

Nutzung von Wasserstoff zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraft

Marc Schumann*, Detlef Schulz

Professur für Elektrische Energiesysteme

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Hamburg, Deutschland

*marc.schumann@hsu-hh.de

Kurzfassung – Die Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff kann zukünftig einen großen Beitrag für eine dekarbonisierte Energieversorgung leisten. Dabei wird schon heute Wasserstoff z. B. über Brennstoffzellen in verschiedenen Anwendungen zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kraft eingesetzt. Brennstoffzellen substituieren somit bereits jetzt konventionelle Energiewandler sowohl in stationären als auch in mobilen Anwendungen. Für eine breitere Einführung von Brennstoffzellen sind noch Verbesserungen in wesentlichen Punkten, wie eine Kostenreduzierung und die Erhöhung der Lebensdauer und der Leistungsdichte, notwendig. Derartige Verbesserungen erfordern eine gezielte Förderung von Forschung und Entwicklung. Für die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen wurden für die speziellen Verwendungsfälle bereits entsprechende Entwicklungsziele definiert, um einer marktrelevanten Einführung näherzukommen. Darüber hinaus bestehen auch Hemmnisse bei der breiten Markteinführung durch die bestehenden Gesetze und Richtlinien sowie der noch fehlenden Wasserstoffinfrastruktur, die im Wesentlichen über eine politische Steuerung positiv beeinflusst werden können.

Stichworte – Norddeutschland, Brennstoffzellentechnologien, Projekte, Forschungsfelder, Potentiale

NOMENKLATUR

AFC	Alkaline Fuel Cell (engl. für Alkalische Brennstoffzelle)
BHKW	Blockheizkraftwerk
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (engl. für Schmelzkarbonatbrennstoffzelle)
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (engl. für Phosphorsäurebrennstoffzelle)
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (engl. für Protonenaustauschmembranbrennstoffzelle bzw. Polymerelektrolytbrennstoffzelle)
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (engl. für Festoxidbrennstoffzelle)

I. EINLEITUNG

Die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien über den Stromsektor hinaus in den Sektoren Wärme und Mobilität, kann durch die Kopplung der Versorgungsstrukturen erreicht werden. Wasserstoff als gut speicher- und transportierbares Medium eignet sich hervorragend für diese Rolle. Erneuerbarer Wasserstoff aus dem Elektrolyseprozess kann nicht nur industriell genutzt werden. Seine energetische Verwendung erlaubt die Integration eines erneuerbar produzierten Überschusses in die weiteren Verbrauchssektoren. Darüber hinaus eignet sich Wasserstoff für die Speicherung und spätere Rückverstromung elektrischer Energie. Für diesen Zweck ist die Brennstoffzellentechnologie hervorragend geeignet. Mittels dieser kann Wasserstoff zu einem beliebigen Zeitpunkt in elektrische Energie zurückgewandelt werden. Zudem werden Brennstoffzellen auch zur Erzeugung thermischer Energie genutzt. In den folgenden Abschnitten wird die Brennstoffzellentechnologie eingeführt und aktuelle Projekte in Norddeutschland vorgestellt. Anschließend werden die Chancen, Hemmnisse und Risiken präsentiert sowie zukünftige Entwicklungen und Optimierungspotentiale von Brennstoffzellen aufgezeigt.

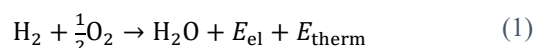
II. AKTUELLER STAND, TECHNOLOGIEN, WIRKUNGSGRAD

Im Folgenden wird die Brennstoffzelle als Technologie zur energetischen Nutzung von Wasserstoff eingeführt, der Aufbau und das Funktionsprinzip beschrieben, der aktuelle Stand der Technologie präsentiert und Anwendungsbereiche angegeben. Anschließend werden einige bereits realisierte und sich aktuell in der Umsetzung befindliche Projekte in Norddeutschland aufgeführt.

A. Brennstoffzellentechnologie

1) Aufbau und Funktionsprinzip

Die Brennstoffzellentechnologie wandelt zumeist Wasserstoff und Sauerstoff nach Gleichung (1) in Wasser, elektrische Energie E_{el} und thermische Energie E_{therm} um:



Klassischerweise werden in einer Brennstoffzelle die Gase an zwei verschiedenen Elektroden, die Anode und die Kathode, herangeführt, welche durch einen gasundurchlässigen und elektrisch isolierenden Elektrolyten voneinander getrennt sind. Über Bipolarplatten mit Strömungsfeld werden die Gase über die Fläche der Brennstoffzelle verteilt. Anschließend durchströmen sie

Gasdiffusionslage und Katalysatorschicht und erreichen den Reaktionsraum an der Membran. Gasdiffusionslage und Katalysatorschicht bilden zusammen die Elektrode. Welche internen Reaktionen an den Elektroden ablaufen und auf welchem Temperaturniveau die thermische Energie bereitgestellt wird, hängt von der verwendeten Art der Brennstoffzelle ab. ABBILDUNG 1 zeigt die typischen Brennstoffzellen auf und klassifiziert diese einerseits nach dem verwendeten Elektrolyten, andererseits nach dem vorherrschenden Temperaturniveau [1].

