- und Windkraftanlagen. Darüber hinaus werden

Geothermie und Biomasse verstärkt zum Einsatz kommen. Mit einer stark ausgebauten erneuerbaren Stromproduktion einher gehen ein forciertes Ausbau der elektrischen Übertragungs- und Verteilnetze, deutlich erhöhte Energiespeicherbedarfe sowie die Nutzbarmachung von Flexibilitätsoptionen in allen Bereichen des Stromversorgungssystems. Die großtechnische Nutzung von Wasserstoff wurde als zentrale Option der saisonalen Energiespeicherung und der Sektorenkopplung identifiziert. [5] In Kombination mit Batteriespeichern könnte der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung eine bedeutende Rolle als flexibles Element dezentraler Energieversorgungssysteme zukommen. Flankierende Maßnahmen liegen in den Bereichen Regulierung und Digitalisierung.

Um unnötig hohe Stromerzeugungskapazitäten zu vermeiden und auch die variablen Kosten der Energienutzung möglichst gering zu halten, werden Energieumwandlungsketten mit hoher Effizienz vorteilhaft sein. Daraus folgt, dass elektrische Energiebedarfe möglichst direkt aus erneuerbarer Stromproduktion zu bedienen sind und Optionen der kurzfristigen und insbesondere der saisonalen Speicherung sorgfältig und nahe am techno-ökonomischen Optimum priorisiert werden. Der Studienlage nach wird erwartet und durch aktuelle Trends bestätigt, dass beispielsweise im Verkehrssektor Elektrofahrzeuge mit Batterie sowie in der stationären

Wärmeversorgung vor allem Wärmepumpen von herausragender Bedeutung sein werden.

Insgesamt ist mit einer deutlich steigenden Stromnachfrage in Deutschland zu rechnen. Laut dem Netzentwicklungsplan der Bundesnetzagentur liegt der Mittelwert des erwarteten Bruttostromverbrauchs über die dort analysierten Szenarien hinweg bei 1160 Terawattstunden. [6] Zum Vergleich: Für das Jahr 2024 wird der Bruttostromverbrauch mit 518 Terawattstunden angegeben. [7] Bild 2 zeigt einen Studienüberblick zur erwarteten Stromerzeugung sowie zu den zugehörigen installierten Leistungen nach Stromerzeugungsart. Den Hintergrund der Analysen bildet jeweils die Erreichung der Treibhausgasziele der deutschen Bundesregierung.

Verfügbare Studien machen weiterhin deutlich, dass auch zukünftig Energieimporte notwendig sein werden. Leitungsgebundene Strom- und Gasversorgungssysteme werden dementsprechend durch weltweite Schifftransporte von Wasserstoff und dessen Derivaten Methanol, E-Fuels und gegebenenfalls Ammoniak ergänzt. Für ein „Zielprodukt“ Wasserstoff erscheint hinsichtlich der Wirkungsgrade und Kosten nur der Pfad über flüssigen Wasserstoff als wettbewerbsfähig. Weiterhin sprechen vor allem Sicherheitsaspekte gegen einen Einsatz von Ammoniak und Methanol im Bereich der Endanwendungen.

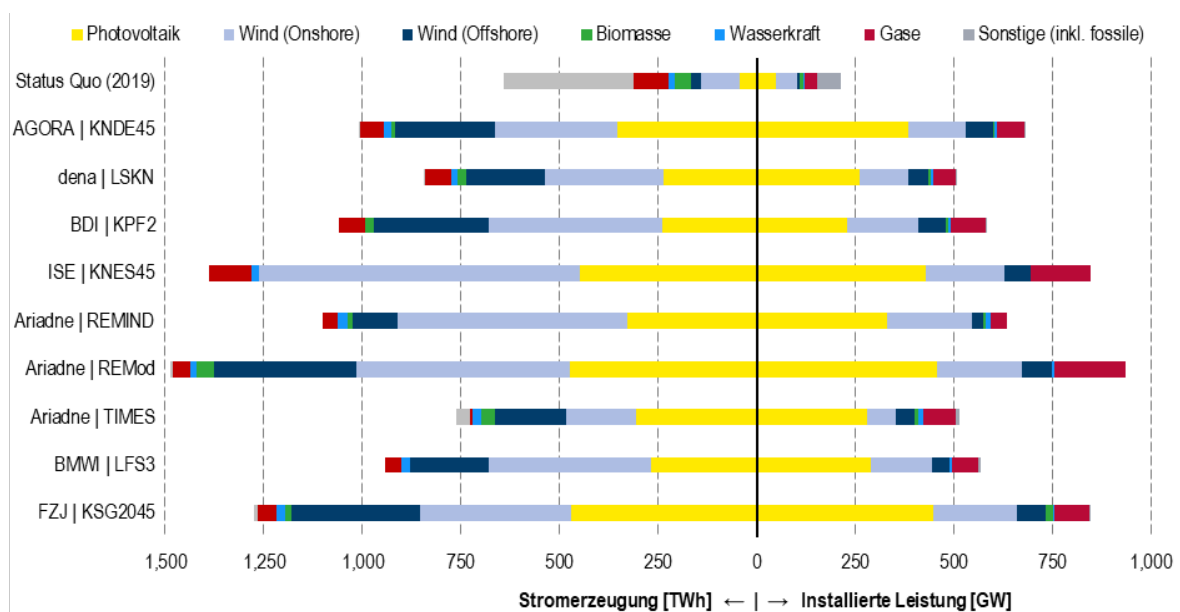


Bild 2. Balkendiagramm zum Studienvergleich bezüglich Stromerzeugung und installierter Leistungen nach Erzeugungsart, Speicherbedarfen (Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH)

## Fazit

Das zukünftige Energiesystem zeichnet sich durch eine starke Dominanz elektrischer Energie aus, deren Bedarf deutlich ansteigen wird und deren fluktuierendes Aufkommen saisonale Wasserstoffgroßspeicher, Batteriespeicher zur kurzfristigen Netzabsicherung und dezentrale Pufferspeicher erfordert. Das Stromnetz wird gegenüber heute deutlich höhere überregionale Transportkapazitäten aufweisen. Im Bereich der dezentralen Energieversorgung wird es bei einer vorzugsweise elektrischen Energienutzung deutlich stärker als gegenwärtig auf Flexibilität

und Effizienz ankommen. Auf die Energieträgerlogistik werden neue Aufgaben im Bereich des Imports und der Verteilung von gasförmigem und flüssigem Wasserstoff und seiner Derivate Ammoniak und Methanol zukommen, einschließlich der zugehörigen Umwandlungs- und Konditionierungsprozesse an den Anfangs- und Endpunkten überregionaler Transportsysteme. Brennstoffzellensysteme mit ihrem hohen elektrischen Wirkungsgrad und gutem Teillastverhalten weisen sowohl als Komponente stationärer Versorgungssysteme als auch im Verkehr ein hohes Anwendungspotenzial auf, das nachfolgend näher erläutert wird.

