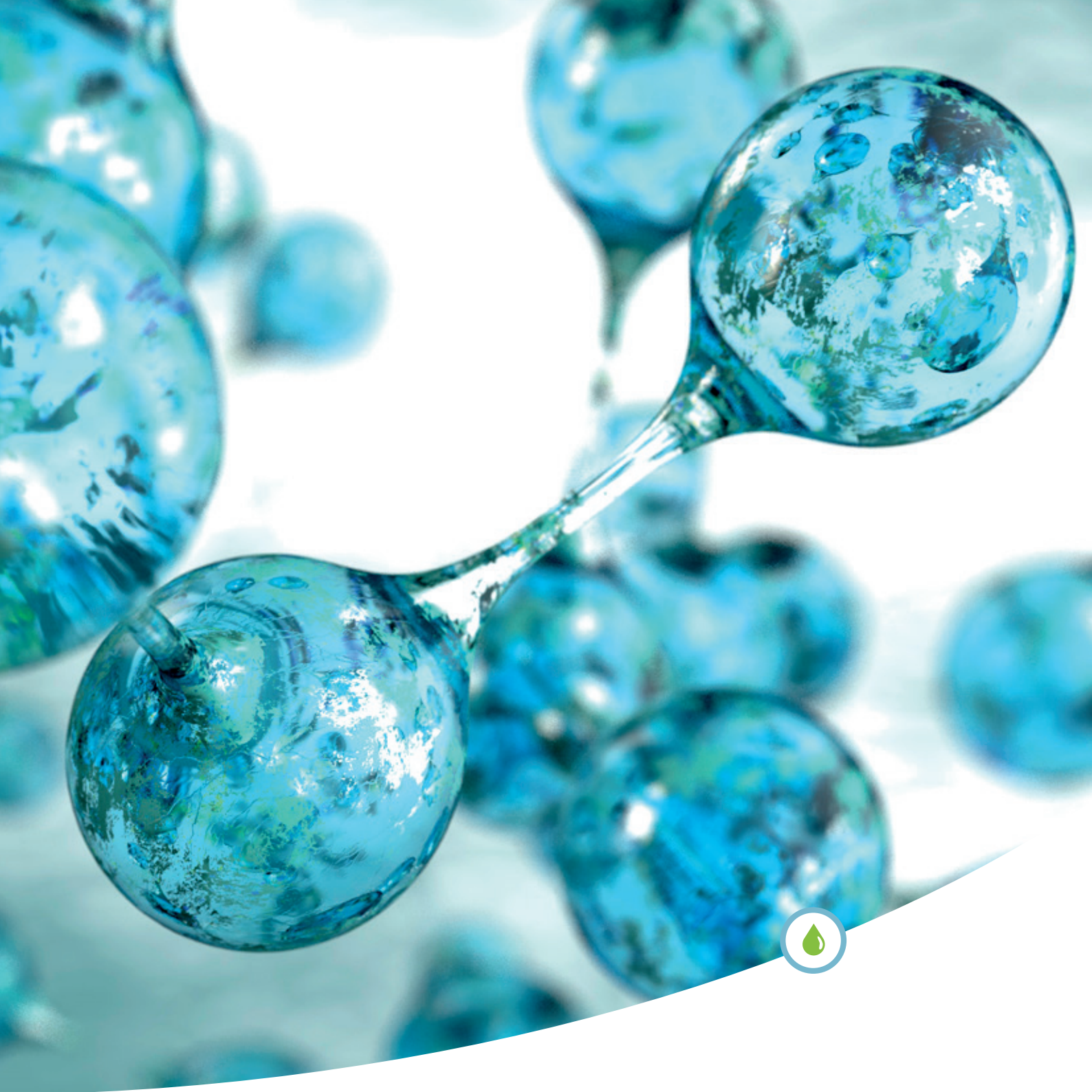




LANGFASSUNG DER EXPERTENEMPFEHLUNG FORSCHUNGSNETZWERK WASSERSTOFF





WASSERSTOFF

FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE

Impressum

Herausgeber

Projekträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt

Forschungsnetzwerk Wasserstoff

Gestaltung und Produktion

Projekträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Stand

März 2022

Bildnachweise:

Titel: ©SmirkDingo – stock.adobe.com

Die Langfassung der Expertenempfehlung ist in einem interaktiven Dialogprozess von den Mitgliedern des Forschungsnetzwerks Wasserstoff im Frühjahr 2022 erstellt worden.

Die Clustersprecher möchten sich bei den Themenpaten, AG-Moderatoren und Teilnehmenden des Konsultationsprozesses ausdrücklich bedanken, ohne deren Engagement es nicht möglich gewesen wäre, die Langfassung der Expertenempfehlung zu erstellen.



Projekträger Jülich
Forschungszentrum Jülich



FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALT

■ ZUSAMMENFASSUNG	3	
■ 1. ERZEUGUNG VON WASSERSTOFF UND FOLGEPRODUKTEN	4	
■ 2. INFRASTRUKTUREN UND SYSTEMINTEGRATION	24	
■ 3. NUTZUNG	36	
■ 4. SICHERHEIT, AKZEPTANZ UND NACHHALTIGE MARKTEINFÜHRUNG	58	
■ ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	72	

ZUSAMMENFASSUNG

Das Forschungsnetzwerk Wasserstoff umfasst knapp 1.360 aktive Mitglieder aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verbänden und deckt mit seinen vier Themenclustern Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten; Infrastrukturen und Systemintegration; Nutzung sowie Sicherheit, Akzeptanz und nachhaltige Markteinführung die gesamte deutsche Wasserstoffkompetenz im Bereich der angewandten Energieforschung ab.

Im September 2021 wurde eine Expertenempfehlung, welche den Forschungsbedarf entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft bis 2025 zusammenfasst an die Vertreter der Bundesregierung übergeben. Die hier vorliegende Langfassung der Expertenempfehlung stellt eine Ergänzung dar, in welcher die in der Kurzfassung aufgeführten Themen aufgegriffen, detailliert dargestellt und in kurz-, mittel- und langfristige Forschungsbedarfe eingeordnet werden.

Das in der Langfassung der Expertenempfehlung gebündelte Fachwissen wird unter anderem dem Nationalen Wasserstoffrat die zukünftigen Forschungsbedarfe und Förderstrategien aufzeigen. Zudem fließt es in den Stakeholder-Prozess „H₂-Kompass - Werkzeug zur Erstellung einer Roadmap für eine deutsche Wasserstoffwirtschaft“ ein.

Die vorliegende Langfassung ist in einem interaktiven Dialogprozess von den Mitgliedern des Forschungsnetzwerks Wasserstoff im Frühjahr 2022 erstellt worden.

Die Clustersprecher möchten sich bei den Teilnehmenden des Konsultationsprozesses, an dem Forschung und Wirtschaft, kleine und große Unternehmen, sowie Verbände gleichermaßen beteiligt waren, ausdrücklich bedanken. Ohne dieses Engagement wäre es nicht möglich gewesen, die Langfassung der Expertenempfehlung zu erstellen.



**Erzeugung von H₂
und Folgeprodukten**



**Infrastrukturen und
Systemintegration**



Nutzung



**Sicherheit, Akzeptanz
und nachhaltige Markteinführung**

1. ERZEUGUNG VON WASSERSTOFF UND FOLGEPRODUKTEN

■ EINFÜHRUNG

Die Erzeugung von CO₂-armem Wasserstoff und wasserstoffbasierter Folgeprodukte ist eine wichtige Säule in der nachhaltigen Transformation des Energiesystems. In Summe existieren verschiedene Verfahren zur Herstellung CO₂-armer, stofflicher Energieträger, die auf dem Weg zur Klimaneutralität entweder als Brückentechnologie oder als Langzeitoption eine wichtige Rolle spielen können.

Beim Wasserstoff fokussiert sich die Nationale Wasserstoffstrategie auf die Erzeugung von sogenanntem grünem Wasserstoff durch Wasserelektrolyse in Kopplung mit regenerativ erzeugtem Strom. Ferner können alternative photokatalytische, photobiologische und thermische Prozesse sowie Verfahren unter Einsatz von Biomasse zur Wasserstofferzeugung genutzt werden. Weitere Pfade zur CO₂-armen Herstellung von sogenanntem blauen und türkisen Wasserstoff auf Basis fossiler Energieträger werden derzeit ebenfalls intensiv betrachtet.

Im Bereich der Folgeprodukte werden Technologien zur Umwandlung in weitere CO₂-arme, gasförmige und flüssige Grundstoffe und Energieträger betrachtet. Insbesondere in der Luft- und Seeschifffahrt sowie zu Teilen im Schwerlastverkehr sind nachhaltige flüssige Kraft- und Treibstoffe bislang alternativlos, um auf absehbare Zeit Klimaneutralität zu erreichen. Auch in der chemischen Industrie müssen bestehende Produktionsabläufe zur Herstellung von Plattformchemikalien und Düngemitteln umgestaltet werden.

■ THEMEN IM CLUSTER:

Der Cluster 1 „Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukten“ adressiert die oben genannten Verfahren und Technologien und hat die relevanten Inhalte und Themen in neun Arbeitsgruppen erarbeitet:

- Thema 1
Grüner Wasserstoff:
Alkalische Elektrolyseverfahren
(AEL/AEMEL/Meerwasserelektrolyse)
- Thema 2
Grüner Wasserstoff:
PEM-Elektrolyseverfahren
(Protonenleitende Membran-Elektrolyse PEMEL)
- Thema 3
Grüner Wasserstoff:
Hochtemperatur-Elektrolyseverfahren
(Festoxidzellen SOC und protonenleitende Membranzellen PCC)
- Thema 4
Grüner Wasserstoff:
Alternative Herstellverfahren
(photoelektrochemisch/photokatalytisch, solarthermochemisch, photobiologisch)
- Thema 5
Grüner Wasserstoff:
Einsatz von Biomasse und biogenen Reststoffen
(Fermentation, Reformierung, Vergasung und Plasmalyse)
- Thema 6
Blauer und türkiser Wasserstoff
(H₂-Herstellung aus Methan ohne bilanzielle CO₂-Emissionen)
- Thema 7
Methan, Methanol, Ammoniak, Olefine und Ether
(Chemische Grundstoffe, Energieträger und Kraftstoffe)
- Thema 8
Synthetische Kerosine, Diesel- und Ottokraftstoffe
(SynFuels)
- Thema 9
Integration ins Energiesystem mit Fokus Strombezug



■ THEMA 1: GRÜNER WASSERSTOFF – ALKALISCHE ELEKTROLYSE (AEL/AEMEL/MEERWASSERELEKTROLYSE)

Bei AEL/AEMEL handelt es sich um die Wasserelektrolyse auf der Basis eines alkalischen Elektrolyseverfahrens, welches dadurch gekennzeichnet ist, dass Hydroxid-Anionen in einem von außen angelegten elektrischen Feld durch ein Diaphragma (AEL) oder eine ionenleitende Membran (AEMEL) diffundieren.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Die alkalischen Elektrolyseverfahren zählen zu den ältesten etablierten Elektrolyseverfahren mit einem TRL (Technology Readiness Level-Reifegrad) von 7–9, je nach technischer Ausführung. Zählt man die Chlor-Alkali Elektrolyse dazu, beläuft sich die weltweite installierte Leistung auf einen zweistelligen GW-Wert. Dabei sind Einzelanlagen im dreistelligen MW-Bereich heute Stand der Technik. Die alkalische Elektrolyse bietet bereits heute die Möglichkeit, im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie sehr schnell Anlagen mit hoher Leistung zu errichten. Die Fertigungstechnik dafür ist bereits für einige technische Anwendungen in der Serienfertigung etabliert und benötigt kaum kritische Ressourcen, wie z. B. Iridium oder Platin. Zudem gibt es langjährige Erfahrungen in Betrieb und Wartung solcher Anlagen sowie im Zusammenspiel mit dem Stromnetz.

Die neue alkalische Membran-Elektrolyse (AEMEL) ist eine Weiterentwicklung der alkalischen Wasserelektrolyse mit einer Anion-Austausch-Membran, welche leitfähig für Hydroxidionen ist. Sie hat entwicklungsbedingt noch ein sehr niedriges TRL von 3–4, konstruktionsbedingt aber ein sehr hohes Potenzial zur Entwicklung kompakter Elektrolyseeinheiten. Sie kann potentiell die Dynamik und hohe Leistungsdichte der PEM-Technologie erreichen und gleichzeitig, wie bei der AEL, zu einer Einsparung von kritischen Ressourcen beitragen.

ÜBERGREIFENDE FORSCHUNGSTHEMEN

Übergeordnete und für beide Technologien wichtige Ziele sind die Absenkung der CAPEX und OPEX durch Wärmeintegration, optimierte Betriebsbedingung und Standardisierung der Bauteile, Baugruppen und Systeme, auch in der Anbindung der elektrischen Systeme (Thema 9). Zudem ist erforderlich, die netzdienliche

Betriebsweise zwischen Stromversorgung und Verfahrenstechnik so zu regeln, dass ein netzdienlicher Betrieb möglich wird.

Neue Entwicklungen sind auch immer im Kontext eines Gesamtmodells bestehend aus CAPEX, bessere Katalysatorperformance und Wirkungsgrad/Lebensdauer z. B. in Abhängigkeit von Stromschwankungen zu evaluieren. Dazu sind einheitliche Messprotokolle zur Charakterisierung von Elektroden und Zellen über beschleunigte Alterungsprozesse zu etablieren. Zur Verbesserung der Energieausnutzung und zur Steigerung des Wirkungsgrades sollen Systeme zur Wärmerückgewinnung und Wärmeintegration erarbeitet werden. Zeitnah müssen neben großflächigen Feldversuchen auch automatisierte Produktionsprozesse von Elektrolyseuren als Ergebnis der Entwicklungen etabliert werden.

Eine übergreifende Zertifizierung der Elektrolysetechnik und Anpassung von Mess- und Regeltechniken muss ebenfalls erfolgen. Neben den technologischen Voraussetzungen sind schnellstmöglich regulatorische Hürden abzubauen.

Weiterhin muss geprüft werden, ob die bestehenden Normen und Standards den aktuellen und kommenden Anforderungen genügen. Das betrifft insbesondere Anlagen, die aus dem technischen Umfeld in ein urbanes Umfeld vordringen. Das ist in entsprechenden Regularien (VDI, VDE, FNN) festzuhalten.

Es gilt übergreifend Wege zu finden, welche die Nutzung von Wasser außerhalb der Trinkwasserqualität (nach WHO) direkt ermöglichen und darüber hinaus die notwendigen Anforderungen an die Wasserqualität zu verringern. Hier müssen u.a. Methoden zur direkten Nutzung von Meer- Fluss- und Abwässern im Komponenten- und Anlagendesign etabliert werden (Salzstabilität).

1. Vorlauftforschung (Grundlagenforschung).

Etablierung einer Recyclingfähigkeit bereits im Komponenten- und Anlagendesign für Systeme und Werkstoffe; Überprüfung der Normen, Standards und Regelwerke (DIN, ISO etc. - in Abstimmung mit Cluster 4).

2. Angewandte Forschung.

Qualifizierung von verfügbaren und unkritischen Materialien und Prozessetablierung in der Breite der Industrie und Zulieferer; Prüfung auf Recyclingfähigkeit der Systeme und Werkstoffe; Einbindung von stationären

Energiespeichern als Energie-Pufferlösung, Beseitigung von Massentransferlimitierungen. Entwicklung von Hochdruckmodulen für den flexiblen Betrieb unter Einsparung der Kompression

FORSCHUNGSTHEMEN AEL-Verfahren

Trotz des hohen Reifegrades der AEL gibt es noch erhebliches Forschungspotenzial. Zum einen werden Materialien und Komponenten, wie z. B. edelmetallfreie Katalysatoren, langzeitstabile Diaphragmen und performante 3D-Stromabnehmer benötigt und müssen unter Berücksichtigung der realen Temperaturen und Drücke entwickelt werden. Für einen nachhaltigen Betrieb der AEL bedarf es auch Anlagenkonzeptionen, Untersuchungen der Lebenszeit der Komponenten und Recycling-Möglichkeiten. Ein weiterer Baustein für die Skalierung von Komponenten und Anlagen zur Herstellung von grünem Wasserstoff sind Serien- und Massenfertigung von Elektrolyseuren und Elektrolyseanlagen sowie deren automatisierter Betrieb. Dabei spielt die Integration in Industrie-4.0-Systeme eine Schlüsselrolle.

Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten in der AEL muss daher die Weiterentwicklung/Optimierung von Elektroden und von Katalysatorsystemen, Diaphragmen und Systemstrukturen sein. Des Weiteren sind Methoden zur Verbesserung der Gasreinheit, die Minimierung von Gas-Crossover und die Ermittlung des ökologischen Fußabdruckes für die industrielle Umsetzung notwendig.

1. Vorlauftforschung (Grundlagenforschung).

Katalysatorentwicklung (edelmetallfrei), Elektrodenentwicklung (Struktur, Strukturierungs- und Beschichtungstechnik); Entwicklung neuer Diaphragmen (Materialforschung); Weiterentwicklung von Dichtungslösungen; Entwicklung der Sensorik (insbesondere Inline zur Überwachung der Alterung); Betriebsbedingungen $T > 120\text{ °C}$ und $p > 30\text{ bar}$ bzw. $p \geq 200\text{ bar}$; Identifikation von Massentransferlimitierungen bei verschiedenen Betriebsparametern; Simulation von Zellen (FEM); insgesamt Untersuchung und Verständnis von Reinheitsgradansprüchen der Elektrolytfeed zum Erreichen einer höheren Salzstabilität und geringerer Verluste bei hohen Stromdichten.

2. Angewandte Forschung.

Zell- und Stack Design mit optimierter Fertigungstechnik; Serien und Massenfertigung insbesondere im

Kontext von Industrie 4.0, Fertigungslinien; Qualitätsmanagement (geringer Ausschuss, Abnahmeprüfung); hohe Stromdichten mit geringen Verlusten im Stack (Abwärme).

3. Experimentelle Entwicklung:

Standardisierte Testumgebung; standardisierte und vergleichbare Tests zur Charakterisierung (Benchmarking); Bereitstellung von Datensätzen für Benchmarking; Erhöhung von Standzeiten; optimierte Wartung; Weiterentwicklung der Normen Standards und Regelwerke (DIN, ISO etc.); dynamische Prozesse im Anlagenbetrieb, abgestimmt auf volatile, erneuerbare Energien; Nutzung des unteren Lastbereichs ($< 10\%$)

4. Pilot- bzw. Demoprojekt:

Optimierte Aufstellungsplanung, Standardisierte Betriebsumgebung; standardisierte Ermittlung der Standzeiten; Etablierung von Garantiewerten; optimierte Wartung/Predictive Maintenance und wiederkehrende Prüfungen; Weiterentwicklung der Normen, Standards und Regelwerke (DIN, ISO etc.); Einfluss von Downstream-Komponenten auf die Betriebsführung des Elektrolyseurs; Sektorenkopplung und gekoppelte Power-to-X-Anlagen, insbesondere im Hinblick auf volatile erneuerbare Energien; Gas-Fernnetz-Einspeisung im Hinblick auf Druckniveau und Volatilität der Erzeugung.

FORSCHUNGSTHEMEN AEMEL-Verfahren

Im Gegensatz zur AEL besitzt die AEMEL Technologie einen niedrigeren TRL und steht damit noch deutlicher im Fokus von Forschung und Entwicklung. Hauptforschungsinhalte sind in diesem Bereich die Entwicklung, Weiterentwicklung und eine Etablierung edelmetallfreier oder edelmetallarmer stabiler Katalysatoren, aber auch langzeitstabile Membranelektrodeneinheiten (MEA), (Stromdichte, Salzstabilität) müssen erreicht und durch entsprechende Tests der Zellen und Stacks nachgewiesen werden. Weiterhin muss eine neue Stacktechnologie, welche eine Anwendung in verschiedenen Druckbereichen ermöglicht, zeitnah umgesetzt sowie die Entwicklung und Etablierung einer Serien- und Massenfertigung von Elektrolyseuren und Elektrolyseanlage aufgebaut und deren automatisierter Betrieb realisiert werden. Von hoher Relevanz sind weiterentwickelte Ionomere und Membrane sowie ein Upscaling zu größeren Zellverbünden, welche sich in umfangreichen Feldversuchen als praxisrelevant gezeigt haben und eine Zertifizierung erlauben, unab-



dingbar. Langfristig gilt es daher eine, der PEM Technologie vergleichbare und wettbewerbsfähige Technologie mit einer Leistungsdichte von $> 6 \text{ A cm}^2$ zu entwickeln.

1. Vorlauftforschung (Grundlagenforschung).

Katalysatorentwicklung (edelmetallfrei, langzeitstabil); Weiterentwicklung der MEA (Struktur, Beschichtungstechnik); Weiterentwicklung Membran (Langzeit- und Salzstabilität); Entwicklung der Sensorik (insbesondere inline zur Überwachung der Alterung). Moderne Zell- und Stack-Designs mit Implikationen aus PEM-EL und anderen elektrochemischen Flusszellen-Stacks; Betriebsbedingungen $T > 120 \text{ °C}$ und $p > 30 \text{ bar}$ bzw. $p \geq 200 \text{ bar}$; Identifikation von Massentransferlimitierungen bei verschiedenen Betriebsparametern; Simulation von Zellen (FEM); insgesamt Untersuchung und Verständnis von Reinheitsgradansprüchen der Elektrolytfeed zum Erreichen einer höheren Salzstabilität und geringerer Verluste bei hohen Stromdichten.

2. Angewandte Forschung.

Weiterentwicklung MEA und MEA Entwicklung mit optimierter Fertigungstechnik; Serien und Massenfertigung, Weiterentwicklung von unterstützenden gasdurchlässigen Substraten, Entwicklung der Sensorik, Fertigungslinien; Qualitätsmanagement (geringer Ausschuss); .

3. Experimentelle Entwicklung:

Siehe oben zur AEL.

4. Pilot bzw. Demoprojekt:

Siehe oben zur AEL.

■ THEMA 2: GRÜNER WASSERSTOFF:

PEM-ELEKTROLYSEVERFAHREN

(PROTONENLEITENDE MEMBRAN-ELEKTROLYSE PEMEL)

In der PEM-Wasserelektrolyse (PEMEL) wird vollentsalztes Wasser an der Anode in Sauerstoff und Wasserstoffionen aufgespalten. Die positiv geladenen Ionen wandern durch eine Protonenleitfähige Membran zur Kathode und bilden dort molekularen Wasserstoff.

Motivation & Ausgangslage

Die PEM-Wasserelektrolyse (PEMEL) zählt zu den am weitesten entwickelten Verfahren zur Herstellung von grünem Wasserstoff über den Einsatz regenerativ erzeugter, elektrischer Energie. Aktuelle Systeme weisen Modulgrößen bis in den MW-Bereich auf. Wesentliche Pluspunkte der PEM-Elektrolyse sind die hohe Flexibilität, die hohe Leistungsdichte sowie die geringe Komplexität des Gesamtsystems im Vergleich zu anderen Elektrolysetechnologien. Aktuell wirken sich jedoch unter anderem hohe Investitionskosten z. B. für Katalysatoren, die derzeit eingesetzten PFSA-Membranen (PFSA: Perfluorsulfonsäure) und poröse Transportschichten aus gesintertem Titan negativ auf die Marktchancen dieser Technologie aus. Kritisch ist auch die Verfügbarkeit von Iridium zu bewerten, das bislang unverzichtbarer Bestandteil der notwendigen Katalysatoren für die PEMEL ist. Die eingesetzten PFSA-Membranen führen in Verbindung mit hohen Potenzialen an der Anode zu harschen Betriebsbedingungen, die den Einsatz extrem korrosionsstabiler Materialien und Bauteile erfordern. Zur kontinuierlichen Verbesserung der PEM-Elektrolyse und damit der Ermöglichung des Markthochlaufs sind daher die unten formulierten Forschungsfragen zu lösen. Die Themenschwerpunkte zielen schlussendlich darauf ab, die ökologisch und ökonomisch beste PEM-Elektrolysetechnologie realisieren zu können.

FORSCHUNGSTHEMEN PEM-Elektrolyse

Forschungsfeld Katalysatoren und Materialien

Aktuell kommerziell verfügbare PEM-Elektrolyse-Stacks und Systeme demonstrieren die Robustheit und lange Lebensdauer (> 50.000 Stunden), die nach dem Stand der Technik bereits erreichbar sind. Allgemeiner Konsens ist jedoch, dass die Anteile von Iridium und Platin in den Stacks kurz- bis mittelfristig weiter reduziert werden müssen, um die Technologie in einem Umfang von mehreren zehn GW Leistung in den Markt einführen zu

können. Teil der Lösung können auch edelmetallfreie Katalysatorsysteme sein, die bislang jedoch deutliche Nachteile gegenüber den Iridium-/Platin-basierten Systemen aufweisen. Weitere Hemmschuhe auf dem Weg des Markthochlaufs sind die Verwendung und die damit verbundenen Material- und Fertigungskosten von Titan als Grundmaterial für verschiedene wesentliche Zellelemente (Bipolarplatten, Flussstrukturen und poröse Transportlagen) sowie der Einsatz von PFSA-Membranen als Protonenleiter. Unverzichtbarer Baustein für die weitere Industrialisierung ist daher die kurz- und mittelfristige Fortführung der Material- und Komponentenentwicklung in allen Bereichen eines PEMEL-Stacks.

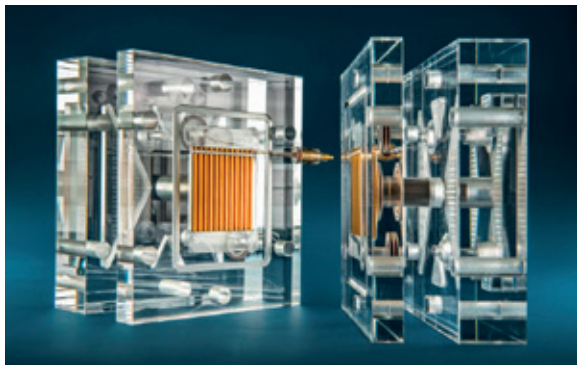


Abbildung: Labortestzelle zur Vermessung neuer Komponenten in der PEM-Elektrolyse (© Fraunhofer ISE)

Forschungsfeld beschleunigte Entwicklung

Neue Materialien und Komponenten müssen nicht nur entwickelt, sondern auch schnell und sicher in die Anwendung überführt werden können. Daher stellen Methoden zur beschleunigten Entwicklung und Herstellung wichtige Werkzeuge für Wissenschaft und Industrie dar. Dazu zählen bspw. verschiedene Formen der Simulation von der Material- über die Komponenten- bis hin zur Stack- und Systemebene und Methoden der künstlichen Intelligenz sowie das rechnergestützte Produktdesign. Von hoher Relevanz ist auch die Entwicklung beschleunigter Alterungstests und Protokolle, damit die Lebensdauer neuartiger Materialien und Komponenten überprüft werden kann, ohne dass diese in umfangreichen Tests über Tausende von Stunden betrieben werden müssen.

Forschungsfeld Recycling

Mit den Materialfragen eng verknüpft sind Themen des Recyclings der eingesetzten Ressourcen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft, speziell in Bezug auf die Edelmetall-Elemente. Die Herausforderungen für die sortenreine und qualitativ hochwertige Trennung der eingesetzten Rohstoffe nehmen z. B. mit dem Einsatz von

Verbundmaterialien, der Beschichtung günstiger, aber nicht korrosionsfester Werkstoffe sowie der Verwendung von Nanostrukturen deutlich zu. Ziel muss es sein, sowohl die entsprechenden Bulk-Materialien wie auch die nur in geringen Konzentrationen eingesetzten, aber dafür umso wertvolleren Bestandteile mit möglichst geringem und umweltfreundlichem Aufwand einer sinnvollen Folgenutzung zuzuführen.

Forschungsfeld Industrialisierung

Die Industrialisierung der PEMEL kann nur dann erfolgreich an einem Standort wie Deutschland gelingen, wenn bestehende und zukünftige Detaillösungen auf Basis der Entwicklung von industrietauglichen und skalierbaren Produktionsprozessen und -anlagen in einer automatisierten Massenfertigung in Verbindung mit dem notwendigen Scale-up der Zellflächen umsetzbar sind. Hierzu sind intensive Entwicklungskooperationen über die gesamte Wertschöpfungskette nötig, d.h. zwischen zukünftigen PEMEL-Komponentenherstellern, Anwendern, Forschungsinstituten, Materiallieferanten und dem Spezialmaschinenbau. Themen wie Design for Mass Production, automatisierte Komponentenfertigung und Assemblierung, In-Line Fertigungskontrolle sowie End-of-Line-Prüfungen sind dafür nur wenige Beispiele. Da bislang nur sehr wenige Konstellationen der Anwendung von Elektrolyse einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen, sind Pilot- und Demonstrationsprojekte auch weiterhin ein wichtiger Teil der Industrialisierung. Darüber hinaus ist die Investitionsförderung für Vorhaben im Multi-MW-Bereich wünschenswert, um das Investitionsrisiko der beteiligten Unternehmen zu senken sowie gleichzeitig die Industrialisierung weiter voranzutreiben und das damit verbundene Kostensenkungspotenzial zu aktivieren.

Forschungsfeld Elektrolyse-System

Neben den material- und fertigungstechnischen Fragestellungen müssen auch weiterhin systemorientierte Forschungen adressiert werden. Diese betreffen u. a. die Optimierung der Stack- und Modul-Dimensionierung, die Auslegung des Betriebsdrucks für unterschiedliche Anwendungsfälle, die Wasserqualität, fortschrittliche Verfahren zur Systemregelung und Entwicklung von Betriebsstrategien, prädiktive Wartung z. B. durch Einsatz digitaler Klone zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit sowie Lebenszyklusanalysen.

Forschungsfeld Offshore-Elektrolyse

Absehbar ist auch ein erhöhter Forschungsbedarf für den Einsatz von Elektrolysesystemen im Offshore-



Bereich, beispielsweise bzgl. der Wasserbereitstellung, den harschen Bedingungen bzgl. Korrosion durch salzhaltige Luft, nicht unerheblichen Schwingungen bei Installation auf Plattformen im Meer, erhöhten Anforderungen an Wartungskonzepte durch schlechte Erreichbarkeit auf See. Die genannten Beispiele zeigen, dass dabei System und Stack bzw. Zelle über die jeweiligen Spezifikationen eng miteinander verzahnt sind.

Forschungsfeld Sicherheit

Das Thema Sicherheit betrifft mit den möglichen Unterpunkten Materialzuverlässigkeit, Explosionsschutz, Druck- und Hochspannungsgefahren sowie der Entwicklung von Normen und Standards die gesamte Entwicklungskette ausgehend von den Materialien bis zu Gesamtsystemen und sollte daher ebenfalls ein wichtiger Aspekt der zukünftigen Forschung sein.

FORSCHUNGSTHEMEN

Elektrochemische Verdichtung und Reinigung

Neben der Erzeugung von Wasserstoff können elektrochemische Prozesse auch zur Reinigung und weiteren Verdichtung des Wasserstoffs eingesetzt werden. Die Elektrochemische Verdichtung (EHC: Electrochemical Hydrogen Compression) und Reinigung (EHP: Electrochemical Hydrogen Purification) von Wasserstoff besitzen ein hohes Potenzial, Kosten und Energieeinsatz für die Verdichtung bzw. Reinigung oder die Wasserstoff-Rückgewinnung zu reduzieren. Diese Verfahren basieren wesentlich auf Komponenten der PEMEL und die bei dieser Technologie auftretenden wesentlichen Fragestellungen sind daher nahezu identisch zur PEMEL.

ÜBERGREIFENDE FORSCHUNGSTHEMEN

Aktuell fokussiert sich die Forschung im Elektrolysebereich auf die Weiterentwicklung der unterschiedlichen Technologien und die damit verbundene Produktionstechnik. Darüber hinaus befassen sich viele Aktivitäten mit der Nutzung des erzeugten Wasserstoffs. Zusätzlich entstehen bei der Wasserspaltung noch die Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff. Aus Gründen der Ressourcenschonung und der Energieeffizienz sollte deren Nutzung zukünftig stärker im wissenschaftlichen, ökonomischen und regulatorischen Forschungsbereich berücksichtigt werden.

THEMA 3: GRÜNER WASSERSTOFF: HOCHTEMPERATUR-ELEKTROLYSEVERFAHREN (FESTOXIDZELLEN SOC UND PROTONENLEITENDE MEMBRANZELLEN PCC)

Bei der Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) wird verdampftes Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Im Fall der Co-Elektrolyse können in der HT-Elektrolyse Gasgemische aus Wasserdampf und Kohlendioxid in Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt werden. Im Grenzfall kann auch die Umwandlung von CO₂ in CO (CO₂-Elektrolyse) erfolgen. Durch diese Produkte können HTEL-Anlagen Rohstoffe sowohl für die energetische als auch die stoffliche Nutzung von erneuerbarem Strom liefern. Mit derselben Technologie kann zudem auch die reversible Umwandlung der erzeugten chemischen Energie in Strom und Wärme erfolgen.



Abbildung: Applikations- und Stapelmaschine für SOC-Stacks
(© Fraunhofer IKTS)

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Die HTEL-Verfahren bieten unter den bekannten Elektrolyseverfahren die höchste elektrische Effizienz für die Stromumwandlung in chemische Energie, welche in Wasserstoff oder anderen chemischen Verbindungen gespeichert wird. Die HT-Elektrolyse bietet das Potenzial, durch Nutzung prozessbedingter Abwärme aus der Anlagenumgebung (z. B. Syntheseprozesse bei der Wasserstoffverwertung) eine sehr hohe Effizienz und damit eine sehr gute Wirtschaftlichkeit zu erzielen. Bei netzgebundener Wasserstoffproduktion unter konstant hoher Auslastung resultiert die inhärent hohe Effizienz der HTEL-Verfahren in sehr geringen Wasserstoffproduktionskosten. Durch die lokale Volatilität der erneuerbaren Energien bietet HTEL anders als PEMEL und AEL eine reversible Wasserstofferzeugung/-nutzung, und darüber hinaus in Kombination mit dem Erdgas-

bzw. Biogasnetz die Flexibilisierung der Anlagennutzung und damit weitere CO₂-Minderungspotenziale. Insbesondere bei der Nutzung alternativer Prozessgase (z. B. Biogas) zeichnet sich die HTEL durch eine vergleichsweise hohe Toleranz gegenüber Verunreinigungen im Brenngas aus. Damit bietet die HTEL vielfältige Möglichkeiten für die Kopplung mit industriellen Prozessen, bei denen Abwärme und nutzbare Abgase entstehen. Eine künftige Umsetzung dieser Technologien im industriellen Umfeld kann auch im Ausland eine Signalwirkung darstellen und den Wasserstoff-Technologiestandort Deutschland langfristig etablieren.

Der Hochtemperatur (HT)-Elektrolyseur besteht aus einem HT-Stackmodul (Betriebstemperatur ≥ 450 °C) und beinhaltet eine Reihe von peripheren Komponenten (Wasserdampfaufbereitung, CO₂-Gasaufbereitung, HT-Wärmetauscher, Gasverdichter sowie weitere EBoP- (Electrical Balance of Plant) und BoP-Komponenten). Aufgrund der engen Ankopplung an Prozesswärme zur Wasserdampferzeugung besteht für die HTEL-Technologie eine wichtige Schnittstelle zu Anlagenauslegung und -aufbau für integrierte Systemlösungen.

Der HTEL-Prozess basiert auf zwei technologischen Plattformen: sauerstoffionenleitenden Festoxidzellen (Solid Oxide Cells, SOC) und protonenleitenden, keramischen Zellen (Proton Conducting Ceramic Cells, PCC), welche sich auf der Modulebene im System nahezu identisch integrieren lassen. Die einzelnen Technologieplattformen haben gegenwärtig unterschiedliche Technologiereifegrade erreicht, sollen dennoch angesichts wachsender internationaler Konkurrenz bis zur Stackebene parallel verfolgt werden.