Die unterschiedlichen Brennstoffzellentechnologien unterscheiden sich aufgrund des verwendeten Elektrolyten und Temperaturniveaus, aber auch aufgrund unterschiedlicher Forschungsschwerpunkte, in einigen technischen Merkmalen. In TABELLE I sind die wesentlichen Merkmale und typische Anwendungsbereiche zusammengefasst.

TABELLE I: ÜBERSICHT ÜBER TECHNISCHE MERKMALE UND ANWENDUNGSBEREICHE DER BRENNSTOFFZELLENTechnologien [2], [3].

BZ-Typ	El. Wirkungsgrad in %	Investitions-kosten in USD/kW _{el}	Lebenserwartung in h	Anwendungs-bereiche
AFC	50 – 60	200 – 700	5.000 – 8.000	Raumfahrt, U-Boote
PEMFC	30 – 60	3.000 – 4.000	40.000 – 60.000 (stationär) 5.000 (mobil)	Fahrzeuge, Raumfahrt, KWK, USV, Haushalt
PAFC	30 – 40	4.000 – 5.000	30.000 – 60.000	BHKW
MCFC	55 – 60	4.000 – 6.000	20.000 – 40.000	Grundlast-Kraftwerke, KWK
SOFC	50 – 70	3.000 – 4.000	bis 90.000	Grundlast-Kraftwerke, KWK, Haushalt, BHKW

2) Anwendungsbereiche

Brennstoffzellen ersetzen schon heute konventionelle Technologien in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen. Im Folgenden werden diese, unterteilt nach stationären und mobilen Anwendungen, aufgeführt.

a) Stationäre Anwendungen

Für stationäre Anwendungen von Brennstoffzellen finden sich heute bereits insbesondere Verwendungen im Bereich der Heizbedarfsdeckung von Wohngebäuden [4]. Darüber hinaus werden sie auch in der Notstromversorgung von kritischen Infrastrukturen [5] und bei Anlagen mit größeren Leistungsbedarfen an Strom und Wärme eingesetzt [6]. Je nach Anwendungsfall werden Brennstoffzellensysteme von wenigen kW_{el} bis mehreren MW_{el} betrieben.

b) Mobile Anwendungen

Für mobile Anwendungsbereiche eignet sich insbesondere die Protonenaustauschmembranbrennstoffzelle (PEMFC) als Niedertemperaturbrennstoffzelle. Im Pkw-Bereich wird diese z. B. bereits von Toyota und Hyundai in Leistungsklassen bis zu 130 kW eingesetzt [7], [8] und auch im Schienenverkehr gibt es erste mit Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge [9]. Darüber hinaus ist z. B. mit der FC Alsterwasser bereits in dem Demonstrationsvorhaben „Zemships“ in Hamburg gezeigt worden, dass Brennstoffzellen auch für den lokalen

leistungsstärkeren Schiffsverkehr geeignet sind [10]. Innerhalb der Bundeswehr Deutschland werden sogar U-Boote der neuesten Generation mit Brennstoffzellen betrieben [11]. Und auch im Flugverkehr gibt es erste Prototypen und Projekte, die die Integration von Brennstoffzellen sowohl als Neben- als auch als Hauptaggregat untersuchen [12], [13], [14].

B. Projekte in Norddeutschland

Norddeutschland verfolgt seit geraumer Zeit die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie. Zur Bündelung der Interessensverfolgung wurde 2019 eine gemeinsame „Norddeutsche Wasserstoffstrategie“ erarbeitet und veröffentlicht, die die nächsten Handlungsfelder identifiziert [15]. Eine große Anzahl bereits realisierter und sich aktuell in Umsetzung befindender Projekte zeigt das Interesse von städtischen Einrichtungen, Industrie und Wissenschaft in Norddeutschland [16].

Im Bereich der mobilen Anwendungen wurde in Hamburg der Einsatz von Wasserstoffbussen erfolgreich getestet und eine Markterkundung abgeschlossen. Als nächstes werden bis 2025 50 Busse mit Brennstoffzellenantrieb angeschafft [17]. Darüber hinaus wird im Projekt „HyReflexS“ ein Notstromkonzept für die aktuell entstehenden batteriebetriebenen Elektrobussen entwickelt, welches im Normalbetrieb die Elektrolyse zur Speicherung von Wasserstoff aus elektrischer Energie nutzt und im Rahmen einer Notstromversorgung den Betrieb auf Brennstoffzellen zur Betankung der Elektrobusse umschaltet [18]. Auch im Bereich der Abfallsammlung und bei den Gepäckschleppern am Flughafen Hamburg gibt es Einsatzpläne bzw. Tests mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen [16]. Für Hochsee-Passagierschiffe wird aktuell im Projekt „Pa-X-ell 2“ eine neue Generation von PEM-Brennstoffzellen entwickelt und die Einsatzfähigkeit unter Hochsee-Bedingungen getestet [19].