## 2 Brennstoffzellen im zukünftigen Energiesystem

Die bisherige Entwicklung hat die Eignung technischer Systeme mit Brennstoffzellen für die Umsetzung der Energiewende bereits bestätigt: Energiewandlung mit Brennstoffzellen findet bei hoher Effizienz statt, und direkte Emissionen sowohl von Kohlendioxid als auch lokal wirksamen Schadstoffen, werden vermieden oder deutlich reduziert. Speicherbare Energieträger auf Basis erneuerbarer Energien können in Form von Wasserstoff, aber auch synthetischen oder biogenen Brennstoffen eingesetzt werden. Bei Letzteren ist ein geeignetes System zur Brenngaserzeugung z.B. ein Reformier, erforderlich. Im Wettbewerb mit anderen Stromerzeugungsoptionen werden Lebensdaueranforderungen in vielen Anwendungen erfüllt, und auch die Kosten gelangen in den Bereich der Wettbewerbsfähigkeit. In zukünftigen Energiesystemen mit steigenden Anteilen erneuerbar erzeugter Energie werden insbesondere flexible Systeme erforderlich sein, die für die Zeiten mit geringer Erzeugung aus Windkraft und PV benötigt werden. Nachfolgend sollen die aus Autorsicht geeigneten Anwendungsbereiche für Brennstoffzellen erläutert werden, soweit sich eine energietechnische Relevanz ableiten lässt.

### 2.1 Optionen und Herausforderungen

Tabelle 1 listet sechs Einsatzfelder von Brennstoffzellen auf, für die eine Nutzung von Wasserstoff sowie weiterer erneuerbarer Brennstoffe infrage kommen. Unter „Einsatzcharakterisierung“ werden die prinzipiellen Anforderungen der jeweiligen Applikation zusammengefasst und in der Spalte „Wettbewerbstechnologie“ alternative technologische Lösungspfade aufgezeigt.

Für die Rückverstromung von Wasserstoff können Brennstoffzellen mit Leistungen im Megawattmaßstab als Alternative zu Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Größere Leistungen werden auch mittel- bis langfristig der Gasturbine vorbehalten bleiben. Im Wettbewerb mit Motor-Blockheizkraftwerken und netzgebundenen Versorgungsoptionen verfügen Brennstoffzellensysteme weiterhin über ein hohes Einsatzpotenzial in der Kraft-Wärme-Kopplung für unterschiedlichste Versorgungsaufgaben. Auch für Off-Grid-Anwendungen lassen sich entsprechende Anwendungsoptionen ableiten.

Tabelle 1. Potenzielle Einsatzfelder von Brennstoffzellensystemen im zukünftigen Energiesystem

Einsatzfeld	Einsatzcharakterisierung	Wettbewerbstechnologie
Rückverstromung	<< 1 GW, Netzdienstleistungen < 50 MW, kommunale Anwendung	Gasturbine (> 50 MW), Motor (< 100 MW)
KWK in Wohnumfeld, Gewerbe, Industrie, Rechenzentren	hohe Lastflexibilität und Teillastwirkungsgrad	Gasmotoren, Strom- und Wärmenetze, Wärmepumpe
Off-Grid-Anwendungen	<i>multi-fuel</i> , netzbildend	abhängig von der Leistung, Motor, Gasturbine
Landverkehr	Traktionsantrieb für Bahnen, Busse, Lkw	Batterie, Verbrennungsmotor
Schifffahrt	APU, Hauptantrieb	Motor, Gasturbine
Luftfahrt	APU, Hauptantrieb, höchste Verfügbarkeit gefordert	Gasturbine (LH <sub>2</sub> ) bei großen Leistungen und Reichweiten

APU: auxiliary power unit (Bordstromversorgung)

KWK: Kraft-Wärme-Kopplung

Im Verkehr liegen zukünftige Anwendungsmöglichkeiten nun zunehmend bei schweren Nutzfahrzeugen und Schienenfahrzeugen, wobei auch hier Elektroantriebe mit Batterie entwickelt werden. Bei Schiffen und Flugzeugen sind Brennstoffzellen kurz- bis mittelfristig für die Bordstromversorgung (APU) oder als Energiequelle für den Antrieb bei kleinen Leistungen geeignet, langfristig gegebenenfalls auch für den Hauptantrieb mittelgroßer Einheiten. Hohe Leistungsanforderungen werden hier auf absehbare Zeit noch mit Gasturbinen in der Luftfahrt und effizienten Motoren in der Schifffahrt bedient werden. Im Folgenden werden die Anwendungsbereiche laut Tabelle 1 näher erläutert und die potenzielle Rolle von Brennstoffzellensystemen wird herausgearbeitet.

## 2.2 Rückverstromung

Unter großtechnischer Rückverstromung wird die industrielle Stromerzeugung aus gespeicherten Brennstoffen verstanden, die zuvor aus erneuerbarem Strom erzeugt wurden. Hierbei geht es um Speicheroptionen, bei denen Batterietechnologien aufgrund hoher geforderter Speicherkapazitäten für eine saisonale Speicherung nicht darstellbar sind. Die Rückverstromung dient der Absicherung der Stromversorgung, aber auch der Gewährleistung der Netzstabilität. Entsprechende Anlagen kommen ab der Megawattklasse, insbesondere aber in der Gigawattklasse, zum Einsatz und unterstützen die Stabilisierung der Netzfrequenz durch schnelle Leistungsanpassung, die Bereitstellung hoher Kurzschlussströme und -leistungen. Im Falle von Blackouts unterstützen Rückverstromungsanlagen den schrittweisen Wiederaufbau der Stromversorgung (Schwarzstartfähigkeit).