FORSCHUNGSTHEMEN SOC-Technologie

Die SOC-Technologie hat einen Reifegrad erreicht, der eine Industrialisierung ermöglicht. In diesem Bereich sind bereits Unternehmen mit ersten Pilotanlagen in Demonstrationsprojekten am Markt. Dennoch bleiben die Herausforderungen der Langzeitstabilität, der Effizienz, der Leistungsdichte und der Kostenreduktion sowie der Skalierung der Anlagengröße zu bewältigen. Folgende Fragestellungen sollen in diesem Bereich adressiert werden:

- Erhöhung der Leistungsdichte, mechanischer Robustheit und Lebensdauer von Elektrolyseestacks durch Material- und Komponentenentwicklung (Grundlagenforschung)

- Etablierung der Zell- und Stack(modul)-Herstellung in Deutschland durch Auswahl und Entwicklung geeigneter Herstellungsprozesse und Etablierung der Zulieferketten (Angewandte Forschung)
- Entwicklung von SOC-Stack und -Anlagentechnik für druckaufgeladenen Betrieb (Grundlagenforschung)
- Optimierung der Elektrolyseure auf jeweilige industrielle Aufgabenstellungen inkl. verfahrenstechnischer Integration (Angewandte Forschung)
- Aufbau von Stacks größerer Leistung und deren Integration in Module für zukünftige Anlagengrößen bis in den GW-Bereich (Angewandte Forschung)
- Design-to-Manufacturing und Automatisierung der Komponenten- und Stackherstellung mit dem Ziel der Qualitätsverbesserung und der Kostensenkung (Angewandte Forschung)

FORSCHUNGSTHEMEN PCC-Technologie

Die PCC-Technologie wurde als Proof-of-Concept bereits demonstriert, allerdings fehlen die werkstofflichen und technologischen Voraussetzungen für die Umsetzung in der breiteren Anwendung. Trotz der großen Breite untersuchter Werkstoffe stehen optimierte Materialien und Herstellungsverfahren noch nicht zur Verfügung. Insbesondere die Herstellung von planaren Zellen und daraus Stacks ist eine erhebliche Herausforderung. Folgende Aufgabenstellungen stehen bei der Entwicklung von PCC-EL im Fokus:

- Entwicklung von Materialien für Elektrolyte mit hoher Protonenleitung und für Elektroden mit verbesserter katalytischer Aktivität und Leitfähigkeit (Grundlagenforschung)
- Untersuchung der Langzeitstabilität und der Degradationsphänomene (Grundlagenforschung)
- Etablierung der Zellherstellung in Deutschland durch Auswahl und Entwicklung geeigneter Herstellungsprozesse (Angewandte Forschung)
- Erhöhung der Leistungsdichte, der mechanischen Robustheit und der Lebensdauer von Zellen (Grundlagenforschung)



- Entwicklung und Erprobung von PCC-Stackkonzepten (Grundlagenforschung)
- PCC-Stackintegration in Stack Module (Angewandte Forschung)
- Skalenübergreifende Modellierung der Prozesse auf Zell-, Stack- und Systemebene zur Optimierung von Geometrie, Auslegung und Betriebsparametern (Grundlagenforschung)

ÜBERGREIFENDE FORSCHUNGSTHEMEN

Die Systemintegration der HTEL in Anlagen und Industrieprozesse erfordern eine Optimierung von peripheren Komponenten und der Qualität der stofflichen und elektrischen Schnittstellen. Die zukünftige Verbreitung dieser Technologie erfordert außerdem die Standardisierung und eine Modularisierung der kritischen Anlagenkomponenten. Die Integration in Energiesysteme erfordert außerdem die Werkzeuge, welche die Vorhersage und die prädiktive Steuerung von komplexen Systemen erlauben. Technologieübergreifend sollen deswegen folgende Problemstellungen bearbeitet werden:

Anlagentechnik

- Wasserdampfaufbereitung, mit speziellem Fokus auf der Auswirkung von Verunreinigungen im Wasserdampf auf die Degradation (Grundlagenforschung)
- CO₂-Aufbereitung, mit speziellem Fokus auf die Auswirkung von Verunreinigungen im CO₂ auf die Degradation der Zellen (Grundlagenforschung)
- Besseres Verständnis der erforderlichen Qualitäten für Wasserdampf und CO₂ bezüglich der Lebensdauer der Stacks (Grundlagenforschung)
- Entwicklung von Anlagentechnik für atmosphärischen Wasserdampf-, CO₂- und Co-Elektrolyse: HTEL-spezifische BoP-Komponenten (Angewandte Forschung)
- Entwicklung von Anlagentechnik für reversiblen Systembetrieb: reversible HTEL-spezifische BoP- und EBoP-Komponenten (Grundlagenforschung)
- Entwicklung der Anlagentechnik zur Abbildung dynamischer Lastprofile (Angewandte Forschung) Konzeptionierung der Anlagenüberwachung inkl. SOH (State-of-Health) und Erstellung von Sicherheitskonzepten inkl. Standardisierung (Angewandte Forschung)
- Modularisierung der Kernkomponenten (Stackmodul), so können Stacks von unterschiedlichen Lieferanten einsetzbar/austauschbar sein (Angewandte Forschung)

Systemsimulation, Analyse der Dynamik von HTEL-Anlagen bei EE-Stromkopplung, wirtschaftliche, nachhaltige Konzepte

- Lebenszyklusanalyse (Herstellungs-, Betriebs- und Recycling-Aspekte (LCA, life cycle analysis)) zu ökologischen Auswirkungen (Grundlagenforschung)
- Techno-ökonomische Analyse für Monitoring und Identifizierung der notwendigen Incentives und Leitanwendungen für HTEL/Techno-ökonomische Energiesystemanalyse zur Herleitung von Zielgrößen für HTEL z. B. Effizienz, Kosten, Lebensdauer und Benchmark-Systemanalysen (Grundlagenforschung)
- Wirtschaftliche Aufbereitung von Wasserdampf und CO₂, z. B. Meerwasser (thermische Aufbereitung) oder Ankopplung verschiedene Synthesegase, z. B. aus der Vergasung von Holz oder anderer biologischer Rohstoffe (Grundlagenforschung)
- Demonstrationsanlagen für Leitanwendungen/ Identifikation von Leuchtturmprojekten für die HTEL, Demonstration des wirtschaftlichen und sicheren Betriebs zur Schaffung einer Akzeptanzbasis (Demonstrationsvorhaben)
- Analyse der Wertschöpfungspotenziale und der Arbeitplatzeffekte bei großskaliger Nutzung von HTEL (Angewandte Forschung)
- Analyse von Sektorkopplungspotenzialen der HTEL in Industrieprozessen oder erneuerbarer HT-Wärme (Angewandte Forschung)

- Einsatz und Verfügbarkeit von kritischen Materialien für Technologiehochlauf (Grundlagenforschung)
- Betriebsweise der Anlage, Dauerbetrieb oder Anpassung an fluktuierenden Erneuerbaren Strom (Angewandte Forschung)

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist es, die HTEL-Technologie aus Deutschland für den breiten, globalen Einsatz in den Leitanwendungen kurzfristig verfügbar zu machen und mittelfristig hinsichtlich der Langzeitstabilität, den Kosten und der Flexibilität der Kopplung mit unterschiedlichen Anwendungsszenarien kompatibel zu gestalten.

■ THEMA 4: GRÜNER WASSERSTOFF: ALTERNATIVE HERSTELLVERFAHREN (PHOTOELEKTROCHEMISCH/PHOTOKATALYTISCH, SOLARTHERMOCHEMISCH, PHOTOBIOLOGISCH)

Neben der indirekten Nutzung der Sonnenenergie über die Stromproduktion durch PV und CSP zur anschließenden Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse befinden sich eine Reihe alternativer Technologien in der Entwicklung, bei denen die Sonnenenergie direkt genutzt werden kann. Dazu zählen die photoelektrochemischen/photokatalytischen, die solartthermochemischen und die photobiologischen Prozesse.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Die solare Strahlung ist die größte Quelle erneuerbarer Energie auf der Erde und spielt dadurch eine Schlüsselrolle bei der zukünftigen Produktion von grünem Wasserstoff. Die mit grünem Solarstrom (PV, CSP) betriebene alkalische oder PEM-Elektrolyse stellt den aktuellen Stand der Technik bei der solaren Herstellung von grünem Wasserstoff dar. Bei diesem indirekten Ansatz wird in einem Zwischenschritt zunächst elektrische Energie erzeugt, bevor diese zur Wasserspaltung genutzt wird. Dieser zusätzliche Umwandlungsschritt ist mit entsprechenden Umwandlungsverlusten und Systemkomplexität (u. a. Verkabelung) verbunden. Außerdem wird in PV-Modulen nur ein Teil des solaren Spektrums genutzt und der ungenutzte Teil führt zusätzlich zu einer Erwärmung der PV-Module, wobei der Wirkungsgrad der PV-Module mit zunehmender Temperatur abnimmt. Weitere Herausforderungen des Stands der Technik sind je nach verwendeter Technologie der Einsatz von

kritischen Rohstoffen und die Kopplung an das fluktuierende Angebot erneuerbarer Energiequellen.

Diese Herausforderungen können durch die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Wasserstoff umgangen werden. In diesem Zusammenhang sind besonders drei Pfade zu nennen:

- Photokatalytisch/photoelektrochemisch: Elektrochemische Erzeugung von Wasserstoff bei Raumtemperatur an Oberflächen von in Wasser getauchten photoaktiven Pulvern oder Dünnschichten ggf. in Kombination mit äußeren elektrischen Feldern
- Solartthermochemisch: Chemische Prozesse zur Erzeugung von Wasserstoff und Synthesegas die unter Ausnutzung von solar erzeugter Hochtemperaturwärme betrieben werden.
- Photobiologisch: Biologische Prozesse zur Erzeugung von Wasserstoff, welche die natürliche Photosynthese nutzen um mit den Reaktionsprodukten der Wasserspaltung direkt Wasserstoff zu generieren. Diese sind klar von Biomasse-basierten Verfahren zu unterscheiden.

Solartthermische Prozesse sind vor allem für die zentrale Wasserstoffproduktion in sonnenreichen Ländern geeignet und bieten besonders hohe theoretische Wirkungsgrade (vor allem bei einer weitgehenden Nutzung der Abwärme), sowie die Möglichkeit, die lokale Industrie über eine hohe Quote der lokalen Wertschöpfung erfolgreich einzubinden. Photokatalytische, photoelektrochemische und photobiologische Ansätze können durch die unmittelbare Nähe der optisch aktiven Zentren und der (elektro)katalytischen Reaktionsstellen eine optimale Nutzung der Sonnenenergie gewährleisten. Durch eine 10- bis 100-fach geringere Stromdichte bei der „künstlichen Photosynthese“ im Vergleich zu kommerziellen Elektrolyseuren, wird der Einsatz von Nicht-Edelmetall-Katalysatoren ermöglicht. Photobiologische Prozesse kommen zudem ganz ohne anorganische Katalysatoren aus. Wasserstoff, welcher aus photobiologischen Prozessen gewonnen wird, wird auch als „weißer Wasserstoff“ analog der „weißen Biotechnologie“ bezeichnet.

Insgesamt bieten die alternativen solaren Verfahren das Potential grünen Wasserstoff besonders effizient und kostengünstig herzustellen und gleichzeitig die Abhängigkeit von Edelmetallkatalysatoren zu reduzieren.



FORSCHUNGSTHEMEN

Photoelektrochemische/Photokatalytische Herstellverfahren

Forschungsfeld Materialien und Grenzflächen

Die Erzeugung von photoangeregten Ladungsträgern mit ausreichender Energie ist ein essenzieller erster Schritt bei der direkten photokatalytischen oder photoelektrochemischen Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser. Um eine ausreichend hohe Photospannung zu erzeugen, müssen zwei oder mehrere halbleitende Lichtabsorber kombiniert werden, welche komplementäre Teile des Sonnenspektrums absorbieren. Die Suche nach effizienten und kompatiblen Halbleitermaterialien, die unter den hochreaktiven Bedingungen der Wasserspaltung (photo)chemisch stabil sind, ist hierbei eine große Herausforderung. Um die interne Ladungstrennung und die Photospannung dieser Materialien zu verbessern, müssen Defekt- und Oberflächenpassivierungsstrategien entwickelt werden. Darüber hinaus sollten die Halbleiteroberflächen mit geeigneten (edelmetallfreien) Elektrokatalysatoren modifiziert werden, um den Ladungstransfer über die Fest-Flüssig-Grenzfläche zu optimieren. Dies erfordert ein besseres grundlegendes Verständnis der Struktur und der Eigenschaften von fest/fest- und fest/flüssig-Grenzflächen. Kurz zusammengefasst lässt sich der Forschungsbedarf wie folgt beschreiben:

- Suche nach neuen, stabilen Halbleitermaterialien mit geeigneten Bandlücken
- Untersuchung und Optimierung von fest-fest und fest-flüssig Grenzflächen
- Erhöhung des Wirkungsgrades (> 10 % bis 2027) und der Stabilität (> 1000 h bis 2030) von geeigneten Materialkombinationen

Forschungsfeld Skalierung

Großflächige photokatalytische und photoelektrochemische Systeme weisen in der Regel niedrige Wirkungsgrade auf, da beim Transport von Photonen, Elektronen und Ionen Kompromisse im Zell-Entwurf (z. B. Verhältnis von photoaktiven zu katalytisch aktiven Flächen, Einsatz einer Membran für optimale Gastrennung oder membranfreie Konstruktion zur Vermeidung von Schattenwirkung, usw.) eingegangen werden müssen. Innovative neue Designkonzepte, die diese Kompromisse minimieren oder sogar vermeiden und gleichzeitig die kostengünstige Produzierbarkeit im großen Maßstab gewährleisten, müssen in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern entwickelt werden. Um das Verhalten

dieser Systeme unter praktischen Bedingungen zu verstehen und zu optimieren, muss der Einfluss von (schwankender) Bestrahlungsstärke, Temperatur und Materialalterung auf die Leistung und Stabilität der Systeme untersucht werden. Modellierung auf allen Skalen, von der Material- bis zur Zell- und Systemebene, wird dabei eine Schlüsselrolle spielen. In Summe kann der Forschungsbedarf so zusammengefasst werden:

- Entwicklung von skalierbaren Architekturen für Bauelemente und Reaktoren (kurzfristig)
- Langzeitstudien zur Stabilität und Wirkungsgrad unter realen Bedingungen (mittelfristig)
- Modellierung und Optimierung photoelektrischer Systemaspekte (langfristig)

FORSCHUNGSTHEMEN

Solarthermochemische Herstellverfahren



Solarthermochemische Anlage SUN-to-LIQUID in Spanien: Ein Prozessschritt ist die Produktion von Wasserstoff mittels thermochemischem Redox-Zyklus (© DLR)

Forschungsfeld Materialien und reaktive Strukturen

Die reaktiven Materialien geben den Spielraum für die Prozessparameter und das theoretische Wirkungsgradpotential vor. Daher spielen sie eine zentrale Rolle bei der Entwicklung solarthermochemischer Prozesse. Für die solarthermochemische Wasserspaltung hat sich Ceroxid als Referenzmaterial in den letzten Jahren etabliert. Basierend darauf liegen die Forschungsbedarfe zum einen in der Optimierung der Ceroxidstrukturen, der Entwicklung und Erprobung neuer reaktiver Materialien, sowie in der Langzeiterprobung der Materialien und Strukturen unter betriebsnahen Bedingungen. Diese Forschungsfragen werden sowohl in der Grundlagenforschung als auch anwendungsnah durchgeführt:

- Suche nach reaktiven Materialien mit verbessertem Systemwirkungsgradpotential (mittelfristig)
- Entwicklung von reaktiven Absorberstrukturen mit optimierter Materialausnutzung (mittelfristig)
- Langzeiterprobung von Materialien und Receiver-Reaktoren (mittelfristig)

Forschungsfeld (Receiver-)Reaktoren

Die (Receiver-)Reaktorentwicklung ist neben der Materialentwicklung die zweite zentrale Voraussetzung der solarthermochemischen Wasserstofferzeugung. In den letzten Jahren wurden mehrere verschiedene Ansätze erforscht und in Anlagen mit bis zu 50 kW und realen Bedingungen erprobt. Die erzielten Wirkungsgrade liegen bei diesen Receiver-Reaktoren mit fest verbauten monolithischen Ceroxid-Schaumstrukturen aktuell bei ca. 5 %. Neben der Weiterentwicklung dieser Anlagen, sind auch neue Konzept mit höheren Wirkungsgradpotentialen zu untersuchen und erproben. Diese erlauben beispielsweise eine kontinuierliche Bestrahlung der Receiver durch den Transport des reaktiven Materials in partikelförmiger oder monolithischer Form und erreichen damit höhere Wirkungsgradpotentiale. Bei der Technologieentwicklung ist auf die Skalierbarkeit der Anlagen zu achten. Die Forschungsfragen sind anwendungsnah, wobei für die Entwicklung neuer Konzepte teilweise auch noch grundlegende Fragenstellungen zu erforschen sind. Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Entwicklung von solarthermochemischen Receiver-Reaktoren mit einem Wirkungsgrad von > 10 % bis 2025 und > 15 % bis 2030:

- Verbesserung von Receiver-Reaktoren zur Erreichung von Wirkungsgraden > 10 % (mittelfristig)
- Erprobung von Receiver-Reaktoren unter realen Bedingungen im 100 kW Maßstab (mittelfristig)
- Entwicklung innovativer Receiver-Reaktorkonzepte mit hohem Wirkungsgradpotential (mittelfristig)
- Skalierung von Receiver-Reaktoren (mittelfristig)

Forschungsfeld Anlage und Betrieb:

Für die Produktkosten ist neben dem Reaktor das Gesamtsystem und die intelligente Verknüpfung von Wärmeströmen entscheidend. Hier geht es um eine möglichst weitgehende Wärmerückgewinnung und

Abwärmenutzung. Zusätzlich ist der Eigenenergieverbrauch der Anlagen zu optimieren. Ein weiterer entscheidender Kostenfaktor ist, wie bei solarthermischen Kraftwerken zur Stromerzeugung, das Solarkonzentratorsystem. Dies besteht aus einem Heliostatfeld welches für Hochtemperaturprozesse mit Sekundärkonzentratoren kombiniert wird. Die Forschungsfragen sind anwendungsnah:

- Verbesserte Abwärmenutzung und Entwicklung von Systemen zur Wärmerückgewinnung (kurzfristig)
- Minimierung von parasitären Energieverbräuchen (z. B. bei der Sauerstoffentfernung) (kurzfristig)
- Optimierung von Solarkonzentratoren für Hochtemperaturanwendungen (Heliostaten, Sekundärkonzentratoren) (mittelfristig)

FORSCHUNGSTHEMEN

Photobiologische Herstellverfahren

Forschungsfeld Biokatalysatordesign

Das Herzstück eines photobiologischen Prozesses ist der Organismus, welcher den Wasserstoff letztendlich produziert. Hier kommen Prokaryonten oder einzellige Algen zum Einsatz, welche eine oxygene Photosynthese betreiben. Um diese Organismen effizient in einem Wasserstoffproduktionsprozess einsetzen zu können, müssen einige Herausforderungen bewältigt werden. Zum einen sind die intrinsischen Hydrogenasen (die Enzyme, welche schlussendlich den Wasserstoff synthetisieren) dieser Organismen sehr Sauerstoffsensitiv und werden von diesem inaktiviert. Dies kann man lösen, indem man Sauerstoff-tolerante Hydrogenasen in die Produktionsorganismen integriert, bzw. die Reaktionsumgebung weitgehend sauerstofffrei hält. Zum anderen ist die Effizienz dieser Prozesse maßgeblich davon abhängig, an welcher Stelle der photosynthetischen Elektronentransportkette die Hydrogenasen gekoppelt werden. Im Idealfall wäre dies Photosystem II, was aber thermodynamisch eher ungünstig ist. Machbarer erscheint die Kopplung an das Photosystem I.

- Optimierung der Elektronenausbeute für die Wasserstoffsynthese
- Maximieren der Stabilität der photobiologischen Wasserstofferzeugung



Forschungsfeld Produktabtrennung

Photobiologische Wasserstofferzeugung wird sich ökonomisch sinnvoll nur realisieren lassen, wenn man diese (semi-)kontinuierlich betreibt. Angestrebt werden Reaktorstandzeiten von mind. sechs Monaten. Kontinuierliche Prozessführung führt hier zu geringen Volumenströmen und vergleichsweise niedrigen Produkttitern. Diese sind an die derzeit existierenden Abtrennungsverfahren nicht koppelbar, da sich die Skalen hier grundsätzlich unterscheiden. Ferner besteht das Problem der Bildung explosiver Knallgasgemische, da durch die oxygene Photosynthese parallel zur Wasserstoffsynthese Sauerstoff freigesetzt wird. Es besteht also Bedarf an geeigneten Abtrennungskonzepten, welche in situ den Wasserstoff aus dem Reaktionsgemisch entfernen. Dies bedingt die Entwicklungen neuartiger reaktiver Materialien wie auch Reaktionstechnik, sowie der Langzeiterprobung der Materialien und Konzepte.

- Entwicklung von reaktiven Absorbermaterialien für die selektive Trennung von Sauerstoff und Wasserstoff in Volumenströmen mittlerer Größenordnung
- Integration von Absorberstrukturen für die selektive Wasserstoffabtrennung in existierende Photobioreaktoren um eine in situ Abtrennung zu gewährleisten
- Langzeiterprobung von Materialien und Reaktionskonzepten

Forschungsfeld Photobioreaktordesign

Photobiotechnologische Prozesse basierend auf ganzen Zellen, zu denen auch die photobiologische Wasserstofferzeugung zählt, sind bislang nur zu einem geringen Teil in der Industrie implementiert. Das hat unter anderem mit den ungenügenden Leistungsparametern (Ausbeuten, Stabilitäten, Produktivitäten) der existierenden Bioreaktoren zu tun. Diese haben ihren Ursprung in der klassischen Biotechnologie und der Anwendung organo-heterotrophen Organismen und ihr größter Nachteil ist die unzureichende Beleuchtung. Da Licht für die Photosynthese betreibenden Zellen eines der Hauptsubstrate darstellt, ist dessen Eintrag in den Bioreaktor von entscheidender Bedeutung. Limitationen führen zu geringen Zelldichten, was sich schlussendlich auch negativ auf die Wasserstoffproduktion auswirkt. Des Weiteren muss die Skalierbarkeit neuartiger Reaktoren und die damit

einhergehende Flächeneffizienz mitbeachtet werden. Viele neue Reaktorsysteme laufen lediglich im Labormaßstab ab und die Skalierungsproblematik wird nicht weiter beachtet. Ähnlich wie im Forschungsfeld Produktabtrennung sehen wir auch hier Bedarf an neuen Materialien, welche als Lichtleiter Licht in den dreidimensionalen Raum transportieren, und ggf. auch als Aufwuchsfläche für die Produktionsorganismen dienen umso eine kontinuierliche Prozessführung zu ermöglichen.

- Entwicklung neuer Konzepte/Materialien zur Lichtleitung in dreidimensionalen Räumen.
- Entwicklung neuer Reaktorgeometrien zur flächeneffizienten und kontinuierlichen Kultivierung der Produktionsorganismen

■ THEMA 5: GRÜNER WASSERSTOFF: EINSATZ VON BIOMASSE UND BIOGENEN RESTSTOFFEN (FERMENTATION, REFORMIERUNG, VERGASUNG, PLASMALYSE)

Als eine der vielversprechendsten Quellen für grünen Wasserstoff zählt heute auch der Einsatz von Biomasse und biogenen Reststoffen. Bei der Produktion werden Verfahren wie die Fermentation, Reformierung, Vergasung und Plasmalyse von fester, flüssiger und gasförmiger Biomasse (Biogas) genutzt, die sich derzeit auf unterschiedlichen TRL von 2 bis 7 befinden und demnach unterschiedliche Forschungsbedarfe aufweisen.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Biogener Wasserstoff ist ideal, um komplementär und z. T. synergistisch zur Elektrolyse den Wasserstoffmarkthochlauf zu unterstützen. Die dezentrale, kontinuierliche und wetterunabhängige Produktion ermöglicht regional geschlossene Stoffkreisläufe und Wertschöpfungsketten. Durch dezentrale Lösungen können Transporte von Substraten und Produkten minimiert und damit biogene Wasserstoffquellen kurzfristig und kosteneffizient verfügbar gemacht werden. In Abhängigkeit der Substrate können hohe THG-Minderungspotenziale und THG-Senken („negative Emissionen“) erreicht werden. CCS/CCU-Technologien können das THG-Senkenpotenzial (> 300 %) weiter steigern oder regeneratives CO₂ sowie weitere Nebenprodukte

(z. B. organische Säuren aus der Dunkelfermentation) als Rohstoff für die Synthese von Chemikalien und Kraftstoffen bereitstellen. Die biogene H_2 -Produktion kann somit zu einer stofflichen und energetischen Produktflexibilisierung beitragen, damit den Anlagenbestand in Deutschland sichern und weitere THG-Minderungspotenziale heben. Biogener Wasserstoff kann einen Beitrag zur Erreichung der in der deutschen Wasserstoffstrategie aufgezeigten H_2 -Bedarfe leisten.

FORSCHUNGSTHEMEN

Wasserstoff aus Biomasse und biogenen Reststoffen

Die Forschungsinhalte teilen sich in theoretisch und praktisch zu erarbeitenden Themen auf. Der Bedarf an theoretischen Arbeiten lässt sich wie folgt beschreiben:

- Ökonomische und ökologische Gesamtbewertung der Wertschöpfungskette
- Potenzialanalyse unter Berücksichtigung der Rest- und Abfallstoff-Vorkommen und Nutzungskonkurrenzen
- Bewertung der Kaskadennutzung von Biomasse und Koppeffekte auf die Nachhaltigkeit der Wertschöpfungskette
- LCA (THG- bzw. Umweltbilanzierung) der Technologien auch im Vergleich zur Elektrolyse hinsichtlich u.a. des Wasserbedarfs und eingesetzten Rohstoffe (z. B. seltene Erden)

Praxisbezogene Forschungsleistungen sollten in den folgenden Bereichen erbracht werden:

- Anwendungsorientierte Grundlagenforschung und Skalierung von Labor- auf Realmaßstab für Technologien im unteren TRL-Bereich (ca. 2–4) (u.a. Dunkelphotosynthese, Hochtemperaturpyrolyse)
- Pilotvorhaben in Realumgebung für Technologien im oberen TRL-Bereich (ca. 5–7) (u.a. Dampfreformierung, Vergasungsprozesse, Autotherme Reformierung, Plasmalyse, Dunkelfermentation, Partialoxidation, Einkopplung erneuerbare Energien)

- Spezifisch abgestimmte Eduktaufbereitungs- und Wasserstoffabscheidungstechnologien
- Auf die Edukte abgestimmte lebensdauer- oder wirkungsgradsteigernde Entwicklungen (Katalysatoren, Materialien, etc.)
- CO_2 -Nutzung zur Hebung der THG-Senkenpotenziale

Allgemein müssen die Ergebnisse der Forschung belastbare Aussagen zu den technischen Potenzialen der Reststoffnutzung, wirtschaftlichen Potenzialen der verfügbaren Technologien und THG-Minderungspotenzialen bei deren Anwendung generieren und diese im Vergleich zu anderen Technologiepfaden darstellen.

■ THEMA 6: BLAUER UND TÜRKISER WASSERSTOFF (H_2 -HERSTELLUNG AUS CH_4 OHNE BILANZIELLE CO_2 -EMISSIONEN)

Blauer Wasserstoff ist Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen, bei dem das bei der Erzeugung entstehende CO_2 abgeschieden und gespeichert wird.

Türkiser Wasserstoff ist Wasserstoff, der über die Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt wird und bei dem der Kohlenstoff anschließend elementar und in fester Form vorliegt. Die hierzu notwendige Energie stammt vorzugsweise aus regenerativen Quellen.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Blauer und türkiser Wasserstoff bieten die Möglichkeit, trotz der aktuell begrenzten Verfügbarkeit regenerativer elektrischer Energie und entsprechender Wasserelektrolyse-Kapazitäten einen Hochlauf der wasserstoffbasierten Energieversorgung und damit eine erhebliche Reduktion der Treibhausgasemissionen ab 2030 ggf. auch früher zu erzielen. Sie können somit einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft liefern. Daher sind beide Technologien ein wichtiges Element für den Erhalt insbesondere der chemischen Industrie in Deutschland, die nur durch Nutzung emissionsarmer und wirtschaftlich wettbewerbsfähiger Wasserstoffquellen ihren geforderten Beitrag zur Dekarbonisierung leisten kann. Über die



Nutzung fossilen Methans hinaus besteht die Möglichkeit des Einsatzes von Biomethan oder Biogas sowie der klimafreundlichen Nutzung von Abfall- oder Reststoffen, wie z. B. nicht vermeidbarer Grubengase oder Deponiegase. Zusätzlich können durch die Produktion von blauem und türkischem Wasserstoff Kohlenstoff bzw. Kohlenstoffdioxid als zukünftige Wertstoffe für die industrielle Produktion im Sinne geschlossener Kreisläufe bereitgestellt werden. Beim Einsatz von biogenen Gasen ermöglicht dies im Extremfall sogar den Aufbau von Wertschöpfungsketten mit negativen CO₂-Emissionen.

Die Forschungsaktivitäten für türkisen und blauen Wasserstoff sind allesamt kurz- bis mittelfristig umzusetzen und decken Grundlagenforschungsthemen aus dem Umfeld der Reaktionstechnik, die angewandten Forschungsthemen aus dem Umfeld der Prozessentwicklung und des Scale-Ups, die angestrebte schnelle Umsetzung in den Pilot- und Demonstrationsmaßstab sowie begleitende Arbeiten zur Life Cycle Analysis und zur gesellschaftlichen Akzeptanz ab. Schwerpunkte stellen die angewandten Forschungsthemen und die Überführung in den Demonstrationsmaßstab dar, damit der schnelle Markthochlauf von Wasserstoff, der für eine Dekarbonisierung der Gaswirtschaft und Grundstoffindustrie unabdingbar ist, erreicht werden kann.

FORSCHUNGSTHEMEN Blauer Wasserstoff

Forschungsschwerpunkte zur Etablierung von blauem Wasserstoff sollten die Entwicklung geeigneter regionaler und überregionaler Infrastrukturen vor allem zur Abtrennung, Zwischenspeicherung und zum Transport von CO₂ sein. Zur Steigerung der Akzeptanz dieser Technologien in der Gesellschaft muss dabei besonders Augenmerk auf den sicheren Umgang und langfristige Konzepte gelegt werden, um Versäumnisse der Vergangenheit auf diesem Gebiet aufzuholen. Wichtige Forschungsfelder zum blauen Wasserstoff:

- Small-scale Anwendungen inklusive CO₂-Abtrennung: Verfahrenskonzepte/-entwicklung z. B. für Biogasanlagen und sonstige Methan-Punktquellen (z. B. Grubengas, Deponiegas etc.)
- Transport und Zwischenspeicherung von CO₂: Synergie von CCS- und CCU-Prozessen auch unter Berücksichtigung von unvermeidlichem CO₂ aus Prozessen wie der Zementherstellung

- Erweiterung der CCU-Verfahren mit Fokus insbesondere auf solche mit Langzeitbindung von CO₂
- Sicherheit und Akzeptanz in der Gesellschaft bzgl. geologischer offshore Speicherung von CO₂

Vorrangiges Ziel der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zum blauen Wasserstoff ist die Nutzung von CO₂ (CCU) und der damit verbundene Aufbau einer Kreislaufwirtschaft durch Verbindung von Emittenten und Senken. Hierzu sind kurzfristig und mit hoher Priorität gesamtheitliche, kostengünstige regionale und überregionale Transportinfrastruktur sowie Sicherheitskonzepte zu entwickeln. Gerade letztere sind entscheidend für die notwendige Akzeptanz der Technologie in der Gesellschaft. Insgesamt kann die zu entwickelnde Infrastruktur auch für die derzeit in der Umsetzung befindlichen CCS-Verfahren, z. B. offshore Norwegen oder den Niederlanden genutzt werden. Sowohl durch CCU als auch CCS ist eine kurzfristige, signifikante Reduktion der CO₂-Emissionen bei relativ geringem Energieaufwand darstellbar. Weiteres Potential bietet hierbei die Entwicklung kostengünstiger Small-Scale-Anlagen für die Nutzung der Technologie für kleinere Produzenten wie z. B. Biogasanlagen.

FORSCHUNGSTHEMEN Türkiser Wasserstoff

Durch türkisen Wasserstoff lässt sich ähnlich wie mit blauem Wasserstoff eine tiefgreifende Dekarbonisierung der Gasversorgung ab voraussichtlich 2030 erzielen. Allerdings haben die (Pyrolyse-)Verfahren noch nicht die für die großtechnische Umsetzung nötige technologische Reife erzielt und Schwerpunkt sollte daher die Überführung der ersten Technologien in den Demonstrationsmaßstab sein. Parallel hierzu sind viele weitere Fragestellungen up-stream und down-stream der eigentlichen Pyrolyseprozesse zu klären, die von der Grundlagenforschung bis hin zur Adaption etablierter Verfahren an die bisher nur teilweise adressierten Fragestellungen reichen. Als dritter Punkt sollte auch parallel die Forschung zur Prozessentwicklung weiterer Pyrolyseprozesse ergebnisoffen verfolgt werden, da sich zum jetzigen Zeitpunkt keine zu favorisierende Variante abzeichnet.

Wichtige Forschungsfelder zu türkisen Wasserstoff sind:

- Prozessentwicklung: Überführung von Pyrolyse-Prozessen und -Verfahren von niedrigem TRL in

den Pilot- oder Demonstrationsmaßstab. Technologien up-stream und down-stream der Pyrolyse (z. B. Edukt- und Produktaufbereitung).

- Reaktionstechnik: Aufklärung von Reaktionsmechanismen und Nebenreaktionen und Vertiefung des Prozessverständnisses. Bestimmung Reaktionskinetik und Stoffeigenschaften bei den üblicherweise sehr hohen Temperaturen und der Hydrodynamik der reagierenden Mehrphasen-Systeme.
- Werkstofffragen: Korrosion und Löslichkeiten, Temperaturbeständigkeit und Kompatibilität von Materialien. Spezielle Aspekte der H_2 -Verträglichkeit und der Herausforderungen durch Nebenprodukte und deren Handhabung.
- Prozesskettenbetrachtung: Reaktorauslegung, Gasaufbereitung, Qualität und Nutzung von Nebenprodukten.
- Produkte: Aufbereitung, Nutzung, Lagerung und Qualitätsanforderung der Produkte H_2 und C.

Für türkisen Wasserstoff gilt es die technische Reife für die Nutzung im industriellen Maßstab zügig zu erhöhen und so zeitnah das hohe Potential der Technologie zu erschließen. Darauf aufbauend gilt es kostengünstige Small-Scale-Anlagen für kleinere Produzenten wie z. B. Biogasanlagen oder Abfallgase zu entwickeln. Des Weiteren besteht Forschungsbedarf bzgl. der Qualität der Edukte und des prozessbedingt anfallenden (Neben-)Produkts Kohlenstoff. Forschung und Entwicklung fokussieren darauf, die für die stoffliche Verwertung geeigneten Qualitäten zu erzielen bzw. die anwendungsspezifische, kostengünstige Umwandlung des Kohlenstoffs in insbesondere für die industrielle Nutzung geeignete Modifikationen zu ermöglichen.

■ THEMA 7: METHAN, METHANOL, AMMONIAK, OLEFINE UND ETHER (CHEMISCHE GRUNDSTOFFE, ENERGIETRÄGER UND KRAFTSTOFFE)

Im Fokus der Reduktion von Treibhausgasemissionen energie- und rohstoffintensiver industrieller Wertschöpfungsketten stehen die Herstellung von Plattformchemikalien, Energieträgern und Düngemitteln

sowie die klimafreundliche Speicherung von Wasserstoff und die Bereitstellung von Energiebedarf z. B. in Form von Prozesswärme. Die Herstellung und Nutzung von Methanol, Ammoniak, Olefine, Ether und flüssigen Komponenten zur Wasserstoffspeicherung stellen Schlüsseltechnologien für den Strukturwandel der rohstoff- und energieintensiven Industrie dar.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Der Transformationsprozess hin zur nachhaltigen Erzeugung von Produkten ist für nahezu alle Bereiche eine große Herausforderung. Dies gilt im besonderen Maße für die Mobilität und die chemische Industrie. Im Bereich der Mobilität sind Energieträger von hoher Energiedichte dort weiterhin in der Diskussion, wo E-Mobilität nur langfristig umsetzbar erscheint, wie z. B. insbesondere Luftfahrt, maritime Schifffahrt und (Fern-) Schwerlastverkehr. Von besonderem Interesse in der chemischen Industrie ist hierbei die erforderliche nachhaltige Umgestaltung von zu verändernden Produktionsabläufen. Die Entwicklung, Optimierung, Integration in Prozesse und Wertschöpfungsketten, die Bewertung und Hochskalierung neuartiger, aber auch existierender, klimafreundlich gestalteter Prozessschritte zur nachhaltigen Erzeugung „kleiner“ Moleküle (wie z. B. Methan, Methanol, Ammoniak, Olefine und Ether) unter Nutzung von grünem Wasserstoff sowie CO und/oder CO_2 ist unverzichtbar auf dem Weg zum Erreichen der Klimaneutralität. Von besonderer Herausforderung sind zum einen die Weiterentwicklung des technischen Reifegrades, sowohl der Gesamtprozesskette wie auch der jeweiligen Einzelschritte innerhalb des Herstellungsprozesses des spezifischen Produktes, die Umgestaltung bestehender Prozesse durch „smarte“ Integration von grünem Wasserstoff, die Integration von Wärme- und Stoffströmen sowie das Designen der entsprechenden Abläufe mithilfe von neu zu entwickelnden Modellen und Software. Besondere Bedeutung kommt der Speicherung und dem Transport „kleiner“ Moleküle (wie H_2) in Form von CH_4 , MeOH, NH_3 oder Liquid Organic Hydrogen Carriers zu aufgrund der Rahmenbedingungen (z. B. fluktuierende und dezentrale Stromherstellung). Die Aktivitäten zielen auf die Sicherstellung und sogar auf eine Erweiterung des Wissens- und Wirtschaftsstandorts Deutschland.



FORSCHUNGSTHEMEN

Neue Materialien

Neue Materialien wie insbesondere Katalysatoren, Membranen und Elektrodenmaterialien sind der Schlüssel zur Steigerung der Prozesseffizienz, der Senkung von spezifischen Investitionen und der Toleranz gegenüber dynamischer Bereitstellung von Rohmaterialien und Energien. Zielparameter sind bspw. die Erhöhung der Standzeiten und verbesserter Zielproduktselektivitäten, neue Materialien bilden damit die Grundlage für die Entwicklungen neuer innovativer und effizienter Verfahren. Notwendig ist eine intensivierte Verknüpfung von Grundlagenforschung und angewandter Forschung sowohl im Bereich der akademischen wie der industriellen Forschung und die Beschleunigung des Übergangs innovativer Materialsysteme von der Forschung in die Anwendung hinein. Diese neuen Materialien werden ihre Anwendungen sowohl in etablierten Verfahrenskonzepten unter Nutzung der Thermokatalyse aber auch in Verfahrenskonzepten finden, die sich derzeit im Stadium von Forschung und Entwicklung befinden (Elektrosynthese, Plasma-Verfahren, direkte Kopplung von Solarthermie und Synthese, photochemische Verfahren). Dieser Ansatz verspricht eine wesentlich effizientere industrielle Umsetzung und somit letztlich auch eine schnellere Markteinführung und Reduktion der Treibhausgasemissionen.