Seit dem 1. April 2021 befindet sich mit dem „Norddeutschen Reallabor“ das wohl größte Projekt Norddeutschlands zum Thema Wasserstoff in der Bearbeitungsphase. Innerhalb dieses Projekts wird die ganzheitliche Transformation des Energiesystems in fünf verschiedenen Hubs, verteilt auf Norddeutschland, untersucht und dabei der Fokus auf Wasserstoff gesetzt [20]. In dem Teilprojekt „iNeP“ dieses übergeordneten Projektes wird eine integrierte Netzplanung der Netze für elektrische Energie, Gas und Wärme entwickelt, um einen möglichst großen Anteil erneuerbarer Energien unter Ausnutzung und volkswirtschaftlichem Ausbau der einzelnen Netze in Hamburg zu verbrauchen [21]. Hierfür werden z. B. Brennstoffzellen und Elektrolyseure als Kopplungs-technologien zwischen elektrischem und Gasnetz verwendet. Deren Anwendung zur Kopplung der beiden Netze unter Berücksichtigung der Anlagendynamiken wird im Projekt „CoupleIT!“ analysiert und bewertet [22].

Die Energieversorgung mit Wasserstoff wird auch im Wattenmeer auf den Inseln Borkum und Ameland getestet. Hier entsteht eine autarke Energieversorgung auf Basis erneuerbaren Wasserstoffs in verschiedenen Nutzungspfaden, unter anderem der Rückverstromung mittels Brennstoffzellen [23]. In Wasserstoff gespeicherter Überschussstrom aus erneuerbaren Energien und dessen energetische Nutzung wurde auch im Rahmen des Projektes „WASH2 Emden“ getestet, bei dem es um Wasserstoffanwendungen im Seehafen Emden ging [24].