Für Anlagen im Gigawattmaßstab werden im Rahmen der Kraftwerksstrategie [20] wasserstofffähige Gasturbinen zum Einsatz kommen. In der Megawattklasse hingegen können Brennstoffzellensysteme und Gasmotoren eingesetzt werden. Dokumentierte Entwicklungen, z. B. von Plug Power, beziehen sich auf den einstelligen Megawattbereich. [8] Eine Ausnahme davon bildet ein Ansatz von FuelCell Energy für eine 450-MW-Anlage zur Versorgung eines Rechenzentrums. Das entsprechende System nutzt die MCFC-Technologie und ist für Methan-

Wasserstoffgemische mit maximal 50 % Wasserstoff geeignet. [9] Für Leistungen im Gigawattmaßstab kommen insbesondere wasserstofffähige Gasturbinen zum Einsatz. Sie sind in naher Zukunft kein Einsatzgebiet für die Brennstoffzelle.

## 2.3 Kraft-Wärme-Kopplung

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) werden Brennstoffe mithilfe von Wärmekraftmaschinen oder elektrochemischen Generatoren umgesetzt, wobei Strom und Wärme direkt lokal oder mithilfe von Nah- und Fernwärmenetzen an entfernten Nutzungsorten bereitgestellt werden. Ziel ist es, durch eine möglichst hohe Wärmenutzung einen hohen Brennstoffnutzungsgrad zu erzielen. KWK-Anlagen konkurrieren grundsätzlich mit anderen Versorgungsoptionen der getrennten Strom- und Wärmeversorgung. Hier sei nochmals erwähnt, dass in Wärmeversorgungssystemen aus Effizienzgründen in zunehmendem Maß Wärmepumpen zum Einsatz kommen. Dabei sind auch hybride Systeme auf Basis der „kalten Fernwärme“ zu beachten, deren Vorlauftemperaturen im Bereich von 10 °C bis 25 °C liegen und bei denen eine Wärmepumpe am Nutzungsort Wärme oder Kälte bereitstellt.

Welcher Versorgungsoption jeweils der Vorzug gegeben wird, hing in der Vergangenheit überwiegend von den konkreten Einsatzbedingungen ab, unter anderem den Strom- und Wärmelastgängen, der jährlichen Gesamtenergienachfrage, den netzseitigen Bezugskosten und möglichen Förderbedingungen (z. B. laut dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz – KWKG). Im Zuge der Energiewende gewinnt nun zusätzlich die Anlagenflexibilität an Bedeutung, wobei durch einen systemorientierten Betrieb weitere Erlöse erzielt werden können, beispielsweise durch das Erbringen von Regelleistung. Weiterhin können Preissignale als Parameter der Optimierung des Betriebs herangezogen werden. Abgesehen davon bleiben jedoch die klassischen Kriterien von KWK-Technologien relevant, insbesondere der elektrische Wirkungsgrad, der Energienutzungsgrad und die Stromkennzahl.

Innerhalb der KWK-Technologien stehen Verbrennungsmotoren, Gasturbinen und Brennstoffzellensysteme im Wettbewerb. Relevante

elektrische Leistungsbereiche der KWK reichen von rund einem bis hin zu mehreren hundert Kilowatt (kWe). Eine feinere Unterteilung kann in Nano-KWK (bis 2,5 kWe), Mikro-KWK (bis 15 kWe) und Mini-KWK (bis 50 kWe) vorgenommen werden. Industrielle KWK reicht bis hin zu mehreren Hundert Kilowatt.

Im Wohn- und Gewerbeumfeld sind Brennstoffzellensysteme aufgrund des guten Teillastwirkungsgrads prinzipbedingt sehr gut für die Kraft-Wärme-Kopplung geeignet, gegebenenfalls in Kombination mit einem Batteriespeicher. Zu beachten sind die je nach eingesetzter Brennstoffzellentechnologie unterschiedlichen Temperaturniveaus bei der Wärmeauskopplung. Weiterhin können Brennstoffzellensysteme neben Wasserstoff auch mit Erdgas oder anderen gasförmigen oder flüssigen kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen betrieben werden. Je nach Brennstoffzellentechnologie ist damit ein unterschiedlich hoher technischer Aufwand verbunden. Im Fall der Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) erfolgt die Brenngaserzeugung teilweise im Brennstoffzellenstapel und erfordert dementsprechend lediglich einen vergleichsweise einfachen Vorreformer. Bei Niedertemperatursystemen mit Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) wird nach der Reformierung noch eine meist zweistufige Brenngasaufbereitung zur Entfernung von Kohlenmonoxid benötigt. Da Hochtemperatur-PEMFC eine höhere CO-Toleranz gegenüber der Niedertemperaturvariante aufweisen, ist die Brenngasaufbereitung hier deutlich weniger aufwändig. Die genannten Systeme zur Erzeugung und Anpassung von Brenngasen sind technisch aufwändig, gelten jedoch als Stand der Technik.

Brennstoffzellensysteme stehen in direktem Wettbewerb mit Blockheizkraftwerken (BHKW) auf Basis von Kolbenmotoren. Aufgrund hoher Stromkennzahlen sollten Brennstoffzellensysteme aus technischer Sicht zum einen wegen eines sinkenden Wärmebedarfs für KWK im Wohnumfeld und zum anderen für die Umsetzung von Netzdienstleistungen besser geeignet sein.

Im deutschen Markt werden KWK-Anlagen mit Brennstoffzellen insbesondere von der Firma Viessmann angeboten. Das Gerät VITOTALOR

300-P verfügt über eine PEM-Brennstoffzelle, die mit einem Gasbrennwertgerät kombiniert wird. Die elektrische Leistung liegt bei konstant 750 W; die maximale Wärmeleistung kann je nach Auslegung des Gasbrennwertgeräts bis zu rund 30 kW betragen. [10] Ein Gerät mit vergleichbarer Leistung ist der Dachs 0.8 (39 % elektrischer Wirkungsgrad, 93 % thermischer Wirkungsgrad), ebenfalls mit einer PEM-Brennstoffzelle. [11] Dieser scheint allerdings derzeit im Markt nicht verfügbar zu sein. Eine weitere interessante Lösung könnte sich aus dem Entwicklungsansatz der Firma Reverion ergeben. Hier werden Systeme entwickelt, die als „reversibles Kraftwerk“ Strom oder Wasserstoff erzeugen. Die Leistungen der zwei entwickelten Varianten betragen im Strom- und Wasserstoff-erzeugungsbetrieb 100 kWe und 300 kWe beziehungsweise 1000 kWe und 3000 kWe. Zum Einsatz kommen Hochtemperatursysteme auf Basis der SOFC-Technologie. Zielanwendungen sind die Verstromung von Biogas mit integrierter CO<sub>2</sub>-Abtrennung sowie die Speicherung von erneuerbarem Strom. [12]

Bezüglich der industriellen KWK sei auf die Ausführungen in Abschnitt 2.2 verwiesen. Demnach sind Brennstoffzellensysteme bis in den einstelligen Megawattbereich verfügbar. Es wird davon ausgegangen, dass sich solche Systeme auch zur KWK eignen, wobei für potenzielle Einsatzfälle besonders das Temperaturniveau der anfallenden Wärme beachtet werden muss.