FORSCHUNGSTHEMEN

Neue Verfahrens-, Apparate- und Anlagen-Konzepte

Angestrebt werden neuartige Konzepte hinsichtlich Verfahren (elektrochemische Synthese von CH_4 , NH_3 , Methanol, DME). Diese können sowohl elektrochemisch, solarthermische, photochemisch sowie biochemische Synthesen umfassen, wie auch innovative Apparate- und Anlagenkonzepte (z. B. 3D-gedruckten Apparate, modularisierte Anlagen, Serienfertigung von Produktionsanlagen, autonom betriebene Produktionsanlagen, dynamischer Anlagenbetrieb). Diese Entwicklungen zielen ab auf eine Verringerung der Komplexität der Prozesse und Anlagen, der Verringerung von Kreislaufströmen, der Beschleunigung des Scale-up innovativer Technologien und einer Erhöhung der Effizienz von Prozessen und Prozessketten.

Für die Wasserstoff-Speicherung sollen neue Verfahren zur Freisetzung des Wasserstoffs aus den Speichermolekülen wie bspw. NH_3 demonstriert wer-

den; diese müssen integriert sein in Prozesse zur Anwendung des Wasserstoffs im Industrie- oder Mobilitätssektor.

FORSCHUNGSTHEMEN

Nutzung von Werkzeugen der Digitalisierung

Die Entwicklung und Skalierung neuer Materialien und Prozesse wird zukünftig in verstärktem Maße auf Basis von Modellen und Software erfolgen kombiniert mit innovativen Test- und Prüfverfahren und der verstärkten Nutzung von Forschungsdaten - Stichworte sind hier „Digitale Zwillinge“ und „Smarte Fabriken“. Die Integration von Stoff- und Energieströmen in Prozessketten und die Optimierung von Effizienz und Resilienz unter den Bedingungen der Energiebereitstellung aus fluktuierenden Energiequellen ist die große Herausforderung der zukünftigen Herstelltechnologien für die Herstellung von großvolumigen Zwischenprodukten und Endprodukte. Diese Optimierung wird überwiegend unter Nutzung von Prozessmodellen der Prozesse und Prozessketten durchgeführt.

FORSCHUNGSTHEMEN

Bewertung und Normierung

Bei der stärker anwendungsorientierten Forschung ist zu beachten, dass Neuentwicklungen von Prozessen/Prozesskomponenten nicht unabhängig vom Anwendungsszenario betrachtet und bewertet werden können. Als wichtige Forschungsthemen zur Realisierung des Transformationsprozesses hin zur nachhaltigen Erzeugung von Produkten mit drastisch reduziertem CO_2 -Fußabdruck sollen dabei berücksichtigt werden:

- Integration neuer Technologien in bestehende Wertschöpfungsketten, evtl. zeitliche Veränderung von Wertschöpfungsketten, Betrachtung verschiedener Szenarien. Bewertung des Potentials für neue Wertschöpfungsketten und -netzwerke
- Standortfaktoren, Verknüpfung mit (nachhaltig erzeugten, auch mit erneuerbarem Strom) zur Verfügung stehenden Rohstoffen (H_2 , CO_2 , N_2), Integration von Konzepten für Logistik, Verfahren und Anlagen
- Integration von Entwicklungsarbeiten und Bewertung der Konzepte, Benchmarking gegenüber Wettbewerbskonzepten

- Dynamischer Betrieb, Festlegung von Zwischenspeichern zur Optimierung des Übergangs von dynamischen zu stationärem Betrieb
- Integration/Adressierung von Normen und Regularien, national und international, bereits während der Herstellung der Produkte bzw. der Optimierung der Gesamt-Prozeßkette
- Akzeptanzfragen, bereits während der Herstellung der Produkte bzw. der Optimierung der Gesamt-Prozeßkette
- Markteinführungsmechanismen, bereits während der Herstellung der Produkte
- Techno-ökonomisch sowie ökologisch-soziale Bewertung der Materialien, Prozess- und Anlagen-Technologien und der daraus hergestellten Produkte

FORSCHUNGSTEHMEN

Plattformen für Entwicklung und Demonstration

Für die Beschleunigung des Übergangs neuer Entwicklungen einschließlich möglicher disruptiver Ansätze von der Forschung in die industrielle Umsetzung, ist eine intensivierte Zusammenarbeit zwischen akademischer Forschung in Hochschulen und Forschungsinstituten und von Industrieunternehmen entlang der Wertschöpfungskette notwendig. Diese Kooperation kann in Form von gemeinsamen Plattformen für Entwicklung und Demonstration gefördert werden und wesentliche Impulse für einen beschleunigten Transformationsprozeß liefern. Insbesondere sollen diese die kritische Masse ermöglichen für die Überführung von neuen, integrierten Ansätzen, je nach Reifegrad, in den Pilot- oder Demonstrationsmaßstab.

■ THEMA 8: SYNTHETISCHE KEROSINE, DIESEL- UND OTTOKRAFTSTOFFE (SYNFUELS)

Synthetische Kraftstoffe sind flüssige Kohlenwasserstoffe, die auf Basis erneuerbarer Energien bzw. nachhaltig gewonnener Rohstoffe wie H_2 , CO und CO_2 hergestellt werden. Solche Kraftstoffe werden auch als Synfuels oder E-Fuels bezeichnet. In der Luftfahrt wird der Begriff Sustainable Aviation Fuel (SAF) verwendet. Für all diese Kraftstoffe und ihre Vorprodukte, wie z. B.

Wasserstoff und Synthesegas, existieren unterschiedliche Herstellungspfade, die unterschiedliche technologische Reifegrade (Technology Readiness Levels, TRLs) besitzen - z. B. von bereits ASTM-zugelassenen Kerosin-Erzeugungs-Routen via Fischer-Tropsch-Synthese bis hin zu neuartigen Verfahren wie Methanol-to-Jet, die bislang nicht zugelassen sind. Je nach chemischer Zusammensetzung können Synfuels Kerosin-, Diesel- oder Ottokraftstoffen beigemischt werden oder diese auch komplett ersetzen (siehe auch Cluster 3: Mobile Nutzung von H_2).



Abbildung: Betankung des Airbus A320 ATRA mit alternativen Treibstoffen (© DLR (CC-BY 3.0)).

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Um die Emissionsziele in der Luftfahrt zu erreichen, sind flüssige Kohlenwasserstoffe für die meisten Anwendungsfälle auf absehbare Zeit alternativlos. Sie bieten die Chancen, sowohl die CO_2 -Emissionen des Luftfahrt-Sektors als auch indirekte Klimaeffekte (z. B. durch Rußemissionen und induzierte Kondensstreifen-Zirren) zu reduzieren. Auch im Schiffs- und Straßenverkehr (hier insbesondere im Güterfern-/Lastverkehr) sind nachhaltige synthetische Kraftstoffe auf Basis von Kohlenstoff und regenerativ erzeugtem Wasserstoff oder regenerativ erzeugtem Synthesegas (H_2/CO) ein wichtiger Baustein für einen nachhaltigen Transport. Hier können synthetische Kraftstoffe zukünftig ebenfalls zur Reduktion von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen beitragen.

Durch die beschlossene PtL-Kerosin-Quote in Deutschland von 2 % in 2030 werden in 2030 ca. 200.000 t/a PtL-Kerosin benötigt. Bislang existieren in Deutschland jedoch nur kleine Demonstrationsanlagen, die wenige hundert Tonnen pro Jahr produzieren. Darüber hinaus wurde der Bau mehrere größerer Anlagen im In- und Ausland angekündigt bzw. ausgeschrieben.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht sowohl in der Entwicklung, Bewertung, Optimierung neuar-



tiger Prozess-Schritte und -Routen zur Erzeugung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe sowie in der Hochskalierung der Produktion und den damit verbundenen Fragestellungen. Diese Arbeiten sollen technologieoffen erfolgen und sind ein zentraler Schritt zum Erreichen der Technologie- und Klimaziele der Bundesregierung. Unterschiedliche Technologien und Prozessschritte, müssen ideal aufeinander abgestimmt und miteinander kombiniert werden, um eine effiziente und wirtschaftliche Produktion zu ermöglichen. Die Forschung soll ebenso Energiepartnerschaften und Technologieexport der deutschen Industrie ermöglichen. Herausforderungen bestehen insbesondere bei der Synthesegasbereitstellung, sowie bei einzelnen Prozessrouten zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe. So muss der Methanol-to-Jet Pfad weiterentwickelt und zur Marktreife gebracht werden sowie die Ausbeute, Selektivität und Effizienz beim Fischer-Tropsch-Pfad optimiert werden.

FORSCHUNGSTHEMEN

Forschungsfeld Rohstoff-Bereitstellung

Für die Erzeugung nachhaltiger Kraftstoffe werden vor allem grüner Wasserstoff (und erneuerbare Energien) sowie Kohlenstoff (z. B. über CO_2 aus Punktquellen oder aus der Luft bzw. über Biomasse als erneuerbarer Kohlenstoffträger) benötigt. Hierfür sind Anforderungen an Infrastruktur (z. B. Mobilisierung von Rohstoffen, lokale Verfügbarkeit der Kohlenstoff- und EE-Quellen, Fluktuation erneuerbarer Quellen, Transport und Speicherung) zu berücksichtigen. Weiterhin müssen Anforderungen an die Toleranz gegenüber Fremdstoffen in Syntheseprozessen erkannt und optimiert werden.

Forschungsfeld Synthesegas-Bereitstellung

Etliche Produktions-Pfade für synthetische Kraftstoffe benötigen ein Synthesegas (CO/H_2) als Zwischenprodukt. Hierfür müssen sowohl demonstrierte Verfahren verbessert und entsprechend skaliert werden, wie z. B. die reverse Wassergas-Shift Reaktion (derzeit TRL 6–7), als auch neuartige Verfahren zur Synthesegasbereitstellung, wie z. B. die Vergasung von biogenen Abfällen (derzeit TRL 8) oder Co-Elektrolyse (derzeit TRL 4–6), Plasmaverfahren oder die solar-thermochemische Synthesegasproduktion entwickelt und etabliert werden. Hierfür ist ein technologie-offener Ansatz von besonderer Bedeutung.

Forschungsfeld Kraftstoff-Synthese

Für die Kraftstoff-Synthese müssen geeignete Katalysatoren gescreent und optimiert werden. Dies betrifft sowohl gut bekannte Prozesse wie die Fischer-Tropsch-Synthese (TRL 7–9), als auch neuartige Prozesse, wie den Methanol-to-Jet-Pfad (TRL 4–5). Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Skalierung sowie im Hinblick auf die Optimierung der Ausbeute und der Selektivität. Auch hier müssen die Anforderungen an die Toleranz gegenüber Fremdstoffen in Syntheseprozessen untersucht und optimiert werden.

Forschungsfeld Kraftstoff-Aufbereitung und Fuel Design

Unter die Kraftstoff-Aufbereitung und das Fuel Design fallen Punkte wie die Adaption an neue Edukte für die Downstream-Prozesse zur Aufarbeitung der Zwischenprodukte (z. B. SynCrude) zu normkonformen oder zulassungsfähigen Kraftstoffen sowie weiteren Produkten. Zur Vorbereitung der Markteinführung ist darüber hinaus Forschung zum Kraftstoff-Design notwendig, um effiziente und schadstoffarme nachhaltige Kraftstoffe zu entwickeln, die in der bisherigen (Drop-In) oder in einer geringfügig modifizierten (Near-Drop-In) Infrastruktur eingesetzt werden können. Zudem müssen Kraftstoffhersteller bei der Zertifizierung und Gestaltung zukünftiger Normen unterstützt werden (Beispiel Luftfahrt mit 100 % SAF).

ÜBERGREIFENDE FORSCHUNGSTHEMEN

Wesentlich für die Erzeugung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe ist die integrative Betrachtung von Teilprozessen als Bestandteile einer Gesamtprozesskette, mit besonderem Fokus auf sektorübergreifende Technologien und Anlagenkonzepte unter Berücksichtigung der Passfähigkeit zur bestehenden respektive sich verändernden Infrastruktur und zu Produktionsprozessen relevanter Industriezweige. Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf die Entwicklung, Analyse und Simulation unterschiedlicher Gesamtprozessketten für die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen unter Einsatz von Kohlenstoff und regenerativ erzeugtem Wasserstoff oder regenerativ erzeugtem Synthesegas (H_2/CO). Insbesondere müssen Strom-, Biomasse-, und Solarthermie-basierte Verfahren optimiert, Hybrid- und biotechnologische Verfahren erprobt und unterschiedliche Dynamiken in Teilprozessen optimal in den Gesamtprozess integriert werden. Dies geschieht durch Simulation, Erprobung und Demonstration von Gesamtprozessen aber auch von gekoppelten Teilprozessen. Um sicherzustellen, dass zukünftige Herstellungsprozesse ökolo-

gisch und wirtschaftlich sind, muss die Entwicklung systemanalytisch durch techno-ökonomische und Lebenszyklusanalysen begleitet werden. Insbesondere der Einfluss globaler Lieferketten (Strom, H_2 -, CO_2 -, Methan-Gas, Zwischenprodukte wie SynCrude, Methanol, Kraftstoff), unterschiedliche Möglichkeiten der Allokation (z. B. für verschiedene CO_2 -Quellen, Abwärme, Nebenprodukte, ...) und weitere Impact Kategorien (z. B. Partikelemissionen, nicht- CO_2 -Effekte auf das Klima) sollten hierbei berücksichtigt werden. Hinzu kommen Fragen der Akzeptanz und Stakeholderbeteiligung.

■ THEMA 9: INTEGRATION INS ENERGIESYSTEM MIT FOKUS STROMBEZUG

Das Themengebiet umfasst alle Aspekte der optimalen Versorgung der Elektrolyse-Systeme zur Erzeugung von Wasserstoff mit Strom aus erneuerbaren Quellen sowie deren Integration in das Stromnetz von der Leistungselektronik über die Steuerungssysteme bis zu den Kommunikationsnetzwerken, und zwar diesseits des Verantwortungsbereichs der Netzbetreiber.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Mit Blick auf die Leistungsdaten der Elektrolyseure im Bereich mehrerer Hundert Megawatt können suboptimale Ankopplungslösungen absolut gesehen eine enorme Gesamtmenge an Energieverlusten verursachen, die sogar andere Nutzungsbereiche des Stroms quantitativ weit hinter sich lässt. Des Weiteren macht der Anteil der Netzintegration laut verschiedener Studien bei Elektrolyseanlagen über 10 % der Investitionskosten aus und der Strompreis wird zukünftig von zeitlich volatilen Strom- und Systemdienstleistungsmärkten abhängen. Es gilt also, für diese Schnittstellen eine adäquate Technik zu entwickeln, um Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Wasserstofferzeugung zu verbessern. Der Umfang an weltweit zu installierender Erzeugungsleistung wird zudem eine Standardisierung in der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich machen, die eine Kostendegression durch Automation bei der Herstellung der Anlagen und Geräte sowie deren möglichst reibungslose Verknüpfung sichert.

Weiterhin geht es um die Bereitstellung von resilienten Gesamtsystemen, um den Elektrolyseur unter Berücksichtigung verschiedener Edukte und Produkte für den weltweiten Einsatz auch in strukturschwachen Regionen vorzubereiten und damit die Exportfähig-

keit der entsprechenden Fertigungsunternehmen zu erhöhen.

Die nachfolgende genannten Forschungsinhalte sollen helfen, innovative Geräte, Anlagen, Konzepte und Betriebsführungsstrategien für die technisch und wirtschaftlich optimierte Ankopplung der Elektrolyseure und ggf. der Zusatzaggregate an das Stromnetz und unter den Gegebenheiten des entsprechenden Standorts zu entwickeln. Dabei soll es auch darum gehen, Anwendungsfälle und Einsatzgebiete zu identifizieren, die die Definition von Baureihen oder Standardlösungen und damit Skaleneffekte in der Produktion, bei der Kaskadierung von Anlagenteilen oder bei der Adaption an Nischenanwendungen erlauben. Angesichts der hohen Reifegrade von Elektrolyseuren und dem beginnenden Markthochlauf verschiebt sich gegenwärtig die Forschungsperspektive von den Grundlagen mit Schwerpunkt Materialwissenschaften hin zu den Grundlagen und Anwendungen von Prozessabläufen, Kopplungselementen, Steuerungsinstrumenten sowie Methoden der Serienproduktion und damit zu den Systemaspekten.

FORSCHUNGSTHEMEN

Betriebsarten und Flexibilität von Elektrolyse-Systemen

Das Themengebiet umfasst Untersuchungen zu verschiedenen Betriebsarten der Anlagen (Dauerbetrieb, Überlast- und Schwachlastbetrieb, Betriebspunktoptimierung bei Teillast), das Ableiten von Anforderungen an Material und Konstruktion sowie die Weiterentwicklung von Elektrolyseuren zum Erbringen von Systemdienstleistungen für das Stromnetz (z. B. Regelleistung, Momentanreserve usw.). Weiterhin werden Grundlagenuntersuchungen zu optimierten Anlagendesigns im Hinblick auf unterschiedliche Betriebsstrategien, die Ausweitung der Betriebsbereiche, die Betriebsdauer der Anlage und die Verfügbarkeit bzw. Substituierbarkeit von Rohstoffen oder Halbzeugen erforderlich werden. Damit verbunden sind Maßnahmen zur Sicherung der Langzeitstabilität und Wartungsarmut der Anlagen, die Entwicklung von vorausschauenden Wartungsstrategien sowie die Optimierung der MSR-Technik für den Stack-Betrieb und dessen Überwachung in großtechnischen Anlagen.

Die Herausforderungen bestehen bei diesen Forschungsinhalten in der Eingrenzung der sinnvollen Spanne für die Anlagenparameter aus der technischen und wirtschaftlichen Sicht der Anlagen- und Netzbetreiber und der Wasserstoffabnehmer sowie dem



Identifizieren wesentlicher Forschungsfragen und -ergebnisse aus materialwissenschaftlicher, verfahrenstechnischer und anlagentechnischer Perspektive. Durch entsprechende Maßgaben an Projektanträge sollte daher das Wechselspiel zwischen Market Pull und Technology Push innerhalb der Projekte oder projektübergreifend gesichert werden.

Es ist hier statt von einer linearen eher von einer auf allen Zeitskalen wiederkehrenden Forschungstätigkeit auszugehen, bei der Grundlagenuntersuchungen parallel zu Weiterentwicklung, Anwendung, Hochskalierung und Betrieb jeweils mit ansteigendem Reifegrad und höherer Effizienz sowie im engen Austausch stattfinden. Dabei werden die übergeordneten Ziele des Markthochlaufs in der Praxis wesentlich zur Priorisierung und Akzentuierung der Arbeiten beitragen.

Insgesamt sollen eine deutliche Kostenreduktion der Anlagentechnik und eine Wirtschaftlichkeitsverbesserung des Betriebs erreicht werden, um so die technischen und regulatorischen Anforderungen an Elektrolyseure besser in Einklang zu bringen.

FORSCHUNGSTHEMEN

Lokale Systemintegration

Es ist zu erwarten, dass Elektrolyseure in großem Umfang auch als Anlagenteil in komplexeren Gesamtsystemen und in entsprechend technisch „rauer“ Umgebung ihren Einsatz finden sollen. Daher werden Untersuchungen zum Schutz vor Umwelteinflüssen, zum verbesserten Umgang der Anlagen mit volatiler Stromversorgung, zum netzdienlichen Betrieb sowie zur Integration lokaler WEA, PV-Anlagen, Batterien und Gasspeicher in die Produktionskette erforderlich.

Weiterhin muss untersucht werden, wie Anlagen- und Prozesselemente für die Herstellung von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten mit Anlagen zur Aufbereitung der Edukte und Produkte – auch Abfallprodukte – oder mit externen Produktionsketten kombiniert werden können. Ziel ist eine größere Flexibilität und eine stärkere Nutzung von Synergieeffekten. Dazu sind u.a. angepasste Steuerungs-, Regelungs- und Managementsysteme für o.g. Ziele der Systemintegration sowie automatisierte Cluster-Strukturen (plug & play) für Inselnetze und Micro Grids mit Elektrolyseur zu entwickeln.

Die Forschung zu diesen Inhalten umfasst einerseits fortgeschrittene Untersuchungen zu Materialverwen-

dung und Konstruktion (Grundlagen- und Anwendungsorientierung auf kurzer und mittlerer Zeitskala), andererseits aber auch auf praktischer Erfahrung und Anwendung beruhende neue Betriebsszenarien (langfristige Anwendungsorientierung im Sinne eines Technologie-Reifungsprozesses). Gerade für den Einsatz in Inselnetzen (z. B. Off-Shore, technikferne Standorte, vielfältige klimatische und praktische Anforderungen, Quartiersanwendungen durch Bürgergenossenschaften) erscheinen Reallabore als das angemessene Format für diese Forschung.

FORSCHUNGSTHEMEN

Elektrische Schnittstellen und automatisierte Netzanbindung

Mit Blick auf die konsequente Markteinführung von Elektrolyseuren und damit des Wasserstoffs werden einheitliche, optimale DC-Leistungsschnittstellen (Strom, Spannung, Rippel usw.), IKT-Schnittstellen zwischen Elektrolyseur-Systemen und Stromrichter sowie IKT-Schnittstellen und neue Protokolle für die bi-direktionale Kommunikations-Anbindung insbesondere großer Elektrolyseanlagen an Netz und Markt erforderlich werden. Daran schließen sich weitere Maßnahmen zur Hochskalierung wie die Automatisierung von Planung und Einbindung von Elektrolyseuren sowie die Automatisierung der Frequenzstabilisierung und Regelleistung durch Elektrolyseure an.

Im Bereich der Leistungselektronik bedarf es der Adaption netzdienlicher Stromrichter-Plattformen und Leistungselektroniklösungen aus der Solar- und Batterietechnik als Elektrolysestromrichter sowie deren Weiterentwicklung mit Blick auf Kostenreduktion, zukunftsfähiger weltweiter Einsetzbarkeit und die neuen Anforderungen.

Die Herausforderungen bestehen in der Ausweitung des Einsatzgebietes leistungselektronischer Kopplungselemente als Puffer zwischen Anlagen und Netz sowie deren Modularisierung mit Blick auf das Variantenmanagement von Anlagentypen und Netzebenen. Die Forschungsinhalte umfassen alle Kategorien von der Vorlaufforschung (z. B. Optimierung leistungselektronischer Bauelemente) über anwendungsorientierte Forschung (z. B. Stromrichter, Systemintegration, Digitalisierung) bis hin zu Pilot- bzw. Demonstrationsprojekten mit zeitnaher/ökonomischer Umsetzung. Der Schwerpunkt der Themen ist in die Kategorie anwendungsorientierter Forschung auf mittlerer bis langer Zeitskala einzuordnen.

2. INFRASTRUKTUREN UND SYSTEMINTEGRATION

■ EINLEITUNG

Wesentliche Grundfragen zur Ausgestaltung der Energiewende sind nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung. Hierzu zählen:

- Wie synchronisieren wir Erzeugung und Verbrauch, wenn der Betrieb der Kraftwerke nicht mehr durch die Nachfrage, sondern durch das Wetter bestimmt ist?
- Wie versorgen wir Energieverbraucher, deren Bedarfe sich durch elektrischen Strom nicht in passender Weise adressieren lassen, mit chemischen Energieträgern?
- Wie stellen wir ausreichende Ferntransport-Kapazitäten großer Energiemengen dar, sowohl auf der nationalen Ebene als auch im Hinblick auf die globale Energie-Logistik?

Zu all diesen Schlüssel-Herausforderungen wird Wasserstoff einen substanziellen Teil der Lösungen beisteuern. Vor diesem Hintergrund ist es essentiell, den Hochlauf des Wasserstoffs nicht nur auf Seiten seiner Erzeugung und Nutzung intensiv durch Forschung zu unterstützen, sondern auch seine unterschiedlichen Aufgaben auf der Ebene der Energiesysteme von vornherein forschungsbasiert zu gestalten. Hierbei sind sowohl strategische Aspekte zum Transformations-Pfad der Infrastruktur wie auch die technischen Aspekte der benötigten Anlagen und Komponenten von zentraler Bedeutung. Zur Erarbeitung und Darstellung des entsprechenden Forschungsbedarfs wurde folgende Untergliederung vorgenommen:

- Gesamtsystemverständnis, -modellierung und -integration
- Mittel- und großskalige Wasserstoff-Speicherung
- Pipelinetransport Fernleitungsnetze
- Pipelinetransport Verteilnetze
- Straßen-, schiffs- und schienengebundener H₂-Transport

Ein angemessenes **Gesamtsystemverständnis** steht unter der Überschrift des „Klimaneutralitätsnetzes“, dass im Koalitionsvertrag der Bundesregierung er-

wähnt ist und gemeinhin als sektorengekoppeltes Gesamt-Netz verstanden wird, das insbesondere die Gas- und Stromnetze einer integrierten Betrachtung zuführt. Wichtige Gestaltungs-Aspekte sind diesbezüglich der sektorenübergreifende Energie-Transport zwischen Ländern und Regionen, der dynamische Betrieb der Netze unter den zukünftigen Randbedingungen, die Aktivierung von nachfrageseitigen Flexibilitäten durch Sektorenkopplung sowie die Verbesserung der Technologien, die an den Schnittstellen für einen integrierten Betrieb der unterschiedlichen Netz-Infrastrukturen sorgen. Erst durch ein effektives Zusammenwirken der Strom- und Gas- bzw. H₂-Infrastruktur wird das Potenzial des Wasserstoffs zur Flexibilisierung und Dekarbonisierung des Gesamtsystems vollumfänglich genutzt werden können.

Die stationäre **Wasserstoff-Speicherung** auf der mittleren und großskaligen Ebene ist ein wesentliches Fundament der H₂-Integration in das Energiesystem. Wie heute bereits bei der Erdgasversorgung, werden auch zukünftig beim Wasserstoff große Energiemengen zwischengespeichert werden müssen, um die Dynamiken auf der Versorgungs- und Nachfrageseite auf unterschiedlichsten Zeitskalen miteinander zur Deckung zu bringen. Die benötigten Kapazitäten werden vorrangig in geologischen Speichern gesehen, deren Umstellung vom Methan- auf den Wasserstoffbetrieb nicht trivial sein wird. Hinzukommt ein Bedarf an oberirdischen Speichern mittlerer Größe, die kurzzeitige Ausgleichsaufgaben beim Betrieb der Wasserstoffnetze werden übernehmen müssen.

Im zukünftigen Energiesystem werden die Aufgaben, Infrastrukturen und Betriebsführungsansätze zwischen Gas-/Wasserstoff-System auf der einen und Stromsystem auf der anderen Seite eng zusammenwachsen. Entsprechend wird auch der **Pipelinetransport** von Wasserstoff in **Fernleitungsnetzen** aus einem gesamtsystemischen Verständnis heraus gestaltet werden müssen. Hierbei gilt es, nicht nur die technischen Fragen von Bestands-Umwidmung und Neubau der Infrastrukturen zu adressieren, sondern insbesondere auch die dynamischen Wechselwirkungen beim Betrieb des sektorenintegrierten „Klimaneutralitätsnetzes“ angemessen zu berücksichtigen. Des Weiteren wird es von Bedeutung sein, den Wasserstoff auch zu dezentralen Verbrauchern zu transportieren, wobei der **Pipelinetransport** mittels **Verteilnetzen** eine besonders attraktive Möglichkeit darstellt. Auf der strategischen Ebene relevant ist hierbei insbesondere



die Fragestellung, welche dezentralen Teile des Energiesystems zukünftig noch durch gasförmige Energieträger adressiert werden und entsprechenden Infrastrukturbedarf auslösen. Von besonderer Relevanz ist diesbezüglich die Frage der zukünftigen Wärmeversorgung, auf die es derzeit noch keine konvergente Antwort gibt. Unabhängig davon gilt es, die zukünftigen dezentralen H₂-Verbraucher möglichst auf der Basis vorhandener Infrastrukturen zu versorgen, deren Umwidmung vom Erdgas- auf den Wasserstoffbetrieb an vielen Stellen Forschungsbedarf auslöst. Hierbei stehen nicht nur die Verteilnetze als solche im Fokus, sondern auch die Infrastrukturen auf Seiten der Abnehmer und Verbraucher (z. B. Armaturen, Anlagen und Sensoren in Wohngebäuden).

In Ergänzung zum leitungsgebundenen Transport wird auch die Infrastruktur für **straßen-, schiffs- und schienengebundenen H₂-Transport** für den Wasserstoff-Sektor essentiell sein. Neben der inländischen H₂-Verteilung auf Straße und Schiene ist diesbezüglich insbesondere der maritime Sektor ein Schlüsselbereich, da wesentliche Teile der Versorgung mit chemischen Energieträgern sich auch zukünftig im Rahmen globaler Märkte und Logistik abspielen werden. Es werden daher nicht nur entsprechende neue Schiffs-Typen benötigt werden, sondern auch die Hafen-Infrastrukturen und deren gesamtsystemische An- und Einbindung müssen diesbezüglich Gegenstand von Forschung und Entwicklung sein.

In allen genannten Feldern sollten zudem übergeordnet folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- **Technologieoffenheit und ein gesamtsystemischer Ansatz** können eine optimale Nutzung der Technologieoptionen und deren Synergien sowie eine schnelle Markteinführung und einen effektiven Hochlauf über die gesamte Einsatzbreite der H₂-Infrastrukturen gewährleisten.
- Der Fokus der FuE-Maßnahmen sollte auf der **Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit, Nachhaltigkeit und Resilienz** durch Optimierung, Weiterentwicklung und Innovation sowie einem verbesserten Verständnis der zukünftigen Systemausgestaltung und Betriebsführung liegen.
- Eine **zeitnahe Umsetzung** der notwendigen FuE-Maßnahmen ist notwendig, da H₂-Infrastruk-

turen eine wesentliche Basis einer Wasserstoffwirtschaft darstellen und frühe Fehler bei technischen Weichenstellungen volkswirtschaftliche teure Lock-In-Situationen hervorrufen können.

- **Der Markteintritt erster Technologieoptionen** ist in allen Bereichen bereits gegeben und sollte parallel zu notwendigen FuE-Maßnahmen verfolgt werden.
- **Kompatibilität sowie Interoperabilität** sind zu entwickeln und optimieren, um Synergieeffekte vollumfänglich ausschöpfen zu können.
- Klare Definitionen von **Standards und Normungen** über alle Themenbereiche bilden die Basis von marktfähigen Technologielösungen.

■ GESAMTSYSTEMVERSTÄNDNIS, -MODELLIERUNG UND -INTEGRATION

MOTIVATION

Der Gesamtsystemmodellierung kommt in Bezug auf eine zukünftige H₂-Infrastruktur eine zentrale Rolle zu. Sie ermittelt und analysiert Optionen für eine nachhaltige, effiziente und robuste Ausgestaltung der Sektorenkopplung, und leitet daraus die Anforderungen an neue und umgebaute Infrastrukturen ab. Die Sektorenkopplung bezieht sich dabei sowohl auf Energieträger und als auch auf Energienachfragesektoren. Bei den Energieträgern handelt es sich um Strom, H₂, Kohlenwasserstoffe und Wärme. Des Weiteren gehören die Mobilität und Logistik, die Industrie sowie Gewerbe plus Haushalte zu den Energienachfragesektoren. Wesentliches Ziel der Gesamtsystemmodellierung ist das Aufzeigen politischer Handlungsoptionen auf Grundlage der Entwicklung und Analyse von Transformationsszenarien. Insbesondere wird auf Technologieoffenheit mit Fokus auf kurz- und langfristige Treibhausgasreduktion Wert gelegt, wobei ebenfalls andere Nachhaltigkeitsaspekte im Sinne der Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen Berücksichtigung finden. Im Folgenden sind die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für die Gesamtsystemmodellierung in die Bereiche Transformationsszenarien sowie Modellentwicklung dargestellt.

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARFE

Transformationsszenarien

- Entwicklung von Transformationsstrategien, welche die globale Ebene bis hin zur lokalen Ebene betrachten und unterschiedliche Ausgestaltungsoptionen der Infrastruktur (z. B. zentral oder dezentral orientiert) vergleichen.
- Nutzung modellgestützter Szenarienanalysen für die Ableitung von robusten Maßnahmen für die Etablierung der H₂-Infrastruktur durch effiziente Kombination von Neubau und Umwidmung von Infrastrukturkomponenten
- Ausgestaltung der Sektorenkopplung unter Einbindung von H₂ und eine Analyse der Transformationskosten in den unterschiedlichen Sektoren.
- Entwicklung und Analyse verschiedener Betreibermodelle für die H₂-Infrastruktur, die den Phase-out von Übergangstechnologien unter Berücksichtigung von Investitionszyklen mit einschließen
- Untersuchung von Stressszenarien (z. B. Naturkatastrophen, Genehmigungsverzug) unter Gesichtspunkten der Versorgungssicherheit und Resilienz des Gesamtsystems entlang des gesamten Transformationspfades für die integrierte H₂-Infrastruktur
- Einbindung und Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten in die Entwicklung von Transformations-szenarien

Modellentwicklung

Die Modellentwicklung ist im folgendem in die drei Unterkategorien: Analysen, Datenentwicklung und Modellierungsframework aufgeteilt. Die Analysen beinhalten die Themenkomplexe, welche mit Hilfe von Modellentwicklungen untersucht werden sollten. Die Datenentwicklung beinhaltet die Erhebung von benötigten Daten für diese Analysen sowie das Modellframework die programmierten Modelle, welche für die Beantwortung der Fragen entwickelt werden sollten.

Analysen

- **Transportinfrastruktur:** Eine integrierten Systemplanungen im Viereck von Versorgungssicherheit,

Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Resilienz des Gesamtsystems.

Die Erforschung der optimalen Koordination zwischen verschiedenen Energietransportinfrastrukturen. Dies sind sowohl Netze für Strom, Gas, flüssige Energieträger als auch nicht leitungsgebundene Infrastrukturen wie Transportbehälter (Trailer, Container, Wechselbrücken). Diese Untersuchungen sollten auch in Bezug auf die europäische sowie weltweite Integration durchgeführt werden.

Erstellung eines Anforderungsrankings und Voraussetzungen an die Infrastruktur für die Nutzung von H₂. Dies beinhaltet auch unter anderem die Weiternutzung sowie Umstellung von Erdgasinfrastrukturen.

Entwicklung von Transportketten auf Basis der Szenarien für eine nationale sowie europäische H₂-Distribution

- **Bereitstellung von H₂:** Untersuchung des Potenzials sowie zukünftiger Verfügbarkeit inländischer H₂-Erzeugung (z. B.: Elektrolyseure, H₂ aus Biomassevergasung) und von H₂-Importen (u.a. blauer und grüner H₂ auch im Markthochlauf)

Möglichkeiten der H₂-Rückgewinnung aus H₂-haltigen Abgasströmen zum Beispiel durch elektrochemische Reinigung und Kompression

Vergleich verschiedener Herstellungsmethoden von H₂ unter einheitlichen Annahmen und Randbedingungen sowie die Bedeutung von Übergangstechnologien

Erforschung potenzieller H₂-Produktions-Standorte und deren Wechselwirkung mit der Strom- sowie Gasinfrastruktur

- **Nutzung von H₂:** Sektoren übergreifende Abschätzung der zukünftigen H₂-Nachfrage sowie die Relevanz von H₂ in den jeweiligen Sektoren unter Einbeziehung der Möglichkeiten der Sekundär- und Tertiärnutzung (z. B. Abwärme bei Stromerzeugung, H₂-Weiternutzung aus H₂-haltigen Abgasströmen).



Des Weiteren die Analyse von Prioritäten zur Nutzung von H₂ auch in Bezug auf die H₂-Qualität sowie H₂-Reinheit.

Hinzu kommen die Entwicklung von Konzepten zur effektiven Nutzung von H₂ und Erneuerbaren Energien.

- **Speicher:** Mit Hilfe von Gesamtsystemmodellierungen sollten effektive Speicherformen und – Medien für H₂ analysiert werden.

Vergleich von Potentialen, Kosten und Systemnutzen von großtechnischen Wasserstoffspeichern und dezentralen Wasserstoffspeichern z. B. im Gebäudesektor.

Datenentwicklung

- Entwicklung von standardisierten Modellnetzen und Bereitstellung von offenen Daten für Bestandsinfrastrukturen und Energienachfrage-sektoren.
- Entwicklung von neuen Datenmodellen für die Transportinfrastruktur (inklusive Transportbehälter wie z. B. H₂ Trailer, Container und Wechselbrücken), Bereitstellung von H₂, Nutzung von H₂ sowie Speicher für H₂. (z. B.: Kavernenspeicher).

Modellierungsframework

- Modell- und Werkzeugentwicklung für eine integrierte Systemplanung. Dabei sollte eine technologieoffene Infrastrukturmodellierung unter Berücksichtigung der Parameter Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Resilienz des Gesamtsystems möglich sein.
- Open-Science-Modellierung der Transport- und Verteilnetze in Verbindung mit optimierenden Modellierungen zur ganzheitlichen Sektorenkopplung (Strom, H₂, Kohlenwasserstoffe, Wärme) und der Energienachfrage (Mobilität, Logistik, Industrie, Gewerbe, Gebäude). Des Weiteren sollten die Modelle virtuellen Grundlast-Kraftwerken mitberücksichtigen.
- Entwicklung von skalierbaren Frameworks zur Abbildung von nicht linearen Zusammenhängen im Bereich der Gasnetzinfrastuktur sowie in

Kombination mit dem Stromnetz und gegebenenfalls weiteren Sektoren.

- Modellabbildungen der H₂-Infrastruktur während der Marktentwicklung sowie das Zusammenspiel von potentiellen Marktpartnern für möglichst effiziente und nachhaltige Prozesse.
- Flankierung der Gesamtsystemmodellierung durch methodische Weiterentwicklung von Akteurs orientierten Analysen des Verhaltens von Anlagenbetreibern und dessen Beeinflussung durch den regulatorischen Rahmen.