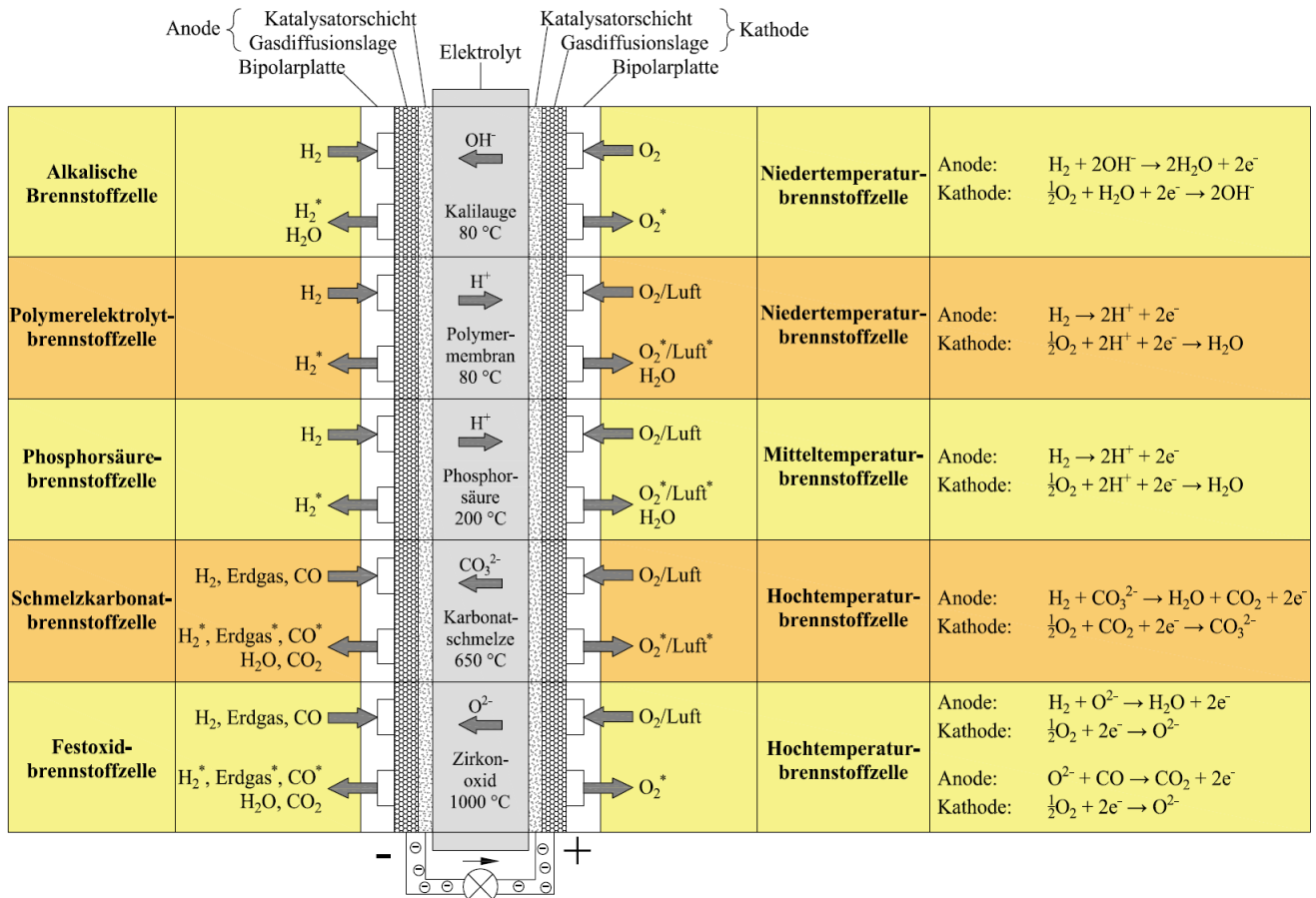


ABBILDUNG 1: FUNKTIONSPRINZIP UND KLASSIFIZIERUNG VON BRENNSTOFFZELLEN, EIGENE DARSTELLUNG NACH [1].

Dies stellt nur eine beispielhafte Aufführung norddeutscher Wasserstoffprojekte dar. Eine ausführliche Sammlung weiterer Wasserstoffprojekte mit einigen Schlüsselinformationen und weiterführenden Links findet sich in [16].

III. CHANCEN, HEMMNISSE UND RISIKEN

Brennstoffzellen bieten einige Vorteile gegenüber konventionellen Energieerzeugern. Hierzu zählen z. B. eine höhere Systemeffizienz, keine umweltschädlichen Emissionen und der Verzicht auf bewegte Teile, wodurch Brennstoffzellen wartungsarm und leise sind. Zudem sind Brennstoffzellen für verschiedene Anwendungen skalierbar und ein schnelles Auftanken ermöglicht einen nahezu pausenlosen Einsatz, insbesondere im Gegensatz zu der Batterietechnologie [25].

Die Anforderungen an ein Brennstoffzellensystem variieren je nach Anwendungsfall. Im Folgenden werden die vielen speziellen Anwendungsfälle in mobile und stationäre Applikationen eingeteilt, deren Entwicklungsziele aufgeführt, der Forschungsbedarf aufgezeigt und Risiken und Hemmnisse aufgeführt.

A. Entwicklungsziele

Um das Jahr 2015 herum haben mehrere Organisationen weltweit Ziele für die Brennstoffzellentechnologie definiert und Maßnahmen zur Erreichung dieser abgeleitet, damit diese zukünftig konkurrenzfähig zu bestehenden Technologien ist und eine breite Markteinführung gelingen kann [2], [26], [27], [28]. In Deutschland wurde mit dem 2016 in die zweite Phase gehenden Förderprogramm „Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“

(NIP II) der Grundstein für die weitere Forschung und Entwicklung gelegt. Ziele des bis 2025 laufenden Programms sind i) weitere Forschung, Entwicklung und Demonstration zur Kostensenkung und ii) Maßnahmen zur Marktaktivierung von Brennstoffzellen in mobilen und stationären Applikationen [28].

Mittlerweile, 5 Jahre später, ist die Zwischentappe „2020“ einiger aufgestellter Entwicklungsziele erreicht und eine umfangreiche Recherche zum Stand der Zielerreichung scheint sinnvoll. TABELLE II und TABELLE III vergleichen wichtige technische Größen von 2015 mit den Zielen für 2020 und den Gesamtzielen nach dem U.S. Department of Energy und dem Maßnahmenkatalog für das NIP II, erstellt von Industrie- und Wissenschaftsvertretern der Wasserstoff- und Brennstoffzellenbranche in Deutschland.

Weitere Ziele für spezielle Anwendungsfälle können [26], [27], [28] entnommen werden. Wichtig bei der Interpretation der Kenn- und Zielwerte ist das Wissen um deren Entstehung, d. h. unter welchen Randbedingungen sie ermittelt oder definiert wurden. Dies kann nur aus den Studien selbst abgeleitet werden, sodass ein direkter Vergleich ohne eine gemeinsame Basis nicht möglich ist.

Auch wenn seit 2015 bereits etwas Zeit vergangen ist, werden nicht alle Ziele bereits erreicht worden sein, insbesondere zu den Gesamtzielen der Technologie nach [26] und [27]. Zur Erreichung der ambitionierten Ziele sind sowohl weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der Grundlagen- und angewandten Forschung, als auch Demonstrationsnachweise großer Anlagen unter realen Bedingungen notwendig, um zeitnah einen größeren Marktanteil einzunehmen.