Insgesamt ist die Anwendung von Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland bisher recht begrenzt. Ausgehend von einer Auswertung der ASUE dürfte die Zahl der installierten Anlagen mit rund 25.000 deutlich geringer sein als in Japan mit mehreren Hunderttausend Einheiten. [13]

## 2.4 Off-Grid-Anwendungen

Off-Grid-Anwendungen sind Anwendungen in Gebieten ohne Anbindung an Verteil- oder Übertragungsnetze. Dies können autarke, aus erneuerbaren Energien gespeiste Systeme sein, bei denen die Rückverstromung von zuvor gespeichertem Wasserstoff Versorgungsaufgaben ganz oder teilweise übernimmt. Sollte eine ausreichende Bevorratung von Wasserstoff nicht

möglich sein, kann dieser auch per Anlieferung bereitgestellt werden. Darüber hinaus sind weitere Brennstoffe einsetzbar. Brennstoffzellensysteme stehen auch hier im Wettbewerb mit Verbrennungsmotoren. Die Auswahl einer Versorgungstechnologie und die einer geeigneten Systemtopologie, gegebenenfalls inklusive elektrischer und thermischer Speicher, ist von den spezifischen Einsatzbedingungen abhängig, die ähnlich zur KWK stark variieren können. Auch die Brennstoffauswahl hat hier einen bedeutenden Einfluss. Im Falle des Einsatzes von Brennstoffzellensystemen wird, analog zur KWK, ein Brenngaserzeugungssystem benötigt, und auch bei Verbrennungsmotoren sind Systemanpassungen an den Betrieb mit unterschiedlichen Brennstoffen zu berücksichtigen.

Der Off-Grid-Anwendung ähnlich sind Netzersatzanlagen, die die Stromversorgung bei Ausfall des Versorgungsnetzes temporär übernehmen. Der Unterschied zur reinen Off-Grid-Anwendung liegt hier in den Zeiträumen, über die die Systeme nicht genutzt werden. Daher spielen hier Wartungsarbeiten, die turnusgemäß unabhängig von der Nutzung durchzuführen sind, kostenmäßig eine größere Rolle. Aufgrund der geringen Zahl beweglicher Komponenten können Brennstoffzellen hier gegenüber Motoren eventuell Kostenvorteile bieten. Der Markt könnte mit zunehmenden Sicherheitsanforderungen für die Versorgung kritischer Infrastruktur in Zukunft wachsen.

## 2.5 Schienen- und Straßenverkehr

Die aktuellen Entwicklungen im Bereich des Schienen- und Straßenverkehrs gehen im europäischen Raum vermehrt in Richtung batterieelektrischer Antriebe. Dies ist mit der technologischen Reife, der höheren Effizienz, den geringeren Kosten und dem jeweiligen Infrastrukturausbau begründbar. Im Folgenden werden die zugrundeliegenden Rahmenbedingungen für die einzelnen Verkehrsträger erläutert und die Eignung für Brennstoffzellenantriebe herausgestellt:

Im Straßenverkehr begünstigt das dichte Straßen- und Stromnetz in Mitteleuropa die derzeitige Verbreitung von Ladesäulen für elektrische Pkw und Lkw. Der technische Fortschritt hinsichtlich der Erhöhung von Reichweite sowie

der Reduktion von Ladezeit hat bisher bestehende Vorteile der Brennstoffzelle kompensiert, sodass im Pkw-Bereich der Einsatz von Brennstoffzellen fraglich geworden ist. Die zugehörige öffentliche Tankstelleninfrastruktur befindet sich derzeit im Rückbau. Im Lkw-Sektor und bei Bussen hingegen sind weiterhin Brennstoffzellen für Anwendungen mit hohem Energiebedarf vor allem bei schweren Nutzfahrzeugen mit hoher Reichweitenanforderung im Einsatz beziehungsweise in der Entwicklung. Die Erweiterung des Tankstellennetzes liegt derzeit im Fokus des Wasserstoffinfrastrukturaufbaus. [14]

Die Eignung des Brennstoffzellenantriebs im Schienenverkehr ist einsatz- und umfeldabhängig. Während dicht ausgebaute Streckennetze mit hohem Elektrifizierungsanteil mit Oberleitungen, wie sie in Mitteleuropa üblich sind, Batterieantriebe infrastrukturell begünstigen, besteht auf Märkten mit wenig verfügbarer Energieversorgungsinfrastruktur ein größeres Potenzial. Für Brennstoffzellenantriebe ergibt sich in folgenden Anwendungsbereichen des Schienenverkehrs eine Eignung:

- Mittlere bis hohe Eignung im Zustell- und Rangierdienst: Unregelmäßige Leistungsanforderungen im mittleren und geringen Umfang, häufige Stillstände und wenig regulärer Oberleitungskontakt erschweren die Batterienutzung und begünstigen Brennstoffzellenantriebe.
- Regionalverkehre mit niedrigen bis mittleren Geschwindigkeiten auf Strecken mit großer Entfernung und ohne bestehende oder geplante Elektrifizierung durch Oberleitung
- Güter- und Personenverkehr auf langläufigen Relationen und auf Strecken ohne Elektrifizierungsanteil oder -perspektive, beispielsweise in Nordamerika

Die individuelle Eignung der Technologie für ein konkretes Vorhaben ist von den vorliegenden Rahmenbedingungen wie dem Ausbauzustand des elektrischen Versorgungsnetzes abhängig und unterliegt infrastrukturellen und betrieblichen Randbedingungen. Zukünftige Einsatzmöglichkeiten der Brennstoffzelle im Schienenverkehr lassen sich jedoch für den Rangierbetrieb und Langstreckenverkehre in Flächenlän-

dern ableiten, soweit keine Streckenelektrifizierung vorhanden ist.