■ MITTEL- UND GROSSSKALIGE WASSERSTOFF-SPEICHERUNG

MOTIVATION

Damit die Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Energieanlagen einen systemdienlichen Charakter durch flexible zeitliche Entkopplung der Produktion- und Verwendung einnehmen kann, sind Wasserstoffspeicher von essenzieller Bedeutung. Dabei kann zwischen Obertage- und Untergrundspeichern unterschieden werden. Während Obertagespeicher kleine und mittlere Speichervolumen örtlich flexibel abdecken können, sind Untergrundspeicher insbesondere bei großen Speicherbedarfen und zum saisonalen Lastausgleich geeignet. Mit den notwendigen Speicherbedarfen eines zukünftigen Wasserstoffmarktes sind insbesondere Großspeicher von hoher Relevanz. Diese müssen als integraler Bestandteil eine europäischen Wasserstoffinfrastruktur betrachtet werden. Obertagespeicher mit kleinen und mittleren Kapazitäten können dabei bereits Flexibilisierung für dezentrale Erzeugungsanlagen ohne Anbindung an eine europäische Wasserstoffinfrastruktur darstellen. Das Zusammenspiel der Speichertechnologien kann daher einen wichtigen Beitrag für den Markteintritt und den Markthochlauf der Wasserstofftechnologie leisten. Im Folgenden werden die notwendigen Forschungsbedarfe für Wasserstoffspeicher aufgeführt.

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARFE

Mikrobiologie – Geologische Speicher

- Folgend aus den Erfahrungen aus der Erdgas-speicherung wird davon ausgegangen, dass mikrobiologische Prozesse weitreichende Einflüsse

auf Untertagespeicher haben. Generell ist der Einfluss von Mikrobiologie auf untertägige Wasserstoffspeicher aber zum heutigen Zeitpunkt unbekannt und sollten durch geeignete Forschungsfragen tiefergehend betrachtet werden.

- Daraus folgend braucht es die Untersuchung der mikrobiologischen Prozesse bei der geologischen Speicherung von Wasserstoff mit Unterscheidung zwischen Poren- und Kavernenspeichern. Hierzu zählen zum Beispiel der Einfluss der mikrobiologischen Biomethanisierung auf die hydraulischen Eigenschaften sowie die Effekte von anderen Gasen im Mix (z. B.: CO₂, O₂) als auch die Entstehung von Schwefelwasserstoff.
- Auch kann die Entwicklung von Verfahren zur schnellen Charakterisierung der relevanten Mikrobiologie für Wasserstoffspeicher den wirtschaftlichen Einsatz von Wasserstoffspeichern unterstützen. Außerdem sollten die Wasserstoffverluste bei der Speicherung (u.a. biologischer Abbau, Diffusion) und die Detektion von Leckagen (z. B.: mittels Mikroben) betrachtet werden.

Transformation von Erdgas- zur Wasserstoffnutzung – Geologische Speicher

- Der Transformation von bestehenden Speichern von Erdgas zu Wasserstoff kommt eine wichtige Rolle im Bereich der Untertagespeicher zu. Dabei müssen neben der Untertagetechnik auch Bauteile bei einer Umwidmung von bestehenden Kavernen und Porenspeichern ausgetauscht werden. Die Forschungsfragen müssen dabei eine effiziente und zeitsparende Transformationsstrategie adressieren.
- Ein weiteres Thema sind die Entwicklung von speicherspezifischen Prüfverfahren für die Eignungsprüfung/Verfügbarkeitsprüfung zukünftiger nutzbarer geologischer Wasserstoffspeicher (Kavernen- als auch Porenspeicher). Hierzu gehören auch die Demonstration und Erprobung von neuen Speichern sowie die Themen geeignete Zementationen und Komplettierungen für Wasserstoff (u.a. Rohrtouren, Dichtungen, Sicherheitsbauteile).

Wasserstoffspeicherung im Marktumfeld – Geologische Speicher

- Zur Schaffung von Planungssicherheit kann die Analyse des Speicherbedarfes zu bestimmten Stützjahren und dessen Verteilung auf Kavernen- und Porenspeicher einen wichtigen Betrag leisten (max. Speicherumsatz/Jahr, Ein- u. Ausspeicher-raten).
- Zur Bestimmung der Speicherbedarf und der Ein- und Ausspeicherraten sollten Anforderungen der Produktionsseite und Anforderungen der Kunden in Bezug auf Kapazität und Versorgungssicherheit der Kunden berücksichtigt werden.
- Auch die Weiterentwicklung von technischen Aspekten unterstützt die Markteinbindung von Wasserstoffspeichern. Bei geologischen Speichern stellt sich beispielsweise die Frage nach dem optimalen Verhältnis aus Arbeits- und Kissengas, um die Speicherkapazität des Speichers möglichst gut nutzen zu können. Alternative Medien zur Verwendung als Kissengas kann zudem zur Kostenreduktion bei der Errichtung der Kaverne beitragen.
- Des Weiteren sollten Strategien zur Einbindung der Speicher in eine Europäische Wasserstoffinfrastruktur erarbeitet werden. Entwicklung von Methoden zum Monitoring des Kavernenbetriebs und des Kavernenzustands sowie Materialuntersuchungen über lange Zeiträume stellen einen wichtigen Betrag zum sicheren Betrieb von Speichern dar.
- Die Erschließung von neuen Kavernen und Porenspeichern kann durch die Analyse von möglichen Standorten in Bezug auf notwendige Infrastruktur (Transportnetz, Verbraucher, Erzeuger) und der damit verbundenen Akzeptanzforschung unterstützt werden.

Gasqualität – Geologische Speicher

- Die Analyse der Gasqualität nach der Ausspeicherung stellt ein wichtiges Instrument zur Integration von Wasserstoffspeichern in eine Wasserstoffinfrastruktur dar. Durch den Speicherprozess können Fremdstoffe, beispielsweise Wasser,



in den Wasserstoff eingebracht werden, die anschließend entfernt werden müssen.

- Relevante Forschungsfragen in diesem Bereich betreffen die Untersuchung von Verfahren zur Sicherstellung der erforderlichen Gasqualität nach der Ausspeicherung (Aufreinigung). Auch hier muss der Gesamtkontext einer Wasserstoffinfrastruktur betrachtet werden.

Thermodynamik der Kavernenspeicherung – Geologische Speicher

- Entwicklung und Erprobung von Speicherfahren, welche einerseits die stark von Erdgas abweichenden thermodynamischen Eigenschaften des Wasserstoffs betrachten und andererseits die erforderlichen hoch flexiblen Fahrweisen von Wasserstoffkavernen und Porenspeichern als Strukturierungselement berücksichtigen.

Oberirdische Speicher

- Analyse der Verfügbarkeit, Kosten und Größen von Kurzfristspeichern und Mehrtages speichern. Entwicklung/Erweiterung eines Regelwerkes für die Materialauswahl (Wasserstoffversprödung, Korrosion, ökonomische Kriterien) und eines Regelwerkes für die Systemsicherheit (Zündung, Flammenbildung) für oberirdische Speicher. Hinzukommen Untersuchungen von Speicher-materialien bezüglich der Verträglichkeit für reinen Wasserstoff und Gasgemische. Entwicklung und Untersuchung von Materialien zur Vermeidung und Hemmung von Flammenausbreitung und Entzündung wasserstoffhaltiger Gasgemische.
- Weiterentwicklung kompakter sicherer Feststoffspeichern (MOF, Metallhydride, Zeolithe, hochporöse Kohlenstoffe) für Wasserstoff und von dezentralen Wasserstoffbehältern
- Entwicklung sicherer Hochdruckspeicher für den Obertageeinsatz unter Berücksichtigung von Zustandsüberwachung (SHM), Permeation, Versprödung und weiteren technischen Aspekten.
- Untersuchung der Werkstoffauswahl (mechanische Eigenschaften) und Entwicklung preiswerter und recyclingfähiger Isolationsmaterialien für Flüssig-speicher. Entwicklung neuer ortho-para-Kataly-

satoren. Entwicklung von Technologien zum Auf-fangen von Verlusten durch den Boil-Off¹ von Wasserstoff.

- Entwicklung von Katalysatoren für die Hydrierung und De-Hydrierung von chemischen Speichern (LOHC, Methanol, Ammoniak). Untersuchung des Korrosionsverhaltens der Behälterwerkstoffe. Analyse der Systemsicherheit bei möglichen Austritten von Ammoniak und Methanol. Untersu-chung der Qualität des Wasserstoffes nach der De-Hydrierung sowie Entwicklung von Methoden zur Aufreinigung.

■ PIPELINETRANSPORT FERNLEITUNGSNETZE

MOTIVATION

Der Transport von reinem und beigemischtem Wasserstoff über Fernleitungen wird in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft von zentraler Bedeutung sein und bereits für den Markteintritt und den anschließenden Markthochlauf wichtige Potenziale zur Kostenreduktion bieten. Fernleitungen ermöglichen die Verbindung von Standorten zur Erzeugung, Speicherung und Verwen-dung über große Distanzen. Damit besteht über Fernlei-tungen auch die Möglichkeit eines grenzüberschreiten-de Wasserstofftransports. Die europäischen Netzbe-treiber haben dazu eine Vision für ein Europäisches Wasserstoffnetz vorgestellt, welches einen trans-euro-päischen Wasserstoffmarkt ermöglichen kann. Fernlei-tungen bieten damit insbesondere für eine systemische Integration von Erzeugungskapazitäten hohe Potenzi-ale, da Erzeugungsstandorte mit hohen stromseitigen Kapazitäten mit wichtigen Regionen zur Nutzung von Wasserstoff verbunden werden können. Dabei werden nicht nur durch die großen Kapazitäten von Fernlei-tungen wichtige Skalierungsmöglichkeiten genutzt, son-dern auch Kostenreduktionen bei der Erzeugung er-reicht. Durch die Möglichkeit bestehende Leitungen für den Transport von Wasserstoff umzunutzen, können Fernleitungen bereits in einer frühen Phase in eine Was-serstoffwirtschaft eingebunden werden. Damit die mög-lichen Potenziale zum Markteintritt und zur Optimie-rung von Fernleitungen für den Wasserstoffeinsatz genutzt werden können, ergeben sich folgende For-schungs- und Entwicklungsbedarfe.

¹ Boil-Off Effekte: Durch das Eindringen von Wärme aus der Umgebung in den H₂-Tank kommt es zum kontinuierlichen Abdampfen von H₂, welches zu einem Druckanstieg im Tank führen würde. Deshalb muss aus dem Tank (bei nicht kontinuierlicher H₂ Abnahme) H₂ abgelassen werden um einen Druckanstieg im Tank entgegenzuwirken.

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARFE

Werkstoffcharakterisierung und -entwicklung

- Nutzung von Fernleitungsnetzen zum Transport von Wasserstoff benötigen innovative Werkstoffe oder vertiefte Kenntnisse zu Bestandswerkstoffen für die veränderten Anforderungen von Wasserstoff für Leitungen, Anlagen und Armaturen.
- Die Wasserstoffverträglichkeit der Werkstoffe und der notwendigen Verbindungstechnik und möglicher Beschichtungsmaterialien bei verschiedenen statischen und zyklischen Parametern wie z. B. Druck und Temperatur bedarf einer tiefergehenden Untersuchung.
- Ebenfalls braucht es weiterführende Untersuchungen der Vibrations- und Pulsationseffekte bei hohen Transportgeschwindigkeiten, die sich aus der reduzierten Energiedichte von Wasserstoff ergeben.
- Mit den Ergebnissen der Materialuntersuchung müssen Methoden zur Auswahl von Werkstoffen unter Wirtschaftlichkeits- und Umweltverträglichkeitsaspekten entwickelt werden. Dabei kommt auch die Weiterentwicklung von bestehenden Werkstoffen für den Einsatz von Wasserstoff im Fernleitungsbereich zum Tragen.
- Für einen marktlichen Einsatz braucht es koordinierte und ggf. angepasste Zulassungs- und Zertifizierungsmethoden für die ausgewählten oder entwickelten Werkstoffe auf nationaler und europäischer Ebene.

Kompressoren und Verdichter

- Kompressor bzw. Verdichter sind zur Einspeisung und Zwischenverdichtung essenzielle Bestandteile eines Fernleitungsnetzes. Durch die Verdichtung wird das Gas zunächst auf den notwendigen Pipelinedruck gebracht und durch die Zwischenverdichtung werden auftretende Druckverluste über die Pipeline ausgeglichen.
- Verdichterstationen gehören im Bereich der Erdgasleitungen heute zum Stand der Technik. Für den Einsatz von Fernleitungen für den Transport von Wasserstoff können diese Erfah-

rung genutzt und übertragen werden.

Dennoch bestehen insbesondere im Bereich der technischen Optimierung und Kostenreduktion auch zukünftig Forschungsbedarfe.

- Aufgrund der hohen Volumenströme werden in heutigen Erdgasleitungsnetzen vornehmlich Turboverdichter eingesetzt. Durch die geringere volumetrische Energiedichte von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas ergeben sich veränderte Anforderungen an die Verdichtung.
- Forschungsbedarf besteht im Bereich der optimalen Auslegung der Verdichtung und der entsprechenden Stufung. Zur Kostenreduktion wird eine Reduktion der notwendigen Verdichterstufen angestrebt.
- Damit ergibt sich ein Forschungsschwerpunkt für innovative Verdichterkonzepte (mechanisch, elektrochemisch) und deren Antriebsstränge zur Kostensenkung, Steigerung der Effizienz und Skalierung für hohe Volumenströme.

Sensorik und Messtechnik

- Im Bereich der Fernleitungsnetze werden Sensorik und Messtechnik zur Bestimmung des Durchflusses und der Gasreinheit eingesetzt. Ziel ist dabei eine eichfähige Abrechnung als auch eine notwendige Sicherheitsüberwachung sicherstellen zu können.
- Sensorik und Messtechnik für konventionelle Nutzung von Fernleitungsnetzen sind heutiger Stand der Technik. Durch die veränderte Energiedichte von Wasserstoff ergeben sich allerdings ebenfalls andere Anforderungen für die Überwachung von Wasserstoff.
- Hier steht insbesondere die Eichfähigkeit der Messtechnik bei dynamischen Parametern in Bezug auf Durchfluss, Druck und Temperatur im Vordergrund.

Gasaufbereitung

- Verschiedene Anwendungsfelder im Bereich Wasserstoff weisen hohe Anforderungen an die Beschaffenheit des Gases nach Ausspeisung aus der Pipeline auf. Die daraus folgende



Gasaufbereitung beeinflusst die Kostenstruktur der Wasserstoffbereitstellung.

- Forschungsbedarf ergibt sich daher für kostenoptimierte Methoden zur technischen Aufreinigung von Wasserstoff mit großen Volumenströmen. Hier gilt es bestehende technische Methoden auf die Anforderungen von Wasserstoff anzupassen.
- Neben der technischen Entwicklung steht auch die systemische Einbindung von Aufreinigungsanlagen im Vordergrund. Dabei stellt sich die Frage nach einer optimalen Positionierung innerhalb der Wertschöpfungskette zur Wasserstoffversorgung.

■ PIPELINETRANSPORT VERTEILNETZE

MOTIVATION

Neben dem Fernleitungsnetz kommt auch dem Verteilnetz für eine Integration von Wasserstoff in das Energiesystem eine zentrale Rolle zu. Bereits heute wird über das Verteilnetz eine Vielzahl von Industriekunden mit Erdgas versorgt. Neben klein- und mittelständischen Unternehmen betrifft dies zum Teil auch Großunternehmen. Mit dem Verteilnetz gelingt eine Einbindung von Endkunden, die keinen direkten Zugang zu einer Fernleitung haben. Für die Versorgung von Wasserstoff kann dies neben Industriekunden auch Tankstellen oder letztlich Haushaltskunden betreffen. Mit dem Verteilnetz kann also ein breiter Zugang zu Erzeugungs- und Speicherkapazitäten gewährleistet werden. Auch wenn heutige Speicherstandorte oftmals Zugang zum Fernleitungsnetz haben, gilt dies für geeignete Standorte zur Wasserstofferzeugung üblicherweise nicht. Das Verteilnetz kann eine Verbindung von Standorten mit hohen Potenzialen auf der Stromseite an das Fernleitungsnetz und damit mögliche Kunden sicherstellen. Auch mögliche Importoptionen lassen sich über das Verteilnetz einbinden. Insgesamt können daher durch die Nutzung des Verteilnetzes für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft wichtige Kostenreduktionen erreicht werden, da eine systemische Einbindung von Produktions-, Speicher- und Anwendungsstandorten erreicht wird. Damit diese Potenziale für eine Wasserstoffwirtschaft gehoben werden können, ergeben sich folgende Forschungs- und Entwicklungsbedarfe.

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARFE

Umstellung auf reine Wasserstoffleitungen

- Forschungsbedarf besteht für die Entwicklung von Umstellungsprozessen und Strategien für die Transformation von Erdgasleitungen zu reinen Wasserstoffleitungen in der Industrie, Mobilität und in Quartieren. Neben der Entwicklung von Strategien können Pilotprojekte erste wichtige Erkenntnisse für den weiteren Transformationspfad liefern.
- Dazu zählt insbesondere die Analyse von lokalen Randbedingungen für die Wasserstoffverträglichkeit der bestehenden Erdgasnetze. Dies betrifft neben den Materialien der Leitungen auch die lokalen Endgeräte bzw. die Anforderungen der lokalen Kunden an die Wasserstoffbeschaffenheit.
- Weiterhin kann durch die Analyse möglicher Zusatzfunktionen des Verteilnetzes in einer integrierten Wasserstoffinfrastruktur in Bezug auf dynamische Betriebsweise und temporärer Speicher eine Integration von Leitungen unterstützt werden.
- Dabei muss eine erforderliche Wasserstoffqualität an wichtigen Messpunkten, bspw. beim Endkunden, durch geeignete Reinigungsmethoden sichergestellt sein. Die technische und wirtschaftliche Optimierung der Reinigungsmethoden stellt weiterhin ein wichtiges Instrument zur Kostenreduktion dar.
- Damit Verteilnetze ihre wichtige Rolle zur Integration von systemdienlichen Erzeugungskapazitäten übernehmen können, bedarf es einer integrierten und gemeinsamen Netzplanung im Bereich der Anbindung von Strom, Gas, Wärme und Wasser.

Beimischung von Wasserstoff

- Für die Beimischung von Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz braucht es die Entwicklung von Methoden zur Sicherung kontinuierlicher Gasqualität bei flexibler Beimischung und Betriebsführung. Dazu zählt auch der Einfluss der Wasserstoffbeimischung auf den auslastungsabhängigen Druckverlust.

- Untersuchung und Entwicklung von Methodik zur Einhaltung der Grenzwerte von bspw. Druck und Gasqualität für unterschiedliche Abnehmer sind Voraussetzung für den marktlichen Einsatz. Weiterhin braucht es eine grundsätzliche Analyse, wie zukünftig verschiedene Anforderungen von diversen Anwendern aus einem Gasnetz zentral versorgt werden können.
- Im Verteilnetzbereich ist die Erarbeitung von Methoden und Strategien für die Odorierung und Deodorierung sowie zur Erkennung von Leckagen zudem relevant.
- Mit der Entwicklung und Optimierung von technischen Lösungen zur Extraktion von beigemischtem Wasserstoff durch beispielsweise Membrantechnologien oder elektrochemische Prozesse kann die Beimischung von Wasserstoff zudem eine wichtige Rolle in der Transformationsphase übernehmen.

Materialforschung

- Die Transformation des Verteilnetzes braucht eine Identifikation von Wasserstoff-kompatiblen Werkstoffe für Leitungen, Anlagen und Armaturen sowie notwendigen Anpassungen oder Neuentwicklungen von Materialien hinsichtlich der technischen Eignung für die unterschiedlichen Anwendungen.
- Dabei müssen die werkstoffspezifischen Hauptbelastung durch Wasserstoff und die Untersuchung der selektiven Permeation von Wasserstoff untersucht werden. Diese Ergebnisse fließen in die Weiterentwicklung oder Neuentwicklung von Materialien ein.
- Für die Materialforschung im Verteilnetz stehen neben den Entwicklungen von Materialien für Leitungen und Armaturen auch die Charakterisierung und Entwicklung von Materialien für die Gasseparation und die Beschichtung von Werkstoffen im Fokus.

Strategien zur Integration des Verteilnetzes

- Durch den breiten Anwendungsbereich der Verteilnetze müssen Synergien zwischen Sektoren identifiziert werden, welche durch das Verteilnetz

verbunden werden können. Hier kann beispielsweise die gleichzeitige Versorgung von Industrieunternehmen und Wasserstofftankstellen über eine gemeinsame Leitung genannt werden.

- Für die Integration des Verteilnetzes braucht es eine Ausarbeitung von Randbedingungen (Kapazitäten, Zeitfaktoren) zur Betriebsführung des Netzes, um den Anforderungen der Sektorenkopplung zu genügen. Eine untergeordnete Rolle können Technologien zur Rückgewinnung von Wasserstoff, wie beispielsweise Membrantechnologien haben.

Komponenten/Betriebsmittel

- Neben den eigentlichen Leitungen braucht die Einbindung von Wasserstoffleitungen weitere Komponenten, wie beispielsweise Gasdruckregelmessanlagen (GDRMA), deren Entwicklung und Erprobung ebenfalls wesentlicher Bestandteil von Forschungsaktivitäten im Bereich der Verteilnetze sein müssen.
- Dabei spielt auch die technische und wirtschaftliche Optimierung von bestehenden Komponenten durch veränderte Randbedingungen durch den Einsatz von Wasserstoff, wie beispielsweise Kühlbedarf von GDRMA, eine wichtige Rolle.
- Bei den Forschungsfragen der Komponenten müssen die veränderte Betriebsweise von Verteilnetzen beim Einsatz von Wasserstoff zur Entwicklung von Komponenten und Messeinrichtungen berücksichtigt werden.

Normung/Zertifizierung/Regelwerk

- Für einen marktlichen Betrieb von Verteilnetzen muss ein sicherer und messrichtiger Betrieb der Infrastruktur inklusive der Prüfung/Normung von sicherheitskritischen Komponenten sichergestellt sein. Hier können durch geeignete Forschungsaktivitäten wichtige Erkenntnisse erarbeitet werden, welche die Normung und Zertifizierung unterstützen.
- Dies betrifft auch die Anpassung und Erweiterung bestehender technischer Regelwerke, Geräternormen und Zertifizierungsprozesse für die Beimischung von Wasserstoff sowie für reine



Wasserstoffleitungen unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Materialforschung.

■ STRASSEN-, SCHIFFS- UND SCHIENENGEBUNDENER H₂-TRANSPORT

MOTIVATION

Für eine zukünftige H₂ basierte sowie treibhausgasneutrale Energiewirtschaft ist eine effiziente Interaktion zwischen Transport-Infrastrukturen notwendig. Neben dem leitungsgebundenen H₂-Transport müssen auch die Möglichkeiten von zukünftige Straßen-, Schienen- und Schiffsgebundene H₂-Transport berücksichtigt werden. Dies ist notwendig um den H₂-Transport von der Erzeugung bis zum Verbraucher in der Zukunft gewährleisten zu können. Dies umfasst den Transport von importierten H₂ sowie die Anbindung von lokal erzeugtem H₂ an die zukünftige H₂-Infrastruktur. Für einen erfolgreichen Aufbau und Interaktion zwischen den H₂-Transportinfrastrukturen ist es wichtig die übergreifenden Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zu identifizieren sowie Themen, welche nur einzelne Themenbereiche betreffen. Des Weiteren sind Ergebnisse aus der Gesamtsystemanalyse wichtige Parameter um Forschungs- und Entwicklungsbedarfe in diesem Bereich auf zukünftig benötigte Infrastrukturen abzustimmen. Im folgendem werden die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für die drei Themen: Transporttechnologie, H₂-Transportinfrastruktur sowie Regulatorik und Sicherheit erläutert.

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARFE

Transporttechnologie

- Identifikation und Entwicklung von energetisch und ökologisch sowie wirtschaftlich effizienten H₂-Transporttechnologien für die benötigten unterschiedlichsten Wasserstoffmengen und Nutzung (inklusive Importmarkt und innerdeutsche Verteilung). Zu den H₂-Transporttechnologien gehören unter anderem Flüssigwasserstoff (LH₂), Druckwasserstoff (CH₂), synthetische Kraftstoffe, LOHC, Metalle und ihre Hydride und NH₃ als H₂-Träger.
- Entwicklung von kostengünstigen mobilen Speichereinheiten inklusive der geeigneten Werkstoffe für unter anderem den Transport von kleinen dezentral erzeugten H₂-Mengen.

- Eine aktive Kopplung der verschiedenen Transportmechanismen bietet Möglichkeiten der Effizienzsteigerung in den verschiedenen Transportpfaden mit dem Ziel der Systemintegration. Diese erfolgt vor dem Hintergrund der folgenden Themen:

- Skalierbarkeit (von z. B. Speichergrößen und Tanktechnologien)
- Zuverlässigkeit (von u. a. Betankungsprozessen und Umfülltechnologien)
- Lebensdauer (von z. B. Transportumschließungen)
- Recycling eingesetzter Stoffe im Sinne einer Kreislaufwirtschaft (hierzu zählen z. B. verwendete Tankmaterialien wie Verbundwerkstoffe oder verwendete Speicherstoffe wie z. B. Hydride und LOHC)
- gesellschaftliche Akzeptanz (von z. B. Transportpfaden und einzelnen Technologien in Bezug auf mögliche Umwelteinflüsse)

Bezugnehmend auf den letzten Punkt sei darauf hingewiesen, dass Technologieoffenheit im internationalen Umfeld für eine allgemeine Akzeptanz unerlässlich ist.

- Sollten aktuelle Initiativen feststellen, dass sich die Anforderungen in Zukunft an feste H₂-Speicher verändern werden, müssen gegebenenfalls H₂-Speichermaterialien weiter beziehungsweise neu entwickelt werden.

H₂-Transportinfrastruktur

- Verschiedene Transportvektoren sind auf Grund ihrer Synergien zu untersuchen und eine Kompatibilität und Interoperabilität zu entwickeln sowie zu optimieren. Hierzu zählen unter anderem die genaue Betrachtung der H₂-Transportmöglichkeiten sowie H₂-Verteilung (Wasser, Schiene, Straße, Gasnetz) von der Erzeugung bis zum Verbraucher. Sowie die Fähigkeit zum Zusammenspiel der verschiedenen Systeme. In Bezug auf die Medienkompatibilität sind zum Beispiel die H₂-Qualitätsanforderung (Reinheitsanforderung) beim Endverbraucher bei den Analysen mit zu berücksichtigen.

- Welche Infrastruktur ist für den Transport am effizientesten unter Berücksichtigung der Eigenschaften möglicher Transporttechnologien und des betrachteten Einsatzgebietes.
- Weiterentwicklung sowie Optimierung der mobilen H₂-Speicherung. Hierbei stehen unter anderem Analysen bezüglich der H₂-Qualität, dem H₂-Druck sowie der kontrollierten H₂-Entspannung im Vordergrund.
- Optimierung von Betankungstechnologien und Umfüllungstechnologien sowie deren Prozesse. Hierbei sind unter anderem die Prozesse der Betankungen von LKWs über Tankstationen, von Binnen- und Hochseeschiffen über Piers sowie von Flugzeugen über Tankwagen genauer zu betrachten. Ein weiterer Punkt sind hierbei zum Beispiel Analysen zur Minimierung der Verdampfungsverluste beim Umfüllen von LH₂.
- Analyse und Minimierung von Boil-Off² Effekten beim Transport von LH₂. Um den abgelassenen H₂ aus dem Tank während dem Transport zum Beispiel für den Schiffsantrieb oder Bordstromnetz verwenden zu können, sollten Konzepte entwickelt werden sowie Tests durchgeführt werden.
- Analyse der Vor- und Nachteile einer zentralen versus dezentralen Infrastruktur (z. B. Verflüssigung von H₂) in Bezug auf die Auswirkungen auf den H₂-Transport.
- Abstimmung der notwendigen H₂-Konditionierung in Bezug auf die direkte Verwendung von H₂ in Brennstoffzellensystemen beim Verbraucher.
- Die Interaktion mit dem Gasnetz und Gasspeichern mit u. a. hochdynamischen Betriebsweisen. Ferner auch die Betrachtung von bestehender Infrastruktur (z. B. Häfen) bezüglich der Umnutzung für den H₂-Transport/Umschlag.
- Eine dauerhafte begleitende Zuverlässigkeitsanalyse der unterschiedlichen Transportinfrastrukturen. Hierbei sollten in einem ersten Schritt die Art sowie die Anzahl von Ausfällen ermittelt

werden und in einem zweiten Schritt Maßnahmen entwickelt werden um diesen in Zukunft vorbeugen zu können. Des Weiteren die Entwicklung von Techniken zur schnellen Schadensbehebung (z. B. auf Schiffen).

Regulatorik und Sicherheit

- Entwicklungsbegleitend sind die Regeln und Richtlinien zu erarbeiten die für eine Markteinführung notwendig sind.
- Analyse der aktuellen Regulatorik für die unterschiedlichen H₂-Transportarten und gegebenenfalls (Weiter-) Entwicklung von Regulatorik. Dies beinhaltet auch die Anpassung von Prüf-fristen unter Berücksichtigung der Lebensdauer von H₂-Speichern.
- Neue Ansätze für Sicherheitsbeurteilungen von Druckgefäßen auf Straße, Schiene und Wasserstraße. Hierzu gehören auch die Entwicklung von Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung von H₂-Speichern (Materialprüfung).
- Methodenentwicklung und Sensoren Entwicklung zur Lebensdauerbewertung von Transportumschließungen (z. B. Druckspeicher). Des Weiteren die Charakterisierung der Alterung von Transportumschließungen unter Betriebsbedingungen und die Entwicklung von probabilistischen Methoden zur Risikobewertung.
- Die Aspekte H₂-Qualitätssicherung und Definition von Standards für Betankungstechnologien. Hierbei sind auch Fragestellungen mit Bezug zu möglichen Umwelteinflüssen der verschiedenen Betankungstechnologien zu analysieren.
- Entwicklung von Sicherheitskonzepten für den Umschlag von H₂ an zum Beispiel Häfen sowie Güterbahnhöfen.
- Regulatorische Leitplanken für die technische Entwicklung erleichtern die technische Umsetzung bei der Bereitstellung der Infrastruktur und erfordern die Definition von Schnittstellen.

² Boil-Off Effekte: Durch das Eindringen von Wärme aus der Umgebung in den H₂-Tank kommt es zum kontinuierlichen Abdampfen von H₂, welches zu einem Druckanstieg im Tank führen würde. Deshalb muss aus dem Tank (bei nicht kontinuierlicher H₂ Abnahme) H₂ abgelassen werden um einen Druckanstieg im Tank entgegenzuwirken.



■ ZUSAMMENFASSUNG

In einem zukünftigen klimaneutralen Energiesystem sowie während der Transformation müssen unterschiedliche Zahnräder, wie unter anderem Technologien, Prozesse, Sektoren und Akteure effizient ineinander greifen plus synchronisiert sein. Ein Zahnrad in diesem Getriebe ist die Wasserstoffinfrastruktur, welche eng verzahnt mit dem Stromnetz das Rückgrat des zukünftigen klimaneutralen Energiesystem bilden wird. Hierbei hat die Wasserstoffinfrastruktur eine zentrale Bedeutung, da diese als Bindeglied zwischen den Erzeugungs- und Nutzungsorten sowie als Speicher dienen kann. Dementsprechend kann die Wasserstoffinfrastruktur dabei helfen die zukünftige wetterabhängige Energieerzeugung mit dem Energieverbrauch optimal zu synchronisieren. Des Weiteren kann die Wasserstoffinfrastruktur dazu beitragen auch Energieverbraucher zu versorgen, deren Bedarfe nicht mit elektrischem Strom bereitgestellt werden können. Um die unterschiedlichen Zahnräder während des Hochlaufs des Wasserstoffs optimal ausrichten zu können und die richtigen Stellen im Gesamtkontext für die Platzierung auszuwählen, ist es wichtig diesen Prozess wirksam durch Forschung zu unterstützen und forschungsbasiert zu entscheiden. Diese Forschungs- und Entwicklungsbedarfe wurden im Cluster Infrastrukturen und Systemintegration in fünf Bereiche unterteilt, welche nachstehend zusammengefasst sind.

- **Gesamtsystemverständnis, -modellierung und -integration:** Entwicklung von Simulationswerkzeugen für eine integrierte Systemplanung mit technologieoffener Infrastrukturmodellierung mit Fokus auf Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Klimaneutralität und Resilienz. Dazu die Entwicklung von Transformationsstrategien für die unterschiedlichen Ebenen sowie Roadmaps für unterschiedliche Szenarien und Marktentwicklungen.
- **Mittel- und großskalige Wasserstoff-Speicherung:** Entwicklung von geologischen Speichern und entsprechenden Strategien ihrer Transformation zu H₂-Speichern. Sowie die Erprobung von Betriebsstrategien für H₂-Speicher, um die veränderten Randbedingungen in Bezug auf dynamische Fahrweise zu berücksichtigen. Des Weiteren die Weiterentwicklung von oberirdischen Speichern zur Erreichung der notwendigen Skalierung und Kostenreduktion.

- **Pipelinetransport (allgemein):** Die Entwicklung von H₂-kompatiblen Werkstoffen für Leitungen, Armaturen und Anlagen mit Berücksichtigung der zyklischen Parameter Druck und Temperatur sowie der Permeation von Wasserstoff.
- **Pipelinetransport Fernleitungsnetze:** Die Weiterentwicklung sowie Anpassung an die neuen Anforderungen von benötigten Anwendungen wie z. B. Verdichtern.
- **Pipelinetransport Verteilnetze:** Entwicklung von sicheren Umstellungsprozessen und Strategien für die Transformation von konventionellen Gasnetzen zu Wasserstoffnetzen (inklusive der H₂-Beimischung zum Erdgas).
- **Straßen-, schiffs- und schienengebundener H₂-Transport:** Technische Entwicklung der energetisch und ökologisch sowie wirtschaftlich effizientesten H₂-Transporttechnologien. Des Weiteren die Weiterentwicklung sowie Optimierung der mobilen H₂-Speicherung, Betankungstechnologien/-prozesse und Umfüllungstechnologien/-prozesse. Sowie die Weiterentwicklung von Sicherheitsstandards.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass der Markteintritt zeitnah durch die Skalierung marktfähiger und bekannter Technologien erfolgen sollte. Des Weiteren sollte für ein optimiertes Systemdesign und um den Transformationsprozess zu gewährleisten, zeitgleich systemanalytische Forschung durchgeführt werden. Um die ökonomische Attraktivität der Speicher-, Transport- und Systemtechnologien durch Weiterentwicklung und Innovation zu steigern, sind die aufgeführten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe bis 2025 essenziell.

3. NUTZUNG

■ MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Die stoffliche und energetische Nutzung von H_2 wird in allen Sektoren geprüft und birgt ein enormes Potenzial, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Für die Nutzung des H_2 stehen eine Vielzahl von Technologien zur Verfügung. Es ist essenziell, dass die Forschung weiterhin technologieoffen erfolgt und H_2 in allen Sektoren als Lösungsoption untersucht wird. Nur so werden die Reduktionspotenziale optimal gehoben werden können.

Neben der wichtigen Rolle zur Erreichung der Klimaziele können insbesondere H_2 -Nutzungstechnologien einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der Deutschen Exportwirtschaft leisten und so langfristig Arbeitsplätze in Deutschland sichern.

■ STRUKTURIERUNG CLUSTER NUTZUNG

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von H_2 wurden entsprechend ihrem Einsatzgebiet zugeordnet:

Industrielle Nutzung von Wasserstoff:

- Stofflicher Einsatz am Beispiel der Metallherzeugung
- Energetische Nutzung für Prozesswärme und -dampf

Stationäre Nutzung von Wasserstoff:

- Einsatz in Gewerbe, Handel, Industrie und Quartieren
- Einsatz in Haushalten und Wohngebäuden

Mobile Nutzung von Wasserstoff:

- Einsatz im PKW
- Einsatz im LKW und anderen Nutzfahrzeugen
- Einsatz im Schienenverkehr
- Einsatz in der Schifffahrt
- Einsatz im Flugverkehr

Nicht berücksichtigt ist die Nutzung von H_2 in der Kraftwerkstechnik zur Stromerzeugung im Megawattbereich. Dieser Aspekt wird von dem Forschungsnetzwerk „Flexible Energieumwandlung“ abgedeckt.

Der Einsatz von synthetischen, auf Wasserstoff basierenden Kraftstoffen ist schon heute in vielen Anwendungsfällen möglich und wird nur dann explizit beschrieben, wenn ein zusätzlicher Forschungsbedarf identifiziert wurde. Die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe wird im Kapitel Erzeugung von Wasserstoff und Folgeprodukte behandelt.