TABELLE II: VERGLEICH WICHTIGER TECHNISCHER GRÖßEN FÜR MOBILE ANWENDUNGEN, INSBESONDERE PKW-Fahrzeuge [26], [28].

Merkmal	Status 2015	2020 [DOE]	2020 [NIP]	2023 [NIP]	Gesamtziel [DOE]
Leistungsdichte in W/l	640	650	-	-	850
Leistungsdichte in W/kg	659	650	-	-	650
Lebensdauer	3.900 h	5.000 h	50.000 Zyklen	100.000 Zyklen	8.000 h
Kosten in \$/kW ohne Speicher, Leistungselektronik und elektr. Antrieb	53	40	-	-	30
Kosten in €/kW	-	-	< 100	< 75	-

TABELLE III: VERGLEICH WICHTIGER TECHNISCHER GRÖßEN FÜR STATIONÄRE ANWENDUNGEN, INSBESONDERE ZUR HAUSENERGIEVERSORUNG ALS KWK-ANLAGE [27], [28].

Merkmal	Status 2015 [DOE]	2020 [DOE]	2019/21 [NIP]
Elektr. Wirkungsgrad bei Nennleistung in %	34 – 40	>45	-
KWK Energieeffizienz	80 – 90	90	-
Systemkosten in \$/kW	2.300–2.800	1.500	-
Kosten in €/kW	-	-	2.000 – 4.000 über Wettbewerbstechnologien / Marktniveau
Lebensdauer in h	12.000 – 70.000	60.000	-

B. Aktuelle Forschungsthemen

Der aktuelle Forschungsförderschwerpunkt liegt bei der Protonenaustauschmembran- bzw. Polymerelektrolytbrennstoffzelle und der Festoxidbrennstoffzelle. Diese beiden Typen bieten aufgrund von technischen Vorteilen und Kostensenkungspotentialen die größten Potentiale für eine langfristige Marktdurchdringung und ergänzen sich zudem wegen der verschiedenen Temperaturniveaus in den möglichen Anwendungsbereichen.

Um eine Markteinführung erfolgreich zu gestalten, werden insbesondere die folgenden Ziele verfolgt [28]:

- Kostenreduzierung,
- Leistungsdichtenerhöhung,
- Lebensdauerverbesserung und
- eine marktrelevante Serienproduktion.

Aber auch weitere Themen, wie Online-Diagnostik, Entwicklung von Testverfahren oder Schaffung von Industriestandards sind von Interesse [28], [29].

Zur Kostenreduzierung werden insbesondere noch Weiterentwicklungen für kostengünstigere Materialien angestrebt. Dies gilt für Bipolarplatten, Membran-Elektroden-Einheiten und, speziell für PEM Brennstoffzellen, das eingesetzte Katalysatormaterial. Zudem können bei den Subsystemen Luftverdichter, Turbine, Rezirkulationssystem und Befeuchtung sowie Wasserstofftank noch Kosten eingespart werden. Die Subsysteme machen bei KWK-

Anwendungen etwa die Hälfte der Kosten aus. Insbesondere die Gasaufbereitung im Reformer stellt bei PEMFC einen großen Kostenpunkt dar [28].

Zur Verbesserung der Lebensdauer sind noch weitere Analysen der Alterungsmechanismen in Brennstoffzellen, insbesondere der Membran-Elektroden-Einheiten und ganzen Stacks, notwendig. Auch die Resistenz gegen Schadgas sollte speziell für Niedertemperaturbrennstoffzellen erhöht werden. Die Verbesserung von diagnostischen Werkzeugen z. B. zur Zellspannungsüberwachung sollte ebenfalls verfolgt werden [28].

Für eine marktrelevante Serienproduktion sind weitere Investitionen zum Erreichen einer kritischen Masse an Produkten und Infrastrukturen, u. a. Tankstellen, notwendig. Aktuell steht die Zuliefererindustrie noch vor der Herausforderung, Fertigungskapazitäten für die verschiedenen Anwendungen auf einem gegenwärtig unsicheren Markt aufzubauen. Die Minderung von Marktrisiken kann nur durch weitere Anstrengungen der öffentlichen Hand, also durch gezielte Förderinvestitionen, realisiert werden. Verbesserte Fertigungsverfahren und der Aufbau einer größeren Produktionskapazität unter Einhaltung der Qualitätssicherung führt zu weiteren Kostensenkungen, insbesondere durch Skaleneffekte bei größeren Stückzahlen [28].

C. Hemmnisse und Risiken

Momentan hemmen folgende Faktoren den schnellen Markthochlauf der vergleichsweise neuen Wasserstoff-Anlagen:

- Infrastruktur befindet sich erst in der Planung (Elektrolyseure, Wasserstoffnetze) bzw. im Aufbau (Wasserstofftankstellen).
- aktuell ungünstige regulatorische Rahmenbedingungen, z. B. Umlagen für den Bezug elektrischer Energie im Wasserstoff-Elektrolysebetrieb
- unbekannte zukünftige Regulatorik für Wasserstoff-Elektrolyseanlagen und damit fehlende Investitionssicherheit
- vergleichsweise hohe Investitionskosten für die Anlagentechnik sowie hohe Betriebskosten einer anlaufenden Wasserstoffbereitstellung und damit z. B. bei Brennstoffzellen vergleichsweise hohe Stromgestehungskosten
- hoher Aufwand für Sicherheitsmaßnahmen und Genehmigung
- Akzeptanzprobleme aufgrund fehlender Wissensbasis.