## 2.6 Schifffahrt

Die Diskussion der zukünftigen Energieversorgung von Schiffen wird maßgeblich von den Gesamtbetriebskosten (total cost of ownership, TCO), der typischen Betriebsreichweite, der Treibstoffverfügbarkeit und den Emissionen sowie regulatorischen Vorgaben getrieben. Die Betriebsflexibilität, beispielsweise in Form von redundanten und hybridisierten Systemen sowie Dual-Fuel-Treibstoffoptionen, wird oft als weiteres Entscheidungskriterium hinzugezogen. Sicherheitstechnische Aspekte ergeben sich meist aufgrund fehlender weltweiter Standards, geringer Technologieakzeptanz und hoher Umrüstkosten.

Neben dem Hauptantrieb ist oft eine zusätzliche Energieversorgung im Einsatz (auxiliary power unit, APU). Diese stellt Energie für das Bordnetz sowie den Betrieb von Hilfssystemen zur Verfügung und stellt die Energieversorgung bei abgeschaltetem Hauptantrieb, beispielsweise im Hafen, sicher. Typische Leistungsbereiche für den Hauptantrieb sowie die APU reichen jeweils von < 1 MW für Yachten, Binnen- und Küstenschiffe sowie > 20 MW für größere Schiffe, z.B. Container-, Spezial-, Tankschiffe und Fähren. Exemplarische detaillierte APU-Fallstudien können [15] entnommen werden, ein Vergleich wasserstoffbasierter Energieversorgungen [16].

Bezüglich des Einsatzes von Brennstoffzellen hat Samskip beispielsweise für das Jahr 2027 zwei Containerschiffe mit jeweils 3,2 MW Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellensystemen (PEMFC) und grünem Wasserstoff als Treibstoff beauftragt [17]. Treiber ist hierbei vor allem die Dekarbonisierung. Dieses Projekt verdeutlicht aber auch die technische Reife von Wasserstoff-basierten PEM-Brennstoffzellen auf Schiffen. [17]

Neben Wasserstoff werden Flüssigerdgas (liquefied natural gas, LNG), Methanol, Ammoniak, Flüssiggas (liquefied petroleum gas, LPG) und fortschrittliche Biokraftstoffe je nach Schiffstyp, Route und regulatorischem Kontext eine Rolle spielen [18; 19], um die seitens der International Maritime Organisation (IMO) vor-

gegebenen Dekarbonisierungsziele für die Schifffahrt erreichen zu können. Für 2030 bedeutet dies bereits den Einsatz von treibhausgasneutralen Treibstoffen vergleichbar zu 7 bis 48 Millionen Tonnen LSFO (low-sulfur fuel oil). [18] Dies entspricht einer installierten Leistung von mindestens 3,8 GW bei 40 % Wirkungsgrad und 24/7-Betrieb. Bei einem Emissionsfaktor von 3,2 beträgt die eingesparte CO<sub>2</sub>-Menge 22 bis 154 Millionen Tonnen. Bei Nutzung fossiler Brennstoffe soll im Jahr 2030 zusätzlich eine CO<sub>2</sub>-Speicherung mit an Bord befindlicher Kohlenstoffabscheidung zwischen 4 und 76 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> stattfinden. [18]

Seitens des Marine Environment Protection Committee (MEPC) der IMO wurden diese Dekarbonisierungsziele im Oktober 2025 vorerst nicht verabschiedet. Dies soll nun ein Jahr später erfolgen. Dennoch wird an den Zielen weiterhin festgehalten. Zahlreiche Finanzierungsmöglichkeiten unterstützen dies, u.a.:

- Green Shipping Fund (GSF): privater Schuldenfonds mit 420 Millionen Euro zur Finanzierung von emissionsarmen und -freien Schiffen sowie für Nachrüstungen
- Zero-Emission Waterborne Transport (ZEWT): öffentlich-private Partnerschaft im Rahmen des Programms Horizon Europe mit 530 Millionen Euro für die Forschung und Innovation für den emissionsfreien Wassertransport
- MARITIME.zeroGHG: ein Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz mit 300 Millionen Euro für die Entwicklung und praktische Anwendung klimafreundlicher Technologien

Innerhalb der IMO steht weiterhin die Einrichtung des International Maritime Research Fund (IMRF) mit 5 Milliarden USD zur Diskussion. Die genannten Förderprogramme sind nicht technologiespezifisch, adressieren jedoch Treibstoffe und Energiewandler. In diesem Zusammenhang dürften auch Entwicklungsprojekte zu Brennstoffzellensystemen eine Rolle spielen.

Die zukünftige Energieversorgung von Schiffen bietet damit Chancen für Brennstoffzellen aufgrund ihrer sehr niedrigen Emissionen, einschließlich der Geräuschemissionen, und hohen

Wirkungsgrade. Bei kleinen Leistungen können Brennstoffzellensysteme bereits kurzfristig für den Hauptantrieb infrage kommen und werden z. B. im Fährverkehr sowie auf Binnengewässern und in Häfen derzeit erprobt. In Container- und Kreuzfahrtschiffen mit erheblichen Antriebsleistungen sind Brennstoffzellen derzeit eher als Hilfsenergiesysteme geeignet und könnten mittelfristig zur Verfügung stehen. Ein regelmäßiger Einsatz zur Versorgung des Hauptantriebs in diesen Schiffsklassen ist eher langfristig zu sehen.

## 2.7 Luftfahrt

Analog zur Schifffahrt sind Brennstoffzellenantriebe bei kleinen Flugzeugen heute bereits als Prototypen realisiert und werden technisch erprobt. Aktuelle Entwicklungen deuten auf eine mittelfristige Verfügbarkeit von brennstoffzellenbetriebenen Flugzeugen bis maximal 100 Sitzplätzen. Die notwendige elektrische Leistung dürfte 2 MW und mehr betragen. Dabei sollten Reichweiten von 1.000 km bis 1.500 km möglich sein. Darüber hinaus sind Entwicklungen von unbemannten Flugzeugen mit Brennstoffzellen bekannt. Verkehrsflugzeuge im Mittel- bis Langstreckenbetrieb und mit entsprechenden Passagierkapazitäten werden voraussichtlich auch langfristig mit Strahltriebwerken angetrieben werden. In solchen Flugzeugen könnten Brennstoffzellen als Ersatz des Hilfstriebwerks (APU) eingesetzt werden. Entsprechende Systeme mit Leistung von 100 kW und mehr werden derzeit entwickelt und getestet. Als Kraftstoff für Brennstoffzellen wird in den bekannt gewordenen Entwicklungen überwiegend von Wasserstoff ausgegangen. Die Nutzung der in der Luftfahrt üblichen flüssigen Kraftstoffe ist technisch machbar, führt jedoch zu erheblich geringeren Leistungsdichten und ist daher in dieser Anwendung nicht zu erwarten. Dementsprechend wird der Einsatz von flüssigem Wasserstoff (liquefied hydrogen, LH<sub>2</sub>) favorisiert. In diesem Fall werden die Möglichkeiten der Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle hinsichtlich Leistungsdichte und Wirkungsgrad voll ausgeschöpft. Die derzeit geringe Betriebstemperatur, die eine Auskopplung der Wärme bei nicht mehr als 80 °C ermöglicht, stellt jedoch eine Herausforderung für das Wärmemanagement dar. Ansätze, dem zu begegnen, sind die Erhöhung der Betriebstemperatur,