In den folgenden Kapiteln wird der Forschungsbedarf anhand seiner zeitlichen Einordnung priorisiert:

- Unmittelbarer Forschungsbedarf → Priorität P1
- Kurzfristiger Forschungsbedarf → bis ca. 2025, Priorität P2
- Mittelfristiger Forschungsbedarf → bis ca. 2030, Priorität P3
- Langfristiger Forschungsbedarf → ab ca. 2030, Priorität P4

Ergänzt wird die Priorisierung um die Art der Forschung

- Grundlagenforschung
- Angewandte Forschung
- Demonstration/Reallabore



■ ÜBERBLICK STAND DER TECHNIK

Die technische Reife variiert jedoch deutlich, einige Anwendungen sind bereits industrialisiert, wohingegen andere erst in einigen Jahren Serienreife erreichen werden. Nachfolgende Tabelle fasst den Entwicklungsstand der Technologien anhand des Technologie-Reifegrads (TRL) für eine reine Wasserstoffanwendung zusammen. Dabei wurde der TRL für das

Gesamtsystem mit der entsprechenden Leittechnologie ausgewiesen. Dabei gilt zu beachten, dass die Einschätzungen des TRL von den Mitgliedern des Forschungsnetzwerkes Wasserstoff nach bestem Wissen getätigt wurden. Sie sollen eine grobe Einordnung des aktuellen Entwicklungsstandes geben und einen Bezug zwischen Anwendungsfeld und Technologien herstellen. Weiter Ausführliche Herleitungen der TRL sind in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführt:

	Industrie: Stofflicher Einsatz	Industrie: Energetische Nutzung für Prozesswärme und -dampf	Stationär: Einsatz in Gewerbe und Industrie	Stationär: Einsatz in Haushalten	Mobil: Einsatz im PKW	Mobil: Einsatz im LKW	Mobil: Einsatz im Schienenverkehr	Mobil: Einsatz in der Schifffahrt	Mobil: Einsatz im Flugverkehr
H ₂ -basierte Direktreduktion und Schmelzprozesse	TRL 7								
H ₂ -Industrieofen	TRL 6	TRL 2-7							
H ₂ -Feuerungsanlagen/ Prozesswärme/ Brennwertechnik/ Dampferzeugung	TRL 6	TRL 2-5	TRL 4	TRL 6					
Stationäre H ₂ -Brennstoffzelle (BZ)			TRL 4-8	TRL 4-8				TRL 3-6	
H ₂ -Gasturbine	TRL 6		TRL 4					TRL 4-6	TRL >4
H ₂ -Blockheizkraftwerk			TRL 5-6	TRL 8				TRL 3-6	
Mobile H ₂ -BZ					TRL 3-9	TRL 4-7	TRL 4	TRL 3-6	TRL 1-6
H ₂ -Speichersysteme				TRL 7	TRL 4-9	TRL 4-9	TRL 2-5	TRL 4	TRL 3-7
Mobiler H ₂ -Verbrennungsmotor					TRL 6	TRL 4-6	TRL 4	TRL 5-6	TRL >4

■ INDUSTRIELLE NUTZUNG VON H₂ – STOFFLICHER EINSATZ AM BEISPIEL DER METALLERZEUGUNG

Die wichtigsten Branchen im Bereich der Metallerzeugung sind die Stahl-, Aluminium- und Kupferindustrie. Die jährlichen Produktionsmengen und damit verbundenen CO₂-Emissionen der Branchen betragen in Deutschland: rd. 43 Mio. t Stahl/60 Mio. t_{CO₂}, rd. 1,2 Mio. t Rohaluminium/21,6 Mio. t_{CO₂} und rd. 0,7 Mio. t Kupfer/1,82 Mio. t_{CO₂}.

Die Stahlerzeugung wird durch zwei wesentliche Verfahrensrouten gekennzeichnet: Durch den Weg vom „Eisenerz zum Stahl“ und durch den Weg vom „Schrott zum Stahl“. Bei der eisenerzbasierten Route wird meistens aus oxydischen Eisenerzen im Hochofen, seltener in Schmelzreduktionsanlagen, Roheisen erzeugt, das im Sauerstoffkonverter zu Rohstahl verarbeitet wird. In Direktreduktionsanlagen aus Eisenerzen hergestellter Eisenschwamm (Direct Reduced Iron (DRI), Hot Briquetted Iron (HBI)) wird im Elektrolichtbogenofen zu Rohstahl umgewandelt. Bei der schrottbasierten Route wird durch Recyceln von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen Rohstahl hergestellt.

Allein bei der Stahlherstellung hat sich der spezifische Energiebedarf in den letzten 30 Jahren um rd. 15 % vermindert, das entspricht rd. 3 GJ/t und rd. 0,3 t_{CO₂}/t Produkt. Auch die Recyclingrate wurde immer weiter gesteigert auf aktuell rd. 45 %, wodurch rd. 20 Mio. t/a CO₂-Freisetzung vermieden werden. Diese Erfolge müssen zusätzlich durch die geförderte Forschung in der Stahlbranche sowie auch anderen Metallbranchen in den jeweiligen Bereichen weiter fortgeführt werden.

Selbstverständlich findet Wasserstoff auch in anderen Prozessindustrien wie der Chemie und der Petrochemie Einsatz. Da es dort aber stärker um die Einbindung der Erzeugung als die Weiterentwicklung im Prozessverfahren selbst geht, sind die Forschungsaspekte im Cluster Erzeugung eingebettet.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Ca. 88 % der CO₂-Emissionen bei der Stahlerzeugung fallen durch den Einsatz von Kohlenstoff (Steinkohlekoks) als Reduktionsmitteln an. Durch den Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel, anstelle von Kohlenstoff, können bis zu 95 % der kohlebasierten CO₂-Emissionen eingespart werden.

- Insbesondere integrierte Hüttenwerke der eisenerzbasierten Route weisen komplexe Zusammenhänge in der Stoff- und Energiewirtschaft auf. Bei der damit verbundenen kohlenstoffbasierten Produktion fallen Kuppelgase (Gicht-, Konverter- und Koksofengas) an, die zur Erzeugung elektrischer Energie oder zur Bereitstellung von Prozesswärme eingesetzt werden. Mit der Nutzung von Wasserstoff als Reduktionsmittel ändern sich die Eigenschaften der Kuppelgase deutlich, sie entfallen oder ändern sich im Aufkommen und/oder in der Gasbeschaffenheit.
- Im nach der Stahlerzeugung folgenden Produktionsschritt (Down-Stream) hängt die Produktqualität des Stahls (Gefüge, Oberflächenbeschaffenheit) maßgeblich von den Randbedingungen im Wärmeprozess ab. Durch den Einsatz von Wasserstoff in Wiedererwärmungs- und Wärmebehandlungsöfen ändert sich die Heißgasatmosphäre in den Öfen. Wärme- und Stofftransport am Nutzgut müssen dort untersucht und ggf. angepasst werden.
- Ein TRL von 6 wird aktuell für den Energieverbund in integrierten Hüttenwerken mit Wasserstoffwirtschaft erreicht.
- Wasserstoffbasierte Direktreduktion weist aktuell einen TRL von 6–8 auf. Durch Weiterentwicklung des Prozesses kann zwischen 2030 und 2040 ein TRL von 9 erreicht werden. Durch entsprechende Forschung und Entwicklung kann mittelfristig die industrielle Umsetzung der wasserstoffbasierten Stahlherstellung erreicht werden.
- Der Einsatz von wasserstoffhaltigen Gasen als Brennstoff wird bereits seit Jahren in integrierten Hüttenwerken durch dort erzeugtes und zur Beheizung eingesetztes Koksofengas mit rd. 60 % H₂-Anteil praktiziert. Das Gas wird z. T. zur Bereitstellung von Prozesswärme in Winderhitzern, Koksofenheiztügen und Wiedererwärmungsöfen eingesetzt (TRL 9). Da in Deutschland nur noch vier Kokereien in Hüttenwerken betrieben werden, ist in allen anderen deutschen Stahlwerken aktuell ein Einsatz von rd. 21 TWh Erdgas pro Jahr für Beheizungsprozesse notwendig. Für die Umstellung des Betriebs von Erdgas (bzw. Kuppelgas) auf Wasserstoff an bestehenden



Anlagen wird aktuell ein TRL von 6 erreicht. Durch entsprechende Entwicklungsarbeiten kann bereits kurzfristig ein TRL von 8–9 erreicht werden.

- Eine Senkung der CO₂-Emissionen von rd. 20 % wird durch Einsatz von Wasserstoff am Hochofen über die Blasformen ermöglicht. Durch den zusätzlichen Einsatz von CCS/CCU Technologie können bis zu 65 % der CO₂-Emissionen eingespart werden. Die Technologie wird aktuell erprobt und weist einen TRL von 7 auf. Durch Weiterentwicklung und Erprobung des Verfahrens kann mittelfristig ein TRL von 8 erreicht werden.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Forschungsfeld:

Stoffliche Nutzung von H₂ zur Reduktion

(angewandte Forschung)

- Einsatz im Hochofen: Verfahrenstechnische Anpassung der am Hochofen eingesetzten Einblastechnik auf H₂-Einsatz (Anpassung von: Temperatur, Kinetik, Mehrkomponenten, Sicherheitstechnik, ...), Ermittlung des Einflusses von H₂-Einsatz auf Einsatzmaterialien und Prozesszonen, Entwicklung neuer Methoden für Monitoring und Prozessführung, Anpassung der Einsatzmaterialien für Maximierung des H₂-Einsatzes und zur Temperaturstabilität in Ofen, Optimierung des Einsatzes von im Hüttenwerk erzeugten Gichtgasen bei veränderten Zusammensetzungen (P1).
- Einsatz in der Direktreduktion: Anpassung der Einsatzmaterialien und Prozessoptimierung für die Substitution des Kohlenstoffs durch einen hohen H₂-Anteil (Prozessgasaufbereitung und Direktreduktionsschacht), Entwicklung neuer Methoden für Monitoring und Prozessführung, Optimierung von integrierten Hüttenwerken für Kombination von Hochofen- und Direktreduktionroute, Ermittlung der Einflüsse der H₂-Anreicherung auf DRI-Eigenschaften und Optimierung von Technologie- und Prozessführung (P1).
- Untersuchung weiterer wasserstoffbasierter Reduktionsmittel (z. B. Ammoniak) (P3).
- Außerdem wird H₂ zur Methanisierung (CCU) bestehender Kugelgasprodukte eingesetzt werden

können. Hierzu haben erste Untersuchungen im Jahr 2018 begonnen und müssen noch bis zur industriellen Einsatzreife weiterentwickelt werden (P1).

Forschungsfeld:

Rohstoffeinfluss auf die Produkteigenschaften und die Prozessbedingungen in der H₂-basierten Produktion

(Grundlagen- und angewandte Forschung, Demonstration)

- Anpassung der Recyclingprozesse und Kreisläufe, der schrottbasierten Route (P1).
- Quantifizierung der Schwankungsbreite der Rohstoff- und Sekundärstoffqualität, der Energieträger bzw. deren Verfügbarkeit (P1).
- Modellierung bzw. technische Überprüfung des Einflusses zukünftiger Prozessparameter (Eingangsmaterial, Energieträgerart, Energieträgerverfügbarkeit etc.) auf die Produkt- und Prozessqualität (P1).
- Ermittlung von Prozessstellgliedern, mit denen die derzeitige Produktqualität optimaler Weise reproduziert werden kann (P2 und in Wiedererwärmungsprozessen P3).
- Quantifizierung der Produkt- und Prozessqualitätsänderungen mit Bezug auf den derzeitigen Prozess als Benchmark (P1).
- Ermittlung der Kundenanforderungen bzw. deren Bereitschaft, zugunsten der CO₂-freien Produktion auf etablierte aber wieder neu zu hinterfragende Qualitätsstandards zu verzichten (P2).
- Unterstützung der Kunden bei der Interpretation zukünftiger Produkteigenschaften bzw. Qualitätskennzahlen sowie der Bewertung dessen Relevanz für deren Produkte (P2).
- Überprüfung des Einflusses von Prozessänderungen auf den zertifizierten Prozess und ggf. Ermittlung von Stellgliedern, die im Rahmen der Zertifizierung angepasst werden können/dürfen (P2).
- Prüfung der Anpassung von Normen an die neuen Produktionsbedingungen (P2).

Forschungsfeld:**Systemintegration (Prozesssimulation, Regelleistung, Recycling von H₂)**

(Grundlagen- und angewandte Forschung, Demonstration)

- Modellierung des Gas- und Energiemanagements im Hinblick auf an die H₂-Nutzung angepasste Prozesse und Prozessketten sowie Energieträgern aus regenerativen Quellen (P1).
- Gas-Regel-Strategien zur Integration dynamischer Kuppelgase (P1).
- Erprobung integrierter Eigenstromerzeugung und Wasser-Elektrolyse-Verfahren unter Berücksichtigung und Integration von Abwärmeströmen (z. B. Hochtemperatur-Elektrolyse) und der Nutzung des anfallenden Sauerstoffs in Thermo-prozessanlagen zur CO₂-Minderung (P1).

Forschungsfeld:**Einsatz von H₂ statt Erdgas und Kuppelgasen in Hochtemperaturprozessen**

(angewandte Forschung)

- Entwicklung von M&R Technik zur Integration dynamischer Brenngaszusammensetzungen (Brenngasbeschaffenheit, Abgasmessung, Flammenüberwachung) (P2).
- Untersuchung und Anpassung der Sicherheitsanforderungen im Unternehmen für die Nutzung von Wasserstoff (auch Eignung von Armaturen & Leitungen) (P1).
- Untersuchung der Strömungs-, Temperatur- und Heißgasbedingungen für den jeweiligen Prozess und die Nutzgutanforderungen (P1).
- Brennerentwicklung/-anpassungen für direkt und indirekt beheizte Thermo-prozessanlagen, sowie entsprechende Regelkonzepte, Überwachung und Wärmerückgewinnung (P2).
- Anpassung von Durchwärmungsmodellen für die Erwärmung von Nutz-/Umformgütern und Entwicklung angepasster Ofenführungsmodelle (P2).

- Untersuchung und Modellierung des Einflusses von Wasserstoff als Brenngas auf die Heißgas-atmosphäre, Wärmeübertragung und die resultierende Produktqualität (z. B. Zunderbildung, Versprödung, Randentkohlung) (P1).

■ INDUSTRIELLE NUTZUNG VON H₂ – ENERGETISCHE NUTZUNG FÜR PROZESSWÄRME UND -DAMPF:

Das Anwendungsfeld beschreibt die energetische Nutzung von Wasserstoff zur Erzeugung von Prozesswärme- und Dampf in der Industrie. Es wird zwischen Industriellen Thermo-prozessanlagen, Feuerungsanlagen und Dampferzeugern differenziert. Die betrachteten Technologien beinhalten die Verbrennung von reinem H₂, Gemischen und alternativen H₂-Energieträgern mit Luft bis hin zu reinem Sauerstoff.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Der Einsatz von Wasserstoff ist insbesondere in Prozessen mit einer hohen Energiedichte von Bedeutung (bspw. Prozesse mit einer hohen Zieltemperatur oder Produktionskapazität). Diese werden nach dem Stand der Technik vielfach mit fossilen gasförmigen Brennstoffen beheizt und können nicht oder nur anteilig elektrifiziert werden. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft eine bedeutende Rolle spielt und der Gesamtenergiebedarf der Industrie nicht vollständig durch Strom aus Erneuerbaren Energien gedeckt werden kann.
- Grundsätzlich kann im aktuellen Stand der Forschung zwischen Industriellen Thermo-prozessanlagen nach EN 746-2 (in den Ausführungen: Material/Werkstück mit und ohne Kontakt zum Verbrennungsgas), Feuerungsanlagen nach EN 676/EN 15502 sowie Dampferzeugern unterschieden werden.
- Der Einsatz von Wasserstoff kann in diesen Anlagen als H₂-Verbrennung von **0 bis 20 Vol.-% H₂ (in Erdgas)**, H₂-Verbrennung zwischen 0 bis 100 Vol.-% H₂ (**flexibel einstellbar**), H₂-Verbrennung mit **100 Vol.-% H₂** und als Verbrennung **alternativer H₂-Energieträger (bspw. Ammoniak)** ausgestaltet sein. Die Technologiereifegrade unterscheiden sich dabei in der branchenspezifischen



Anwendung (z. B. Schmelzen, Erwärmung, Wärmebehandlung im Bereich Stahl, NE-Metalle, Glas, Keramik, Kunststoffe, Zement, Batterieproduktion, ...) deutlich.

- Für **industrielle Thermoprozessanlagen** (Material/ Werkstück **mit Kontakt** zum Verbrennungsgas) liegt das TRL für die H_2 -Verbrennung mit 100 Vol.-% H_2 je nach Prozess und Anwendung zwischen 2 und 6. Für die H_2 -Verbrennung mit 0 bis 20 Vol.-% H_2 (in Erdgas) zwischen 4 und 7 und für die H_2 -Verbrennung zwischen 0 und 100 Vol.-% H_2 (flexibel einstellbar) zwischen 2 und 4.
- Für **industrielle Thermoprozessanlagen** (Material/ Werkstück **ohne Kontakt** zum Verbrennungsgas) liegt das TRL für die H_2 -Verbrennung mit 100 Vol.-% H_2 je nach Prozess und Anwendung zwischen 3 und 7. Für die H_2 -Verbrennung mit 0 bis 20 Vol.-% H_2 (in Erdgas) zwischen 5 und 7 und für die H_2 -Verbrennung zwischen 0 und 100 Vol.-% H_2 (flexibel einstellbar) zwischen 2 und 5.
- Für **Feuerungsanlagen** liegt das TRL für die H_2 -Verbrennung mit 100 Vol.-% H_2 je nach Prozess und Anwendung zwischen 2 und 5. Für die H_2 -Verbrennung mit 0 bis 20 Vol.-% H_2 (in Erdgas) zwischen 3 und 7 und für die H_2 -Verbrennung zwischen 0 und 100 Vol.-% H_2 (flexibel einstellbar) ≤ 3 .
- Für die **Dampferzeuger** beträgt das TRL für die H_2 -Verbrennung mit H_2 -Anteilen zwischen 0 und 100 Vol.-% H_2 (flexibel einstellbar) sowie 100 Vol.-% $H_2 \leq 2$. Für die H_2 -Verbrennung 0 bis 20 Vol.-% H_2 (in Erdgas) beträgt das TRL 5.
- Der Einsatz alternativer H_2 -Energieträger (bspw. Ammoniak) wird für die Dampferzeuger mit einem $TRL \leq 1$ und für die Industriellen Thermoprozessanlagen sowie Feuerungsanlagen mit ≤ 3 angegeben.
- Die maßgeblichen Hürden für den Einsatz von Wasserstoff in diesen Anwendungsfeldern liegen insbesondere im Bereich der Industriellen Thermoprozessanlagen sowie Feuerungsanlagen in der Demonstration der Prozessstauglichkeit bzw. der Überprüfung der Funktionsfähigkeit der jeweiligen Prozesse (bspw. in Bezug auf die Produktqualität). Im Bereich der Dampferzeuger

ist der Wärmeübertragung von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus spielen Schadstoffemissionen sowie Normung und Zertifizierung von Komponenten und Systemen eine wichtige Rolle.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Die Vielfalt der Prozesse in dem betrachteten Anwendungsfeld (v. a. Industrielle Thermoprozessanlagen im Bereich Metall-, Mineral-, Chemie- und Lebensmittelindustrie) bedingt eine anwendungsspezifische Betrachtung für den Einsatz von Wasserstoff. Grundsätzlich existieren selbst im Bereich einer H_2 -Verbrennung von 0 bis 20 Vol.-% H_2 in Erdgas sehr wenige Anwendungen mit hohem TRL. Der Hauptgrund hierfür liegt in gegenüber Erdgas deutlich höheren Kosten und der begrenzten Verfügbarkeit des Brennstoffs Wasserstoff.

Der Fokus der Forschung liegt kurz und mittelfristig insbesondere im Einsatz von Wasserstoff (anteilig und bis zu 100 %) sowie langfristig im Einsatz von Wasserstoff als H_2 -Derivat (bspw. Ammoniak).

Forschungsfeld:

Brennertechnik

(angewandte Forschung)

- Untersuchung des Emissionsverhaltens (bspw. NO_x) und der Möglichkeiten zur Emissionsminderung (bspw. flammlose Verbrennung, Verbrennungspulsation in Feuerungsanlagen) bei der Verbrennung und Flexibilisierung von Brennersystemen (H_2 -Verbrennung/alternative H_2 -Energieträger) (P1).
- Untersuchung und Erprobung von Messverfahren, Steuer- und Regelstrategien für wechselnde Brennstoffbeschaffenheit (H_2 -Verbrennung) (P1).
- Entwicklung von Abgasmesssystemen für H_2 im Abgas (bspw. nicht verbranntes H_2 im Abgas) (P2).

Forschungsfeld:

Prozess- und Anlagentechnik

(Grundlagen- und angewandte Forschung, Demonstration)

- Untersuchung der Interaktion zwischen Material/ Werkstück und (feuchten) Verbrennungsgasen und Auswirkungen auf die Produktqualität

(H₂-Verbrennung/alternative H₂-Energieträger; nur Industrielle Thermoprozessanlagen – Material/Werkstück mit Kontakt zum Verbrennungsgas) (P1).

- Ermittlung der Auswirkungen auf Wärmeübertragung, Effizienz und Ausbringen der Anlage (H₂-Verbrennung/alternative H₂-Energieträger) (P1). Untersuchungen zur wärmetechnischen Integration von Prozess und H₂-Erzeugung (P2).
- Erprobung neuer Technologien in Demonstrationsanlagen (P3).
- Schaffung von Schnittstellen zur H₂-Infrastruktur (P3).
- Untersuchung der Möglichkeiten zur Nutzung H₂-haltiger Abgase aus Produktionsprozessen (P3).
- Integration von Prozesswärme und Stromerzeugung (P4).

Forschungsfeld:

Werkstofftechnik

(Grundlagen- und angewandte Forschung, Demonstration)

- Untersuchung der Interaktion zwischen Anlagenkomponenten und Verbrennungsgasen (H₂-Verbrennung/alternative H₂-Energieträger) (P1).
- Materialuntersuchungen und -entwicklungen für Anlagenkomponenten (insbes. metallische und keramische Werkstoffe) und Feuerfestmaterialien in Wasserdampfatmosphären in Thermoprozessanlagen (Standzeiten, Korrosion, Ermüdung, ...) (H₂-Verbrennung/alternative H₂-Energieträger) (P1).

Forschungsfeld:

Normung und Zertifizierung

(angewandte Forschung)

- Erarbeitung von Standards eventuell nötigen Explosionsschutz für den H₂-Betrieb (P2).
- Erarbeitung von Zertifizierungsprogrammen für Komponenten sowie Gasregelstrecken (P2).

Forschungsfeld:

Szenario- und Wirtschaftlichkeitsanalysen

(angewandte Forschung)

- Analyse wirtschaftlicher Perspektiven für den Einsatz von H₂ im Bereich Industrieller Thermoprozessanlagen und Feuerungsanlagen (P2).
- Überprüfung der Möglichkeiten der Kostenreduktion bspw. für Anlagenkomponenten wie Gasregelstrecken (P2).
- Ermittlung des H₂-Bedarfs aus Thermoprozessanlagen und abgeleitete Bedarf für Versorgungsinfrastrukturen (P2).
- Vergleich der Einsatzbereiche für Elektrifizierung und H₂ (P2).
- Entwicklung von Einstiegs- und Langzeitszenarien für den Einsatz von H₂ und H₂-Energieträgern (P3).
- Untersuchung und Erarbeitung der Möglichkeiten zur Neuanlagenförderung und Anreizsetzung (bspw. flexible Abwrackprämie) aufgrund langer Lebensdauer der Anlagen (P4).

■ STATIONÄRE NUTZUNG VON H₂ - EINSATZ IN GEWERBE, HANDEL, INDUSTRIE UND QUARTIEREN:

Das Anwendungsfeld beschreibt die Nutzung von Wasserstoff bzw. gasförmigen und flüssigen Wasserstoffträgern, um Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, Industrie und Quartiere mit Energie zu versorgen bzw. über eine Sektorenkopplung die Elektroladeinfrastruktur zu verstärken. Die betrachteten Technologien umfassen die Wandlung der im Wasserstoff bzw. Wasserstoffträgern chemisch gebundene Energie in elektrische und thermische Energie durch Brennstoffzellensysteme sowie die Verbrennung des Wasserstoffs oder Wasserstoffträgern in Feuerungsanlagen, Gasturbinen und Verbrennungsmotoren in Blockheizkraftwerken.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sowie Industrie haben z. B. in Deutschland einen Anteil von über 40 % des Gesamtenergieverbrauchs, welcher mit geeigneten Mitteln zu dekarbonisieren ist. Weitere Herausforderungen sind der notwen-



dige Stromnetzausbau und die fehlenden Speicherkapazitäten im Bereich der Stromversorgung.

- Der Einsatz von Wasserstoff und Wasserstoffträgern ist an Standorten mit einem erhöhten Energiebedarf in Form von Strom, Wärme und Kälte notwendig (z. B. hoher Einsatz von Anlagen, Geräten und Maschinen), verbunden mit der Anforderung an eine dezentrale Energieversorgung mit ausreichender Speicherkapazität. Nach dem heutigen Stand der Technik werden die meisten Energiewandler mit fossilen flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen betrieben. Es ist daher davon auszugehen, dass Wasserstoff und Wasserstoffträger im Energiesystem der Zukunft eine bedeutende Rolle spielen werden und so die bisherigen Energiewandler ersetzen können.
- Hocheffiziente Brennstoffzellensysteme, die Wasserstoff oder Wasserstoffträger als Energieträger nutzen, liegen für industrielle und gewerbliche Anwendungen auf Basis unterschiedlicher Technologien wie z. B. SOFC, PAFC, PEM-FC, von deutschen bzw. europäischen Herstellern als einzelne Pilotanlagen oder Prototypen vor. Erste Industrialisierungen sind in naher Zukunft geplant. Aufgrund der Neuheit dieser Technologie und des Vorsprungs amerikanischer und asiatischer Anbieter besteht enormer Forschungs- und Entwicklungsbedarf in vielen Bereichen. Diese beginnen in der Grundlagenforschung zur Evaluierung neuer Materialien bis hin zu Arbeiten im Umfeld einer kostengünstigen Großserienfertigung, um eine ausreichende Skaleneffekte zu erreichen.
- Auch bei langjährig am Markt befindlichen verbrennungsbasierten Systemen wie Feuerungsanlagen, Gasturbinen und Verbrennungsmotoren geht eine Nutzung von Wasserstoff oder Wasserstoffträgern über eine reine Anpassungsentwicklung hinaus. Auch hier ist bei bestimmten Komponenten (z. B. H₂-Brennern) ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf vorhanden, der eine Diversifizierung dieser Systeme weg von fossilen Energieträgern hin zu Wasserstoff und Wasserstoffträgern erlaubt.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Aufgrund der Vielfalt der Anwendungsfälle in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, der Industrie, den Haushalten und sektorenübergreifenden Bereichen und der zahlreichen Optionen der Energiewandler für Wasserstoff und Wasserstoffträgern ergibt sich eine Vielzahl von Forschungsfeldern im Bereich der Brennstoffzellensysteme und der auf Verbrennung basierenden Systeme.

Grundsätzlich existieren in allen Bereichen der Energiewandlung sehr wenige Anwendungen mit hohem TRL. Aufgrund der gegenüber fossilen Energieträgern deutlich höheren Kosten und der heute stark begrenzten Verfügbarkeit von CO₂-neutralem Wasserstoff bzw. Wasserstoffträgern ist eine anwendungsspezifische Betrachtung für den Einsatz von Wasserstoff sinnvoll, die auch für eine Übergangszeit mit alternativen Gasen oder einer Wasserstoff-Beimischung abgedeckt werden kann.

Der Fokus der Forschung liegt kurz- und mittelfristig insbesondere im Einsatz von Wasserstoff (anteilig und bis zu 100 %), sowie langfristig im Einsatz von Wasserstoff in Wasserstoffträgern- oder -derivaten (z. B. Ammoniak oder Methanol).

Brennstoffzellen

Arbeitsfelder für Grundlagenforschung, angewandte Forschung, Demonstration/Reallabore

- Niedertemperatur-PEM-FC;
Hochtemperatur-PEM-FC
- Hochtemperatur-SOFC;
weitere NT/MT/HT-Brennstoffzellentypen
- Brennstoffzellen zu elektrochemischer Wasserstoffreinigung (Purification) und/oder Kompression (Compression) [EHP/EHC]

Forschungsfeld:

Brennstoffzellen – Industrialisierung

(angewandte Forschung)

- Skalierung in großvolumige Industrialisierung inkl. Entwicklung einer Zuliefererlandschaft (P1)
- Zustandsüberwachung, interoperable Systemtechnik (P2)

- lebensdauerschonender und netzdienlicher Brennstoffzellen-Betrieb (P2)

Forschungsfeld:

Brennstoffzellen - Energieträger

(Grundlagenforschung, angewandte Forschung, Demonstration)

- Nutzung von Wasserstoff, Nutzung von Wasserstoffbeimischungen in Erdgas/Biogas (P1, P2, P3, P4)
- Nutzung von Wasserstoffträgern und Wasserstoffderivaten wie Methanol und Ammoniak (P1, P2, P3, P4)

Forschungsfeld:

Brennstoffzellen – Material

(Grundlagenforschung, angewandte Forschung)

- Materialuntersuchungen und -optimierungen zur Lebensdauererhöhung im Bereich Energiewandler (P1, P2)
- Materialuntersuchungen und -optimierungen zur Lebensdauererhöhung im Bereich System (P2, P3)
- Untersuchungen zu Fertigungs- und Prozessthemen (P2, P3)

Forschungsfeld:

Brennstoffzellen - System/Sensorik/Steuerung

(Grundlagenforschung, angewandte Forschung)

- Steigerung der Effizienz und Lebensdauer durch Monitoringsysteme und Betriebsoptimierung/ Einsatz von KI (P1, P2, P3, P4)
- Verständniserweiterung zu Degradationsprozessen auf Stack- und Systemebene (P2, P3)
- Untersuchungen zur Gasqualität und Adaptation der Steuerung/Regelung (P2, P3)
- Untersuchungen zu netzdienlichem Systembetrieb/smart grids (P3)
- Verstromung von Abwärme (P3)
- Multi-fuel Systeme: Nutzung verschiedener Wasserstoffträger oder Wasserstoffderivate (P2, P3)

Forschungsfeld:

Brennstoffzellen – Energiesystem

(Grundlagenforschung)

- Systemanalyse mit langfristigem Wirtschaftlichkeitspotential (P2, P3)
- Integration in bestehende Systeme und Netze (Strom/Wärme) (P2, P3)
- mittel- und langfristige Speicherung von Energie/ Bewertung Versorgungssicherheit (P2, P3)

Forschungsfeld:

Brennstoffzellen

(Grundlagenforschung, angewandte Forschung)

- Reversibler Betrieb: Kombination Nutzung und Erzeugung von Wasserstoff in einer Einheit (P2, P3)

Forschungsfeld:

Brennstoffzellen – Zuverlässigkeit/Sicherheit

(Grundlagenforschung, angewandte Forschung)

- Begleitforschung zur Vermeidung von Ausfällen und Risiken (P2, P3, P4)
- well-to-energy-Betrachtung (P2, P3, P4)

Verbrennungsbasierte Systeme

Arbeitsfelder für Grundlagenforschung, angewandte Forschung, Demonstration/Reallabore:

- Feuerungsanlagen; Gasturbinen
- Verbrennungsmotoren; Blockheizkraftwerke

Forschungsfeld:

Verbrennungsbasierte Systeme

- Optimierte, kostengünstige Betriebsführung, Überwachung von Verbrennungsprozessen beim Einsatz von reinem Wasserstoff (P1, P2, P3)

Forschungsfeld:

Verbrennungsbasierte Systeme – Energieträger

(Grundlagenforschung, angewandte Forschung, Demonstration)

- Wasserstoffbeimischung, 100 % Wasserstoffbetrieb (P2, P3, P4)



- Retrofit (P2, P3)
- Entwicklung von H₂-Brennern (P1, P2, P3)
- Materialuntersuchungen und -optimierungen zur Lebensdauererhöhung im Bereich Energiewandler (P2, P3)
- Flüssige Wasserstoffträger (P1, P2, P3)

Forschungsfeld:

Verbrennungsbasierte Systeme – System/Sensorik/Steuerung (Grundlagenforschung, angewandte Forschung)

- Untersuchungen zur Gasqualität und Adaptation der Steuerung/Regelung/Einsatz von KI (P1, P2, P3)
- Untersuchungen zur Nox-Reduzierung (P2, P3)
- Nutzung von Prozess-/Abwärme: Dampferzeugung/zusätzliche Verstromung (P2, P3)

Forschungsfeld:

Verbrennungsbasierte Systeme – Energiesystem (Grundlagenforschung)

- Systemanalyse mit langfristigem Wirtschaftlichkeitspotential (P2, P3)
- Integration in bestehende Systeme und Netze (Strom/Wärme) (P2, P3)
- mittel- und langfristige Speicherung von Energie/ Bewertung Versorgungssicherheit (P2, P3)

Forschungsfeld:

Verbrennungsbasierte Systeme -Zuverlässigkeit/Sicherheit (Grundlagenforschung, angewandte Forschung)

- Begleitforschung zur Vermeidung von Ausfällen und Risiken (P2, P3, P4)
- well-to-energy-Betrachtung (P2, P3, P4)

■ STATIONÄRE NUTZUNG VON H₂ - EINSATZ IN HAUSHALTEN UND WOHNGEBÄUDEN

Das H₂ -Anwendungsfeld „Einsatz in Haushalten“ beinhaltet v.a. die thermische Nutzung von Wasser-

stoff für Heizung und Trinkwarmwasser mit Hilfe von Gas-Brennwertgeräten in Haushalten aber auch im Gewerbe-, Handel- sowie Dienstleistungssektor. Auch die gekoppelte Bereitstellung von Wärme und Strom in Mikro KWK-Anlagen (H₂-fähige Brennstoffzellen und gasmotorische Geräte) wird in Zukunft eine Rolle spielen. Die Verteilung und Bereitstellung des Wasserstoffs für die Haushalte kann entweder zentral (Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes) oder dezentral (lokale H₂-Erzeugung) erfolgen, wobei der überwiegende Teil des benötigten Wasserstoffs durch Importe gedeckt werden muss.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Durch Kombination von Wärmepumpen und grünen Gasen ist eine weitgehende Dekarbonisierung des Gebäudesektors möglich. Grüner Wasserstoff ist insbesondere geeignet um saisonale Schwankungen der Erneuerbaren Energien (PV, Wind) auszugleichen und die Belastung des Stromnetzes zu minimieren. Wirtschaftlich interessant für den Endkunden ist der Einsatz von Wasserstoff v. a. in Bestandsgebäuden die aus technischen/ökonomischen/ sozialen Gründen nicht mit einer Wärmepumpe beheizt werden können. Zu nennen sind etwa Etagenwohnungen in Mehrfamilienhäusern mit begrenztem Platzangebot (nicht ausreichend für die Installation einer Wärmepumpe mit Speicher) oder innerstädtische Bereiche mit entsprechend Lärmschutz- und Abstandsrestriktionen für Wärmepumpen.
- Einen Vorteil bieten H₂-ready-Geräte (TRL 6) insbesondere für Endkunden die nicht über die entsprechenden finanziellen Mittel verfügen um eine Investition in eine Wärmepumpe zu stemmen. Eine weitere Hürde für die Installation von Wärmepumpen sind notwendige Investitionen in die Gebäudehülle (um die Vorlauftemperatur zu senken), die sich nur bei einem entsprechend langen Planungshorizont wirtschaftlich auszahlen.
- Für Anwendungsfälle mit hohem Strombedarf eignen sich zudem H₂-fähige Brennstoffzellen. (SOFC: TRL 4, PEM: TRL 8) Auch die gasmotorische KWK-Technologie (TRL 8) kann einen Beitrag zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors leisten.

- Aktuell können max. 10 vol.-% H₂ ins Erdgasnetz beigemischt werden, was prinzipiell einen sofortigen Beitrag zur CO₂-Emissionsreduktion im Wärmesektor möglich macht. Hierzu gilt es allerdings auf politischer Seite den regulatorischen Rahmen für eine Einspeisung von H₂ ins Erdgasnetz anzupassen. Auch müssen die H₂-Endgeräte technisch angepasst und für eine höhere H₂-Beimischungen zertifiziert werden. Aktuelle H₂-Brennwertgeräte können bereits jetzt mit einer H₂-Beimischung von bis zu 20 vol.-% betrieben werden. Technisch ist dies auch für Brennstoffzellen (sowohl PEM als auch SOFC) möglich.
- Eine Umwidmung von Teilabschnitten des bestehenden Erdgasnetzes auf H₂ erfordert weitergehende technische Anpassung der Endgeräte auf den Betrieb mit 100 vol.-% H₂. Um den technologischen Reifegrad zu erhöhen, müssen Verbrennungstechnik, -regelung und -überwachung weiterentwickelt und die Langlebigkeit der Geräte sichergestellt werden.
- Bei der dezentralen H₂-Versorgung (z. B. H₂-Quartiere) muss das umgebende System (TRL 7) - insbesondere Elektrolyse, Speicherung und Abwärmenutzung – mit in die Betrachtung einbezogen werden. Es gilt die einzelnen Systemkomponenten aufeinander abzustimmen und das Gesamtsystem zu optimieren.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Kurz- und mittelfristiger Forschungsbedarf (P1, P2) besteht im Hinblick auf die Entwicklung von H₂-ready Brennwertgeräten, H₂-fähigen Brennstoffzellen, umgebende Systemkomponenten (Elektrolyse, Speicher, Kompressor, BoP), sozioökonomischer Begleitforschung und der Entwicklung von H₂-Bedarfs- und Supplyszenarien. Mittelfristiger Forschungsbedarf (P3) besteht in puncto H₂-Einspeisung ins Erdgasnetz.

Forschungsfeld:

Entwicklung H₂-Brennwertgeräten der 2. Generation

(Angewandte Forschung P1, P2)

- Maßnahmen zur Rückzündungsvermeidung bei vollvormischenden Brennern
- Entwicklung von kostengünstigen und serientauglichen Flammenwächtern

- Nutzung der Flammenwächter-Signale zur sicherheitsgerichteten Überwachung und Regelung
- Sicherstellung der Dual-fuel-Fähigkeit (H₂ und CH₄)
- Selbstadaptive Verbrennungsregelung

Forschungsfeld:

Entwicklung von H₂-fähige Brennstoffzellen (PEM, Alkalisch, SOFC) und Mikro KWks

(Angewandte Forschung P1, P2)

- Optimierung der Systemarchitektur und Anpassung der Betriebsbedingungen
- Entwicklung von Konzepten zur effizienten Nutzung der Abwärme
- Verhinderung von Degradation -> vertieftes Verständnis der Elektrochemie und Materialverbesserungen
- Anpassung der Verbrennungstechnik von Mikro KWks

Forschungsfeld:

Lokale H₂-Einspeisung ins Erdgasnetz (P3)

- Schaffung eines regulatorischen Rahmens (ggf. mit H₂-Einspeisevergütung analog PV)
- Spezifikation der technischen Voraussetzungen und der notwendigen Anpassungen für eine Einspeisung

Forschungsfeld:

Sozio-ökonomischer Forschungsbedarf

(Angewandte Forschung P1, P2)

- Erhöhung der Nutzerakzeptanz von Wasserstoff
 - Analysen der Bedingungen für die wirtschaftliche und soziale Akzeptanz von H₂ in Haushalten
- Nachweisführung sicherheitstechnische Unbedenklichkeit (Infobroschüren, Aufklärungsarbeit etc.)
- Entwicklung eines geeigneten Zertifizierungssystems: Herkunftsnachweise für grünen Wasserstoff



- Weiterentwicklung der Primärenergiefaktoren für Energielabeling: Berücksichtigung von grünem Wasserstoff

Forschungsfeld:

Systemoptimierung

(Demonstrationen/Reallabore; P1, P2)

- Optimierung des Gesamtsystems hinsichtlich wirtschaftlichen Einsatzes von H₂.
- Ableiten von Anwendungsfällen in denen H₂-basierte Gebäudetechnologien einen wichtigen ökologischen als auch ökonomischen Beitrag im zukünftigen Energiesystem leisten.