Hieraus ergeben sich Risiken für den weiteren Markthochlauf und die aus Klimaschutzgründen notwendige Ausweitung von Wasserstofftechnologien in den Bereichen Industrie, Verkehr und Wärme.

IV. ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN UND OPTIMIERUNGSPOTENZIALE

Zukünftig kann aufgrund der politischen Rahmenbedingungen sowie der massiven Förderinstrumente eine sehr starke Zunahme der Wasserstoffherzeugung und -nutzung

erwartet werden. Insbesondere der Übergang von den Projektförderungen für die Anwendung von grünem Wasserstoff zur marktwirtschaftlichen Nutzung zeichnet sich als gesamtgesellschaftliche Aufgabe ab.

A. Bedeutung für die Energiewende

Der Aufbau einer „grünen“, d. h. dekarbonisierten Wasserstoffwirtschaft ist momentan das wesentliche Instrument für eine erfolgreiche durchgehende Dekarbonisierung im gesamten Energiebereich. Insbesondere die hohen kalorischen Bedarfe im Industrie- und Heizungssektor lassen sich aus heutiger Sicht nur mit Wasserstoff klimaneutral abdecken. Die Ziele und die Vorgehensweise in Norddeutschland wurden in der „Norddeutschen Wasserstoffstrategie“ [15] definiert.

B. Rechtsrahmen

Der Rechtsrahmen der grünen Wasserstoffwirtschaft betrifft sowohl die nationale als auch die europäische Gesetzgebung. Hierzu gehören z. B. folgende Regelungen [30]:

- Energiewirtschaftsgesetz für den Gasnetzzugang
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2021 und Erneuerbare-Energien-Verordnung zur EEG-Umlagenbefreiung der Elektrolyse
- politische Vorgaben in der Europäischen Wasserstoffstrategie
- Regelungen der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie
- delegierter Rechtsakt nach Art. 27 Abs. 3 der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie.

C. Technische Richtlinien

Für den Bau von Wasserstoffanlagen sind die Technischen Richtlinien des DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. zu beachten [31]. Abhängig von der Anlagenart (Elektrolyseur, Tankstelle, Wasserstoffnutzung) ergeben sich hier unterschiedliche Anforderungen. Darüber hinaus existieren verschiedene Zusammenstellungen sicherheitsrelevanter technischer Fragestellungen zu Wasserstoffanlagen, z. B. des Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verbands [32].

D. Bedarfsorientierte und kostenoptimale Infrastruktur

Der Aufbau einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft erfordert eine bedarfsorientierte und kostenoptimale Infrastruktur. Dies bedeutet, dass die Bedarfe für unterschiedliche Nutzenergien erfasst und kostenoptimal den Strom-, Gas- und Wärmenetzen zugeordnet werden müssen. Hierbei ist zwischen der heute aufgrund der realen Gegebenheiten realisierbaren und der zukünftigen optimalen Zuordnung zu unterscheiden.

E. Integrierte Energienetze

Zukünftig müssen die Infrastrukturen integriert, d. h. gemeinsam und in Summe effizienz- und kostenoptimal entwickelt werden. Bei den leitungsgebundenen Energieträgern Strom, Gas und Wärme muss dazu eine integrierte Netzplanung erfolgen [33]. In einem weiteren Artikel dieses Bandes wird der aktuelle Arbeitsstand des dazu laufenden Projektes „iNeP – integrierte Netzentwicklungsplanung für die Energieträger Strom, Gas und Wärme“ beschrieben.

F. Einbindung in das elektrische Netz und Steuerung

Aufgrund der mit Wasserstoff versorgten zukünftigen hohen Leistungen bzw. Energiemengen müssen insbesondere beim Einsatz von Elektrolyseuren Eingriffsmöglichkeiten für elektrische Netzbetreiber geschaffen werden, um die Sicherheit des Netzbetriebs zu gewährleisten. Hierfür existieren bereits praktisch erprobte Steuerungsmethoden aus dem Bereich der Elektromobilität [34], [35].