z. B. durch Nutzung verbesserter Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen wie im EU-Vorhaben NIMPHEA im Rahmen des Clean Hydrogen Joint Undertaking verfolgt, oder durch die Anhebung der Effizienz durch deutliche Anhebung der Einzelspannungen am Betriebspunkt. Brennstoffzellentechnologien werden im neu ausgerichteten Luftfahrtforschungsprogramm explizit adressiert. [21] Brennstoffzellentechnologien für die Luftfahrt werden ebenso in den EU Joint Undertakings zu Clean Aviation (CAJU) und Green Hydrogen (CleanH<sub>2</sub>-JU) adressiert. Die Ausführungen in diesem Abschnitt machen deutlich, dass zahlreiche Anknüpfungspunkte für den Einsatz von Brennstoffzellen in der Luftfahrt bestehen, diese jedoch aufgrund langwieriger Entwicklungs- und Freigabeprozesse nicht kurzfristig umsetzbar sein werden. Die Versorgung elektrischer Bordnetze sowie der Antriebe von Kleinflugzeugen könnte mittelfristig erfolgen, während der Einsatz in Mittelstreckenflugzeugen eher langfristig zu sehen ist.

## 2.8 Fazit

Die Betrachtung von Anwendungsbereichen von Brennstoffzellen ergibt ein heterogenes Bild, das einerseits durch ein breites Spektrum an Optionen in der stationären Strom- und Wärmeerzeugung sowie im Verkehr geprägt ist, in dem andererseits jedoch eine nur begrenzte Vermarktung erfolgt. Ursachen mögen in einer noch nicht überzeugenden Erfüllung von Produktanforderungen sowie in einem starken Wettbewerbsumfeld liegen. Im stationären Einsatz ist darüber hinaus die Transformation hin zu einem von erneuerbarem Strom dominierten Energiesystem zu beachten, mit ausgeprägten Anforderungen an Flexibilitäten sowohl auf der Erzeugungs- als auch der Verbraucherseite. Hier könnten Systeme mit Brennstoffzellen aufgrund ihres hocheffizienten, emissionsfreien, und geräuscharmen Betriebs zur Stabilisierung und Absicherung in Verteilnetzen beitragen. Dies gilt auch in den überlappenden Bereichen der Kraft-Wärme-Kopplung und Rückverstromung. Im Verkehr hingegen ist besonders der Wettbewerb mit batterieelektrischen Antrieben zu beachten. Im Straßenverkehr wurden Brennstoffzellen in Europa bereits weitgehend aus dem Pkw-Segment verdrängt; sie werden aktuell in begrenztem Umfang in Bussen und Lkw eingesetzt. In Schiffen und Flugzeugen wird der

Einsatz als Hauptantrieb in kleineren Einheiten aktuell erprobt. Für Langstreckenverkehrsflugzeuge und Hochseeschiffe werden wohl auch längerfristig Strahltriebwerke beziehungsweise Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, während Brennstoffzellen die Aufgabe der Bordstromversorgung übernehmen könnten. Brenn-

stoffzellensysteme werden dabei, von Ausnahmen in der stationären Stromerzeugung abgesehen, überwiegend für die direkte Wasserstoffnutzung entwickelt. Dies stellt einerseits die lokale Emissionsfreiheit sicher, andererseits sind diese Systeme effizienter und verfügen über eine höhere Leistungsdichte.

### 3 Brennstoffauswahl und infrastrukturelle Passfähigkeit

Brennstoffzellensysteme im direkten Wasserstoffbetrieb sind hinsichtlich Kosten, Wirkungsgrad und Dynamik grundsätzlich zu bevorzugen. Dementsprechend haben sie sich bislang im mobilen Einsatz besonders bewährt. In stationären Systemen überwiegen bislang Systeme mit Erdgas, das über bestehende Netze gut verfügbar ist. Darüber hinaus wurden in der Vergangenheit mehrere Varianten der Brenngaserzeugung aus weiteren Kohlenwasserstoffen, wie Methanol oder Diesel, getestet und in unterschiedlichen Produktstadien entwickelt. Neuere Entwicklungen beruhen auf der weltweiten Perspektive von Wasserstoff als erneuerbar erzeugtem Energieträger aus Regionen mit einem entsprechend hohen Potenzial. Neben Flüssigwasserstoff sind dabei insbesondere Ammoniak, Methanol und flüssige organische Wasserstoffträger (liquid organic hydrogen carriers, LOHC) Gegenstand aktueller Entwicklungen. Unter der Maßgabe, dass Wasserstoff genutzt wird, variiert die techno-ökonomische Performance dieser Optionen zum Teil sehr deutlich, insbesondere aufgrund der jeweils notwendigen Prozessschritte, regionaler Bedingungen in der Herkunftsregion und der Transportentfernung.

Ausgehend von den genannten Energieträgeroptionen werden aktuell Systeme mit Ammoniak und LOHC entwickelt. Beispiele dafür sind:

- EU-gefördertes Projekt ShipFC: 2 MW SOFC im Betrieb mit Ammoniak. Das Projekt ruht allerdings seit Februar 2025, da ein neuer Anbieter für die SOFC gesucht wird.

- Am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS wird ein ammoniakbetriebenes SOFC-System mit 2,3 kW Leistung getestet.
- Als Teil des Helmholtz Hydrogen Clusters wird ein 100 kW SOFC-System zunächst mit Erdgas und im Weiteren auch mit Wasserstoff betrieben, der aus LOHC zurückgewonnen wird.

Die Autoren gehen davon aus, dass Brennstoffzellensysteme auch zukünftig weit überwiegend direkt mit Wasserstoff betrieben werden. Dies steht im Einklang mit den Planungen zum Aufbau von Wasserstoffinfrastrukturen, die heute bereits punktuell bestehen. Eine flächendeckende Versorgung wird mit dem Aufbau des Wasserstoff-Kernetzes in Deutschland sowie des European Hydrogen Backbone in Europa angestrebt. Davon ausgehende Verteilnetze sind abhängig von den regionalen Nutzenden und werden je nach Bedarf ausgebaut. Darüber hinaus könnte Methan weiterhin eine Rolle spielen; in abnehmendem Maß als Erdgas und möglicherweise auch langfristig als Biogas. Sollten Ammoniak und Methanol zukünftig eine substantielle Rolle in der Energieträgerlogistik einnehmen, ist aufgrund sicherheitsrelevanter Eigenschaften nicht von einer Nutzung beim Endverbraucher auszugehen. Die Autorensicht bezüglich zukünftig relevanter Kombinationen aus Anwendung, Brennstoffzellentechnologie und Brennstoff kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2. Einschätzung hinsichtlich Einsatzpotenzial von Brennstoffzellenanwendungen gemäß Tabelle 1.  
 Zeithorizont: kurzfristig: ≤ 5 Jahre, mittelfristig: ≤ 10 Jahre, langfristig: > 10 Jahre

Einsatzfeld	Technologie	Brennstoff	Zentraler Nutzen	Zentrale Herausforderungen	Zeithorizont
Rückverstromung	PEMFC	H <sub>2</sub>	Effizienz, Flexibilität	Kosten, Skalierung	mittelfristig
KWK (Wohngebäude, Gewerbe, Industrie, Rechenzentren)	PEMFC	H <sub>2</sub>	Effizienz, Flexibilität	Kosten	kurzfristig
	PEMFC/indirekt	Erdgas	Übergangstechnologie	Kosten	kurzfristig
	SOFC	Erdgas, H <sub>2</sub>	Effizienz	Kosten, Haltbarkeit, Skalierung	kurzfristig
Off-Grid	PEMFC	H <sub>2</sub>	Effizienz	Kosten	kurzfristig
	PEMFC/indirekt	Erdgas, Biogas, LPG	Effizienz	Kosten	kurzfristig
	SOFC	Erdgas, Biogas	Effizienz	Kosten, Haltbarkeit, Skalierung	mittelfristig
Busse und Lkw	PEMFC	H <sub>2</sub>	Reichweite, Emissionsfreiheit	Kosten	verfügbar
Schienenverkehr	PEMFC	H <sub>2</sub>	oberleitungsfrei	Kosten	verfügbar
Schifffahrt „klein“/„küstennah“ bzw. mittlere Reichweiten, Antrieb und APU	PEMFC	H <sub>2</sub>	Effizienz, Emissionsfreiheit	Kosten, H <sub>2</sub> -Infrastruktur	kurzfristig
Schifffahrt „große Reichweiten“, Antrieb und APU	HT-PEMFC, MCFC, SOFC	NH <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> OH	niedrige Emissionen	Kosten, Systementwicklung	mittelfristig
Luftfahrt, APU	PEMFC	?	niedrige Emissionen	Systementwicklung	mittelfristig
Luftfahrt „klein“, Antrieb	PEMFC	H <sub>2</sub>	Effizienz, Emissionsfreiheit	gravimetrische Leistungsdichte, Thermomanagement	mittelfristig
Luftfahrt „mittelgroß“, Antrieb	PEMFC, HT-PEMFC	H <sub>2</sub>	Effizienz, Emissionsfreiheit	Leistungsdichte, H <sub>2</sub> -Speicherung	langfristig

# Autorenteam aus dem VDI/VDE-Fachausschuss Wasserstoff und Brennstoffzellen

Dr. Carsten Cremers

Torsten Brandt

Dr. Thomas Grube

Dipl.-Ing. Martin Pokojski

Erik Wolf

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla

# Schrifttum

- [1] *Jakupca, Ian*: Introduction to NASA Applications using Fuel Cell and Electrolysis Technologies. Online: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210025356/downloads/RFC%20-%20NREIP%20Presentation%20-%2020211202.pdf> (abgerufen am 04.03.2026)
- [2] *Wilson, Matthew*: Blue Origin and Nimbus Power Systems Successfully Complete Simulated Launch Test of Fuel Cells for Life Support in Space. Nimbus Power Systems. Online: <https://www.nimbuspower-systems.com/2026/01/13/blue-origin-and-nimbus-power-systems-successfully-complete-simulated-launch-test-of-fuel-cells-for-life-support-in-space/> (abgerufen am 19.02.2026)
- [3] *Grube, Thomas; Sander, Marietta*: Deployment of Fuel Cell Vehicles in Road Transport and the Expansion of the Hydrogen Refueling Station Network, Energy & Environment (Nr. 678). Jülich/Germany: Forschungszentrum Jülich GmbH, 2025
- [4] *Ohno, Teruyuki; Nishida, Yuko; Ishihara, Toshikazu; Hirose, Akiko*: Re-examining Japan's Hydrogen Strategy: Renewable Energy Institute, 2022
- [5] Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: Deutsche Bundesregierung, 2023
- [6] Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045, Version 2025, 1. Entwurf. Berlin, 2025
- [7] BDEW e.V.: Die Energieversorgung 2024 – Jahresbericht. Online: [https://www.bdew.de/media/documents/Die\\_Energieversorgung\\_2024\\_Update\\_Chartsatz\\_FINAL\\_1.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/Die_Energieversorgung_2024_Update_Chartsatz_FINAL_1.pdf) (abgerufen am 04.03.2026)
- [8] Plug Megawatt Scale Fuel Cell Power Generation Brochure – North America. Online: <https://resources.plugpower.com/generate-stationary-power-fuel-cell/plug-megawatt-scale-fuel-cell-power-generation-brochure-north-america>. (abgerufen am 19.02.2026)
- [9] FuelCell Energy partners with SDC to deploy up to 450 MW of fuel cells across data centers globally. Online: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/fuelcell-energy-partners-with-sdc-to-deploy-up-to-450mw-of-fuel-cells-across-data-centers-globally/>. (abgerufen am 19.02.2026)
- [10] Vitovalor Brennstoffzellenheizung: Überblick. Online: <https://www.viessmann.de/de/produkte/brennstoffzelle/vitovalor-familie.html> (abgerufen am 19.02.2026)
- [11] Infoblatt-Dachs-0.8. Online: <https://www.senertec.de/wp-content/uploads/2019/05/4797-313-003-Infoblatt-Dachs-0.8.pdf>. (abgerufen am 19.02.2026)
- [12] Wasserstoff-Kraftwerke von Reverion: 75 % Round-Trip-Effizienz. Online: <https://reverion.com/wasserstoff-kraftwerke/> (abgerufen am 19.02.2026)
- [13] ASUE: Brennstoffzellen. Online: <https://www.asue.de/themen/kraftwaerme-kopplung/brennstoffzellen>. (abgerufen am 19.02.2026)
- [14] H2 MOBILITY führt Transformationsprozess fort: Von Wasserstofftankstellen der ersten Generation hin zu neuen leistungsstarken Tankstellen | H2.LIVE. Online: <https://h2.live/news/4027/>. (abgerufen am 19.02.2026)
- [15] Fuel Cell Technologies and Applications for Deep-Sea Shipping. Maersk Zero Carbon Shipping. Online: [www.zerocarbonshipping.com/publications/fuel-cell-technologies-and-applications-for-deep-sea-shipping](http://www.zerocarbonshipping.com/publications/fuel-cell-technologies-and-applications-for-deep-sea-shipping). (abgerufen am 19.02.2026)
- [16] *Laursen, R.; Patel, H.; Dowling, M.; Ji, C.; Nelissen, D.; Királi, J.; Van der Veen, R.; Pang, E.*: Potential of Hydrogen as fuel for shipping: European Maritime Safety Agency, 2023
- [17] Samskip 2024 Sustainability Report. Online: <https://sustainability.samskip.com/>. (abgerufen am 19.02.2026)