Forschungsfeld:

H₂-Bedarfs- und Supplyszenarien

(Angewandte Forschung P1, P2)

- H₂-Bedarfsermittlung für die Jahre 2030/2040/2050
- Wie groß ist das Potential für die einheimische H₂-Erzeugung? Wieviel H₂ muss importiert werden?
- Wie wird sich der H₂-Preis in den einzelnen Sektoren entwickeln?

■ MOBILE NUTZUNG VON H₂ - EINSATZ IM PKW:

Beim Einsatz im PKW wird bestenfalls regenerativ erzeugter Wasserstoff zusammen mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff in einer Brennstoffzelle zu Wasserdampf gewandelt. Die im Wasserstoff chemisch gebundene Energie wird elektrisch und thermisch umgesetzt. In einer Verbrennungskraftmaschine kann der Wasserstoff ebenfalls unter Nutzung der mechanischen und der thermischen Energie verbrannt werden.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Für die Erreichung der Klimaziele werden für den Mobilitätssektor im Bereich PKW aktuell vor allem batterieelektrische Fahrzeuge von den OEMs in der Entwicklungsroadmap forciert. Brennstoffzellenbasierte Antriebsstränge werden lediglich von Toyota, Hyundai und BMW vorangetrieben. Diese sind derzeit auf dem deutschen Absatzmarkt noch eine Nischenanwendung. Die Anzahl der neuzugelassenen BZ-Fahrzeuge im Jahr 2021 betrug bis Ende November 434. Insgesamt lagen

die Zulassungszahlen zu diesem Zeitpunkt bei 1.411 Fahrzeugen was gemessen an dem Fahrzeugbestand von etwa 49 Mio. PKW einen sehr geringen Anteil darstellt.

- Hieraus wird deutlich, was das größte Hemmnis an einer breiten Markteinführung darstellt. Der aktuell niedrige Industrialisierungsgrad der Produktionsprozesse und die damit verbundenen hohen Kosten für Brennstoffzellen und deren Systemkomponenten
- Es gibt aktuell viele Ankündigungen und Investitionsentscheidungen von den Zulieferern und Herstellern aus dem Automobilbereich diesen Punkt zu adressieren. Nun gilt es die Brennstoffzellentechnologie in verschiedene Anwendungen (Nutzfahrzeuge N1-N3, stationäre Anwendungen, Intralogistik, PKW) zu bringen, um die aufgebauten Produktionskapazitäten bei den Herstellern auch auszulasten. Da viele Unternehmen parallel die Kapazitäten hochfahren, wird ein großer Preisdruck bei allen Herstellern entstehen, was wiederum voraussichtlich den Markt beleben wird.
- Im Bereich der Verbrennungskraftmaschine gibt es von einigen Motoren- und Fahrzeugherstellern bzw. Entwicklungsdienstleistern in naher Zukunft auch geplante Umsetzungen in die Praxis im Bereich der Nutzfahrzeuge und auch im PKW-Bereich. Diese werden zum Teil auch schon in verschiedenen Anwendungen erprobt. Die Emissionen (NO_x und CO₂) lassen sich auch ohne Abgasnachbehandlungssysteme durch eine geschickte Prozessführung auf ein Mindestmaß reduzieren
- Wasserstoff im Sektor der PKWs ist unverzichtbar, da eine emissionsfreie Mobilität durch die reine Nutzung von batterieelektrischen Antrieben nicht bzw. nur unter hohen Anstrengungen umgesetzt werden kann. Die benötigten Anschlussleistungen gerade in Wohngebieten wären enorm und damit verbunden sind sehr hohe Investitionen für die benötigte Netzinfrastruktur erwartbar.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Im Bereich der Industrialisierung der PEM-Brennstoffzellenstacks (aktuell im Fokus stehende Technologie bei Brennstoffzellen) gibt es aktuell viele Tätigkeiten

von Lieferanten und Nutzfahrzeugherstellern auf dem Gebiet der Industrialisierung. Diese Synergien muss der PKW-Markt nun ebenfalls nutzen und Fahrzeuge zu einem angemessenen Preis auf dem Markt anbieten. Die Akzeptanz von brennstoffzellenbasierten Antriebslösungen in der Bevölkerung ist sogar höher als die von batteriebetriebenen Fahrzeugen und muss nun für die Anwender und Kunden noch auf ein Kostenniveau gebracht werden, dass sich eine breite Schicht in der Bevölkerung auch angesprochen fühlt, und Fahrzeuge kaufen kann.

Forschungsfeld:

Speicher- und Betankungstechnologien

(angewandte Forschung für Brennstoffzelle und Verbrenner)

- Industrialisierungsprozesse von Wasserstofftanks wie Gasdrucktanks (Wickeln), Flüssigspeicher oder Metallhybridspeicher. Standardisierung von Prüfprozessen für Kryo-Tanks (kontinuierliche Verwendung notwendig, nicht praktikabel für Endkunden aus dem privaten Bereich) (P1)
- Industrialisierungsprozesse von Tanksystemkomponenten zur Kostensenkung des Tanksystems, Materialforschung zur H₂-Versprödung und Verringerung der Permeation von Wasserstoff, Funktionsintegration von Druckregeleinrichtungen in Tankköpfe für Anwendungen in der Intralogistik, Verbesserung des Druckregelverhaltens (Schwankungen im System) durch komplexe Simulation der Fluid-Struktur-Interaktion (Rückwirkung federbelasteter Druckregler auf Druckschwankungen im System), zertifizierte Wärmetauscher zum Vorheizen des zugeführten Wasserstoffs durch Kühlwasserkopplung mit dem Ziel der Reduktion von Kondenswasser im Rezirkulationspfad des Stackkreislaufs (P2)
- Weitere Erhöhung der gravimetrischen Speicherdichte von Drucktanks durch verbesserte/optimierte Wickeltechnologien (bestmögliche Materialnutzung) (P3)
- Weitere Materialforschung zur Reduktion von umwelt- und recyclingkritischen Klebstoffen im Wickelprozess (P4)
- Lokale H₂-Rückgewinnung aus dem Erdgasnetz via EHP/EHC für Tankstellen (P1, P2).

BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUGE

Forschungsfeld:

Gesamtantriebsstrang- und Fahrzeugoptimierung

(Angewandte Forschung)

- Frei verfügbare modulare und flexible Leistungsverteilungseinheiten (PDU-„power distribution unit“) für die Sicherheit und das Abschalten von Teilsystemen im Fehlerfall, Standardisierung von Recyclingprozessen kritischer Komponenten z. B. der Membran und den verwendeten Bipolarplatten sowie den Dichtungen im Brennstoffzellenstack, Entwicklung von modularen Anodenrezirkulationssystemen auf Basis von Strahlpumpen und erhöhte Funktionsintegration in diese Module (Wasserabscheider, Proportionalventile, Sicherheitsventile und Druck-/Temperatur Sensorik. Industrialisierung von zertifizierten Steuergeräten, die einen geringeren Integrationsaufwand (kürzere Entwicklungszeiten) für potenzielle Start-Ups im Bereich Umrüstung/Integrationsdienstleistung ermöglichen (P2)
- Materialforschung für CH-basierte Membranen ohne Fluor und im Bereich der alkalischen Brennstoffzelle zur Erhöhung der Leistungsdichte bei weiterer Reduktion der Platinnutzung an den Elektroden ohne Kompromisse in der Leistungsfähigkeit der Membran-Elektroden-Einheit (P3)
- Industrialisierungsprozesse für alle Systemkomponenten zur Kostensenkung hier sind vor allem Modularisierung der leistungselektronischen Komponenten für unterschiedliche Leistungsklassen (DC/DC) und Kühlwasserregelventile mit großem Querschnitt (Proportionalventile) für das Thermomanagement zu nennen (P1)
- Weitere Erhöhung der Produktionskapazitäten für die Kostensenkung unter Einbeziehung von Volumenmodellen im Automobilsektor (P4)

Forschungsfeld:

Wirkungsgradoptimierung

(Angewandte Forschung)

- Nutzerverhalten für verschiedene Anwendungsfelder analysieren und unter Betrachtung der TCO-Kosten über Laufzeit mit alternativen batterieelektrischen Fahrzeugen über den gesamten Lebenszyklus analysieren (P1)



- Entwicklung von effizienzorientierten und anwendungsabhängigen Hybrid- und Hybrid-auslegungsstrategien mit Optimierungs- und „Machine-Learning“-Verfahren (P2)
- Anhand von Modulbaukasten Skalierungseffekte erzielen (Stückzahlen) (P3)

WASSERSTOFFVERBRENNUNGSMOTOR FAHRZEUGE

Forschungsfeld:

Gesamtantriebsstrang- und Fahrzeugoptimierung

(Angewandte Forschung)

- Angepasste Karosseriestrukturen sind durch den erhöhten Platzbedarf der Druckwasserstoff-tanksysteme (konstruktive, simulationsbasierte Optimierung) erforderlich. Weitere Emissionssenkung im Bereich NO_x (hohe Verbrennungstemperaturen) und CO₂ (durch Ölverbrennung) sowie Partikelemissionen → Diese sind durch angepasste Triebwerksentwicklungs- und Prozessführung der Medienzuführung optimierbar (P1)
- Anwendungsorientierte Wirkungsgradsteigerung innerhalb des Kennfeldes abhängig vom Nutzerverhalten (P2)

■ MOBILE NUTZUNG VON H₂ - EINSATZ IM LKW UND ANDEREN NUTZFAHRZEUGEN

Ein wesentlicher Anteil der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr stammt aus dem Güterverkehr. Innerhalb des Güterverkehrs sind Lkw – fast ausschließlich (> 90 %) mit dieselmotorischem Antrieb – mit Abstand der größte CO₂-Produzent. Da eine komplette Umstellung des Güterverkehrs auf die Schiene logistisch unmöglich ist, müssen Lkw zukünftig mit klimaneutralen Antrieben ausgestattet werden.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Auch zukünftig wird aus logistischen Gründen der Straßen-Güterverkehr einen bedeutenden Anteil der Tonnenkilometer in der Bundesrepublik tragen. Im Zuge der Globalisierung ist insgesamt auch zukünftig mit einer insgesamt steigenden Anzahl der Tonnenkilometer pro Jahr zu rechnen. Zur Erreichung der Klimaziele ist es von entscheidender Bedeutung, so schnell wie möglich eine Senkung der CO₂-Emissionen zu erreichen. In diesem Sinne ist gleichsam von Bedeutung,

Neufahrzeuge mit klimaneutralen Antrieben auszurüsten als auch Umrüslösungen für die Bestandsflotte bereitzustellen.

- Bei Neufahrzeugen stellen die hohen Anforderungen im Nutzfahrzeugsbereich hinsichtlich Reichweite, Lebensdauer, Transportkapazität, Robustheit und Kosten für batterieelektrische Konzepte eine hohe Einstiegshürde dar. Ob diese sinnvoll überwunden werden können, ist nach aktuellem Stand der Technik, speziell im Fernverkehr, nicht abschließend zu klären. Das parallele Vorantreiben anderer klimaneutraler Antriebstechnologien, die auf Wasserstoff oder abgeleiteten synthetischen Kraftstoffen (Cluster 1, Thema 8) basieren, ist daher von herausragender Bedeutung, damit der Straßen-Güterverkehr seinen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten und gleichzeitig der gewohnte Garant für die industrielle und öffentliche Versorgung bleiben kann. Dies gilt umso mehr in Hinblick auf die schnelle CO₂-Reduzierung durch Umrüslösungen.
- Die Forschung der letzten Jahre lässt sich grob in die Bereiche „Brennstoffzelle“, „Verbrennungskraftmaschine“ und „Speichertechnologien“ einteilen. In allen Bereichen werden insgesamt betrachtet ähnlich hohe TRL im mittleren Bereich (4–7) erreicht, allerdings mit starker Binnendifferenzierung je nach betrachteter Subtechnologie. Gerade bei Subtechnologien mit besonders hohem Potenzial besteht noch Nachholbedarf wie im Abschnitt Forschungsinhalte ausgeführt. Dasselbe gilt auch für Arbeiten, die das Gesamtsystem betrachten, Wechselwirkungen einzelner Subsysteme (z. B. Brennstoffzelle und Kühlkreislauf) analysieren und auf einen hohen Systemwirkungsgrad optimieren. Systembetrachtungen des Antriebs sind für die Etablierung der Technologie am Markt von herausragender Bedeutung und erfordern im Allgemeinen wegen der ansonsten nicht zu beherrschenden technischen Komplexität Ansätze mit Simulationsmethoden. Die Entwicklung von modellgestützten Methoden in allen drei genannten Bereichen, die die schnelle und wirtschaftliche Entwicklung markteinsatzfähiger Lösung ermöglichen und als Multiplikator auf die Innovationskraft wirken, sind daher mindestens genauso wichtig wie Machbarkeitsprojekte mit physischen Demonstratoren.

- Insgesamt sind marktreife, klimaneutrale Antriebssysteme auf Wasserstoffbasis für Lkw aus technischer Sicht in Reichweite. Neben den im folgenden adressierten Forschungsfeldern werden vielfach das Fehlen von rechtlichen oder normativen Vorgaben als Voraussetzung zum Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur als Einstiegshürden wahrgenommen. In dieser Hinsicht sind auch H₂-Derivate (synthetische Kraftstoffe) hervorzuheben, die bei entsprechender Verfügbarkeit die bestehende Infrastruktur für fossile Kraftstoffe mit minimalem Aufwand nutzen können.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Forschungsfeld:

Gesamtantriebsstrang- und Fahrzeugoptimierung

(Angewandte Forschung, P2)

- Die Integration einer Antriebskomponente in das Antriebssystem und dessen Integration in ein konkretes Fahrzeug geht i.A. mit deutlichen Verlusten im Wirkungsgrad einher. Die Vielzahl der dabei variablen Auslegungsparameter spannt schnell multidimensionale Optimierungsfelder auf, die nur noch simulativ beherrschbar sind, teilweise auch KI-basierte Ansätze erfordern, zumal auch die Optimierungsziele divers sind (z. B. Wirkungsgrad vs. Lebensdauer).
- Die Optimierung der Betriebsstrategie und Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten und Subsystemen sind zu betrachten. Eine Brennstoffzelle sollte bspw. für sich betrachtet immer einen besseren Wirkungsgrad im Vergleich zu einem H₂-Verbrennungsmotor haben, ist aber hinsichtlich des Kühlverhaltens wesentlich kritischer, was wiederum Auswirkungen auf die benötigten Kühlflächen hat. Eine sinnvolle Optimierung ist also nur in der Gesamtsystembetrachtung möglich, wozu Werkzeuge und Methoden entwickelt werden müssen.
- Ebenso ist der Zusammenhang zum Energiespeicher zu betrachten und die Verwendung weiterer Subsysteme, wie etwa Technologien zur Abwärmenutzung, z. B. durch thermoelektrische Generatoren, die den Gesamtsystemwirkungsgrad nochmals verbessern können.

Forschungsfeld:

Speicher- und Betankungstechnologien

(Angewandte Forschung, P3)

- Erhöhung des Massendurchsatzes beim Betankungsvorgang, Kompression des Wasserstoffs und seine Kühlung für eine mögliche Flüssigspeicherung (kryogener Wasserstoff).

Wirkungsgradoptimierung

(Angewandte Forschung; VKM (P1) + BSZ (P2))

- Ein hoher Komponentenwirkungsgrad des Energiewandlers ist zentral zum Erreichen hoher Reichweiten, Entschärfen der Speicherproblematik und Verbesserung der Kosteneffektivität.
- Bei der Brennstoffzelle geht es hierbei vor allem um die Optimierung der einzelnen Unterkomponenten und elektrochemischen Vorgänge.
- Beim Verbrennungsmotor besteht noch deutliches Potenzial zur Wirkungsgradsteigerung, da der Fokus bislang stark auf Umrüstarbeiten ausgehend von einer dieselmotorischen Basis lag. Dies gilt vor allem für die Optimierung des Brennverfahrens durch die Nutzung H₂-spezifischer Vorteile wie der Möglichkeit zur extremen Gemischabmagerung bei gleichzeitig hoher Verbrennungsgeschwindigkeit in Kombination mit Direkteinblasung.
- Hier besteht insbesondere auch Bedarf an Entwicklung der entsprechenden Simulationswerkzeuge, auch hinsichtlich des Klopfverhaltens.
- Daneben sind auch tribologische Themen relevante Forschungsfelder.
- Beim Einsatz von H₂-Derivaten ergeben sich je nach eingesetztem synthetischem Kraftstoff ebenfalls erhebliche Potenziale, aber auch Forschungsbedarfe zur Brennverfahrensoptimierung.

Forschungsfeld:

Sub-Zero-Emission H₂-Verbrennungsmotor

(Grundlagenforschung, P1)

- Während der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff das CO₂-Problem des Verbrennungsmotors



praktisch vollständig löst, entschärft er das Problem der Schadstoffemissionen zunächst nur, da insbesondere weiterhin Stickoxidemissionen entstehen können.

- Es existieren Ansätze durch Verwendung entsprechender Brennverfahren (z. B. mit extremer Ladungsverdünnung) und Abgasnachbehandlungskomponenten „Sub-Zero-Emission“-Konzepte zu realisieren, bei denen effektiv über einen Tag weniger Schadstoffe (insbesondere Feinstaub und Stickoxide) im Abgas enthalten sind als diejenigen, die über die Frischluft aus der Umgebung angesaugt worden sind. Dies klingt vielversprechend und stellt z. B. gegenüber batterieelektrischen Antrieben sogar eine Verbesserung dar, erfordert aber noch weitere Forschungstätigkeit sowohl im simulativen Bereich als auch hinsichtlich Demonstratoren.

■ MOBILE NUTZUNG VON H₂ - EINSATZ IM SCHIENEN-VERKEHR

Stand 2021 ist 61 % des deutschen Schienen-Streckennetzes nicht elektrifiziert. Trotz der voranschreitenden Elektrifizierung werden über viele Jahre Lösungen basierend auf Wasserstofftechnologien notwendig sein, mit denen die bisherigen Dieselantriebe durch klimaneutrale Antriebe ersetzt werden können.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Aufgrund des hohen Anteils des nicht-elektrifizierten Streckennetzes muss parallel zu einer weiteren Elektrifizierung der Pfad der Wasserstoff-Technologien beschritten werden. Nur mit solchen Zwischenlösungen können die Klimaziele erreicht werden. Ferner werden auch langfristig Streckenabschnitte und Einsatzszenarien bleiben, bei denen eine Elektrifizierung nicht wirtschaftlich ist und sich der Einsatz von Wasserstofftechnologien anbietet.
- Ein wesentlicher Unterschied der Schienenfahrzeuge zu schweren Nutzfahrzeugen im Straßenverkehr ist ihre deutlich längere Lebens- und damit auch Verweildauer in der Flotte. Lösungen, die auf Entwicklung und Verkauf von Neufahrzeugen beruhen werden bei Schienenfahrzeugen für die Klimaziele zu spät wirksam. Der Schwerpunkt bei Schienenfahrzeugen muss auf dem Umbau von

Bestandsfahrzeugen für einen Wasserstoffbetrieb liegen. Die technischen Lösungen müssen hier jeweils fahrzeug- und anwendungsbezogen anpassbar und wirtschaftlich durchführbar sein. Beispielsweise wird ein diesel-hydraulischer Antrieb sinnvoll nur über eine Nutzung des Wasserstoffs in einem Verbrennungsmotor umrüstbar sein, für einen diesel-elektrischen Antrieb kann sich dagegen der Umbau auf eine Brennstoffzelle anbieten. Die Umrüstungen sind dabei i.A. so zu gestalten, dass eine Neuzulassung von Bestandsfahrzeugen nach einer Umrüstung zu vermieden wird, da diese mit hohem Aufwand und Kosten einhergeht.

- Die Forschung der letzten Jahre hat sich auf die Komponente „Brennstoffzelle“ und „Speichertechnologien“ fokussiert. Hier wurde bereits in einzelnen Anwendungsfällen ein TRL 8 erreicht. Nachholbedarf besteht bei dem Umsatz des Wasserstoffs in einem Verbrennungsmotor (TRL 4) sowie bei Arbeiten, die das Gesamtsystem betrachten und auf einen hohen Systemwirkungsgrad optimieren (TRL 4). Systembetrachtungen des Antriebs sind insbesondere bei der Brennstoffzelle wichtig, die hohe Anforderungen an den Kühlkreislauf stellt. Eine Auslegung und Optimierung des Systems „Antrieb“ wird im Allgemeinen mit Simulationsmethoden erfolgen. Hier gibt es noch erheblichen Entwicklungs- und Forschungsbedarf (TRL 4). Verglichen zu Straßenfahrzeugen gab es hier in der Vergangenheit wenig Forschungsaktivität was zu einem erheblichen Nachholbedarf führt. Daher sollte eine Forschungsförderung im Bereich „Wasserstoff & Schienenverkehr“ nicht auf physischen Demonstrationsprojekte fokussieren, sondern simulative/virtuelle Ansätze mindestens im gleichen Ausmaß fördern. Die hohe Variantenvielfalt der Antriebe im Schienenverkehr kann nur mit simulativen Ansätzen beherrscht werden. Leuchtturmprojekte und Reallabore, die die Machbarkeit einzelner Technologien zeigen sind weniger notwendig. Stattdessen benötigt es modellgestützte Methoden, um schnell und wirtschaftlich H₂-Lösungen für die hohe Variantenvielfalt der Bestandsflotte (Retrofit) und für Neufahrzeuge anbieten zu können.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Forschungsfeld:

Wirkungsgrad im Fahrzeug (BSZ & VKM), Abwärmenutzung

(Angewandte Forschung, P1)

- Die Integration einer Antriebskomponente in das Antriebssystem und dessen Integration in ein konkretes Fahrzeug geht i.A. mit deutlichen Verlusten im Wirkungsgrad einher. Im Schienenfahrzeug kann dieser besonders hoch sein, da Antriebskomponenten und Antriebssystem im Unterschied zu Straßenfahrzeugen u.U. nicht aus einer Hand angeboten werden. Eine Brennstoffzelle sollte als Komponente immer einen besseren Wirkungsgrad im Vergleich zu einem H₂-Verbrennungsmotor haben. Um diesen Vorteil auch im Fahrzeug realisieren zu können, bedarf es jedoch eines sehr gut ausgelegten und integrierten Kühlsystems. Die hohen Wirkungsgradverluste bei der Integration einer Brennstoffzelle in ein Fahrzeug sollten zukünftig vermieden werden.
- Auf der anderen Seite kann der Wirkungsgrad von H₂-Verbrennungsmotoren bei der Integration in das Fahrzeug mit Hilfe von Abwärmenutzungstechnologien, z. B. thermoelektrischen Generatoren, noch gesteigert werden. Für letzteren Fall besteht auch noch Bedarf für Demonstrationsprojekte. Beispielsweise wird beim Einsatz von kryogenem Wasserstoff eine Steigerung des Wirkungsgrads des Gesamtsystems mittels Thermoelektrik auf ca. 5 % erwartet.

Forschungsfeld:

Simulationsmethodik Fahrzeugintegration Antrieb + Kühlung

(Grundlagenforschung, P1)

- Die Fahrzeugintegration ist für den Systemwirkungsgrad von erheblicher Relevanz. Gleichzeitig zeichnet sich der Schienenverkehr durch eine hohe Vielfalt an Fahrzeugen aus, die nochmals enorm ansteigt wenn auch das Retrofit betrachtet werden soll. Von daher ist die Nutzung von Simulationsmethoden zur Optimierung des Antriebs alternativlos. Bei Straßenfahrzeugen gibt es Aktivitäten, neben physikbasierten Systemsimulationen auch KI-Methoden auf Daten anzuwenden, die im Realfahrbetrieb erfasst werden. Mit Blick auf die hohe Variantenvielfalt bei Schienenfahrzeugen und auf Retrofits, sollten

solche KI-gestützten Ansätze dort auch vorangetrieben werden.

Forschungsfeld:

Energiemanagement Hybrid-Fahrzeuge

(Angewandte Forschung, P2)

- Brennstoffzellen und auch H₂-VKM-Elektrische Antriebe benötigen eine Regelung/Betriebsstrategie, die entscheidet, welche Leistung zum jeweiligen Zeitpunkt über den Energiewandler Brennstoffzelle oder VKM gewonnen werden soll, und welcher Anteil der Batterie entnommen werden soll. Diese Betriebsstrategie beeinflusst sehr wesentlich den Wirkungsgrad des Gesamtfahrzeugs im realen Einsatz. Arbeiten zur Optimierung von Betriebsstrategien erscheinen sehr sinnvoll, insbesondere unter Berücksichtigung von Methoden der künstlichen Intelligenz und den besonderen betrieblich-technischen Anforderungen des ländlichen Raums. Die Demonstration solcher Ansätze sollte i.A. im virtuellen Raum erfolgen, da hier eine deutlich größere Variantenvielfalt verglichen mit realen Demonstratoren abgedeckt werden kann.

Forschungsfeld:

Modulare, skalierbare Baukastensysteme mit standardisierten Schnittstellen

(Angewandte Forschung, P3)

- Bahnantriebe werden i.A. aus Komponenten und Teilsystemen unterschiedlicher Hersteller bestehen. Ein Baukastensystem mit standardisierten Schnittstellen könnte helfen, Wasserstofftechnologien schneller in Schienenfahrzeuge zu bringen.

Forschungsfeld:

Sub-Zero-Emission H₂-Verbrennungsmotor, dedicated H₂ engine

(Grundlagenforschung, P1)

- Auf Komponentenebene wird insbesondere bei dem H₂-Verbrennungsmotor noch deutlicher Forschungsbedarf gesehen. Für die Akzeptanz dieses Antriebs ist es wichtig, ihn als „Sub-Zero-Emission-Concept“ aufzusetzen. D.h. Verbrennungsführung und Abgasnachbehandlung müssen so gut sein, dass z. B. die über einen Tag weniger Schadstoffe (insbesondere Feinstaub und Stickoxide) im Abgas enthalten sind als diejenigen,



die über die Frischluft aus der Umgebung angesaugt worden sind.

Forschungsfeld:

Untersuchung und Definition der bahnspezifischen Anforderungen, die eine Nutzung von Wasserstoff in der Bahn wirtschaftlich möglich machen
(Grundlagenforschung, P3)

- Die Anwendungsfälle des Schienenverkehrs sind sehr unterschiedlich und komplex. Beginnend bei den Anwendungsfällen Regional- und Güterverkehr sowie Nebenfahrzeugen, über Anforderungen die sich aus der Upgrade-Fähigkeit von Komponenten ohne Neuzulassung ergeben und sehr unterschiedliche Anforderungen bzgl. Lebensdauer und Haltbarkeit der Komponenten im Vergleich zu Straßenfahrzeugen.

■ MOBILE NUTZUNG VON H₂ - EINSATZ IN DER SCHIFFFAHRT:

Es handelt sich bei dem Anwendungsfall „Schifffahrt“ zum einen um den Einsatz von Wasserstoff bzw. Wasserstoffträgern für Schiffsantriebssysteme zur Erzeugung der notwendigen Propulsionsleistung und zur Abdeckung des weiteren Energiebedarfs an Bord von Schiffen. Zum anderen geht es um den Transport von Wasserstoff mit See- und Binnenschiffen.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Zuverlässiger, sicherer und umweltverträglicher Verkehr ist eine elementare Voraussetzung für eine wettbewerbsfähige Wirtschaft. Dabei nimmt die Schifffahrt eine bedeutende Rolle innerhalb des Gesamtverkehrssystems ein.
- Schiffe befördern weltweit Waren, Rohstoffe, Halb- und Fertigerzeugnisse sowie viele hunderte Millionen von Menschen zu ihren Bestimmungsorten. **90 % der interkontinental und 40 % der innerhalb Europas** gehandelten Güter werden auf dem Wasserweg transportiert.
- Die Schifffahrt hat einen Anteil an dem weltweiten **Treibhausgas-Ausstoß von etwa 2,5 %** und ist damit vergleichbar mit dem Luftverkehr.
- Hochsee- und Küstenschiffe setzen bisher **Schweröl und Gasöl** ein. Binnenschiffe nutzen seit

2011 analog zum Straßenverkehr nahezu schwefelfreien Diesel.

- Die Schifffahrt soll nach Vorgaben der EU bis zum Jahr **2050 klimaneutral** werden. Einige Reedereien streben an, bis **2040 bzw. 2045** die Klimaneutralität ihrer Flotten zu erreichen. Weiterhin plant die EU, bis zum Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um 55 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren (**Fit for 55**).
- Die Nutzung klimafreundlicher Energieträger und die Entwicklung neuer Antriebskonzepte sind erforderlich, um die o. g. ehrgeizigen Ziele zu erreichen.
- Schiffe haben unterschiedliche Transportaufgaben, Fahrprofile und Größe. Daher variiert die Antriebsleistung zwischen **wenigen hundert Kilowatt und (teilweise) mehr als 80 Megawatt**.
- Der Einsatz von **batterie- und brennstoffzellenelektrischen** Antrieben zur Abdeckung des gesamten Leistungsbedarfs kommt aus heutiger Sicht nur für kleine Schiffe mit einer verhältnismäßig kleinen Antriebsleistung und Transportdistanz (**z. B. kleine Passagierschiffe oder Fähren**) in Frage.
- Ein Teil der Schifffahrt wird zunächst **Verbrennungsmotoren** als Antrieb verwenden, die mit umweltverträglichen Kraftstoffen betrieben werden. Hierbei werden neben **Drop-In Fuels (Cluster 1, Thema 8) vor allem Wasserstoff bzw. Wasserstoffträger wie Ammoniak, Methanol und synthetisches Methan als praktikabel** angesehen.
- Derzeit gibt es einzelne Projekte bzw. Schiffsneubauten (z. B. Containerschiffe, Binnenschiffe, Fähren, Kreuzfahrtschiffe), die umweltfreundliche Kraftstoffe nutzen.
- Für den Einsatz alternativer Kraftstoffe müssen neben den Energiekonvertern (Kolbenmaschine, Brennstoffzelle, Turbine) auch **Speichertanks, Systeme zur Kraftstoffaufbereitung und eine Bunkerinfrastruktur** zur Verfügung stehen.
- Die **Entwicklung der Regularien** hält in der Regel mit der technologischen Transformation nicht Schritt. Dadurch kann der Einsatz innovativer und umweltfreundliche Technologien verzögert oder sogar verhindert werden.

- Eine große **Herausforderung** stellen die **langen Lebenszyklen** von Schiffen (etwa 20 bis 50 Jahre) dar. Denn die heutigen Schiffsneubauten müssen den künftigen Zielen entsprechen. Zudem müssen Lösungen für die **fahrende Flotte (retrofits)** erarbeitet werden.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Forschungsfeld:

Entwicklung und Einsatz von Demonstratoren zur Erprobung von Technologien für Wasserstoff und Wasserstoffträger

- Die erfolgreiche Implementierung innovativer Technologien zum Einsatz von Wasserstoff und Wasserstoffträgern (z. B. Ammoniak, Methanol und synthetisches Methan) setzt die Erprobung unter realen Bedingungen voraus.
- Die Technologien umfassen Bunkern, Tanksysteme, Kraftstoffaufbereitung, Konverter, elektrische und mechanische Integration, Hybridisierung der Systeme für dynamische Anwendungen, etc.
- Es sollen Technologiedemonstratoren entwickelt und eingesetzt werden, um die o.g. Technologien zu erproben. Diese sind auch essenziell für die Vorschriftenentwicklung.

Forschungsfeld:

Weiterentwicklung und Anpassung von Antriebssystemen mit Wasserstoff und Wasserstoffträgern

- Für Anwendungen in der See- und Binnenschiffahrt sollen Antriebssysteme mit Wasserstoff und Wasserstoffträgern (z. B. Ammoniak, Methanol und synthetisches Methan) gezielt weiterentwickelt und angepasst werden. Zu den Antriebssystemen zählen u. a. Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen und Turbomaschinen.
- Standardisierung und Synergieeffekte mit landseitigen Anwendungen sind anzustreben.
- Mehrkraftstofflösungen sind zu erarbeiten. Es sollen hierzu Simulationswerkzeuge entwickelt und mittels experimenteller Daten validiert werden.

Forschungsfeld:

Hybride Nutzung unterschiedlicher Kraftstoffe und Antriebssysteme an Bord von Schiffen

- Abhängig vom Schiffstyp und Fahrprofil kann die Nutzung verschiedener Antriebssysteme mit unterschiedlichen Kraftstoffen sinnvoll sein. So können beispielsweise Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen für verschiedene Energieverbräuche (Propulsion, Energie an Bord, ...) eingesetzt werden.
- Es sollen Lösungen für den Energiemix an Bord von Schiffen erarbeitet werden. Diese umfassen die Integration der Energiesysteme und die Entwicklung von Energiemanagementsystemen.

Forschungsfeld:

Entwicklung von Schiffen zum Transport von Wasserstoff

- Der nachhaltige, sichere und wirtschaftliche Transport des sog. grünen Wasserstoffs bedarf einer intelligenten Verknüpfung verschiedener Verkehrsträger. Hierbei spielt die Entwicklung von Schiffen für den See- und Binnentransport auf der Wasserstraße eine wichtige Rolle.
- Es sollen See- und Binnenschiffe, seegehende Binnenschiffe und Bunkerschiffe für den Transport von Wasserstoff und Wasserstoffträgern bzw. für das Bunkern entwickelt werden. Dabei ist die Entwicklung und Integration von Tanksystemen von besonderer Bedeutung.

Forschungsfeld:

Entwicklung von Regularien für den Einsatz von Wasserstoff und Wasserstoffträgern als Kraftstoff und Ladung

- Es sollen Richtlinien für den Transport per Schiff und die Nutzung als Kraftstoff entwickelt werden, die als Basis für Vorschriften der zuständigen Behörden und Institutionen dienen sollen. Hierzu sollen deterministische und risikobasierte Methoden weiterentwickelt und angewendet werden.
- Die Richtlinien sollen alle relevanten Aspekte für die Zulassung der einzelnen Systeme und des Gesamtschiffes sowie für das Bunkern umfassen. Die Entwicklung der Richtlinien soll möglichst in Zusammenarbeit mit Sicherheitsinstitutionen erfolgen.



Forschungsfeld:

Qualifizierung von Fachpersonal für den Einsatz von Wasserstoff und Wasserstoffträgern

- Es sollen Kurse für die Qualifizierung des nautischen und des landseitigen Personals zum Umgang mit Wasserstoff und Wasserstoffträgern in Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden und Institutionen entwickelt werden. Hierbei sollen u. a. praxisnahe Trainings, teils unter Einsatz von Simulatoren, entwickelt werden.

Forschungsfeld:

Systematischer Vergleich wasserstoffbasierter Energieträger und Energiewandler

- Für Schiffsantriebe kommen verschiedene wasserstoffbasierte Kraftstoffe in Frage, die abhängig von der Anwendung Vor- und Nachteile aufweisen. Für die Wahl des nachhaltigen Kraftstoffes sollen verschiedene wasserstoffbasierte Kraftstoffe und Systeme anwendungsspezifisch hinsichtlich Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit (Well-to-wake, LCA, TCO) verglichen werden.

■ MOBILE NUTZUNG VON H₂ - EINSATZ IM FLUGVERKEHR:

Das Anwendungsfeld beschreibt die Speicherung von H₂ an Bord von Luftfahrzeugen sowie Nutzung von H₂, um Antriebe und Bordsysteme von Luftfahrzeugen mit Energie zu versorgen. Die betrachteten Technologien umfassen die Verbrennung des Wasserstoffs in Fluggas-turbinen und Verbrennungsmotoren sowie die Wandlung der chemischen Energie in elektrische Energie in Brennstoffzellen.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

- Effiziente Luftfahrzeuge zeichnen sich durch ein möglichst geringes Systemgewicht und einen möglichst hohen Antriebswirkungsgrad aus, sodass Wasserstoff als Energieträger für die diese Anwendungen prädestiniert ist.
- Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden in Luftfahrtanwendungen fast ausschließlich fossile Energieträger verwendet. Die Nutzung von Blends aus fossilen und synthetischen Kraftstoffen (Sustainable Aviation Fuels, SAF ; Cluster 1, Thema 8) wurde bereits demonstriert. Ein alltäglicher Einsatz

scheitert zum momentanen Zeitpunkt an der Verfügbarkeit von SAF.