G. Maßnahmen zur Akzeptanzförderung

Die Steigerung der Akzeptanz erfordert den Aufbau einer breiten, für alle gut zugänglichen und gut verständlichen Informationsbasis. Hierbei müssen alle vorgenannten Themen in den verschiedenen Bildungseinrichtungen zielgruppengerecht vermittelt werden. Die hohe Komplexität des laufenden Umbaus unseres Energiesystems und insbesondere die Komplexität im Bereich der Energiewirtschaft erschweren diese Aufgabe. Deshalb kommt den Hochschulen und anderen wissenschaftlichen Einrichtungen sowie den Verbänden eine besondere Bedeutung bei der notwendigen Wissenschaftskommunikation zu. In der Metropolregion Hamburg wird dies durch die „Arbeitsgruppe Wasserstoff der Akademie der Wissenschaften in Hamburg“ [36], die „Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e. V.“ [37], den „Energieforschungsverbund Hamburg“ [38] sowie das „Cluster Erneuerbare Energien Hamburg“ [39] umgesetzt.

V. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Zukünftig soll die Nutzung von „grünem“ Wasserstoff eine klimafreundliche Energiebereitstellung ermöglichen. Wasserstoff ist zur flexiblen Bereitstellung von Strom, Wärme und/oder Kraft sehr gut geeignet. Mit Brennstoffzellen kann Wasserstoff in stationären und mobilen Anwendungen in elektrische Energie umgewandelt werden. In Norddeutschland wird der zukünftige Einsatz von Wasserstoff in einer Vielzahl von Forschungs- und Pilotprojekten erprobt. Der zukünftige Markthochlauf erfordert den Abbau von regulatorischen Hemmnissen sowie Investitionsrisiken. Zur Steigerung der Akzeptanz muss eine breite, für alle gut zugängliche und gut verständliche Informationsbasis aufgebaut werden. Um die hohen elektrischen Leistungen von Elektrolyseuren im Netz beherrschbar zu gestalten, müssen diese Anlagen in die Netzsteuerung einbezogen werden. Zur bedarfsorientierten Wasserstoffbereitstellung in den Bereichen Industrie, Verkehr und Gebäuden wird ein weiterer Ausbau der Infrastruktur benötigt, d. h. Elektrolyseure, Speicher, Leitungssysteme und Tankstellen. Dieser Ausbau muss bedarfsorientiert und kostenoptimal erfolgen, dies kann durch eine integrierte Netzplanung für Strom-, Gas und Wärmenetze erreicht werden.

LITERATUR

- [1] P. Kurzweil, Brennstoffzellentechnik - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [2] International Energy Agency (IEA), „Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells“, Paris, 2015.
- [3] J. Adolf, C. H. Balzer, J. Louis, U. Schabla, M. Fishedick, K. Arnold, A. Pastowski und D. Schüwer, „SHELL Wasserstoff-Studie: ENERGIE DER ZUKUNFT? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂“, Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, 2017.
- [4] T. Badenhop und M. Schellen, „Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung“, in *Wasserstoff und Brennstoffzelle, Technologien und Marktperspektiven*, Berlin, Springer Vieweg, 2017.