- [18] DNV (2024) Maritime Forecast to 2050
- [19] Laursen, R.; Barcarolo, D.; Patel, H.; Dowling, M.; Penfold, M.; Faber, J.; Királi, J.; Van der Veen, R. et al.: Potential of Ammonia as Fuel in Shipping: European Maritime Safety Agency, 2023
- [20] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE): Grundsatzvereinbarung mit der Europäischen Kommission über Eckpunkte der Kraftwerksstrategie. Online: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2026/01/20260115-grundsatzvereinbarung-mit-europaeischen-kommissionueber-eckpunkte-der-kraftwerksstrategie.html> (abgerufen am 19.02.2026)
- [21] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE): Neuausrichtung Luftfahrtforschungsprogramm LuFo –10 Handlungsfelder für eine zukunftsfähige Luftfahrtforschung, 22.12.2025

Engineer  
your future -  
with us

Jetzt  
3 Monate  
kostenlos  
testen

## Gestalten Sie mit uns die Welt von morgen.

Als größte Technik-Community mit rund 125.000 Mitgliedern in Deutschland bringen wir das Wissen, die Ideen und die Leidenschaft von Ingenieurinnen und Ingenieuren zusammen – für eine lebenswerte, nachhaltige und innovative Zukunft.

Mit Ihrer Mitgliedschaft im VDI werden Sie Teil eines starken Netzwerks, das nicht nur verbindet, sondern bewegt. Und Sie profitieren von zahlreichen Vorteilen, die Sie persönlich und beruflich weiterbringen:



### Networking

- Mitwirkung und Austausch in aktiven Netzwerken
- Passgenaue Weiterbildungsmöglichkeiten



### Wissen

- Zahlreiche Webinare
- VDI nachrichten
- Kostenfreie Fachzeitschriften
- Exklusiver Newsletter: das VDI-Update



### Beratung

- Individuelle Karriereberatung
- Job- & Praktikumsbörse
- Zugang zum VDI-Career Center



### Community

- Interessante Exkursionen
- Große Kongresse
- Spannende Soft-Skills-Seminare



#### Jetzt kostenlos Mitglied werden:

1. QR-Code scannen oder auf [vdi.de/mitglied](https://vdi.de/mitglied) gehen
2. Mitgliedsantrag ausfüllen und den Aktionscode **TGC** eintragen

## Über den VDE

Der VDE, eine der größten Technologie-Organisationen Europas, steht seit mehr als 130 Jahren für Innovation und technologischen Fortschritt. Als einzige Organisation weltweit vereint der VDE dabei Wissenschaft, Standardisierung, Prüfung, Zertifizierung und Anwendungsberatung unter einem Dach. Das VDE Zeichen gilt seit mehr als 100 Jahren als Synonym für höchste Sicherheitsstandards und Verbraucherschutz.

Wir setzen uns ein für die Forschungs- und Nachwuchsförderung und für das lebenslange Lernen mit Weiterbildungsangeboten „on the job“. Im VDE Netzwerk engagieren sich über 2.000 Mitarbeitende an über 60 Standorten weltweit, mehr als 100.000 ehrenamtliche Expertinnen und Experten und rund 1.500 Unternehmen gestalten im Netzwerk VDE eine lebenswerte Zukunft: vernetzt, digital, elektrisch. Wir gestalten die e-diale Zukunft.

Sitz des VDE (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e.V.) ist Frankfurt am Main. Mehr Informationen unter [www.vde.com](http://www.vde.com)

## Der VDI

### Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Seit mehr als 165 Jahren gibt der VDI wichtige Impulse für den technischen Fortschritt. Mit seiner einzigartigen Community und seiner enormen Vielfalt ist er Gestalter, Wissensmultiplikator, drittgrößter technischer Regelsetzer und Vermittler zwischen Technik und Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Er motiviert Menschen, die Grenzen des Möglichen zu verschieben, setzt Standards für nachhaltige Innovationen und leistet einen wichtigen Beitrag, um Fortschritt und Wohlstand in Deutschland zu sichern. Der VDI gestaltet die Welt von morgen – als Schnittstelle zwischen Ingenieurinnen und Ingenieuren, Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. In seinem einzigartigen multidisziplinären Netzwerk mit rund 125.000 Mitgliedern bündelt er das Wissen und die Kompetenzen, die nötig sind, um den Weg in die Zukunft zu gestalten.



VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.  
VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt  
Kevin Hares  
Tel. +49 211 6214-644  
dessel@vdi.de  
www.vdi.de

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik und  
Informationstechnik e.V.  
Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG)  
Tel. +49 69 6308-346  
etg@vde.com