- Eine reine Elektrifizierung ist aufgrund der geringen Energiedichte der Akkumulatoren nur für Anwendungen mit kleinen Startgewichten und kurzen Reichweiten eine Alternative. Des Weiteren machen die Zulassungs- und Sicherheitsanforderungen solche Energiespeicher sehr aufwändig und damit teuer und schwer.
- Für die **Verbrennung von Wasserstoff in Strahltriebwerken** liegt das TRL bei 4. Bei der Entwicklung kann auf die Erkenntnisse über die Wasserstoffverbrennung in stationären Gasturbinen und Verbrennungsmotoren zurückgegriffen werden. Erste Versuche wurden mit APU Systemen im Labor durchgeführt. Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen an Luftfahrtantriebe ist ein Transfer der Brennkammertechnologie aus stationären Gasturbinen nicht eins zu eins möglich. Entsprechende Demonstrationsvorhaben für moderne Strahltriebwerke sind ausstehend.
- Für die **H₂-Brennstoffzelle** als Teil des Flugantriebs liegt das TRL zwischen 1 (für Verkehrsflugzeuge) und 6 (für allgemeine Luftfahrt). Es existieren bereits mehrere erfolgreiche Technologie-Demonstratoren in Form von kleinen Forschungsflugzeugen, die über Brennstoffzellensysteme angetrieben werden. Eine entsprechende Skalierung für Verkehrsflugzeuge ist ausstehend.
- Zur **Speicherung von Wasserstoff** in der kommerziellen Luftfahrt werden kryogene Tanksysteme verwendet werden, um die geforderte gravimetrische und volumetrische Energiedichte zu erreichen. Eine entsprechende Entwicklung der Tanksysteme und der Transfer z. B. aus der Raumfahrt ist daher notwendig, sodass das TRL mit 3 angegeben wird. Drucktanks finden vor allem in den aktuellen Demonstrationsvorhaben Anwendung, können aber nur für die allgemeine Luftfahrt von Relevanz sein (TRL 7).
- Die Entwicklung von **H₂-Verbrennungsmotoren** für Luftfahrtanwendungen wird bisher nicht aktiv verfolgt. Ein Transfer aus den bodengebundenen Anwendungen ist jedoch möglich (TRL <4). Es gibt vereinzelte Demonstratoren (e.g. Phantom Eye) die mit dieser Technologie erprobt wurden.

- Die maßgebliche Hürde für den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger im Luftverkehr stellt die Entwicklung und Demonstration der Technologie sowie die Zulassung als luftfahrtsichere Produkte dar. Aufgrund der weitestgehend notwendigen Neuentwicklungen ergeben sich für die Industrie hohe technologische und damit auch finanzielle Risiken. Weiterhin ist die Infrastruktur noch unterentwickelt. Im Gegensatz zu anderen Mobilitätssektoren hat die Luftfahrt den großen Vorteil, dass die Betankung an Flughäfen zentral zusammenläuft, aber den Nachteil, dass sehr schnell Flughäfen global ausgerüstet werden müssen.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Die Gliederung der Forschungsfelder erfolgt anhand der verschiedenen Komponenten, die für eine Nutzung von Wasserstoff in der Luftfahrt erforderlich sind, ergänzt durch das Querschnittsthema „Luftfahrtsicherheit und Zertifizierung“.

Forschungsfeld:

Hybrid-Elektrische Antriebssysteme mit H₂-Brennstoffzelle (Grundlagenforschung, angewandte Forschung)

- Steigerung/Skalierung der gravimetrischen Leistungs- und Energiedichte des Antriebssystems für den Einsatz in Verkehrsflugzeugen (P1)
- Thermalmanagement des Antriebssystems und die Wechselwirkung mit der Flugzeugkonfiguration und der Aerodynamik der Lufteinlässe (Brennstoffzelle in Verbindung mit LH₂-Tank, eventuell Pufferbatterie und E-Motor, Kühlungssystem und die flugzeugseitigen Ein- und Auslässe) (P1)
- Systemarchitektur und Dimensionierung für transiente Vorgänge (P3)
- Höhenverträglichkeit des Antriebsstrangs (Membran-Elektroden, Leistungselektronik, elektrisches Netzwerk, Antriebsmotor) (P3)
- Entwicklung neuer FADEC-Regelkonzepte und Messtechnik für Antriebe mit Brennstoffzellen (P2)
- Elektromagnetische Verträglichkeit (Komponenten untereinander als auch Verhalten bei Blitzschlag).

- Weiterentwicklung der Brennstoffzelle (höhere Stack Performance, geringere parasitäre Lasten, geringere Degradation). (P4)
- Entwicklung supraleitender elektrischer Komponenten (P4)

Forschungsfeld:

H₂-Direktverbrennung im Strahltriebwerk

(Grundlagenforschung, angewandte Forschung)

- Stabile und schadstoffarme H₂-Verbrennung und daraus folgende Veränderungen am Triebwerk (P1)
- Werkstoffentwicklung hinsichtlich Wasserstoffversprödung und Hochtemperaturbeständigkeit (P2)
- Entwicklung des Treibstoffsystems um den kryogenen Treibstoff mit hohem Druck und entsprechenden Massenströmen der Brennkammer zuzuführen. (P3)

Forschungsfeld:

Tanksystem und Betankung

(angewandte Forschung, Demonstration)

- Reduktion des Gewichts des H₂-Tanksystems (sowohl Drucktanks als auch kryogene Tanks). (P1)
- Thermalmanagements des kryogenen Tanksystems, vor allem in Hinblick auf die transienten Flugmanöver (P1)
- Infrastruktur am Boden (Tanklager für H₂, Verteilerpipelines am Flughafen, Tankcluster, ...) und operatives Vorgehen bei der Betankung mit Wasserstoff (z. B. durch Erprobung in einem Reallabor). (P2)
- Zuverlässige und leichte Sensoren (sicherheitsrelevant), die in dem Kryotank verbaut werden können und über die Lebensdauer des Flugzeugs nicht degradieren/ausfallen. (P2)

Forschungsfeld:

Luftfahrtsicherheit und Zulassung

(angewandte Forschung, Demonstration)

- Entwicklung luftfahrtspezifischer Komponenten und Gewährleistung der Zuverlässigkeit, der Lebensdauer und der Nachweisbarkeit der Flugsicherheit (P1)



- Erarbeitung von Zertifizierungsrichtlinien für Wasserstoffkomponenten in Luftfahrtanwendungen (P2)
- Weiterhin bedürfen die Nachweise von „Failure Cases“ (z. B. crash landing, Lightning strike, Particular risks, etc.) mit den Flugzeugrandbedingungen und Anforderungen eine Simulationsentwicklung und anschließende Validierung der Methodik, um LH₂ Treibstoffsysteme zulassen zu können. (P3)

Forschungsfeld:

Wirtschaftlichkeit und Einsatzszenarien im Vergleich zu Wasserstoffalternativen

(angewandte Forschung)

- Analyse der wirtschaftlichen Perspektiven für Wasserstoff in der Luftfahrt, insbesondere im Vergleich zu SAF (P1)
- Ganzheitliche Klimabewertung (well-to-wake), insbesondere der nicht CO₂-Effekte (P2)

4. SICHERHEIT, AKZEPTANZ UND NACHHALTIGE MARKTEINFÜHRUNG

■ EINLEITUNG

Die Wertschöpfungskette von Wasserstoff beinhaltet Themen, die weder der Erzeugung noch der Infrastruktur oder Nutzung zugeordnet werden können, jedoch Anknüpfungspunkte zu allen Technologien in den Bereichen besitzen. Es ist wichtig, die technischen Fragestellungen im Kontext dieser Themenbereiche zu betrachten und die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe miteinander zu kombinieren. Übergeordnete Themen müssen so ausgestaltet werden, dass der Hochlauf der Erzeugung und Anwendung von Wasserstoff zu den allgemeinen sozialen, ökologischen und wirtschaftlichen Zielbildern beiträgt.

Bedingung für eine erfolgreiche Energiewende und die wirtschaftliche Nutzung von Wasserstoff als sauberen Energieträger sind neben eines zügigen Markthochlaufs und der Etablierung der dafür notwendigen Wertschöpfungsketten im nationalen und europäischen Rahmen die Schaffung verlässlicher Qualitäts- und Sicherheitsstandards für innovative Technologien. Durch die Gewährleistung der Sicherheit wächst das Vertrauen, in Wasserstofftechnologien zu investieren und mit Markteinführung eine breite Anwendung der Wasserstofftechnologien in der Gesellschaft zu ermöglichen.

Nicht zuletzt sind die Qualität- und Sicherheitsstandards auch eine relevante Grundlage für eine gesellschaftliche Akzeptanz. Neben zentralen weiteren Kriterien wie den positiven Klimawirkungen der Wasserstoffnutzung, deren Bezahlbarkeit und gesellschaftlichen Teilhabeoptionen stellt die Risikowahrnehmung einen Faktor dar, um eine breite Zustimmung auf den unterschiedlichen gesellschaftlichen Akteursebenen zu erreichen.

Als Grundlage dafür, dass eine Markteinführung von Wasserstoff gelingen kann, müssen geeignete und verlässliche Rahmenbedingungen für Geschäftsmodelle entlang der gesamten Wertschöpfungskette ausgestaltet werden. Um dies zu gewährleisten, müssen neben technologischen Fragestellungen auch ökonomische und rechtliche Fragen geklärt werden. Zentral ist die dabei die Rolle der Nachhaltigkeit, die in ihrer ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension als integraler Bestandteil von Forschung verankert werden muss.

Mit den Reallaboren der Energiewende wurde durch die Bundesregierung bereits ein Projektformat etabliert, innovative Technologien im industriellen Maßstab und

unter realen Bedingungen zu erproben und damit die Lücke zwischen anwendungsnahe Forschung und der Umsetzung in der Praxis zu schließen. Es adressiert damit viele der genannten Punkte. Dieses sowie weitere innovative Förderformate gilt es aufzugreifen und anhand der genannten Kriterien weiterzuentwickeln sowie gegebenenfalls neue Formate zu etablieren.

Die nötigen Forschungsschwerpunkte der genannten Kategorien werden nun im Folgenden in ihrer nötigen Ausgestaltung näher erläutert.

■ SICHERHEITSTECHNISCHE FRAGESTELLUNGEN BEANTWORTEN UND KONZEPTE BEDARFSORIENTIERT WEITERENTWICKELN

Der Begriff „Sicherheit“ wird in der Regel spezifisch für unterschiedliche Domänen definiert, bezeichnet aber grundsätzlich einen Zustand, der frei von unvermeidbaren Risiken und/oder Beeinträchtigungen ist oder als gefahrenfrei angesehen wird.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Die sichere Nutzung von Wasserstoff wird bereits seit vielen Jahren intensiv erforscht, da insbesondere spezifische Eigenschaften des Energieträgers unter den jeweiligen technologischen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden müssen. Ein erfolgreiches Sicherheitsmanagement setzt dabei Kenntnisse in vielen verschiedenen Disziplinen voraus. Materialkompatibilitäten, Freisetzungsszenarien, Zündmechanismen und reaktive Strömungen sowie Überlegungen zur strukturellen Integrität müssen hierbei oft im Zusammenhang mit neuen Anwendungen, neuen Materialien und möglicherweise auch unter Berücksichtigung von öffentlichen Nutzern betrachtet werden. Es gibt trotz der bisherigen intensiven Forschung noch Wissenslücken, die auch unter Berücksichtigung der Entwicklung neuer und/oder dem Hochskalieren bekannter Technologien geschlossen werden müssen.

Die Wasserstoffsicherheit stellt kein Hindernis für die Einführung des Energieträgers oder der Technologien dar. Es müssen vor allem vorhandene Erfahrungen aus vielen verschiedenen Bereichen wie z. B. großen chemischen Produktionssystemen mit Wasserstoff, der Konstruktion von Verbrennungsmotoren oder petrochemischen Prozessen geteilt werden. Umfassendes Wissen zur Wasserstoffsicherheit liegt auch unzweifelhaft im Bereich der kerntechnischen Sicherheit vor, z. B.



den Einsatz passiver Sicherheitskomponenten zum Abbau ungewollter Wasserstofffreisetzungen und entsprechende Warnsysteme. Das in allen Bereichen erlangte und dokumentierte Wissen sowie die zugehörigen Daten müssen in eine allgemeinverständliche Form übertragen werden, um einen wichtigen Beitrag zur Wasserstoffsicherheit und zur Bewertung hinsichtlich der Beherrschbarkeit von möglichen Unfällen in der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft leisten zu können.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Leckageüberwachung:

Die Überwachung von Prozessen und Anlagen hinsichtlich einer Freisetzung brennbarer Gase gehört zu den klassischen Maßnahmen des Explosionsschutzes im Rahmen der Anlagensicherheit und des Arbeitsschutzes. Zur Umsetzung der Maßnahmen sind Sensoren mit verschiedenen Messprinzipien verfügbar, die eine gute Punktdetektion oder die Überwachung eines Teilbereichs von Anlagen oder von einzelnen Komponenten gestatten. Forschung und Entwicklung von flächen- und volumenbezogener Detektion von Wasserstofffreisetzungen und Mischungsverhalten müssen vorangetrieben werden, um innovative Methoden und Konzepte für ein Bereichsmonitoring zu entwickeln. Durch die Auswahl und Kombination geeigneter Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien und der Integration dieser in Netzwerke kann die betriebliche Überwachung von Anlagen erheblich verbessert werden und auch zu Kosteneinsparungen führen, wenn z. B. die Zahl der Sensoren verringert oder Ausfallzeiten von Anwendungen minimiert werden. Die Möglichkeit zur Digitalisierung und der Einsatz künstlicher Intelligenz kann zusätzlich zu einer verbesserten und schnelleren ganzheitlichen Datenverarbeitung führen, um frühzeitig noch vor Eintreten kritischer Zustände auf unerwünschte Zustände hinzuweisen bzw. Sofortmaßnahmen einzuleiten. Der Ausfall einzelner Sensoren muss z. B. nicht zwangsläufig ein Abschalten der Anlage bedeuten, wenn die „fehlende Information“ durch die Summe aller anderen Sensordaten „ersetzt“ werden kann und die Sicherheit nicht reduziert wird. Insbesondere die Erarbeitung von Auswahlkriterien für Sensorkonzepte für den Einsatz von Kryo-Wasserstoffanwendungen sollte vorangetrieben werden.

Schutzkonzepte:

Insbesondere im industriellen Bereich gibt es etablierte Schutzkonzepte für den sicheren Einsatz von Wasserstoff, mit denen Unfälle und Explosionen ver-

mieden und die Auswirkungen der Freisetzung limitiert werden. Eine direkte Übertragung auf Technologien und Anwendungen im öffentlichen, nicht-industriellen Bereich, in denen zusätzlich mit großen Mengen Wasserstoff umgegangen wird, ist nicht ohne weiteres möglich, vor allem aufgrund der schwierigen Realisierbarkeit bestimmter organisatorischer Schutzmaßnahmen und des größeren Schadensausmaßes im Falle von Unfällen. Für spezifische Schutzmaßnahmen, z. B. Ablassen von Wasserstoff über entsprechende Abblasseleitungen für eine kontrollierte und sichere Freisetzung von Wasserstoff fehlen geeignete und validierte Leitfäden. Die Leitfäden sollten möglichst auch valide Modelle zur Berechnung der Ausbreitung des Wasserstoffs sowie Modelle zur Auswirkungsbetrachtung bei Folgeszenarien, z. B. Entzündungsszenarien, sowie wissenschaftlich fundierte Methoden zur Festlegung von Schutzbereichen (Zonen, Sicherheitsabstände, Gefahrenbereiche) beinhalten, die auch international einheitlich genutzt werden. Eine besondere Herausforderung besteht in der Erarbeitung spezifischer Leitfäden für LH_2 und kryogenem Wasserstoff mit höheren Dichten, da entsprechende Daten zur Validierung der Modelle unvollständig sind.

Verhalten von Wasserstoff bei Unfallszenarien:

Wasserstofftechnologien werden im Rahmen der Entwicklung auch mit Blick auf ihre Sicherheit intensiv geprüft. Dennoch kann ein unfallbedingtes Versagen von Einzelkomponenten oder Anlagen nie vollständig ausgeschlossen werden. Das Verhalten von Wasserstoff in solchen Unfallszenarien muss noch besser verstanden werden, um entsprechende, mitunter komplexe Szenarien bei der Erarbeitung von Vorschriften, Regelwerken und Normen zu berücksichtigen. Auch für die Entwicklung von Modellen für Risikominderungspotenziale verschiedener Schutzmaßnahmen und deren Validierung durch experimentelle Daten ist dieses Wissen von Bedeutung.

Die erforderliche pränormative Forschung umfasst u. a. bei phänomenologische (z. B. mehrphasige Freisetzung großer Flüssigwasserstoff Massen, Zündung von Freisetzungen bei Extrem-Wetterlagen) und spezifische anwendungsbezogene Fragestellungen (z. B. Flammenausbreitungen und -geschwindigkeiten bei inhomogenen Wasserstoff-Luft-Gemischen oder kryogenen Mischungen, Gasexplosion von expandierendem siedenden Flüssigwasserstoff (BLEVE), Zündwahrscheinlichkeiten für Gefährdungs- und Sicherheitsanalysen).

Materialeignung und -kompatibilitäten:

Ein zentraler Aspekt für alle Technologien der Wertschöpfungskette ist die Auswahl geeigneter Materialien und Werkstoffe, die hinsichtlich eines sicheren und nachhaltigen Einsatzes über die gesamte Nutzungsdauer charakterisiert und beurteilt werden müssen. Insbesondere wasserstoffabhängige Werkstoffveränderungen, die unter Umständen bei extremen Bedingungen über die Nutzungsdauer auftreten können, z. B. bei hohen oder tiefen Temperaturen und Drücken, müssen bekannt sein. Hierzu ist es erforderlich, bestehende Prüfverfahren anzupassen bzw. neue Verfahren und Prüfinfrastrukturen für den Nachweis der Wasserstofftauglichkeit zu entwickeln. Aus den Daten müssen außerdem wissenschaftlich fundierte, aber gleichzeitig praxistaugliche Kriterien für den Einsatz der Materialien festgelegt werden. Für eine kontinuierliche Überwachung von Technologien sind auch neue Methoden zur Deformations- und Schadensfrüherkennung erforderlich, um bei einer kritischen Veränderung der Materialeigenschaften noch vor einem Versagen Maßnahmen ergreifen zu können. Neue Werkstoffkonzepte, z. B. die Kombination mehrerer Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften im Zusammenhang mit der Wasserstoffkompatibilität, können die Langlebigkeit und Nachhaltigkeit erhöhen, müssen aber noch entwickelt werden.

Neben den Prüfmethoden zur Ermittlung von wasserstoffabhängigen Werkstoffeigenschaften gewinnt auch die Materialinformatik zunehmend an Bedeutung, um neue Materialien und deren Eigenschaften mit Hilfe von Computersimulationen vorherzusagen und damit zu deren Sicherheit und Nachhaltigkeit beizutragen. Ab initio Simulationen erlauben die Berechnung von Materialparametern, ohne auf empirische Annahmen und experimentelle Anpassungen angewiesen zu sein. Schädigungsmechanismen, Werkstoffveränderungen oder die Vorhersage von Lebensdauern von Bauteilen sind möglich, erfordern aber die Entwicklung und Validierung entsprechender Modelle.

Zur Unterstützung von Technologieentwicklungen fehlen vor allem Leitfäden mit praxisnahen Handlungsempfehlungen für die Auswahl geeigneter Materialien in allen Bereichen der H₂-Wertschöpfungskette. Solche Leitfäden können Entwicklungsprozesse bereits in frühen Stadien erheblich vereinfachen bzw. beschleunigen.

Additive Manufacturing:

Die additive Fertigung bietet die Möglichkeit, qualitativ hochwertige und vor allem komplexe Komponenten für Wasserstofftechnologien schneller, effizienter und gegebenenfalls sogar „vor Ort“ herstellen zu können. Doch bislang fehlen zuverlässige Kriterien und Verfahren für die Prüfung und Qualitätssicherung additiv gefertigter Bauteile.

Wissenstransfer:

Bildung und Ausbildung als zentrales Element des Wissenstransfers muss auf allen Ebenen gefördert werden. Mit der Unterstützung und Weiterentwicklung der beruflichen und wissenschaftlichen Aus- und Weiterbildung im Bereich der Wasserstofftechnologien müssen Arbeitende und Betriebe zu einer effizienten und sicheren Handhabung von Wasserstofftechnologien geschult werden. Dies betrifft vor allem die Qualifizierung von Personal zur Produktion, Betrieb und Wartung in Bereichen, in denen Wasserstoff bisher nur eine untergeordnete Rolle gespielt hat. Neben qualifizierten Fachkräften bedarf es auch der Förderung des akademischen Nachwuchses. Dabei sind auch Konzepte zur Kombination von Bildung und Forschung, etwa über Kompetenzzentren von außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Hochschulen, sinnvoll.

Eine weitere wichtige Gruppe, die adressiert werden muss, sind Feuerwehren und Rettungsdienste. Neue Technologien bringen auch andere Gefahren hervor, mit denen Ersthelfer (First Responder) konfrontiert werden und in ihrem Alltag ganz konkret umgehen müssen. Entsprechende Leitfäden für die verschiedenen Technologien der Wertschöpfungskette müssen erarbeitet werden.

■ ERFORDERLICHE NORMUNG FÜR WELTWEITE QUALITÄTSSTANDARDS REALISIEREN

Normen und Standards sind Dokumente, die Anforderungen an Produkte, Dienstleistungen oder Verfahren festlegen. Sie definieren Terminologie, Schnittstellen, Sicherheits-, System- und Qualitätsanforderungen und schaffen somit ein einheitliches Verständnis über Fachgebietsgrenzen hinweg. Technische Regelsetzung unterstützt rechtssicheres Handeln und bildet die Grundlage für belastbare wirtschaftliche Investitionen.

Für die Transformation zu einer dekarbonisierten Wirtschaft ist grüner Wasserstoff als nachhaltiger Energie-

träger, -speicher und Element der Sektorkopplung ein zentraler Baustein. Normen und Standards bilden, zusammen mit den rechtlichen Rahmenbedingungen, das Grundgerüst für den erfolgreichen nationalen, europäischen und internationalen Markthochlauf dieser Wasserstofftechnologien und werden z. B. in der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS), der Europäischen Wasserstoffstrategie, der im Februar 2022 veröffentlichten Normungsstrategie und dem jährlichen Arbeitsprogramm für Normung 2022 der Europäischen Union oder einem Bericht der European Clean Hydrogen Alliance¹ adressiert.

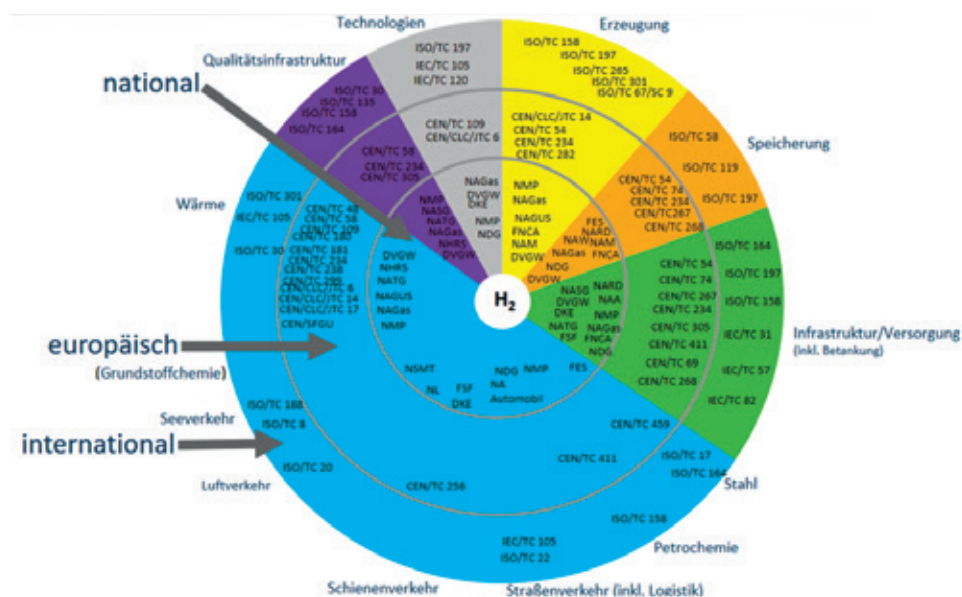
MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Es gibt eine Vielzahl von Normungsgremien auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene für die das Thema Wasserstoff entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Herstellung von Wasserstoff bis hin zur Anwendung in Industrie, Verkehr und Wärmesektor, und den produktübergreifenden Themen wie Qualitätssicherung und Sicherheits-

aspekte, von Relevanz ist. Ebenfalls beschäftigen sich übergeordnete Gremien, wie beispielsweise auf europäischer Ebene die Arbeitsgruppe Wasserstoff des CEN-CENELEC Sektorforums Energiemanagement, das CEN-CENELEC Sektorforum Gas und die neugegründete CEN-CLC Sektorforum Joint Task Force Wasserstoff-Qualitätsanforderungen für die industrielle Nutzung mit der strategischen Umsetzung von Normungsthemen im Bereich Wasserstoff.

Manche dieser Gremien sind traditionell gut im Bereich Wasserstoff aufgestellt, für andere gewinnt dieses Thema rasch massiv an Bedeutung, dementsprechend divers ist die Ausgestaltung des Normenkatalogs je nach Themenfeld. Grundsätzlich liegt der Fokus sehr stark auf der europäischen und internationalen Normungsarbeit, für die die Basis durch die Arbeit in den nationalen Normungsgremien gelegt wird.

Die Komplexität der Abbildung der Wertschöpfungskette von Wasserstoff in der Normung wird in dem folgenden Bild verdeutlicht:



¹ The European Clean Hydrogen Alliance, Reports of the Alliance Roundtables on barriers and mitigation measures, October 2021: https://ec.europa.eu/growth/document/download/5b759bcc-db55-49ad-b0d4-bf0e16255aab_en

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Ein elementarer Punkt ist das schnelle Aufgreifen und die effiziente Überführung der Ergebnisse und Innovationen aus den Forschungstätigkeiten in die Normung. Hierbei ist eine gute Vernetzung der großen Vielzahl an Projekten, Clustern und Initiativen unter dem Gesichtspunkt der Normung zwingend notwendig, da dadurch Doppelarbeit und Redundanzen vermieden und der aktive Wissensaustausch zwischen den Akteuren und Akteurinnen ermöglicht wird. Gleichzeitig ist das die Basis für die gezielte Initiierung von pränormativen Forschungsvorhaben in den Themenfeldern, in denen noch Wissenslücken gegeben sind, um die wissenschaftlichen Grundlagen für die vom Markt benötigten Normen zu erarbeiten.

Erstellung einer nationalen Normungsroadmap:

Durch den forcierten Markthochlauf gewinnt Wasserstoff entlang der gesamten Wertschöpfungskette in kürzester Zeit massiv an Bedeutung. Hierbei ist es essentiell wichtig, dass die Vielzahl von Anwendungsfeldern, Forschungsaktivitäten und einzubindenden Akteure und Akteurinnen unter dem Gesichtspunkt der Normung vernetzt und eine effiziente Verwertung durch die Normung gewährleistet wird. Ein wichtiger Baustein ist das gemeinsame und abgestimmte Vorgehen der nationalen Regelsetzenden zusammen mit allen Stakeholdern der Wasserstoff-Community. Daher ist als Maßnahme die Ausarbeitung einer nationalen Normungsroadmap, in der die Ergebnisse der laufenden Initiativen miteinfließen, konkrete Maßnahmen für die nationale Normungsarbeit formuliert werden und diese schnell und effektiv angestoßen werden, vorzusehen.

Dieses Vorgehen ermöglicht, dass:

- eine starke nationale Normungsgemeinschaft aufgebaut wird, die sich proaktiv im europäischen und internationalen Kontext zum Thema Wasserstoff einbringt und die Normungstätigkeiten in ihrem Sinne vorantreibt;
- eine Strategie zur zielgerichteten Initiierung und Begleitung von Normungsaktivitäten auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene vorliegt;
- Normen und Standards effizient erarbeitet werden, welche auf die Bedürfnisse der deutschen Stakeholder zugeschnitten sind.

Erstellung von Normen zur Zertifizierung von Produkten:

Entlang der gesamten Wertschöpfungskette werden aktuell unter den o. g. Einschränkungen Normen vorbereitet. Dies bedarf

- einer vorgelagerten Erarbeitung von technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die Zertifizierung, Abnahme und Freigabe von Produkten;
- der Berücksichtigung von Methoden zur Risikobewertung;
- der Kombination von Prüfung und Simulation.

Beispiele dafür sind:

- Festlegungen für Behälter und Rohrleitungen zum Transport von Wasserstoff in Gasform oder flüssiger Form und damit verbundene Prüfverfahren
- Festlegungen für Bestandteile von Wasserstoffbetankungseinrichtungen und damit verbundene Prüfverfahren
- Festlegungen für die Leistung und Sicherheit von Geräten zur wärmetechnischen Verwertung von Wasserstoff und deren Bestandteilen und damit verbundene Prüfverfahren
- Prüfverfahren für wasserstoffinduzierte Rissbildung im Stahl
- Prüfverfahren zur Ermüdungsprüfung von wasserstoffbelasteten Bauteilen und Werkstoffen
- Festlegung zum Explosionsschutz von elektrischen und nichtelektrischen Geräten in wasserstoffhaltigen Gemischen
- Festlegung von Mindeststandards von Wasserstoffsensoren in Bezug auf Sensitivität und Querempfindlichkeit

■ AKZEPTANZ BEI VERSCHIEDENEN AKTEUREN FÖRDERN

Für den schnellen Aufbau und die erfolgreiche Nutzung von Wasserstofferzeugungstechnologien sowie die damit verbundene Transport- und Verteilungs-



infrastruktur ist die gesellschaftliche Akzeptanz auf unterschiedlichen Akteursebenen ein wesentlicher Erfolgsfaktor; sie reicht von der lokalen Technikakzeptanz von Anwohnenden gegenüber Elektrolyseuren bis hin zur Nutzungsakzeptanz von Anwendern im Verkehrs- oder Industriesektor.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Die Erfahrungen aus den letzten Jahren im Bereich der Erneuerbaren Energien und dem Stromnetzausbau verdeutlichen, dass nicht nur technische oder ökonomische Fragen für die Verbreitung neuer Technologien eine Rolle spielen, sondern auch Aspekte der gesellschaftlichen Akzeptanz. Dabei sind aus einer ganzheitlichen Akzeptanzforschungsperspektive nicht nur die Proteste von Anwohnenden oder Naturschutzverbänden auf lokaler Ebene relevant, sondern auch die Akzeptanzlagen von Akteursgruppen auf übergeordneter Ebene, welche sich u. a. in gesetzten Ausbauzielen oder Abstandsregelungen widerspiegeln. In der geplanten Wasserstoffgesellschaft wird sehr viel neue Infrastruktur in sehr kurzer Zeit benötigt, dementsprechend bedarf es gesellschaftlicher Akzeptanz nicht nur in Form des Ausbleibens von Protesten wie beim Stromnetzausbau, sondern vielmehr als aktive Unterstützung und Mitwirkung.

Bisherige Akzeptanzstudien adressieren vor allem den Mobilitätsbereich als Anwendungsgebiet von Wasserstofftechnologien. Hierbei stehen insbesondere die Wahrnehmung und Bewertung von Wasserstofftankstellen unter Risikoaspekten sowie Nutzungsbereitschaften hinsichtlich privater oder öffentlicher Fahrzeugnutzungen im Vordergrund. Die Untersuchungen zeigen, dass das Wissen zur Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in der Bevölkerung tendenziell (noch) gering ist und Unsicherheiten in der Einschätzung bestehen, jedoch grundsätzlich ein hohes Interesse an dem Thema vorhanden ist und viele prinzipielle Vorteile dieser Technologie bei den Befragten gesehen werden. Aktuelle Punkte im gesellschaftlichen Akzeptanzdiskurs beschäftigen sich konsistent dazu vor allem mit den Fragen, in welchen Bereichen Wasserstoff eingesetzt werden soll (Verkehr, Industrie, Wärme) bzw. wie die Allokation innerhalb der Sektoren gestaltet wird (z. B. Verkehr z. B. Luft- und Schifffahrt oder straßengebundener Mobilität). Weitere Fragen betreffen generell die mit einer Wasserstoffnutzung verbundenen Vor- und Nachteile (u. a. Umweltwirkungen, Kosten), verfügbare Mengen im Rahmen

verschiedener Zeithorizonte sowie verfügbare Infrastruktur, mögliche Alternativen, Konsequenzen für den Ausbau Erneuerbarer Energien und weitere. Bei allen diesen Punkten zeigen sich akzeptanzrelevante Diskurse, die durch forschungsbasierte Erkenntnisse fundiert werden müssen (vgl. Forschungsfelder Wissenstransfer bzw. Kommunikationsstrategien).

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Genereller Wissenstransfer und gesellschaftlicher Dialog zum Thema Wasserstoff in der Energiewende:

Für den weiteren gesellschaftlichen Diskurs und fundierte Meinungsbildungsprozesse in der Gesellschaft ist ein Transfer aktueller Forschungsergebnisse in die Öffentlichkeit notwendig. Die mögliche Rolle von Wasserstoff in der Energie- und Verkehrswende muss verständlich kommuniziert und der gesellschaftliche Diskurs zum Einsatz, Import und Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft geöffnet werden. In diesem Zusammenhang muss gerade für die Fragen des grünen Wasserstoffs die Verbindung zum verstärkten Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland und den damit einhergehenden Diskussionen vor Ort gezogen werden. Hier sollte zudem eine Transferforschung bezogen auf die bisherigen sozialwissenschaftlichen Ergebnisse und Erfahrungen innerhalb der Energie- und Verkehrswende sowie systemischen Innovationsforschung erfolgen und entsprechende Erkenntnisse auf die zukünftige Wasserstoffnutzung übertragen werden.

Kommunikationsstrategien in der Risikobewertung:

Neben der allgemeinen Wissenschaftskommunikation zum Thema Wasserstoff weisen risikobezogene Kommunikationsstrategien eine spezifische Relevanz auf. Die Erfahrungen zeigen, dass oftmals negative, medial relevante Einzelfälle im Zusammenhang mit Wasserstoff eine besondere Reichweite und Bedeutung erlangen, wobei Unterschiede in der Experten-Laien-Wahrnehmung hinsichtlich des Risikos eine Rolle spielen. Hier sollten Strategien entwickelt werden, welche Informationen für die Zivilgesellschaft adäquat aufbereiten und ein allgemeines Sicherheitsverständnis unterstützen. Die Kommunikationsstrategien sollten unterschiedliche Formate Visualisierungen oder die (partizipative) Erstellung von Risikomodellen für die Einführung von Wasserstoffinfrastrukturen beinhalten.

Gerechtigkeit als zentrales Akzeptanzkriterium:

Für gesellschaftliche Akzeptanzfragen ist die Gerechtigkeitsempfindung eine zentrale Größe. In diesem

Zusammenhang spielen Beteiligungsstrategien bei Planungs- und Genehmigungsverfahren eine wichtige Rolle, welche sich positiv auf die prozedurale Gerechtigkeit auswirken können. Die Ebene der Verteilungsgerechtigkeit adressiert die fairen Teilhabeoptionen sowohl an Wertschöpfungseffekten als auch der Verteilung der lokalen Belastungen von Wasserstoffinfrastrukturen, welche unter anderem über Bürgerenergieansätze erreicht werden können. Hier bestehen weitreichende Erfahrungen aus dem Bereich Erneuerbarer Energien und Netzausbau, welche auf Wasserstoffinfrastrukturen übertragen und angepasst werden sollten. Neben der bundesdeutschen Situation sollte für eine an den globalen Nachhaltigkeitszielen orientierte Gerechtigkeitsbewertung auch die internationale Perspektive berücksichtigt werden, hier sind vor allem mit dem Wasserstoff-Imports verbundene ökologische und geo-politische Fragen in den Partnerländern zu beachten. Dabei sollten Akzeptanzfragen vor Ort adressiert, Teilhabemöglichkeiten der lokalen Bevölkerung geschaffen und die jeweiligen eigenen nationalen Energiewenden unterstützt werden.

Zielgruppenspezifische Akzeptanzforschung:

Die bisherigen Ergebnisse aus der Akzeptanzforschung zeigen, dass neben allgemeinen Faktoren auch aktorsgruppenspezifische Akzeptanzlagen existieren, die oftmals aber noch nicht im Fokus der Forschung stehen. Beispielhaft sei hier die Gruppe der Jugendlichen und jungen Erwachsenen genannt, die im Sinne der intergenerationalen Gerechtigkeit stärker in Entscheidungsprozesse wie auch Forschungskontexte einbezogen werden sollten, da sie die Auswirkungen der aktuellen Entscheidungen zu tragen haben. Weitere zielgruppenspezifische Akzeptanzlagen können beispielsweise in einem besonderen regionalen Kontext wie in Strukturwandel- oder Grenzregionen sowie hinsichtlich spezifischer Nutzergruppen im Verkehrs- oder Industriesektor betrachtet werden.

Konzepte zur Aus- und Fortbildung von Fachkräften:

Auf Ebene der Marktakzeptanz ist die Erarbeitung von Bildungsstrategien essentiell, welche Kompetenzen für das gesamte Spektrum der Wasserstoff-Wertschöpfungskette, aber auch spezifische Aspekte wie Qualitäts- und Sicherheitsstandards, abdecken. Dadurch wird gewährleistet, dass entsprechende Fachkräfte vorhanden sind und die verschiedenen Nutzungsansprüche insbesondere bei einem schnellen Markthochlauf erfüllen können.

■ GEEIGNETE RAHMENBEDINGUNGEN SCHAFFEN FÜR DIE GESCHÄFTSMODELLE DER ZUKUNFT

Damit die Transformation privatwirtschaftlich mitgetragen wird und die für den Markthochlauf von Wasserstoff notwendigen Investitionen getätigt werden, muss ein geeigneter Rahmen geschaffen werden, der es erlaubt, dass Geschäftsmodelle rund um Wasserstoff entstehen können.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Mit Blick auf aktuelle Szenarienstudien² sind für die Erreichung von Klimaschutzziele die Produktion und der Einsatz von Wasserstoff in weitaus größeren Mengen als bisher notwendig. Um nachhaltige Technologien rund um den Wasserstoff schnell zur Anwendung zu bringen, bedarf es eines verlässlichen regulatorischen Rahmens, der privatwirtschaftliche Investitionen anstößt, das innovative Potenzial der Wirtschaft nutzt und Hürden des technologischen Wandels beseitigt. Im Kontext von Wasserstoff ist ein solcher Rahmen noch nicht vorhanden und die Regulierung u. a. im Hinblick auf die Anerkennung von grünem Wasserstoff und dessen Zertifizierung noch nicht ausgestaltet. Außerdem fehlt es noch an einer ausreichenden Wasserstoffinfrastruktur, insbesondere einem Transportnetz, das die großskalige Anwendung erst ermöglicht. Durch gezielte ökonomische Anreizmechanismen und Förderinstrumente, die langfristige Investitionssicherheit bieten, können Schwierigkeiten beim Markthochlauf von Wasserstoff abgebaut werden. Ein Gestaltungsrahmen für den Wasserstoffmarkt muss auf einer soliden Wissensbasis aufsetzen, die durch Forschung, aber auch Umsetzungsprojekte stetig erweitert werden muss. Erst im Wissen um verlässliche regulatorische Rahmenbedingungen werden Geschäftsmodelle entwickelt und umgesetzt werden.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Die im folgenden aufgeführten Forschungsfelder enthalten Aspekte der Geschäftsmodelle und Markteinführung. Zudem werden Punkte in Bezug auf mögliche geopolitische Effekte adressiert.