- [5] H. Paul und C. Leu, „Ersatzstromversorgung,“ in *Wasserstoff und Brennstoffzelle, Technologien und Marktperspektiven*, Berlin, Springer Vieweg, 2017.
- [6] G. Ilg, „Europas erstes Brennstoffzellenkraftwerk der Megawatt-Klasse,“ 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.process.vogel.de/europas-erstes-brennstoffzellenkraftwerk-der-megawatt-klasse-a-538051/>. [Zugriff am 14. Oktober 2021].
- [7] Hyundai Motor Deutschland GmbH, „Der Hyundai NEXO - Zukunft für die H2,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hyundai.de/modelle/nexo/>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [8] Toyota Deutschland GmbH, „MIRAI - Wasserstoff in seiner schönsten Form,“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.toyota.de/download/cms/dede/Toyota_Mirai_MB_Web_final_tcm-17-2182312.pdf. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [9] Alstom, „Coradia iLint – der weltweit erste Wasserstoffzug,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.alstom.com/de/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-der-weltweit-erste-wasserstoffzug>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [10] Proton Motor Fuel Cell GmbH, „Maritime Anwendungen - "Zemships" macht dem Klimaschutz Dampf,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.proton-motor.de/anwendungen/maritim/>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [11] Bundesministerium der Verteidigung, „Die U-Boot-Klasse 212 A,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundeswehr.de/de/ausrustung-technik-bundeswehr/seesysteme-bundeswehr/u-boot-klasse-212-a>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [12] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „Emissionsfreier Antrieb für die Luftfahrt: Erstflug des viersitzigen Passagierflugzeugs HY4,“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2016/20160929_emission-sfreier-antrieb-fuer-die-luftfahrt-erstflug-des-viersitzigen-passagierflugzeugs-hy4_19469.html. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [13] A. Lücken, *Integration von Brennstoffzellen in Flugzeugbordnetze*, Hamburg: VDE Verlag GmbH, 2014.
- [14] Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg - Elektrische Energiesysteme, „Brennstoffzellensystem-Entwicklung für die technische Aviatik (BETA),“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hsu-hh.de/ees/forschung-2020/beta>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [15] Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer, „Norddeutsche Wasserstoffstrategie,“ 2019.
- [16] IHK Nord, „Energiequelle der Zukunft - Bundeslandübergreifende H2-Projekte im Norden,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ihk-nord.de/produktmarken/energiepolitik-industriepolitik/wasserstofflandkarte-2020-4946362?shortUrl=%2Fwasserstofflandkarte>. [Zugriff am 11. Februar 2021].
- [17] Hamburger Hochbahn AG, „Emissionsfrei mit grünem Wasserstoff,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hochbahn.de/de/presse/pressemitteilungen/emissionsfrei-mit-gruenem-wasserstoff-13652>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [18] Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg - Elektrische Energiesysteme, „Wasserstoffbasierte Notstromversorgung mit integriertem Regelkraftwerk mittels flexibler Sektorkopplung und Metallhydridspeichern (HyReflexS),“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hsu-hh.de/ees/forschung-2020/hyreflexs>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [19] hySOLUTIONS GmbH, „Pa-X-ell 2,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.e4ships.de/deutsch/projekte-seeschiffahrt/pa-x-ell-2/>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [20] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Gewinner des Ideenwettbewerbs „Reallabore der Energiewende“ – Steckbriefe –,“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/reallabore-der-energiewende-gewinner-ideenwettbewerb-steckbriefe.pdf?__blob=publicationFile. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [21] Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, „Städtische Gesellschaften planen Energienetze der Zukunft,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/14321640/2020-09-16-bukea-inep-reallabore/>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [22] „CoupleIT! – Digitalisierte Kopplung des Strom- und Gasnetzes,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://dtecbw.de/home/forschung/hsu/projekt-coupleit>. [Zugriff am 14. Oktober 2021].
- [23] MARIKO gemeinnützige GmbH, „H2Watt,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://h2watt.eu/>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [24] MARIKO gemeinnützige GmbH, „Wasserstoff-Anwendungen im Seehafen Emden - WASH2 Emden,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mariko-leer.de/portfolio-item/wash2emden/>. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [25] R. O'Hayre, S.-W. Cha, W. Colella und F. B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [26] U.S. Department of Energy, „DOE Technical Targets for Fuel Cell Systems and Stacks for Transportation Applications,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications>. [Zugriff am 11. Februar 2021].
- [27] U.S. Department of Energy, „DOE Technical Targets for Fuel Cell Systems for Stationary (Combined Heat and Power) Applications,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-stationary-combined-heat-and-power>. [Zugriff am 11. Februar 2021].
- [28] „Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien – Tragende Säulen der Energiewende,“ 2015.
- [29] U.S. Department of Energy, „2019 Annual Merit Review and Peer Evaluation Report,“ Arlington, 2019.
- [30] B. Hoffmann, A. Halbig, J. Senders, J. V. Nysten, O. Antoni und T. Müller, „Auf dem Weg zum Wasserstoffwirtschaftsrecht? Rechtsgrundlagen und Entwicklungslinien für die Regulierung der grünen Wasserstoffwirtschaft,“ Stiftung Umweltenergierecht, Würzburg, 2021.
- [31] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvgw-regelwerk.de/>. [Zugriff am 11. Oktober 2021].
- [32] Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V., „DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium,“ November 2011. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/Wasserstoff_kompodium.pdf. [Zugriff am 11. Oktober 2021].
- [33] D. Vorwerk und D. Schulz, „Grundlegende Herausforderungen für zukünftig integrierte Strom-, Gas- und Wärmenetze,“ in *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz - Infrastrukturen leitungsgebundener Energieträger*, Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2021, S. 122-128.
- [34] S. Darvish, L. Baum, F. Grumm und D. Schulz, „A Smart Charging Management Interface for Electric Vehicles Based on Communication Links Through the Electrical Grid,“ Virtual 4th E-Mobility Power System Integration Symposium, 2020.
- [35] S. Darvish, R. Jordan, M. Schumann, H. Haupt und D. Schulz, „Implementierung eines Netzdienlichen Lade- und Lastmanagements für Elektrofahrzeuge auf Privatflächen im Stadtgebiet Hamburg,“ in *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz*, Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2019, S. 36-39.
- [36] Akademie der Wissenschaften in Hamburg, „Arbeitsgruppe Wasserstoff,“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.awhamburg.de/forschung/arbeitsgruppen/wasserstoff.html>. [Zugriff am 11. Oktober 2021].
- [37] Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V., [Online]. Verfügbar unter: <https://www.h2hamburg.de/>. [Zugriff am 11. Oktober 2021].
- [38] Energieforschungsverbund Hamburg, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieforschungsverbund.hamburg/>. [Zugriff am 11. Oktober 2021].
- [39] Erneuerbare Energien Hamburg Clusteragentur GmbH, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.erneuerbare-energien-hamburg.de/de/>. [Zugriff am 11. Oktober 2021].