² Ariadne-Kurzdossier – Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie (2021): <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfahigen-wasserstoffstrategie/>



Erarbeitung von Szenarienwelten:

Die Erarbeitung konsistenter Szenarienwelten bildet die Grundlage, um die Rolle von Wasserstoff im Energiesystem zu erörtern. Durch sie kann die Bandbreite möglicher Wasserstoffbedarfe aufgezeigt werden. Im Zusammenspiel mit der Energiesystemanalyse werden anschließend die Wechselwirkungen zwischen Wasserstoffnutzung und -bereitstellung im Energiesystem untersucht. Das so entstehende Orientierungswissen dient als Basis für Anpassungen des regulatorischen Rahmens. Damit auch technische Entwicklungen sowie geänderte politische Rahmenbedingungen in diesen Prozess einfließen können, bedarf es einer stetigen Aktualisierung der Szenarienwelten. Der so entstehende zyklische Prozess gewährleistet eine kontinuierliche Begleitung der Integration von Wasserstoff in das Energiesystem.

Erarbeitung eines Marktdesigns:

Wie der zukünftige Markt für Wasserstoff aussehen wird, ist noch weitgehend unklar. Zur Orientierung hilft die Erstellung konkreter Zielbilder. Aus dem Abgleich von Szenarienwelten und Zielvorstellungen muss der notwendige Anpassungs- und Regulierungsbedarf abgeleitet werden. Im Idealfall gelingt es, die Marktprozesse so zu gestalten, dass die Ziele des Markthochlaufs von Wasserstoff erreicht und Schwierigkeiten und Hürden bereits im Vorfeld abgebaut werden. Handlungsfelder des Marktdesigns, die es zu untersuchen gilt, sind unter anderem die Netzregulierung und die Internalisierung externer Effekte, insbesondere die Bepreisung von Klimawirkungen. Damit sich Geschäftsmodelle rund um den Wasserstoff schnell am Markt etablieren, bedarf es zudem geeigneter Anreizinstrumente. Darüber hinaus können im Hinblick auf die Sektorkopplung unterstützende Maßnahmen zur Koordination der Marktakteure sinnvoll sein. Diese Instrumente und Maßnahmen gilt es fortwährend zu analysieren, um ihr Potenzial abschätzen zu können.

Analyse zu Anreizsystemen:

Anreizsysteme sollen der noch am Anfang stehenden Wasserstofftechnologie zum Durchbruch verhelfen und die Transformation zu einer nachhaltigen Wirtschaft beschleunigen. Welche Anreizsysteme für den Markthochlauf von Wasserstoff besonders förderlich sind, muss analysiert werden. Allgemein werden regulatorische, marktbasierende, informatorische Instrumente und Förderinstrumente unterschieden. Zu den diskutierten Instrumenten im Wasserstoffkontext zählen insbesondere Maßnahmen wie eine CO₂-Be-

preisung, Maßnahmen der Forschungsförderung, Quotenregelungen und Carbon Contracts for Difference (CCfD). Bei der Beurteilung der Vorteilhaftigkeit sollten nicht nur Kriterien wie die Kosteneffizienz und das transformative Potential eine Rolle spielen, sondern auch weitergehende Aspekte wie etwa die gesellschaftliche Akzeptanz und die Möglichkeit der Realisierung von positiven Nebeneffekten ("Co-Benefits") berücksichtigt werden.

Innovationsforschung und Transfer in der Wertschöpfungskette von Wasserstoff:

Bis Wasserstoff in großem Umfang als Energieträger genutzt wird, sind noch viele Herausforderungen zu bewältigen. Weitere technische Verbesserungen und Effizienzgewinne sind erforderlich, damit nachhaltig hergestellter Wasserstoff im Vergleich zu anderen Energieträgern konkurrenzfähig wird. Aus der Innovationsforschung können wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, welche Faktoren technischen Fortschritt im Energiesektor begünstigen und wie die Innovationskraft der Wirtschaft angeregt werden kann. So kann etwa ein intensiverer Wissenstransfer entlang der Wertschöpfungskette für Wasserstoff, wie es z. B. mit der Einrichtung von Reallaboren der Energiewende intendiert ist, die Ausbreitung von Innovationen befördern. Auf der anderen Seite erschweren Pfadabhängigkeiten häufig den Markteintritt von Innovationen. Damit die Ausbreitung von Innovationen gewährleistet wird und Hürden überwunden werden können, muss Innovationsforschung ein Raum geboten werden, der es zulässt, neue Ansätze wirtschaftlich darstellbar zu erproben.

Identifikation von Marktnischen:

Wasserstoff hat das Potenzial, die Energiemärkte grundlegend zu verändern. Ob es Unternehmen gelingt, sich unter den neuen Rahmenbedingungen am Markt zu behaupten, hängt auch davon ab, ob Unternehmen frühzeitig neue Geschäftsfelder rund um den Wasserstoff entdecken und mit innovativen Produkten Marktnischen zu besetzen. Ein geeigneter regulatorischer Rahmen setzt frühzeitig Signale, um diese Veränderungsprozesse anzustoßen. Um ungenutzte Nachfragepotenziale zu identifizieren, muss auf Instrumente der Marktbeobachtung, der Marktanalyse und der Marktforschung zurückgegriffen werden. Im Idealfall geht von einer Intensivierung der Aktivitäten in diesem Bereich auch eine Dynamik für den Markthochlauf von Wasserstoff aus.

Untersuchung früherer energiewirtschaftlicher Maßnahmen:

In der Vergangenheit wurde bereits bewiesen, dass Innovationen mit einem geeigneten regulatorischen Rahmen gefördert und zur Wirtschaftlichkeit gebracht werden können. So wurde mit dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz der Grundstein für einen weltweiten Ausbau von Erneuerbaren Energien gelegt. Im Bereich Wasserstoff sollen vergangene energiewirtschaftliche Maßnahmen in einem neuen Kontext analysiert und ihre Eignung für eine Markteinführung geprüft werden. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf bestehenden Hürden und Herausforderungen, damit man geeignete Instrumente findet, um Geschäftsmodelle entstehen zu lassen.

Mehrwert der Produktion von Wasserstoff:

Für Wasserstoff sind vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im Energiesystem der Zukunft denkbar. Bereits heute ist absehbar, dass das Potenzial von Wasserstoff über Anwendungen in der Industrie und im Mobilitätssektor hinausgeht. Eine weitere Möglichkeit ist, Wasserstoff als Speicher für Strom aus volatilen Erneuerbaren Energiequellen und zur Entlastung des Stromnetzes an kritischen Punkten einzusetzen. Die bei der Elektrolyse entstehende Abwärme kann zudem Nahwärmenetzen zugeführt werden. Entsprechende zusätzliche Mehrwerte gilt es weiter zu identifizieren und zu implementieren. In aktuellen Forschungsprojekten werden zudem moderne Speichertechnologien für den Wasserstoff in der Praxis erprobt. So fungiert die Wasserstoff-Modell-Region Mitteldeutschland als Forschungsplattform für die Speicherung von „grünem“ Wasserstoff in Salzkavernen. Weiterer Forschungsbedarf besteht vor allem im Hinblick auf die Frage, wie mithilfe von Wasserstoff die Erneuerbaren Energien optimal in das Energiesystem integriert werden können. Hier kann eine stärkere Verknüpfung der Marktmodelle für Strom und Gas im Rahmen der Energiesystemanalyse wertvolle Einsichten liefern. Aus ökonomischer Perspektive ist zu überlegen, wie der Aufbau von Elektrolysekapazität an besonders netzdienlichen Standorten über Anreize aktiv gefördert werden kann.

Untersuchung von Kostenentwicklungen:

Um abschätzen zu können, wann nachhaltig produzierter Wasserstoff wettbewerbsfähig sein wird, ist eine Analyse der zukünftigen Kostenentwicklung von zentraler Bedeutung. Prognosen bezüglich der Gestehungskosten von Wasserstoff sind mit großer Unsicherheit behaftet und hängen von verschiedenen

technischen und ökonomischen Faktoren ab, nicht zuletzt von den regulatorischen Rahmenbedingungen, wie etwa den Abgaben, Umlagen und Steuern auf Strom, Erdgas und andere Energieträger. Neben den Stromkosten spielen auch die Investitionskosten für Elektrolyseure, die Umwandlungseffizienz und die Auslastung der Produktionsanlagen eine wichtige Rolle. Zudem sind Kostenschätzungen auch im Zusammenhang mit dem Import von Wasserstoff relevant, wenn unterschiedliche Transportvarianten verglichen oder mögliche Importländer für „grünen“ Wasserstoff ausgewählt werden. Die existierenden Unsicherheiten bei der Berechnung von Bereitstellungskosten müssen tiefer analysiert und ihre Sensitivitäten quantifiziert werden.

Analyse der Zahlungsbereitschaft für grüne Produkte:

Die Zahlungsbereitschaft beschreibt allgemein den Preis, den ein Konsument maximal bereit ist, für eine Einheit eines Gutes oder einer Dienstleistung zu zahlen. Sie kann als Maß für den Wert betrachtet werden, den ein Konsument einem Gut beimisst. Eine wichtige Frage im Zusammenhang mit Wasserstoff ist, inwiefern eine höhere Zahlungsbereitschaft für „grünen“ Wasserstoff im Vergleich zu Konkurrenzprodukten angenommen werden kann. Eine höhere Zahlungsbereitschaft würde implizieren, dass sich nachhaltige Geschäftsmodelle leichter am Markt etablieren können. Studien für andere Märkte, auf denen „grüne“ mit weniger nachhaltigen Produkten konkurrieren, legen allerdings nahe, dass die Zahlungsbereitschaft von Konsumenten für Nachhaltigkeit eher gering ausfällt. Studien, die hypothetische Entscheidungen betrachten, sind für die Untersuchung nur bedingt geeignet, da diese die Zahlungsbereitschaft häufig überschätzen. Hier muss eine verlässliche Datenbasis erstellt werden, damit dahingehend Geschäftsmodelle ausgelegt werden können.

Policy-Analysen der EU-Staaten:

In den EU-Staaten spielt der Einsatz von Wasserstoff in der Transformation der Energiesysteme eine entscheidende Rolle und stellt zugleich eine soziotechnische Herausforderung dar, die durch nationale Pfadabhängigkeiten in der Energie-, Wirtschafts- und Industriepolitik geprägt wird. Diese länderspezifischen Rahmenbedingungen bedingen wiederum eine Vielzahl unterschiedlicher Wege und sektoraler Prioritäten bei der Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft. So zeichnen sich mit Blick auf die jeweilige Versorgungsquelle sowie die politischen Instrumente, die zur Diffusion der Technologie und Förderung der Akzeptanz



eingesetzt werden, unterschiedliche Schwerpunkte und Entwicklungskorridore ab. Da angenommen werden kann, dass sich aufgrund der nationalen Besonderheiten die Wasserstoffstrategien in den EU-Ländern hinsichtlich ihres Umfangs, ihrer Ausgereiftheit oder ihres Anspruchsniveaus unterscheiden, liegt ein Forschungsfokus auf der Untersuchung des Status Quo der Politikgestaltung im Hinblick auf die Einführung einer Wasserstoffinfrastruktur und -wirtschaft im europäischen Vergleich. Bei den nationalen Wasserstoffstrategien handelt es sich um komplexe Investitionspläne für Energie sowie technologische Forschung und Entwicklung. Zugleich werden insbesondere langfristige Fragen der nationalen Wettbewerbsfähigkeit und Marktdominanz aufgeworfen. Grundsätzlich muss betrachtet werden, ob sich in Europa eine kooperative oder eine kompetitive Form der Wasserstoffpolitik herausbildet. Mit Blick auf die Definition von Standards und Zertifizierungsverfahren zur Vereinheitlichung auf EU-Ebene gilt es, die zentralen Positionen in den EU-Staaten und Unterschiede zu identifizieren, um ihre Auswirkungen zu bewerten und sich daraus ergebende Herausforderungen und Grundsatzoptionen, denen sich Entscheidungsbefugte auf der EU-Ebene gegenübersehen, abzuwägen. Von Interesse ist dabei auch, inwieweit nationale und EU-weite Wasserstoffstrategien in der Lage sind, miteinander zu interagieren und voneinander zu lernen. Im Zusammenhang mit den nationalen Wasserstoffstrategien gilt es herauszuarbeiten, welche gemeinsamen Standards und Regulierungen identifiziert werden können, um sie unter dem Dach der EU-Wasserstoffstrategie zu harmonisieren. Des Weiteren wird als wichtig erachtet, frühzeitig Asymmetrien in Bezug auf die unterschiedliche Bedeutung der EU-Ebene sowie der nationalen Unternehmen und Forschungsnetze zu identifizieren.

Analyse von Importstrategien:

Importstrategien ermöglichen es, über den Aufbau und die Absicherung neuer Energiehandelsströme sowie die Ausgestaltung neuer Import-Exportländer-Koalitionen das Thema Energiesicherheit nicht nur technologisch, sondern auch geopolitisch neu zu rahmen. Mit Blick auf die Entstehung des globalen Wasserstoffmarktes wird geprüft, inwieweit energiereiche Länder bspw. ihre Produktionsprozesse diversifizieren und optimieren. Dies könnte wiederum mit einer Steigerung ihrer Wettbewerbsfähigkeit einhergehen, was eine Analyse der Folgewirkungen auf die europäischen und bundesdeutschen Produktionszusammenhänge unerlässlich macht.

Schließlich besteht das Potenzial, dass emissionsreiche und aber auch generell die Erzeugung von industriellen (Vor-)Produkten in sonnen- und windreiche Länder verlagert werden könnten. Entsprechend ist zu prüfen, inwieweit die Neugestaltung der globalen Energiewirtschaft dazu führen wird, dass neue Lieferketten entstehen und einzelne EU-Länder Produktionsschritte oder gesamte Produktionscluster in andere Länder verlagern. Für die Bundesrepublik bieten die Energiepartnerschaften die Möglichkeit, nicht nur verlässliche Importquellen für Wasserstoff zu sichern, sondern auch international die Position Deutschlands im Bereich der Elektrolysetechnologien zu stärken. Insbesondere vor dem Hintergrund aktueller geopolitischer Konflikte zwischen liberal-demokratischen und staatskapitalistisch-autoritären Systemen, wird bei der Analyse der Importstrategien ein besonderes Augenmerk auf technopolitische und geoökonomische Einflussphären und entsprechend Technologieführerschaft, sowie den Wettbewerb um Rohstoffe, gesamtindustrielle Erzeugungs- und Produktionsprozesse sowie deren Wertschöpfung gerichtet. Dabei spielen Forschung und Entwicklung, aber auch Logistikketten und Produktionsnetzwerke im Sinne langfristiger Import-Export-Koalitionen eine zentrale Rolle.

Analyse der Rolle der EU:

Die aktuelle Rolle der EU besteht vor allem darin, den sich entwickelnden Wasserstoffsektor zu unterstützen, zu finanzieren und zu fördern. Ein zentraler Fokus richtet sich auf die Investitionsförderung im Rahmen des europäischen "Green Deal". Die strukturellen Unterschiede zwischen den EU-Ländern bieten Potenziale für eine europäische Arbeitsteilung in einem gemeinsamen Wasserstoffnetz. Von Bedeutung ist dabei sowohl die Produktion als auch die Speicherung und Nutzung von Wasserstoff. Nationale Wasserstoffstrategien ebenso wie bilateral zwischen Ländern aufgesetzte Energiepartnerschaften bergen jedoch die Gefahr, dass marktkonzentrierte und integrierte Zweistaaten-Koalitionen oder regionale Wasserstoffenergieregulungen entstehen. Diese könnten zu einem Machtungleichgewicht und einer Verzerrung des Energiemarktes führen und einzelnen Ländern und Unternehmen zu einer führenden Position bei der Wasserstofftechnologie und in der Wasserstoffwirtschaft verhelfen. Analysiert werden muss dabei, welche Treiber und Hindernisse Einfluss auf eine Führungsrolle der EU im Rahmen der gesamteuropäischen, aber auch in einer globalen Wasserstoffwirtschaft nehmen. Zentral ist dabei das Themenfeld Zertifizierung. Denn über technische

Normen und (Nachhaltigkeits-)Standards werden Leitmärkte und Technologiepfade definiert sowie Geschäftsmodelle und Chancen bzw. Markteintrittsbarrieren für Partnerländer vorgeprägt.

■ NACHHALTIGKEIT ALS GRUNDVORAUSSETZUNG FÜR DIE WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

Nachhaltigkeit gilt als Treiber und damit auch wesentlicher Grundpfeiler für den Hochlauf von Wasserstoff. Nicht zuletzt deswegen gilt es sie als integralen Bestandteil aller weiteren Analysen zu etablieren.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

In der Deklaration über Umwelt und Entwicklung wurde bereits 1992 das Ziel einer Nachhaltigen Entwicklung völkerrechtlich bindend festgelegt. Um eine Nachhaltige Entwicklung zu erreichen, hat die Völkergemeinschaft 17 konkrete Ziele benannt, die 2015 in Paris beschlossen wurden. Ziel #7 fordert den Zugang zu sauberer und bezahlbarer Energie für alle. Wasserstoff als wichtiger Energieträger kann prinzipiell mithilfe regenerativer Energien erzeugt und in unterschiedlichen Sektoren verwendet werden. Er ist damit eine wichtige Komponente, um dieses Ziel zu erreichen.

Allerdings ist Wasserstoff nicht von sich aus nachhaltig und umweltfreundlich. Wasserstoff kann entlang unterschiedlicher Pfade erzeugt werden, die sich in ihren Umweltauswirkungen massiv unterscheiden. Nur wenn Erzeugung, Verteilung und Nutzung nachhaltig gestaltet werden, leistet eine Wasserstoffwirtschaft einen Beitrag zu einer Nachhaltigen Entwicklung. Nachhaltigkeit im Sinne der Deklarationen der Vereinten Nationen (engl. United Nations - UN) bedeutet dabei, dass Umweltauswirkungen minimiert und die gerechte Beteiligung aller gesellschaftlich relevanten Gruppen an der Problemlösung ermöglicht werden muss. Daher ist es notwendig, die Nachhaltigkeit bereits während der Technologieentwicklung kontinuierlich sicherzustellen.

Wissenschaftlich etablierte Methoden zur Nachhaltigkeitsbewertung wie Lebenszyklusanalysen wurden bereits auf einige etablierte technische Verfahren, insbesondere im Hinblick auf die Wasserstofferzeugung, angewendet. Allerdings fehlen umfassende Studien, die diese Methoden für die Bewertung neuer Technologieentwicklungen oder zur Systemoptimierung in der Entwicklungsphase anwenden. Auch systematische,

vergleichende Bewertungen von alternativen Erzeugungspfaden und deren Systemintegration fehlen vielfach.

FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

In welcher Form Nachhaltigkeit kurz- und mittelfristig in der Forschung in Bezug auf Wasserstoff adressiert werden muss, wird im Folgenden näher erläutert.

Nachhaltigkeitskriterien für Wasserstoff:

Es besteht Forschungsbedarf im Bereich der Zertifizierung von Wasserstoff als nachhaltiger Energieträger: Zwar sind aktuell eine Vielzahl an Regularien und Initiativen in der Entwicklung, die Kriterien für nachhaltigen Wasserstoff definieren. Es fehlt jedoch ein einheitliches Framework, das eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Wasserstofferzeugungspfade sowohl hinsichtlich ökologischer als auch sozialer und ökonomischer Bewertungskriterien erlaubt. Ein solcher Rahmen fehlt auch für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Speicherung, Transport und Nutzung.

Mit den methodischen Ansätzen der Lebenszyklusanalyse existiert bereits ein wissenschaftlich fundierter Methodenkasten, der die Basis für die Entwicklung eines einheitlichen Bewertungsrahmens bieten kann. Forschungsbedarf besteht unter anderem im Hinblick auf die Frage, welche Umweltwirkungen über die Klimawirkung hinaus zu berücksichtigen sind und wie soziale Aspekte in Nachhaltigkeitsanalysen der Wasserstoffbereitstellung zukünftig berücksichtigt werden sollen. Letzteres ist gerade vor dem Hintergrund der Diskussion von internationalen Produktionsstätten eine relevante Fragestellung. Zudem ist die Fragestellung zu beantworten, welche Grenzwerte Wasserstoff einhalten muss, um als nachhaltig zu gelten, und wie sich diese Kriterien im Zeitverlauf verändern. Darüber hinaus besteht Bedarf beim Aufbau einer transparenten, öffentlich zugänglichen Datenbasis sowie an nutzerfreundlichen Tools, die eine transparente und vergleichbare Bewertung für unterschiedliche Nutzergruppen erlaubt.

Neben der Verwendung wissenschaftlich fundierter Methoden bedarf die Bewertung der Nachhaltigkeit von Wasserstoff auch einer Einbindung betroffener Stakeholder im Rahmen partizipativer Prozesse, um relevante Fragestellungen im Kontext einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft frühzeitig und demokratisch im



Sinne einer transdisziplinären Forschung zu identifizieren. Hierzu ist es notwendig funktionsfähige Dialog- und Interaktionsformate zwischen Wissenschaft und Akteuren aus Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft zu erproben und so zu einer nachhaltigen Transformation der Energiewirtschaft beizutragen.

Vor diesem Hintergrund sollten aktuelle Forschungsaktivitäten im Bereich Nachhaltigkeit von Wasserstoff in einem übergeordneten Forschungsvorhaben gebündelt werden. Ziel könnte die Vernetzung relevanter Stakeholder, die Zusammenführung aktueller wissenschaftlicher Ansätze, der Aufbau einer Datenbasis und die Entwicklung eines einheitlichen Rahmens zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Wasserstoff als Basis für Regularien und Zertifizierungen sein.

Lebenszyklusanalysen zur Bewertung der Nachhaltigkeit:

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Wasserstoff ist eine Bewertung über den gesamten Lebenszyklus notwendig, da in Abhängigkeit der Bereitstellungsrouten ein signifikanter Anteil der Umweltwirkungen auch in den vor- und nachgelagerten Prozessschritten entsteht. So ist für Wasserstoff aus Elektrolyse beispielsweise die Strombereitstellung der Hauptemissionstreiber und für Wasserstoff aus Dampfreformierung tragen die flüchtigen Methan-Emissionen in der Vorkette der Erdgasbereitstellung einen signifikanten Anteil zur Klimawirkung bei.

Zwar wurden bereits einige Lebenszyklusanalysen im Bereich Wasserstoff durchgeführt, diese haben aber unterschiedliche Schwerpunkte und sind nur in einzelnen Forschungsprojekten verordnet. Es mangelt somit an der systematischen Integration dieser Methoden in alle wasserstoffbezogenen Forschungsaktivitäten. Eine solche Verankerung von Lebenszyklusmethoden in den Forschungsvorhaben stellt einen wichtigen Schritt zur Sicherstellung der Nachhaltigkeit von zukünftigen Wasserstoffprozessketten dar. Zudem kann hiermit die Grundlage für eine umfassende Datenbasis zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Wasserstofftechnologien geschaffen werden.

Die Bewertung der Nachhaltigkeit muss alle drei Dimensionen berücksichtigen. Der Methodenkasten der Lebenszyklusanalyse bietet hierfür ein geeignetes Framework. Mit der Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment – LCA) besteht eine etablierte Methodik zur Bewertung der Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen über ihren gesamten

Lebenszyklus, die in den ISO-Normen 14040 und 14044 definiert ist. Zur Adressierung der ökonomischen und sozialen Dimensionen kann zudem auf die Lebenszykluskostenanalyse (engl. Life Cycle Costings – LCC) und das „social Life Cycle Assessment“ (sLCA) zurückgegriffen werden. Auch wenn es sich hierbei um etablierte Methoden handelt, gibt es insbesondere im Bereich der sLCA und der LCC noch erhebliche offene methodische Fragen.

Ökologische Bewertung:

In Bezug auf die ökologische Bewertung besteht Bedarf an einem einheitlichen und transparenten Vergleich aller Wasserstoffpfade hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen, z. B. mithilfe der LCA-Methodik. Da die direkte Vergleichbarkeit von LCAs mit unterschiedlichem Ziel und Untersuchungsrahmen nicht gegeben ist, muss dieser Vergleich auf Basis von einheitlichen methodischen Annahmen und Datensätzen erfolgen. Dabei sind noch Forschungslücken zu schließen, insbesondere in Bezug auf eine Vereinheitlichung des Bewertungsrahmens, die Datenverfügbarkeit sowie die Berücksichtigung weiterer Umweltwirkungen neben Klimawandel. Methodisch besteht zudem weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Bewertung zukünftiger Entwicklungen (prospektive LCA), der Abbildung von Wasserverbrauch und Metallbedarf, sowie der Berücksichtigung indirekter Umwelteffekte während der Nutzungsphase, z. B. im Flugverkehr.

Untersuchung ökonomischer Nachhaltigkeit:

Mithilfe der LCC-Methodik kann die ökonomische Nachhaltigkeit von Wasserstoff bewertet werden, indem die relevanten Kostenbestandteile über den gesamten Lebenszyklus erfasst werden. Methodisch herrscht weiterer Entwicklungsbedarf insbesondere in Bezug auf die Allokation der Kosten auf die verschiedenen Akteure der Wertschöpfungskette. In diesem Kontext ist eine Gegenüberstellung der Kosten der jeweiligen Akteure mit den Kosten aus systemischer Perspektive von Interesse, um etwaige Diskrepanzen zwischen betriebswirtschaftlichen Anreizen und volkswirtschaftlich effizienten Lösungen aufzuzeigen. Vor diesem Hintergrund ist auch die Integration von Ansätzen zur Quantifizierung externer Kosten, die nicht direkt durch die Akteure getragen werden, zu berücksichtigen (z. B. gesellschaftliche Kosten durch Umweltschäden).

Weiterentwicklung der Bewertung sozialer Kriterien:

Insbesondere in Bezug auf die Berücksichtigung sozialer Kriterien in der Nachhaltigkeitsbewertung von Wasserstoff herrscht weiterer Forschungsbedarf, da die Methodik sowie die Datenbasis sich noch in der Entwicklung befinden. Mit der sLCA gibt es bereits einen Ansatz zur Bewertung sozialer Aspekte über den gesamten Lebenszyklus, jedoch ist eine Weiterentwicklung der Bewertungskriterien sowie die Schaffung einer einheitlichen und transparenten Datenbasis anzustreben. Da die Verfügbarkeit von verlässlichen Daten in diesem Bereich eine besondere Herausforderung darstellt, gilt es zu prüfen, inwiefern bestehende Datensätze z. B. aus der Nachhaltigkeitsberichterstattung sowie volkswirtschaftlichen Statistiken eingebunden werden können.

Datenverfügbarkeit als entscheidende Grundlage:

Es wird deutlich, dass für eine transparente und vergleichbare Bewertung der Nachhaltigkeit verschiedener Wasserstoffpfade neben der Methodik vor allem die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Daten entscheidend ist. Ein möglicher Ansatz ist der Aufbau einer offenen Datenbank, auf die alle relevanten Akteure der Wasserstoffwirtschaft zugreifen können. Dabei sind Anforderungen wie Datenqualität, transparente Dokumentation und Vergleichbarkeit der zugrundeliegenden Annahmen zu beachten. Gleichzeitig muss eine solche Datenbank das Bedürfnis der Akteure auf Schutz des geistigen Eigentums aller gewährleisten.

■ PROJEKTFORMATE NACH DEM VORBILD DER REAL-LABORE DER ENERGIEWENDE

In Bezug auf die zukünftige Forschungsförderung stellt sich auch die Frage nach möglichen Projektformaten, die hilfreich sein können, die gesetzten Ziele zu erreichen. Die Reallabore der Energiewende können hier als Blaupause für zukünftige Formate dienen.

MOTIVATION & AUSGANGSLAGE

Wenngleich Wasserstoff bereits heute genutzt wird, ist abzusehen, dass er in den kommenden Jahrzehnten weitere Anwendungsfelder erschließen wird. In Bezug auf diese Anwendungsfelder wurde in der Vergangenheit bereits viel grundlegende Forschung betrieben, sodass es zum heutigen Zeitpunkt eine zunehmend wichtigere Aufgabe ist, diese Erkenntnisse in die Praxis zu tragen. Dabei gilt es einerseits die Technologien aus

dem Labor heraus in die großskalige Anwendung zu bringen und dabei das Ziel der nachhaltigen Markteinführung im Auge zu behalten. Andererseits müssen in diesem Zuge Fachkräfte in allen Bereichen ausgebildet und geschult werden, damit auch zeitnah Wasserstoff zum Einsatz kommen und somit einen positiven Beitrag zur Energiewende leisten kann.



FORSCHUNGSFELDER & -INHALTE

Die anzustrebende Ausgestaltung der Forschungsformate teilt sich in sechs Felder ein, die auf die Zielbilder des übergeordneten Austauschs, des gesellschaftlichen Mehrwerts sowie der Nachhaltigkeit eingehen. Im Folgenden werden diese nun näher beschrieben.

Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette:

In den Reallaboren der Energiewende mit Fokus auf Wasserstoff und Sektorkopplung werden meist Projekte gefördert, die die gesamte Wertschöpfungskette des Wasserstoffs abbilden. So werden von der Erzeugung über Speicherung und Transport bis hin zur Anwendung Technologien untersucht. Oftmals wird das zudem flankiert von systemischen Analysen wie z. B. Ökobilanzen, Energiesystemanalysen oder regulatorischen Untersuchungen. Ganzheitliche Ansätze wie diese ermöglichen es, gegenseitige Rückwirkungen leichter erkennbar zu machen und möglichen entstehenden Hürden proaktiv zu begegnen. Auch zukünftige Projektformate sollen einen gesamtheitlichen Blick auf das Thema bieten. Wo dies nicht innerhalb eines Projekts möglich ist, wäre ein enger Austausch mit Projekten, die andere Aspekte in Bezug auf Wasserstoff beleuchten, sinnvoll.

Kreislaufwirtschaftliche Aspekte in Projekten:

Umsetzungsprojekte sollen so angelegt sein, dass sie auch nach Projektende Anwendung finden. In den



Reallaboren ist dies sichergestellt durch die Tatsache, dass die Demonstratoren von einem Pilot- bzw. Forschungsbetrieb überführt werden in den Regelbetrieb. Das Projektende ist somit nicht das Lebensende der Anlage. Da dies bei Demonstrationsprojekte jedoch nicht immer möglich oder sinnvoll ist, können auch weitere kreislaufwirtschaftliche Aspekte wie Second-Life-Konzepte oder Recycling zum Einsatz kommen.

Stärkung transdisziplinärer Forschungsansätze:

Bereits in der Vergangenheit haben auch in Projekten im Bereich Wasserstoff transdisziplinäre Ansätze Einzug genommen. Dies gilt es in Zukunft beizubehalten und sofern möglich zu intensivieren. Dies schafft bei den beteiligten Forschenden ein allgemeineres Verständnis auch über das eigene Forschungsfeld hinaus. Insbesondere im Energiebereich ist ein solch umfassendes Verständnis von großem Vorteil, um Handlungsoptionen aus einer multikriteriellen Perspektive bewerten zu können.

Aus- und Weiterbildung von Fachkräften:

Wie in vielen anderen Bereichen droht der Energiebranche im Allgemeinen und dem Bereich Wasserstoff im Speziellen ein Mangel an Fachkräften. Um einen positiven Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten zu können, wird Wasserstoff in Anwendungsbereiche Einzug nehmen, in denen bisher andere Technologien zum Einsatz kamen. In diesen Bereichen müssen Fachkräfte wie z. B. Handwerker:innen oder Mechaniker:innen sowie Rettungskräfte im Umgang mit dem Energieträger und den zugehörigen Technologien geschult werden. Weiter werden Ingenieur:innen gebraucht, damit die nötige Geschwindigkeit in der Transformation erreicht wird. Forschungsprojekte sollen mit geeigneten Formaten dabei helfen, diese Fachkräfte auszubilden und geeignete Multiplikatoren (wie z. B. Lehrer:innen) zu schulen.

Einbindung von Bürger:innen:

Die Einbindung von Bürger:innen in Forschungsprojekte kann einen wichtigen Baustein dafür leisten, dass Wasserstoff in der Gesellschaft präsent wird und damit auch Hürden im Umgang damit abgeschafft werden. Dieser Möglichkeit der Einbindung könnte z. B. durch sogenannte Citizen-Projekte Raum geschaffen werden. Eine enge Einbindung von Bürgern schafft einerseits Verständnis von der Materie bei diesen, andererseits gewinnen Forscher:innen dabei ein Gefühl für die noch relevanten Herausfor-

derungen in der Gesellschaft, die neben den klassischen Forschungsthemen herrschen.

Offene Datenbanken:

In vielen Analysen bilden Daten die wichtigste Grundlage der Untersuchungen, die entsprechende Recherche oder Synthese kann dabei sehr zeitaufwändig sein. Insbesondere in öffentlich geförderten Forschungsprojekten sollte somit Wert darauf gelegt werden, dass Eingangs- wie Ergebnisdaten veröffentlicht werden. Dies führt einerseits zu einem hohen gesellschaftlichen Mehrwert, da weitere Projekte auf diesen Daten aufbauen können. Zudem führt die damit einhergehende Transparenz zu einer erhöhten Akzeptanz der Ergebnisse. Die bereitgestellten Daten sollen dabei das Ziel verfolgen auch außerhalb des Kontextes ihres Ursprungs verwendet werden zu können. Entsprechend muss dabei im Blick behalten werden, sie disziplinübergreifend verständlich aufzubereiten.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AEL	Alkalische Elektrolyse (AFC: Alkaline Fuel Cell)
AEMEL	Alkalischer Membran-Elektrolyse
ABZ	Alkalische Brennstoffzelle
ASTM	American Society for Testing and Materials
BLEVE	boiling liquid expanding vapour explosion (explodierender siedender Flüssigwasserstoff)
BoP	Balance-of-Plant
BSZ/BZ	Brennstoffzelle
C	Kohlenstoff
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)
CEN	Comité Européen de Normalisation, Europäisches Komitee für Normung
CENELEC/CLC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CH ₄	Methan
CCS	CO ₂ -Abtrennung und Speicherung (Carbon Capture and Storage)
CCU	CO ₂ -Abtrennung und Nutzung (Carbon Capture and Utilization)
CH ₂	Druckwasserstoff (Compressed Hydrogen)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO	Kohlenstoffmonooxid
CSP	Concentrated Solar Power
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DME	Dimethylether
DRI	Direct Reduced Iron
EE	Erneuerbare Energien
E-Fuels	synthetischer Kraftstoffe
EHC	Electrochemical Hydrogen Compression
EHP	Electrochemical Hydrogen Purification
EL	Elektrolyse
EBoP	Electrical Balance of Plant
FC	Fuel Cell
FEM	Finite Elemente Methode
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb
FuE	Forschung und Entwicklung
GDRMA	Gasdruckregelmessanlagen
GW	Gigawatt
H ₂	Wasserstoff
HBI	Hot Briquetted Iron
HT	Hochtemperatur
HTEL	Hochtemperaturelektrolyse
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IMO	International Maritime Organisation
ISO	International Organization for Standardization
KI	Künstliche Intelligenz
kW	Kilowatt
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life Cycle Assessment
(s)LCA	soziale Lebenszyklusanalysen (Social Life Cycle Assessment)
LCC	Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing)

LH ₂	Flüssigwasserstoff (Liquid Hydrogen)
LKW	Lastkraftwagen
LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers)
MEA	Membran-Elektroden-Einheit (Membrane Electrode Assembly)
MeOH	Methanol
MOF	metal-organic frameworks
M&R	Mess- und Regelungstechnik
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
MT	Mitteltemperatur
MW	Megawatt
N ₂	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickstoffoxide
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
NT	Niedertemperatur
O ₂	Sauerstoff
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPEX	Operational Expenditures (Betriebsausgaben)
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsäurebrennstoffzelle)
PCC	Proton Conducting Ceramic (protonenleitende Membran)
PEMEL?	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PDU	power distribution unit
PEMEL	Protonen-Austausch- oder Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyseur
PEMFC/BZ	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PFSA	Perfluorsulfonsäure
PKW	Personenkraftwagen
PtX(L)	Power-to-X (Liquid)
PV	Photovoltaik
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SDG	Sustainable Development Goals
SHM	Structural Health Monitoring
SO(F)C	Festoxid-(Brennstoff)zelle (Solid Oxide (Fuel) Cells)
SOH	State-of-Health
SynFuels	Synthetische Kerosine, Diesel- und Ottokraftstoffe
TCO	Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership)
THG	Treibhausgas
TRL	Technologischer Reifegrad (Technology Readiness Level)
UN	United Nations
VDE	Verband der Elektrotechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WEA	Windenergieanlage
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)

Trotz der betrachteten Vielfalt an verschiedenen Technologien wird an dieser Stelle kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Die adressierten Forschungsthemen und Fragestellungen wurden durch die beteiligten Akteure und Mitglieder des Forschungsnetzwerks Wasserstoff sorgfältig recherchiert. Damit soll nicht ausgeschlossen werden, dass es weitere erfolgversprechende Ansätze und Technologien gibt, die zukünftig einen sinnvollen Beitrag zur Entwicklung von Wasserstofftechnologien liefern können. Es ist wichtig, dass auch zukünftig neue, weniger bekannte und disruptive Ansätze eine Chance haben, erforscht und weiterentwickelt zu werden, da sie deutliche Steigerungen von Effizienz oder Kostenpotenzialen ermöglichen können.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages