

Entwurf

Strategiekreis Wasserstoff
des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Arbeit

Strategiepapier zum
Forschungsbedarf in der
Wasserstoff-Energietechnologie

München, im Januar 2005

Ausschlussklärung

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Strategiekreises Wasserstoff des BMWA erstellt und vom Projektträger Jülich (PtJ) des BMWA im Rahmen des Vorhabens ET 6903 M finanziert. Er soll einen Beitrag zur sachlichen Diskussion von Fragen der Wasserstoff-Forschung und -Technologieentwicklung bringen. Für den Inhalt des Berichtes sind die Autoren verantwortlich. Der Bericht gibt weder notwendigerweise die Meinung des BMWA oder des PtJ wieder, noch können aus ihm irgendwelche Verantwortung des BMWA oder PtJ oder Ansprüche gegenüber ihnen hergeleitet werden.

Vorwort des BMWA

Die Bundesregierung hat in den zurückliegenden 30 Jahren die Erforschung und Entwicklung der Wasserstofftechnologien für den Energiemarkt intensiv gefördert. Dabei sind hervorragende, international wegweisende technologische Ergebnisse erzielt und wertvolle Erkenntnisse für die zukünftige Entwicklung gewonnen worden. Sowohl in der "regenerativen" wie auch in der "konventionellen" industriellen Herstellung und Verarbeitung von Wasserstoff liegt die deutsche Industrie und Forschung technologisch mit an der Weltspitze. Dies gilt auch für die Technologien, die Wasserstoff nutzen, vor allem für Automobile und Brennstoffzellen. Unbestritten ist, dass trotz aller Erfolge noch ein weiterer, erheblicher Forschungsaufwand notwendig ist, um die Chancen der Wasserstofftechnologien gerade unter ökonomischen und ökologischen Aspekten für die Energiewirtschaft nutzen zu können.

Das politische Interesse an einer zukünftigen Wasserstoff-Energiewirtschaft in der Europäischen Union und weltweit ist groß. Ende 2003 wurden die Internationale Partnerschaft für die Wasserstoff-Wirtschaft (IPHE) sowie Anfang 2004 die Europäische Technologieplattform Wasserstoff und Brennstoffzellen gegründet, beide mit dem Ziel einer engen länderübergreifenden Kooperation in Forschung und Entwicklung (FuE) bis zur Markteinführung. Das BMWA und deutsche Fachleute sind in den Gremien der europäischen und internationalen Zusammenarbeit an prominenter Stelle vertreten.

Wir hatten dazu bereits frühzeitig einen nationalen "Strategiekreis Wasserstoff" einberufen, zusammengesetzt aus Fachleuten der Industrie und der Wissenschaft sowie Vertretern von Bundes- und Länderministerien, um die nationale wie internationale FuE-Zusammenarbeit zu stärken. Dieser Strategiekreis hat den vorliegenden umfassenden Bericht zum Forschungsbedarf bei den Wasserstoff-Energietechnologien erstellt. Der Bericht ist ein wichtiger Beitrag zur nationalen Diskussion des nachhaltigen Weges zu einer möglichen Wasserstoff-Energiewirtschaft und zur Vorbereitung zukünftiger Kooperationen innerhalb Europas wie darüber hinaus.

Allen Beteiligten möchte ich für die intensive Mitwirkung danken. Sie haben damit eine gute, gemeinsame Basis für die anstehenden Aufgaben geschaffen. So begrüße ich den Vorschlag, vorrangig eine Wasserstoff-Strategie für Deutschland zu entwickeln. Denn hierbei gilt es zum Einen, angesichts der vielen angesprochenen, noch offenen Entwicklungsprobleme die finanziellen und technologischen Risiken zu minimieren. Zum Anderen ist die Schlüsselfrage der wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Herstellung von Wasserstoff möglichst konkret zu beantworten. Dazu zählt, die Idee der Wasserstoff-Erzeugung mit dem Strom aus der zukünftigen Offshore-Windenergie im Vergleich mit anderen Verfahren zu untersuchen. So könnte auch der Strom aus CO₂-freien Kohle- und Gaskraftwerken längerfristig für die umweltfreundliche Wasserstoff-Erzeugung in Frage kommen; das BMWA fördert die Entwicklung dieser Kraftwerkstechniken (FuE-Konzept COORETEC).

Darüber hinaus verspreche ich mir von den Strategiediskussionen eine Akzentuierung der staatlichen und der industriellen Interessen in der nationalen, europäischen wie auch in der internationalen Zusammenarbeit.

Georg Wilhelm Adamowitsch
Staatssekretär
Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	IX
Vorwort	1
1 Energiewirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen	3
1.1 Warum Wasserstoff?	4
1.2 Nationale Aktivitäten und Initiativen	7
1.3 Internationales Umfeld	9
2 Stand der Technik und Forschungsbedarf	13
2.1 Wasserstofferzeugung	13
2.1.1 Energiebereitstellung zur Wasserstoffherstellung	13
2.1.2 Verfahren zur Wasserstofferzeugung	15
2.2 Wasserstofflogistik	22
2.2.1 Gasförmiger Wasserstoff	22
2.2.2 Flüssigwasserstoff	24
2.2.3 Druckspeicher und Flüssigwasserstoff-Speicherung	26
2.2.4 Hydridspeicher und Speicherung in neuen Materialien	28
2.3 Wasserstoffanwendungen	30
2.3.1 Mobile Anwendungen	30
2.3.2 Stationärer Bereich	35
2.3.3 Portabler Bereich	39
2.4 Zusammenfassung zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf	42
2.4.1 Erzeugung	42
2.4.2 Logistik	43
2.4.3 Anwendung	44
3 Rechtliche Rahmenbedingungen	45
3.1 Anforderungen an die Einführung Wasserstoff basierter Technologien	45
3.2 Status quo nationaler und internationaler Regelwerke	45
3.2.1 Stationärer Einsatz von Wasserstoff	45
3.2.2 Zulassung und Genehmigung von mobilen Anwendungen	48
3.2.3 Zulassung von portablen Anwendungen	50
3.3 Steuerrechtliche Behandlung von Wasserstoff	50

4	Vergleichende Bewertung der Wasserstoff-Energietechnologie.....	51
4.1	Bewertungskriterien	51
4.2	Ganzheitliche Bewertung der Wasserstoffbereitstellung	52
4.2.1	Kumulierter nicht regenerativer Energieaufwand.....	52
4.2.2	CO ₂ -Emissionen	54
4.2.3	Kosten.....	55
4.3	Vergleich konventioneller Technologien mit Wasserstofftechnologien.....	56
4.3.1	Pkw-Antriebstechniken im Vergleich.....	56
4.3.2	Beispiel für die stationäre Anwendung.....	57
4.3.3	Beispiel für die portable Anwendung	59
5	Empfehlungen des Strategiekreises	61
5.1	Aktualisierte Förderpolitik im Bereich der Wasserstofftechnologie.....	61
5.2	Empfohlene Schwerpunktsetzungen in der F&E-Förderung	62
5.3	Demonstrationsvorhaben	64
5.4	Gesetzgebung und Standardisierung	64
5.5	Schnittstellen zu internationalen Aktivitäten	65
5.6	Die Zukunft des Strategiekreises	65
6	Anhang.....	67
6.1	Die Teilnehmer des Strategiekreises Wasserstoff im BMWA.....	67
6.2	Darstellung der Landesinitiativen in Deutschland.....	69
	Abkürzungsverzeichnis	77

Zusammenfassung

Unter Federführung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit und in Zusammenarbeit mit den Bundesministerien für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen sowie für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit wurde der Strategiekreis Wasserstoff mit dem Ziel ins Leben gerufen, den nationalen Aktivitäten im Bereich der Wasserstofftechnologie eine gemeinsame Zielrichtung zu geben und die deutsche Position und Präsenz bei internationalen Kooperationen zu stärken. Motivation für den Einsatz aller Beteiligten und Treiber für die Verwendung von Wasserstoff in der Energiewirtschaft sind die folgenden Aspekte:

Wasserstoff – Energieträger der Zukunft

Wasserstoff und Energieversorgungssicherheit

Wasserstoff kann aus allen (fossilen, nuklearen und regenerativen) Primärenergieträgern hergestellt werden. Hierdurch ist eine flexiblere Anpassung des Energiemixes an die globale Ressourcensituation möglich.

Wasserstoff als Brückentechnologie

Die Übergangsphase zu einer auf regenerativ erzeugtem Wasserstoff basierenden Energiewirtschaft kann mittels fossiler Energieträger und gegebenenfalls CO₂-Entsorgung realisiert werden. Dabei kann auch aus konventionellen Energieträgern hergestellter Wasserstoff Effizienzvorteile bieten.

Wasserstoff und regenerative Energien

Wasserstoff ermöglicht eine verstärkte Integration erneuerbarer Energien in die zukünftige Energieinfrastruktur. Wasserstoff leistet somit einen Beitrag zur Schonung erschöpfbarer Energieträger.

Wasserstoff und Klimaschutz

Durch Wasserstofftechnologien sind geringere CO₂-Emissionen bei gleichen Energiedienstleistungen erreichbar. Zudem ist die Nutzung von Wasserstoff beim Anwender nahezu schadstofffrei.

Wasserstoff und Brennstoffzellen

Wasserstofftechnik und Brennstoffzellen erschließen unabhängig voneinander energiewirtschaftliche und ökologische Vorteile und lassen sich zu besonders energieeffizienten Lösungen kombinieren.

Wasserstoff und Wettbewerbsfähigkeit

Innovative Wasserstofftechnologien erschließen global neue Märkte – eine Technologieführerschaft stärkt die Wirtschaftskraft und schafft Arbeitsplätze in deutschen Unternehmen.

Wasserstoff in Deutschland

Deutschlands Stärke ist das wissenschaftliche und industrielle Know-how zur Entwicklung und Herstellung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechniken. Diese Kompetenzen sind Basis für eine Vorreiterrolle zur intensiven Marktvorbereitung.

Daraus ergibt sich, dass die Wasserstofftechnik in einer zukünftigen Energiewirtschaft eine bedeutende Rolle spielen wird. Um gemeinsam mit den europäischen Partnern die Technologieführerschaft zu erlangen, besteht aus Sicht des Strategiekreises in folgenden Punkten Handlungsbedarf:

Handlungsbedarf für eine H₂-Technologieführerschaft

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit sind erheblich zu verstärken:

- Verbesserung von Wasserstoff-Herstellungsverfahren, -Speicherung und -Infrastruktur
- Weiterentwicklung der Anwendungstechniken, wie z. B. Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor
- Kostenreduktionen entlang der Wertschöpfungskette
- Begleitende Systemanalyse und ganzheitliche Bewertung, z. B. zur effizienten Schwerpunktsetzung von F&E-Aktivitäten

Zur Marktvorbereitung sind Impuls- und Leuchtturmprojekte mit den folgenden Zielen zu realisieren:

- Erhöhung des Engagements durch Aufteilung der Risiken
- Nachweis der technischen Machbarkeit
- Auswertung praxisnaher Erfahrungen
- Steigerung der Akzeptanz in der Gesellschaft durch objektive Informationsvermittlung
- Verstärkung der nationalen, europäischen und internationalen Zusammenarbeit
- Aufbau von Keimzellen für eine zukünftige Wasserstoff-Energiewirtschaft

Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen für Entwickler, Hersteller und Investoren:

- Definition der nationalen Ziele und einer europäischen Roadmap
- Zügige Abstimmung und Umsetzung internationaler Vorschriften und Gesetze
- Verbindliche Aussagen zu Markteinführungsinstrumenten

Um die Akteure in Forschung, Entwicklung und Industrie für die Wasserstofftechnologie und das Know-how in Deutschland zu erhalten bzw. neu zu gewinnen, ist von Seiten der Politik, des Bundes und der Länder eine langfristige und stetige Unterstützung in den oben genannten Punkten erforderlich. Dieser Bericht dient dazu, die bisherige Förderpolitik der Bundesregierung im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik zusammenzufassen.

München, 31. Januar 2005

Vorwort

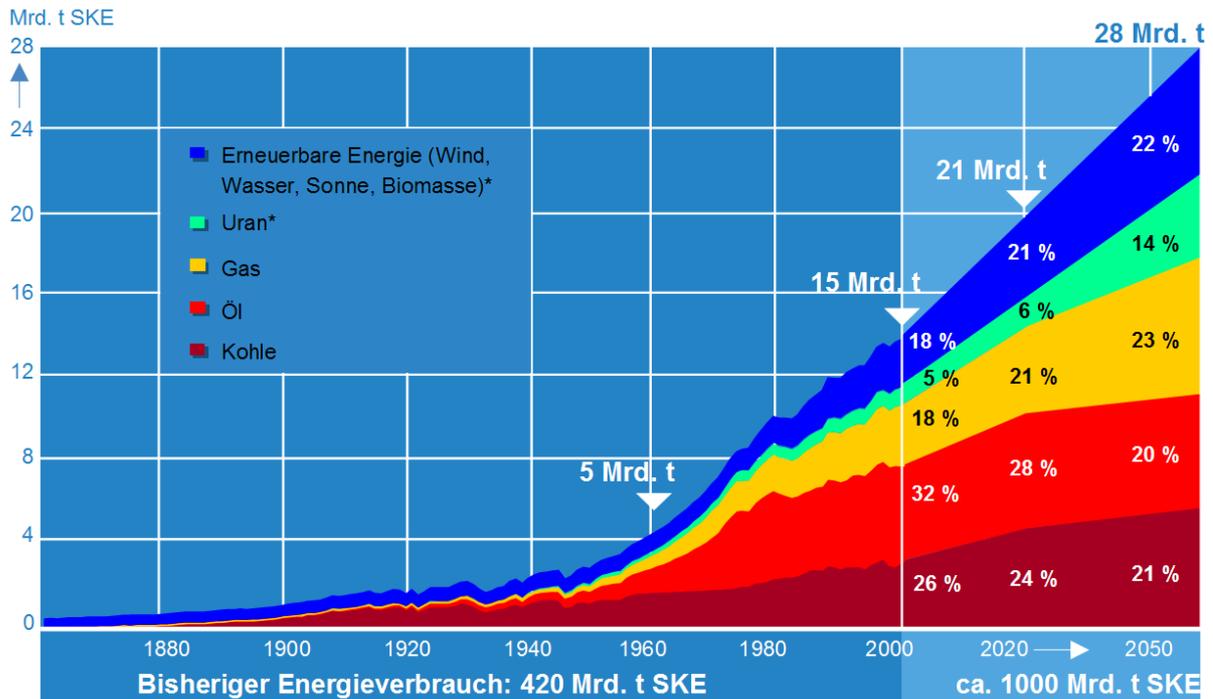
Im Jahr 2003 haben die weltweiten Aktivitäten zu einer zukünftigen Wasserstoff-Energie-wirtschaft neue Impulse erhalten. Hervorzuheben sind hier die Schaffung der „European Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform“ und die Gründung der „International Partnership for the Hydrogen Economy“. Der Strategiekreis Wasserstoff des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit den oben genannten Bundesministerien 2003 mit dem Ziel ins Leben gerufen, den nationalen Aktivitäten im Bereich der Wasserstoff-technologie eine gemeinsame Zielrichtung zu geben und die deutsche Position und Präsenz bei den internationalen Kooperationen zu stärken.

Die Mitglieder des Strategiekreises vertreten nahezu die gesamte deutsche Wasserstoffgemeinde aus Industrie, Forschung und Initiativen sowie Landes- und Bundesministerien. Zahlreiche Experten aus den Gebieten der Wasserstoff-Herstellung, -Logistik und -Anwendung haben sich mit ihrem Wissen beteiligt und den Strategiekreis unterstützt.

Dieses Strategiepapier ist das Ergebnis der gemeinsamen Arbeit der Mitglieder des Strategiekreises. Es stellt die politischen Rahmenbedingungen, den aktuellen Stand der Wasserstofftechnik und den weiteren, für eine Marktdurchdringung notwendigen Entwicklungsbedarf dieser Technologie dar. Hierauf aufbauend wurden vom Strategiekreis Empfehlungen formuliert, die als Hilfsmittel für Politiker und Entscheidungsträger dienen sollen, um die Forschung und Entwicklung der Wasserstoff-Energietechnik in Deutschland zielgerichtet zu fördern und dadurch die Basis für die Einführung und Integration dieser wichtigen Komponente einer zukünftigen, nachhaltigen Energiewirtschaft zu schaffen.

1 Energiewirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen

Der weltweite Bedarf an Energie wird in den kommenden Jahrzehnten dramatisch ansteigen. Nach den Vorhersagen des Weltenergieerates rechnet man unter der Annahme eines „Business-as-usual“-Szenarios bis 2050 mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate des weltweiten Energieverbrauchs um 1,3 % pro Jahr.



*Stromerzeugung aus Kernenergie und erneuerbaren Energien mit Substitutionsmethode bewertet
Quellen: WEC, IIASA, IEA/OECD 2001/2002

Abbildung 1-1: Entwicklung des weltweiten Energieverbrauchs

Ein derartiger Anstieg des Energieverbrauchs in diesem Zeitraum kann trotz steigendem Anteil erneuerbarer Energien maßgeblich nur durch fossile und nukleare Energieträger gedeckt werden. Die damit einhergehende Steigerung der CO₂-Emissionen und anderer Umweltbelastungen, vor allem aber die zunehmende Verknappung der fossilen Energieträger, macht die Suche nach geeigneten Alternativen zur Energieversorgung unumgänglich.

Die Versorgungssicherheit spielt eine entscheidende Rolle. Fossile Energieträger, insbesondere Erdöl und Erdgas, kommen nur in wenigen Regionen der Welt in ausreichender Menge vor. Der Zugang zu diesen Ressourcen ist von den jeweiligen technischen und ökonomischen Bedingungen abhängig und gekennzeichnet durch politische und ökologische Faktoren sowie mit geopolitischen Risiken verbunden. Diese Faktoren führen zum Einen vermehrt zu volatilen, oft hohen Preisentwicklungen, während zum Anderen politische Maßnahmen die verstärkte Reduzierung von Treibhausgasemissionen und anderen Umweltbelastungen erfordern.

Die heute weniger entwickelten Regionen werden durch ihre verstärkte wirtschaftliche Entwicklung bis 2030 mehr als die Hälfte zu den weltweiten CO₂-Emissionen beitragen und den Druck auf die Energiemärkte verstärken. Die Verfügbarkeit von effizienten Technologien ist daher auch für diese Ländergruppen erforderlich. Aus klimapolitischen Gründen und aus Gesichtspunkten der Industriepolitik sind verstärkte Anstrengungen bei der technologischen Entwicklung hin zu neuen umweltverträglichen Energiesystemen vor allem durch die industrialisierten Länder zu unternehmen.

Eine kohärente Strategie ist erforderlich, die sowohl Energieerzeugung als auch Energienachfrage in einer Gesamtbetrachtung erfasst, d. h. Brennstoffbeschaffung, Transport, Verteilung, Energieumwandlung bis hin zur Rolle der Energietechnik und den Endverbrauchern beinhaltet. Kurz- und mittelfristig muss eine solche Strategie zwangsläufig die Erhöhung der Energieeffizienz und die vermehrte Nutzung erneuerbarer Energiequellen zum Ziel haben. Darauf aufbauend kann langfristig eine wasserstoffbasierte Versorgung – komplementär zu Elektrizität – einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung leisten. Die technologische Weiterentwicklung von wasserstoffbasierten Systemen im mobilen Bereich, in der Energiewirtschaft, in der industriellen Anwendung und bei den Haushalten eröffnet die Möglichkeit für eine effiziente und umweltschonende Energieversorgungsalternative.

Forschung, Entwicklung und Erprobung neuer Technologien in Versuchs- und Demonstrationsprojekten kommt eine zentrale Bedeutung für den Einstieg in ein wasserstoffbasiertes Versorgungssystem zu. In diesem Dokument werden die unterschiedlichen Aktivitätsfelder mit ihren Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt und bewertet. Die abgeleiteten Empfehlungen sollen der Politik eine Hilfestellung geben, wo und mit welchem Umfang und Zeithorizont Weichenstellungen bei der Forschungsförderung gesetzt werden sollten, um mittelfristig innovative Produkte und marktfähige Anwendungen zu entwickeln.

1.1 Warum Wasserstoff?

Wasserstoff ist kein primärer Energieträger wie Kohle, Gas oder Öl, sondern er ist ein Sekundärenergieträger ebenso wie Elektrizität. Er kann durch vielfältige Methoden hergestellt werden, durch Energiesysteme auf Basis konventioneller Techniken ebenso wie aus erneuerbaren Energieträgern (vgl. **Abbildung 1-2**).

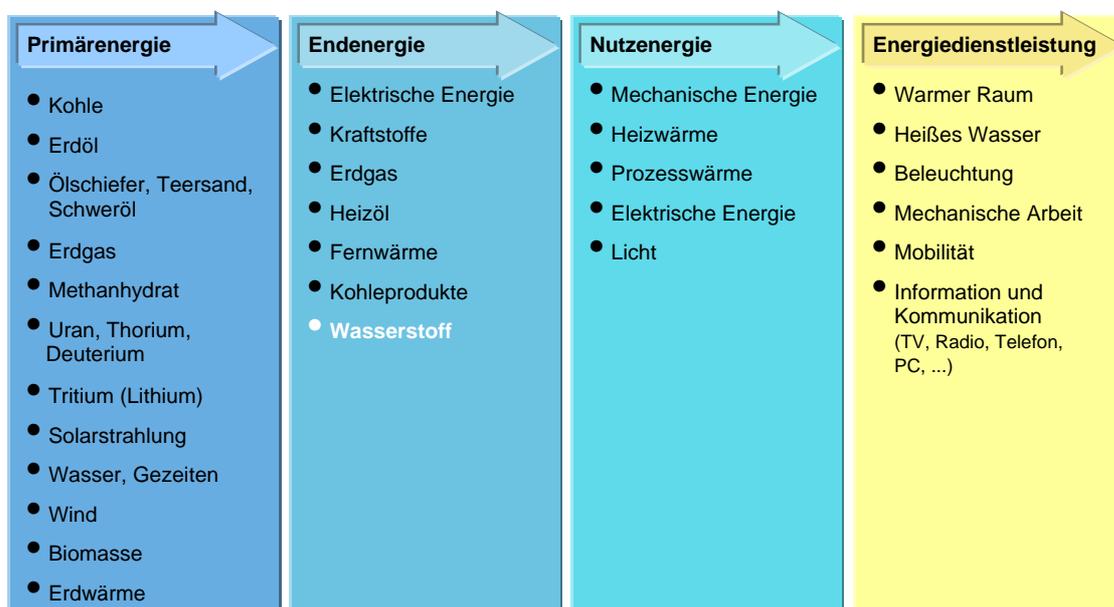


Abbildung 1-2: Stufen der Energieumwandlung

Die großtechnische Erzeugung von Wasserstoff oder wasserstoffreichem Gas ist dann energiewirtschaftlich sinnvoll, wenn sie einen Beitrag zur Schonung erschöpfbarer Energieträger darstellt oder zu verringerten Treibhausgasemissionen führt. Dies trifft insbesondere für die H₂-Erzeugung aus erneuerbarer Energie zu, sofern diese nicht auf andere Weise direkt in bestehende Energieversorgungsstrukturen integrierbar ist.

Wenn die Nutzung erneuerbarer Energien ein Maß erreicht haben wird, das erhebliche (saisonale) Speicherung erfordert, kommen die Vorteile der energetischen Wasserstoffnutzung

voll zum Tragen: universelle Erzeugungsmöglichkeiten, Speicherung und Transport mit hohen Nutzungsgraden sowie geringe Umweltbelastung am Einsatzort. Die Vielzahl von Herstellungs- aber auch Nutzungsmöglichkeiten eröffnet eine breite Palette von technischen Lösungen. Diese Flexibilität macht es möglich, sich regionalen, ökologischen wie ökonomischen Erfordernissen anzupassen.

Grundsätzlich sollten zunächst die Umwandlungsketten mit der höchsten Energieeffizienz bzw. mit den geringsten Verlusten eingesetzt werden. Zu beachten ist, dass bei der Bereitstellung von Wasserstoff konkurrierende Nutzungsbedingungen für die nur begrenzt zur Verfügung stehenden Primärenergieträger vorliegen. Einerseits kann regenerativ hergestellter Strom direkt ins Versorgungsnetz eingespeist werden. Andererseits verfügt der Wasserstoff durch seine Speicherfähigkeit über einen Vorteil gegenüber Elektrizität, der die Verwendung in mobilen Anwendungen und zur Übertragung beispielsweise von Wind-offshore erzeugter Energie attraktiv macht und damit den Mehraufwand bei der Energieumwandlung rechtfertigen kann.

Eine nachhaltige Energieversorgung ist Basis für eine höhere Lebensqualität. Die Herausforderung besteht darin, eine saubere, sichere und zuverlässige Bereitstellung von Energie zu bezahlbaren Preisen zu realisieren. Versorgungssysteme, die diese Bedingungen nicht ausreichend erfüllen, werden sich nachhaltig sowohl negativ auf die Umwelt- und Gesundheitsbedingungen auswirken als auch aus ökonomischen Gründen ins Hintertreffen geraten.

Vor diesem Hintergrund lassen sich aus heutiger Sicht folgende Treiber für die Beschäftigung mit dem Thema Wasserstoff herausstellen:

- Energie-Versorgungssicherheit und Unabhängigkeit von Energie-Importen kann zukünftig zur Preisstabilität beitragen
- Wasserstoffbasierte Techniken (Erzeugung, Transport, Speicherung, Anwendung) können als Exportprodukte die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland stärken
- Luftqualität und Gesundheitsschutz werden durch eine Abnahme der Schadstoffemissionen verbessert
- Dem globalen Klimaschutz wird durch Absenkung der Treibhausgas-Emissionen Rechnung getragen

Energie-Versorgungssicherheit

Die heutige Energieversorgung basiert auf einer marktfähigen und ununterbrochenen Bereitstellung von bezahlbaren fossilen und nuklearen Energieträgern. Der Primärenergieverbrauch in Deutschland weist einen hohen Anteil fossiler Energieträger aus, wobei die Mineralölprodukte überwiegend im mobilen Bereich eingesetzt werden, während Stein- und Braunkohle die Basis für ca. 50 % der deutschen Stromerzeugung bilden. Mit dem Beschluss der Bundesregierung zum Ausstieg aus der Kernenergie ist mittelfristig von einem weiteren Anstieg der fossilen Energieträger an der Gesamtversorgung auszugehen. Die ebenfalls beschlossenen CO₂-Minderungsziele im Rahmen des Kyoto-Protokolls lassen sich somit nur durch eine Kombination verstärkter Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und wo – energiewirtschaftlich sinnvoll – mittels Substitution durch kohlenstoffärmere oder erneuerbare Energieträger erreichen.

Die Europäische Kommission hat in ihrem Grünbuch zur Versorgungssicherheit¹ die Tendenz zunehmender Importabhängigkeit Europas von Erdöl und Erdgas aufgezeigt.

Es wird prognostiziert, dass bis 2030 die Versorgungsabhängigkeit der EU von Erdöl und Erdgas weiter zunehmen und von heute ca. 50 % auf dann etwa 70 % steigen wird. Regenerative Energien und Wasserstoff bieten die Chance, die Primärenergiebasis heimischer Quellen zu verbreitern und damit diesem Trend der Versorgungsabhängigkeit entgegenzuwirken.

¹ KOM(2000)769, Grünbuch hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit

Wasserstoff kann aus vielen Quellen hergestellt werden, aus fossilen Energieträgern ebenso wie über die nukleare Prozesskette und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Wasserstoff und Elektrizität gemeinsam erlauben eine höhere Flexibilität, um das Erzeugungsnetz aus zentralen und dezentralen Einheiten sowie einer ggf. zunehmenden fluktuierenden Einspeisung zu stabilisieren. Durch die Nutzung des Wasserstoffs im Transportbereich könnte sich die derzeit hohe Abhängigkeit vom Öl verringern.

Ein breiter Einsatz von Wasserstoff im mobilen wie im stationären Bereich setzt allerdings erhebliche Erzeugungskapazitäten voraus. Derzeit wird der weltweite Verbrauch von Wasserstoff auf 500 Mrd. Nm³/a geschätzt, was mit 5,4 EJ/a aus energetischer Sicht einen vernachlässigbaren Beitrag darstellt (im Vergleich hierzu: weltweit beträgt der Primärenergieverbrauch ca. 2.400 EJ/a). Dieser Wasserstoff wird knapp zur Hälfte direkt energetisch genutzt, meist in verunreinigter Form als Abfallprodukt chemischer Prozesse. Der Haupteinsatz im nichtenergetischen Bereich ist die Ammoniak-Produktion, ein Drittel der Wasserstoffproduktion wird hierfür eingesetzt.

Um in Zukunft Wasserstoff im größeren Maßstab in Energieversorgungssystemen zu etablieren, sind erhebliche technologische Anstrengungen bei den Erzeugungskapazitäten erforderlich. Die Produktionsanreize werden letztlich bestimmt durch die Entwicklung der fossilen Energieträgerpreise und den Wert, den man der Versorgungssicherheit zumisst. Die Wasserstoffherstellung mittels Kohlevergasung, anschließender CO₂-Abtrennung und Deponierung stellt für europäische Länder mit größeren Kohlevorkommen eine grundsätzlich interessante Option dar. Erneuerbare Energien, wie Biomasse, Solar-, Wind- und Meeresenergie, sind entsprechend ihrer regionalen Verfügbarkeit in Europa unterschiedlich effizient nutzbar. Beispielsweise ist eine kosteneffiziente Wasserstoffherzeugung auf Basis solarthermischer Großkraftwerke zukünftig nur in Südeuropa sinnvoll zu betreiben. Die Windenergienutzung hat vor allem in Deutschland schon in den letzten Jahren erheblich zugenommen und stellt eine weitere Option zur Wasserstoffproduktion dar.

Wettbewerbsfähigkeit

Die Entwicklung und der Verkauf von Energiesystemen und Energieanwendungen mit hoher Energieeffizienz – von Laptops, Handys, Haushaltsgeräten über Automobile bis zu kompletten Kraftwerksanlagen – stellen für die deutsche Industrie einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar. Dies gilt sowohl für die möglichst kosten- und energieeffiziente Deckung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen, als auch für die Entwicklung von exportfähigen Produkten, die durch signifikant höhere Effizienz einen vermarktungsfähigen Mehrwert gegenüber Standardtechnologien bieten.

Zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und zum Erhalt der industriellen Leistungsfähigkeit ist die Weiterentwicklung von Anwendungen mit hoher Energieeffizienz zu bezahlbaren Preisen im Kontext des globalisierten Wettbewerbs unumgänglich.

Technologien auf Basis von Wasserstoff können hierzu einen Mehrwert leisten. Es ist jedoch zu bedenken, dass sich die wasserstoffbasierten Anwendungen im mobilen wie im stationären Bereich gegenüber den zum Teil hocheffizient arbeitenden konventionellen Systemen erst etablieren müssen. Dies gilt vor allem auch im Vergleich zu direkten Stromanwendungen, wo der Einsatz von Wasserstoff einen Vorteil darstellen muss.

Luftqualität und Gesundheitsschutz

Die technologische Entwicklung bei stationären und mobilen Verbrennungssystemen hat in der Vergangenheit schon beträchtliche Fortschritte erreicht, um der Problematik des Sauren Regens, der Staub- und der Ozonbelastung zu begegnen. Weitere Verbesserungen sind gesellschaftlich nötig und politisch gewollt. Hierzu bedarf es weiterer Anstrengungen durch technologische Weiterentwicklung der bestehenden Systeme.

Wasserstoffbasierte Techniken bei Fahrzeugen und Kraftanlagen sind nahezu schadstofffrei und können in bestimmten Anwendungsbereichen auch zu einer Verringerung der Lärmbelastigung beitragen. In großen Ballungszentren könnten wasserstoffbetriebene Fahrzeuge einen Beitrag zur Begrenzung der lokalen Luftverschmutzung leisten.

Globaler Klimaschutz

Mit dem Kyoto-Protokoll hat sich Deutschland verpflichtet, zwischen 2008 und 2012 die Treibhausgasemissionen um 21 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Langfristig ist eine notwendige weitere Absenkung nur über eine Dekarbonisierung, d. h. eine kohlenstoffärmere Energieträgerstruktur erreichbar. Wasserstoff, CO₂-frei oder CO₂-neutral hergestellt, kann dazu einen Beitrag leisten.

Wann die CO₂-freie Wasserstofferzeugung im großtechnischen Maßstab realisiert sein wird und welche Größenordnung anzustreben ist, wird durchaus unterschiedlich bewertet. Fokussiert man sich allein auf Klimaschutzgesichtspunkte, unterstellt eine hinreichende Verfügbarkeit fossiler Energiequellen über die nächsten Jahrzehnte und setzt auf eine primäre, direkte Nutzung von elektrischer Energie, sind energiewirtschaftlich signifikante Beiträge von Wasserstoff möglicherweise erst ab der vierten oder fünften Dekade dieses Jahrhunderts zu erwarten². Geht man hingegen von einer sich deutlich früher verschärfenden Öl- und Gasknappheit im Verbund mit den Klimaschutzerfordernissen aus, wird die Einführung von Wasserstoff, insbesondere auch im Verkehrsbereich, deutlich früher erfolgen müssen. Weltweit kann ein durch den Klimaschutz bedingter Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft früher erfolgen, wenn z. B. hinreichende Nutzungspotenziale erneuerbarer Energien vorliegen oder durch anderweitige Treiber (z. B. Reduktion der städtischen Luftverschmutzung) deutliche Impulse gesetzt werden.

1.2 Nationale Aktivitäten und Initiativen

Aktivitäten des Bundes

Der Bund fördert Forschung und Entwicklung im Bereich von Wasserstofftechnologien seit mehr als 20 Jahren. Der Schwerpunkt der Förderung lag in den Jahren 1988 bis 1995. Gefördert wurden in diesem Zeitraum sowohl die Entwicklung einzelner Technologien, z. B. zur Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse und zur Speicherung, als auch Demonstrationsprojekte. Viel Beachtung fand das binationale Projekt HYSOLAR, in dem eine solare Wasserstofferzeugung in Deutschland und Saudi-Arabien demonstriert wurde, sowie das bereits in den 80er Jahren vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr, Infrastruktur und Technologie geförderte Solar-Wasserstoff-Projekt in Neunburg vorm Wald.

Durch diese Forschungsaktivitäten konnte gezeigt werden, dass die notwendigen Komponenten für eine Wasserstoffwirtschaft vorhanden sind und die Technik zu beherrschen ist, jedoch kein energiewirtschaftlicher Handlungsdruck zur Einführung einer (solaren) Wasserstoffwirtschaft bestand. Größtes Hemmnis waren die hohen Kosten der Wasserstofferzeugung mit regenerativen Energien, insbesondere der Photovoltaik.

In der Folge hat der Bund die Förderung auf das Technologiefeld der Brennstoffzellen fokussiert, da diese viele Einsatzgebiete auch unabhängig von einer Wasserstoffwirtschaft haben. In den Jahren 1990 bis 2003 wurden Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu stationären und mobilen Anwendungen mit Mitteln in Höhe von 180 Mio. € unterstützt. Die Förderung im Bereich der Brennstoffzellentechnik erreichte einen Höhepunkt mit dem Zukunftsinvestitionsprogramm (ZIP) der Bundesregierung. Ab dem Jahr 2001 standen hierdurch

² vgl. Ergebnisse der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung“, Berlin, 2002

zusätzliche Mittel bereit, um auch Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Demonstrationscharakter zu fördern.

Zur weiteren strategischen Ausrichtung der Förderaktivitäten von Brennstoffzellenanwendungen hat der Bund den Arbeitskreis BERTA gegründet, in dem Vertreter der Industrie, der Wissenschaft, des Bundes und der Länder gemeinsam über Leitlinien zukünftiger Entwicklungen beraten. Dieses Strategiepapier zur Wasserstofftechnik wurde in enger Zusammenarbeit auch mit dem BERTA-Arbeitskreis erstellt.

Landesinitiativen

Parallel zum Bund fördern einige Länder Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Seit einigen Jahren schon bestehen die Landesinitiativen in Baden-Württemberg, Bayern und Nordrhein-Westfalen, durch deren Arbeit Wasserstoff- und Brennstoffzellenprojekte mit einem Umfang von über 150 Mio. € angeregt wurden. Auch in Hamburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen und Sachsen-Anhalt wurden in den letzten Jahren Institutionen zur Förderung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik gegründet (s. auch Anhang).

Wasserstoff-Demonstrationsvorhaben

Zur Unterstützung der politischen und gesellschaftlichen Akzeptanz von nachhaltigen Kraftstoffen wird deren Alltagstauglichkeit in verschiedenen Projekten nachgewiesen. Hier sind besonders die Wasserstoff-Tankstelle am Flughafen München (ARGEMUC), das Projekt „Clean Urban Transportation für Europe“ (CUTE) und die „Clean Energy Partnership Berlin“ (CEP) zu nennen. Dabei werden die Herstellung, die Handhabung und der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff im Straßenverkehr demonstriert. In diesen Feldtests werden eine Reihe technischer und wirtschaftlicher Fragen, wie zum Beispiel die sichere Betankung von Fahrzeugen, die Form der Wasserstoffspeicherung und die kostengünstige Herstellung geklärt. In CEP sollen die regenerative Herstellung von Kraftstoffen und deren Einsatz im Straßenverkehr unter Beweis gestellt werden.

Bündnisse der Industrie

In Deutschland hat sich die Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie in den letzten Jahren u. a. in folgenden Initiativen zusammengefunden: Fuel Cell Europe (FCE), Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWV), Initiative Brennstoffzelle (IBZ), Fachausschuss Brennstoffzelle des Vereins Deutscher Ingenieure (BREZEL) und Brennstoffzellenforum beim Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA).

Des Weiteren gibt es die Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie (VES), ein Partnerschaftsprojekt zwischen der deutschen Fahrzeug- und Mineralölindustrie³ und der Deutschen Bundesregierung. Leitziel dieses Projekts ist es, gemeinsam eine Strategie zu erarbeiten, die Europa zur internationalen Spitzenposition bei der Erzeugung und dem Einsatz alternativer Energien für den Straßenverkehr führen soll. Weitere strategische Ziele bestehen darin, die Abhängigkeit des Verkehrs vom Erdöl deutlich zu verringern, endliche Ressourcen zu schonen und die Emissionen, insbesondere CO₂, zu reduzieren. Derzeit erfolgt die Erarbeitung einer Übergangstrategie von den heutigen Kraftstoffen über komplementäre bzw. regenerative Kraftstoffe hin zu Wasserstoff, neben anderen Optionen (z. B. synthetische Kraftstoffe aus Biomasse), als langfristige Lösung.

³ VES-Mitglieder: BMW, BP (Aral), DC, Shell, GM, MAN, RWE, Total, VW

1.3 Internationales Umfeld

Auf **europäischer Ebene** werden von der Kommission, vorwiegend vertreten durch die Generaldirektion Forschung, aber auch durch die Generaldirektion Energie und Transport und andere Generaldirektionen, Wasserstoff-Programme vorangebracht und europäisch koordiniert. So werden auch im 6. EU-Rahmenprogramm für Forschung und Technologieentwicklung F&E- sowie Demonstrationsprojekte zur Wasserstofftechnik gefördert, an denen Deutschland maßgeblich beteiligt ist.

Zur Zusammenführung aller europäischen F&E-Aktivitäten und um die Markteinführung von Brennstoffzellen und Wasserstoff zu beschleunigen, wurde im Januar 2004 von der Europäischen Kommission auf Empfehlung einer High Level Group die „European Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform (H2/FC TP)“ etabliert. Die H2/FC TP wird von einem Advisory Council gelenkt, in dem alle Interessensgruppen vertreten sind, wobei die Industrie deutlich dominiert. Deutschlands Industrie und Wissenschaft sind mit zehn von 36 Mitgliedern (Ballard Power Systems AG, BMW, DaimlerChrysler, Linde, Siemens, Umicore, FZ Jülich, UITP, WWF, ZSW) gut vertreten, auch kommt ein stellvertretender Vorsitzender aus Deutschland. Folgende Arbeits- und ad-hoc-Gruppen des Advisory Council werden von deutschen Vertretern geleitet: „Strategic Research Agenda“, „Deployment Strategy“ und „Training and Education“. Darüber hinaus soll die in der H2/FC TP vorgesehene Member States Mirror Group, in der Deutschland durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit vertreten ist, die Belange der Regierungen der Mitgliedsländer und Regionen einbringen.

Von der European High Level Group wurde eine Vision zur Wasserstoff-Energiewirtschaft in Europa entworfen (vgl. **Abbildung 1-3**), welche der H2/FC TP als Anregung für eine europäische Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Roadmap dienen soll.

Eine von der Europäischen Kommission propagierte „EU Hydrogen and Fuel Cell Quick Start Initiative“ soll mit einem Budget von 2,8 Mrd. € für einen Zeitraum bis über das Jahr 2010 ausgestattet werden. Die genauen Schwerpunkte, Inhalte und die Struktur dieser Initiative werden derzeit von der EU-Kommission gemeinsam mit der H2 / FC TP erarbeitet. Einer der Vorschläge ist eine Demonstrationsanlage zur Wasserstofferzeugung aus fossiler Energie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung sowie „Wasserstoff-Siedlungen“, in denen die Machbarkeit von Wasserstoff als Energieträger von Sicherheitsaspekten bis zur Wirtschaftlichkeit erkundet werden soll. Budgetfestlegungen sind aber bisher noch nicht getroffen, auch soll ein großer Teil des Budgets durch private Investitionen bereitgestellt werden.

Das europäische Projekt HyWays befasst sich mit der Erstellung einer europäischen Roadmap für mobile und stationäre Wasserstoffanwendungen. Die industriellen und institutionellen Partner dieses EU-geförderten Vorhabens werden in Abstimmung mit der European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform die technischen und auch sozio-ökonomischen Bedingungen für die Einführung von Wasserstoff als künftigem Energieträger untersuchen. Durch vergleichende Analysen von regionalen Wasserstoffversorgungsoptionen und Energieszenarien wird versucht, die nationalen Aktivitäten in eine synthetisierte europäische Wasserstoff-Roadmap zusammenzuführen. Zeithorizonte sind die Übergangsperiode bis 2020 mit einem visionären Ausblick auf 2050.

Eine herausfordernde europäische Wasserstoffvision

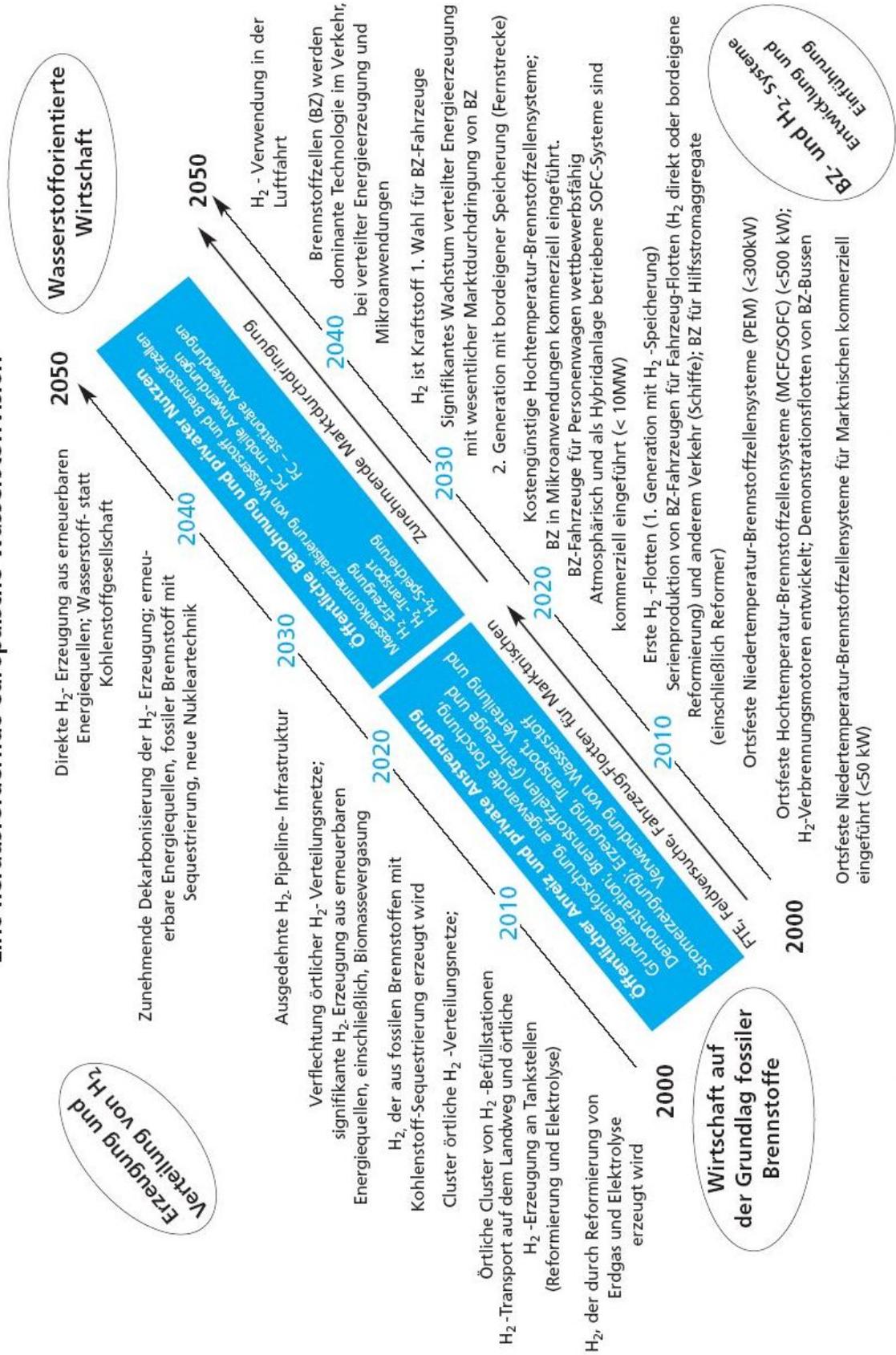


Abbildung 1-3: Vision der European High Level Group zu Wasserstoffwirtschaft

Ferner ist das politische Konzept des Europäischen Forschungsraums "European Research Area" (ERA) zu erwähnen, welches zum Ziel hat, die europäische Forschung in allen Gebieten in Netzwerken zu koordinieren. Diese mit dem Kürzel ERA-NET bezeichnete Koordinierung wird derzeit für Wasserstoff und Brennstoffzellen unter deutscher Federführung aktiv vorbereitet. Es ist vorgesehen, dass im HY-CO-Arbeitsprogramm eine Unterstützung für die schon erwähnte Mirror Group integriert werden soll.

International gibt es neben der schon seit langer Zeit aktiven Zusammenarbeit in den „Implementing Agreements“ der Internationalen Energieagentur und weiteren IEA-Aktivitäten, die von den USA ins Leben gerufene „International Partnership for the Hydrogen Economy“ (IPHE). Die IPHE wurde im November 2003 mit dem Ziel gegründet, die Einführung der Wasserstoffwirtschaft zu beschleunigen. Deutschland ist Gründungsmitglied und hat den Co-Vorsitz im „Implementation and Liaison Committee“ übernommen. Das Liaison Committee soll einerseits konkrete Aktivitäten und Projekte unter dem Schirm der IPHE definieren und zum Laufen bringen, andererseits auch den Bezug zum privaten Sektor suchen. Die IPHE wurde von 14 Staaten⁴ und der Europäischen Kommission unterzeichnet.

⁴ Australien, Brasilien, China, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Island, Italien, Japan, Kanada, Norwegen, Russland, Südkorea, USA

2 Stand der Technik und Forschungsbedarf

Wasserstoff ist ein weltweit genutzter Rohstoff und kommerzielles Produkt in der petrochemischen Industrie, der Nahrungsmittelindustrie, der Flachglasproduktion, der Elektronikindustrie u. a. Der Umgang mit Wasserstoff ist dort eine seit rund einem Jahrhundert erprobte Technologie.

Etwa die Hälfte des in Deutschland hergestellten Wasserstoffs (ca. 20 Mrd. Nm³/a) wird aus Erdgas und Naphtha erzeugt. Die andere Hälfte fällt als Nebenprodukt in Raffinerien an und wird dort weitestgehend für die Hydrierung eingesetzt. Ein geringer Anteil (ca. 2 %) ist Nebenprodukt der Chloralkali-Elektrolyse.

Großanlagen der Wasserstoffherstellung aus fossilen Energieträgern erreichen eine Tageskapazität von über 4 Mio. Nm³/d. Sie können prinzipiell auch für die Herstellung von Wasserstoff aus biogenen Rohstoffen eingesetzt werden. Die elektrolytische Wasserspaltung wird insbesondere zur Erzeugung hochreinen Wasserstoffs eingesetzt und ist mit rund 5 % Anteil an der Gesamtmenge gering. Aufgeteilt nach Primärenergieträgern stammen derzeit 45 % des Wasserstoffs aus Rohöl, 33 % aus Erdgas und 15 % aus Kohle. Die restlichen 7 % stammen aus Elektrolyseverfahren.

Die bei der „nichtenergetischen“ und „indirekt energetischen“ Verwendung von Wasserstoff gewonnenen Erfahrungen mit der Herstellung, dem Transport und der sicheren Handhabung großer Wasserstoffmengen sind auch für eine zukünftige Nutzung von Wasserstoff als Energieträger von großer Bedeutung. Dies gilt insbesondere für die Wasserelektrolyse, die in einer zukünftigen Wasserstoff-Energiewirtschaft unter Umständen eines der wichtigsten Herstellungsverfahren sein wird. An einigen internationalen Standorten mit preisgünstigem Strom aus Wasserkraft werden schon seit Jahrzehnten größere Elektrolyseanlagen mit Anschlussleistungen bis zu 150 MW (entsprechend 33.000 Nm³/h Wasserstoff) betrieben.

2.1 Wasserstofferzeugung

2.1.1 Energiebereitstellung zur Wasserstoffherstellung

2.1.1.1 Fossile Quellen

Die Energie zur Wasserstoffherstellung wird in absehbarer Zukunft vorwiegend durch fossile Brennstoffe bereitgestellt werden müssen, da preisgünstige erneuerbare Energien noch nicht im ausreichenden Umfang verfügbar sind. Neben dem Einsatz von Kohle, Erdgas oder anderen Kohlenwasserstoffen in chemischen Verfahren kann auch elektrischer Strom aus fossil befeuerten Kraftwerken zur Wasserstoffherstellung genutzt werden. Um den CO₂-Ausstoß hierbei so gering wie möglich zu halten, muss eine Palette von Maßnahmen ergriffen bzw. die Forschung und Entwicklung der relevanten Kraftwerks-Technologien weiter vorangetrieben werden. Für eine möglichst CO₂-arme Energiebereitstellung gibt es folgende Ansatzpunkte:

1. Die Erhöhung des Wirkungsgrades der Kraftwerke. Dadurch wird bei gleichem Rohstoffeinsatz bzw. CO₂-Ausstoß mehr Energie bereitgestellt.
2. Die Abscheidung (Sequestrierung) von CO₂ aus dem Abgas und die anschließende Deponierung. Hierzu werden vor allem das IGCC-Verfahren (Integrated Gasification Combined Cycle) und Oxyfuel-Verfahren (Verbrennung mit reinem Sauerstoff) entwickelt.

Sowohl der genaue Stand der Technik als auch die empfohlenen Forschungsschwerpunkte sowie die zu erwartende Technologieverfügbarkeit wurden detailliert im COORETEC-Report dargelegt.

2.1.1.2 Regenerative Quellen

Erneuerbare Energien ermöglichen die Wasserstoffbereitstellung praktisch emissionsfrei und nachhaltig. Von den verschiedenen regenerativen Quellen sind für Deutschland insbesondere Wind und Biomasse relevant. Bei der Stromerzeugung aus diesen Quellen sollte aber aus Effizienzgründen der Strom vorzugsweise direkt genutzt werden.

Allerdings liegt auch ein Potential zur H₂-Erzeugung vor: Der heute schon hohe Anteil von fluktuierender Windenergieeinspeisung in das Netz führt zu hohem Regel- und Reservehaltungsaufwand. Bei einem weiteren massiven Ausbau der Windenergie on- und offshore werden sich diese Anforderungen noch verstärken. Neben der konventionellen Option des Netz- und Regelkraftwerksausbaus besteht hier die Alternative zur Produktion von Wasserstoff aus Windenergie, wenn diese nicht in das Netz eingespeist werden kann. Insbesondere könnten auf diese Weise die geplanten Offshore-Windparks zur H₂-Produktion beitragen. Auch kann die Elektrolyse als regelbare Last im elektrischen Netz genutzt werden, um die steigenden Anforderungen an Regelkapazität zu unterstützen

Biomasse ist ein weiterer potentieller erneuerbarer Energieträger zur H₂-Erzeugung. Biomasse kann entweder über konventionelle Kraftwerksverfahren in Strom und anschließend mittels Elektrolyse in H₂ gewandelt werden oder über Vergasungsprozesse direkt zur Erzeugung von H₂ eingesetzt werden. Bei dem Einsatz von Biomasse sind allerdings die konkurrierenden Nutzungen zu beachten (Nahrungsmittel und Futtermittel, Extensivierung der Landwirtschaft, Naturschutz, industrielle Nutzung). Daher ist eine fundierte Analyse der für die H₂-Erzeugung zur Verfügung stehenden Biomassepfade notwendig.

Weitere regenerative Quellen, wie Solarenergie oder Geothermie sind heute in Deutschland noch von untergeordneter Bedeutung. Bevor diese Quellen zur H₂-Erzeugung betrachtet werden, sollte deren Nutzung zur Stromerzeugung eine wirtschaftlich attraktive Größenordnung erreicht haben.

Kraftstoff für den Individualverkehr stellt im Vergleich zu anderen Nutzenergien ein Hochpreissegment dar. Bei entsprechender Förderung CO₂-freier Kraftstoffe (Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen), z. B. über geringere Steuersätze, kann ein Pull-Effekt für erneuerbare Energien ausgelöst werden, d. h. der weitere Ausbau regenerativer Ressourcen wird unterstützt.

2.1.1.3 Nukleare Quellen

Auch mit der Nutzung der Kernenergie steht im Prinzip ein CO₂-freier Energieträger zur H₂-Produktion zur Verfügung. Durch das Gesetz über die geordnete Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität, kann diese Ressource jedoch nach aktueller Sachlage in Deutschland langfristig nicht zur H₂-Erzeugung eingesetzt werden.

2.1.2 Verfahren zur Wasserstoffherzeugung

2.1.2.1 Elektrolytische Wasserstoffherzeugung

Die Herstellung von Wasserstoff über die Wasserelektrolyse mittels Strom erhöht die möglichen Ressourcen zur Wasserstoffbereitstellung erheblich, da aus nahezu allen Primärenergiequellen Strom erzeugt werden kann. Dem Anspruch der Diversifikation der Quellen zur Energieversorgung wird dadurch Rechnung getragen. Allerdings muss auch hier die Gesamtkette der Energiebereitstellung hinsichtlich Emissionen und Effizienz betrachtet werden: Bei dem Einsatz fossiler Quellen müssen die CO₂-Emissionen in geeigneter Weise reduziert werden, bei der Nutzung regenerativer Stromquellen sollte der Strom primär direkt genutzt werden, allerdings können (lokale) Überproduktionen zur H₂-Erzeugung verwendet werden. Auch bei der Regelung des elektrischen Netzes, eine an Bedeutung gewinnende Herausforderung bei zunehmender Einspeisung fluktuierender Erzeugung, kann die Elektrolyse Netzregelaufgaben übernehmen.

Wasserstoff kann aus Gleichstrom direkt durch elektrolytische Zerlegung von Wasser gewonnen werden. Wasserstoff und Sauerstoff entstehen bei der Elektrolyse als Gase hoher Reinheit (typischer Wert 99,8 %, mit Verunreinigungen aus Wasserdampf und Spuren von Sauerstoff bzw. Wasserstoff sowie Stickstoff). Elektrolysewasserstoff kann daher ohne weitere Brenngasreinigung auch in Membranbrennstoffzellen direkt für die Rückverstromung eingesetzt werden. Elektrolytische Verfahren der Wasserstoffherstellung erreichen auf Grund des modularen Aufbaus aus elektrochemischen Einzelzellen auch bei kleinen Anlagengrößen sehr hohe Umwandlungswirkungsgrade.

Drei Verfahrensvarianten der elektrolytischen Wasserstoffherstellung aus Wasser sind möglich und unterschiedlich weit entwickelt:

- Die „klassische“ und am weitesten entwickelte alkalische Wasserelektrolyse mit wässriger Kalilauge als Elektrolyt und einer Betriebstemperatur um 80 °C.
- Die Membran-Elektrolyse mit einer Protonen leitenden Membran als Elektrolyt, deren Aufbau grundsätzlich mit dem einer Membranbrennstoffzelle vergleichbar ist und die bei einer Betriebstemperatur von ebenfalls etwa 80 °C arbeitet.
- Die Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse („Hot Elly“), die von Dornier konzipiert und in ersten Labormustern betrieben wurde. Hier basiert das Grundprinzip auf der Verwendung von Sauerstoffionen-Leitern als Elektrolyt bei Betriebstemperaturen zwischen 800 und 1.000 °C, vergleichbar mit der oxidkeramischen Brennstoffzelle.

GHW entwickelt derzeit einen 30-bar-Druckelektrolyseur, in dem alle wesentlichen Druckkomponenten (Zellstapel, Abscheider) in dem Druckbehälter integriert sind. Ziel ist eine wesentlich verringerte Komplexität der Gesamtanlage und dadurch Kostenreduzierung, Effizienzsteigerung und geringerer Platzbedarf. Ein erster Prototyp ist im Testbetrieb.

Bei den Elektrolyseverfahren der chemischen Industrie (Chlor-Alkali-Elektrolyse, Salzsäureelektrolyse) wird Wasserstoff in erheblichen Mengen als Nebenprodukt freigesetzt. Durch die Weiterentwicklung dieser Verfahren wird sich aber mittel- bis langfristig die Menge des „überschüssigen“ Wasserstoffs bei diesen chemischen Prozessen deutlich verringern.

Stand und Entwicklungspotenzial der alkalischen Wasserelektrolyse

Alkalische Wasserelektrolyseure werden heutzutage vor allem für die lokale Bereitstellung von Wasserstoff für chemische Prozesse (Metallurgie, Fetthärtung, Elektronikindustrie) in Regionen eingesetzt, wo elektrische Energie zu günstigen Preisen verfügbar ist.

Die Kapazität der Anlagen erreichte Produktionsmengen von einigen 100 bis über 33.000 Nm³/h. Mit Ausnahme der von GHW und Lurgi entwickelten 30-bar-Druckelektrolyseure werden

alkalische Elektrolyseure nahe Atmosphärendruck bis zu wenigen bar Überdruck betrieben. Die Wirkungsgrade der Umsetzung von elektrischer Energie in Wasserstoff liegen bei der klassischen, alkalischen Elektrolyse zwischen 65 und 70 % (bezogen auf den oberen Heizwert des Wasserstoffs).

In den 80er Jahren wurde eine Reihe von Forschungsprogrammen mit dem Ziel durchgeführt, den Wirkungsgrad fortschrittlicher alkalischer Wasserelektrolyseure zu erhöhen. Dabei wurde festgestellt, dass die plasmatechnische Elektrodenaktivierung zu einer signifikanten Effizienzsteigerung führt, so dass inzwischen technische Wirkungsgrade von über 80 % auch im industriellen Einsatz mit nachgewiesenen Standzeiten von über 40.000 Stunden erreicht werden konnten. Im Rahmen des HYSOLAR-Projektes wurde demonstriert, dass bei optimaler Auslegung mittlere Wirkungsgrade der Wasserstofferzeugung aus fluktuierender Primärenergie von über 85 % erreicht werden können.

Alkalische Elektrolysemodule wurden in jüngster Zeit vermehrt bei internationalen Projekten zur Wasserstoffversorgung von Fahrzeugen mit dezentralen Anlagen oder mobilen Versorgungsstationen eingesetzt. Die hier erreichten Wirkungsgrade liegen jedoch deutlich unter den oben angegebenen technischen Werten.

Stand und Entwicklungspotential der Membranelektrolyse

Auch bei der Entwicklung von Membranelektrolyseuren ist die Vor-Ort-Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff ein zentrales Ziel. PEM-Hochdruckelektrolyseure mit einem Betriebsdruck von 35 MPa und einer Produktionsrate von 2,5 Nm³/h stehen am Markt bereits zur Verfügung. Zur dezentralen Versorgung von Tankstellen sind Elektrolysemodule mit 30 Nm³/h bei 40 MPa Wasserstoffdruck in der Entwicklung. Darüber hinaus wird eine weitere Druckerhöhung auf 70 MPa, der geplanten Obergrenze von Wasserstoffspeichern in Fahrzeugen, angestrebt.

Bei der sicherheitstechnischen Beherrschung von Elektrolyseuren steht die Vermeidung eines zündfähigen Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisches im Vordergrund. Mit steigendem Druck erhöht sich die Löslichkeit und Querdiffusion der Reaktionsgase im Elektrolyten und damit die Gefahr einer Gemischbildung. Auch beim Bruch der Elektrolytmembran kann dieses Problem auftreten. Aus diesem Grund ist eine sorgfältige Analyse und Zulassungsbewertung der PEM-Hochdruckelektrolyseure erforderlich.

Stand und Entwicklungspotential der Hochtemperatur-Dampfelektrolyse

Bei der Hochtemperaturelektrolyse kommt ein ähnlicher Sauerstoff-Ionen leitender Festelektrolyt wie bei der Hochtemperaturbrennstoffzelle vom Typ SOFC zum Einsatz und auch die Betriebstemperatur liegt mit 800 - 1.000 °C im gleichen Bereich. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass zur Spaltung von Wasserdampf, der auf der Kathodenseite zugeführt wird, weniger elektrische Energie benötigt wird als zur Spaltung von Wasser. Zudem kann die Verdampfungsenthalpie des Wassers thermisch zugeführt werden, was neue Energieformen erschließt, die eventuell einfacher bereitgestellt werden können (z. B. thermische Solarenergie).

Eine neue Verfahrensvariante der Hochtemperaturdampfelektrolyse im Temperaturbereich 700 – 800 °C, NGS-Verfahren genannt („Natural Gas Assisted Steam Electrolyser“), nutzt die partielle Oxidation von Erdgas auf der Anodenseite zu Synthesegas. Hierbei wird auf der Anodenseite kein Sauerstoff entwickelt, sondern dieser wird direkt für die partielle Oxidation von Kohlenwasserstoffen genutzt. Das niedrige elektrochemische Potenzial dieser „Erdgasverzehr-Anode“ ermöglicht aus thermodynamischer Sicht sehr niedrige Zellspannungen der Wasserdampfelektrolyse und damit einen hohen Wirkungsgrad. Der Realisierung des erst in Laborversuchen untersuchten NGS-Konzeptes stehen noch zahlreiche materialtechnische Probleme entgegen, die aber auch in enger Beziehung zu den Entwicklungsarbeiten für Hochtemperatur-Dampfelektrolyse oder die oxidkeramische Brennstoffzelle stehen. Beispielfhaft

seien hier die Verringerung der Betriebstemperatur auf 700–800 °C bei ausreichender Sauerstoffionenleitung und die Herstellung von homogen dichten Keramikmembranen sowie alterungsbeständiger Gasdiffusionselektroden genannt.

Systemtechnische Aspekte der Einbindung von Elektrolyseuren in elektrische Netze und bei direktem Betrieb mit fluktuierendem Stromangebot

Ein interessanter systemtechnischer Aspekt der elektrolytischen Verfahren bei der Herstellung von Wasserstoff mit elektrischer Energie ist die Möglichkeit des Lastmanagements in elektrischen Netzen oder lokal beim Verbraucher. Elektrolyseure können wie alle elektrochemischen Energiewandler nahezu verzögerungsfrei auf Lastwechsel reagieren. So können sowohl bei fluktuierenden Angebotsüberschüssen (z. B. im Zuge der längerfristig steigenden regenerativen Stromerzeugung) wie auch bei verbrauchsseitigen Nachfragedefiziten in Schwachlastzeiten Elektrolyseure mit hoher Dynamik zu Wasserstofferzeugung genutzt werden. Bei einer Kombination mit einem Wasserstoffspeicher kann ein Elektrolyseur wie ein regelbarer Stromverbraucher für das Lastmanagement eingesetzt werden. Dieses Lastmanagement kann zu einem höheren Gesamtnutzungsgrad von Kraftwerksanlagen führen, da Kraftwerksleistungen in geringerem Umfang für Regelungsaufgaben vorgehalten werden müssen.

Forschungsbedarf

Die Probleme bei der Entwicklung von Wasserelektrolyse sind naturgemäß in enger Weise mit dem Forschungsbedarf der Brennstoffzellen verbunden.

- Bei Niedertemperatur-Elektrolyseuren bietet die Reduzierung der Sauerstoffüberspannung durch bessere Sauerstoffkatalysatoren ein Verbesserungspotenzial des Wirkungsgrades um bis zu zehn Prozentpunkte.
- Bei der Systemtechnik ist es notwendig, durch stark vereinfachte Systemkonzepte (Gastrennung) deutlich kostengünstigere Elektrolyseure für z. B. on-site Produktion an Tankstellen oder den intermittierenden Betrieb, etwa in direkter Kopplung mit Windkraftanlagen zu entwickeln.
- Bei Hochtemperatur-Elektrolyseuren steht hier wie bei der SOFC die Materialentwicklung zur deutlichen Erhöhung der Betriebs- bzw. Standzeiten im Mittelpunkt.

2.1.2.2 Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen

Stand der Technik

Durch die Reaktion mit Wasserdampf lassen sich Kohlenwasserstoffe in Mischungen aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan und Kohlendioxid umwandeln. In der Technik verwendet man hierfür den Begriff der Dampfreformierung, worunter die endotherme katalytische Umsetzung mit Wasserdampf bei über 800 °C zu verstehen ist.

Aufgrund der eingesetzten Katalysatoren ist es unbedingt notwendig, saubere und rückstandsfrei verdampfbare Ausgangsstoffe zu verwenden. Als solche finden Kohlenwasserstoffe von Methan bis Benzin Verwendung.

Entwicklungspotential

Die Dampfreformierung leichter Kohlenwasserstoffe ist heute das weltweit am meisten verbreitete Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff. Dementsprechend ist die Entwicklung der Dampfreformierung hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Optimierung bereits relativ weit gediehen. Der Gesamtwirkungsgrad bestehender Anlagen liegt bei 70 - 80 %. Dennoch rechnet z. B. das U.S. Department of Energy mit einer Wirkungsgraderhöhung um einige

Prozentpunkte bzw. eine Kostenreduktion von 25 bis 30 % durch zukünftige Integration einer CO₂-Abscheidung oder durch die Verwendung verbesserter Katalysatoren.⁵

Aus energetischer und ökonomischer Sicht sind weitere Verbesserungen bei zukünftigen Anlagen vor allem durch optimale Systemintegration mit kombinierter Erzeugung von Wasserstoff, Strom und Wärme zu erwarten. Ein weiteres wichtiges Entwicklungsziel derzeitiger Optimierungsmaßnahmen ist die Reduzierung der CO-Emissionen aus der Anlage.

2.1.2.3 Partielle Oxidation von Schweröl

Stand der Technik

Schwere Kohlenwasserstoffe können mit Hilfe der partiellen Oxidation zu Wasserstoff umgesetzt werden. Dieses Verfahren wird hauptsächlich zur Wasserstofferzeugung aus Schweröl und schwefelhaltigen organischen Rückständen eingesetzt. Bei der Partialoxidation erfolgt eine exotherme Umsetzung des Schweröls mit Sauerstoff unter Zusatz von Wasserdampf. Die chemischen Reaktionen verlaufen am besten bei Temperaturen zwischen 1.300 und 1.500 °C sowie einem Druck von 30 bis 100 bar, wobei auf den Einsatz eines Katalysators verzichtet werden kann. Im Gegensatz zur Dampfreformierung stellt die partielle Oxidation keine besonderen Anforderungen an die Qualität der Rohstoffe. In der Praxis ist die partielle Oxidation von Schweröl in zwei großtechnischen Verfahren von Texaco und Shell realisiert worden.

Entwicklungspotential

Aus energetischer und ökonomischer Sicht sind weitere Verbesserungen bei zukünftigen Anlagen vor allem durch optimierte Systemintegration zu erwarten. Für die Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass sich der Brennstoffeinsatz um ca. 5 % und der Stromeinsatz um etwa 10 % reduzieren lässt, womit der Anlagennutzungsgrad von derzeit ca. 73 % auf rund 77 % steigen würde.

2.1.2.4 Vergasung von Kohle und Biomasse

Für die Erzeugung von Wasserstoff aus festen Brennstoffen wird eine Kombination von Pyrolyse und Vergasung angewandt. Die Vergasung von festen Brennstoffen zur industriellen Herstellung von Gasen ist in der Vergangenheit mit einer Vielzahl von Verfahren durchgeführt worden. Die große Zahl der Ausführungsmöglichkeiten der Reaktoren rührt aus der großen Anzahl der Einflussfaktoren, die der Prozessgestaltung viel Spielraum bieten.

Die Vergasungstechniken lassen sich nach folgenden Kriterien unterscheiden:

- externe und interne Wärmeerzeugung (allothermer oder autothermer Vergaser)
- Kontakt zwischen Oxidationsmittel und Brennstoff (Festbett, Wirbelbett und Flugstrom)
- Richtung der Massenströme von Brennstoff und Vergasungsmittel (Gleich-/Gegenstrom)
- Vergasungsmittel (Luft, Sauerstoff, Wasserdampf oder eine Mischung)

Stand der Technik bei der Vergasung von Festbrennstoffen

Mit der Konversion der Festbrennstoffe zu Wasserstoff ist der Verfahrensweg, nämlich die Hochtemperaturvergasung (Wirbelschicht- und Flugstromreaktor) zur Erzeugung eines Synthesegases, aus dem mittels konventioneller bzw. verfügbarer Technik Wasserstoff hergestellt werden kann, weitgehend festgelegt. Dies bedeutet, Festbettvergaser sind für die Wasserstofferzeugung nicht geeignet.

⁵ U.S. Department of Energy: Hydrogen Program 2000

Entwicklungspotential der Vergasung von Festbrennstoffen

Im Rahmen eines umfangreichen Projekts der VEBA OEL AG wurde in den Jahren 1989 bis 1994 die Konversion von festen Brennstoffen zum Energieträger Wasserstoff verfolgt. Hierbei wurden geeignete Vergasungsverfahren entwickelt und z. T. in technischem Maßstab erprobt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen, die größtenteils auf Simulationsrechnungen beruhen, versprechen ein beachtliches Optimierungspotential hinsichtlich der Effizienz.

Bei optimierten prozesstechnischen Abläufen lässt sich mit den analysierten Verfahren ein Nutzungsgrad der Wasserstofferzeugung von bis zu 70 % erzielen. Entscheidenden Einfluss auf die energetische Effizienz einer Vergasungsanlage hat die Nutzung der entstehenden Abwärme. Das heiße Rohgas muss nach heutigem Stand der Technik z. B. in einem Rauchrohrkühler abgekühlt werden. Die Wärmeenergie kann zur Erzeugung von Prozessdampf genutzt werden, wofür jedoch geeignete Wärmeabnehmer notwendig sind.

2.1.2.5 Kvaerner-Prozess

In einem Plasma-Bogen können Kohlenwasserstoffe bei Temperaturen von 1.600 °C mittels Elektrizität in Wasserstoff und hochreinen Kohlenstoff verwandelt werden. Aufgrund der besonderen Verfahrensbedingungen treten hierbei keine direkten Kohlendioxid-Emissionen auf. Eine Pilotanlage zu diesem Kvaerner-Prozess genannten Verfahren produziert aus 1.000 Nm³/h Erdgas 500 kg/h Kohlenstoff und 2.000 Nm³/h Wasserstoff, wobei 2.100 kWh elektrischen Stromes eingesetzt werden müssen. Der Gesamtwirkungsgrad liegt damit bei ca. 50 %.

2.1.2.6 Sonstige Verfahren

Thermochemische Wasserstofferzeugung

Bei Temperaturen über 2.200 °C beginnt der thermisch aktivierte Zerfall von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Durch Einkopplung von Wärme auf sehr hohem Temperaturniveau kann somit im Prinzip Wasserstoff direkt aus Wasserdampf hergestellt werden. Das grundsätzliche und bisher ungelöste Problem ist, neben der technischen Beherrschung der notwendigen Arbeitstemperatur, die Abtrennung von Wasserstoff bei diesen hohen Temperaturen.

Eine Absenkung der Temperatur der thermischen Wasserspaltung auf unter 900 °C kann über gekoppelte chemische Reaktionen erreicht werden. Bereits in den 70er Jahren wurden für die Einkopplung der Wärme von Hochtemperaturreaktoren verschiedene thermochemische Kreisprozesse vorgeschlagen, die zum Teil auch für die Nutzung konzentrierter Solarstrahlung geeignet sind. Die höchsten Systemwirkungsgrade sowie das größte Potenzial für Verbesserungen weist aus heutiger Sicht ein verbesserter Schwefelsäure-Jod-Prozess auf: Jod und Schwefeldioxid reagieren bei 120 °C mit Wasser zu Jodwasserstoff und Schwefelsäure. Nach der Separation der Reaktionsprodukte wird Schwefelsäure bei 850 °C in Sauerstoff und Schwefeldioxid gespalten, aus Jodwasserstoff entsteht bei 300 °C Wasserstoff und das Ausgangsprodukt Jod. Den hohen thermischen Wirkungsgraden der thermochemischen Kreisprozesse (bis zu 50 %) müssen die heute noch weitgehend ungelösten material- und verfahrenstechnischen Schwierigkeiten gegenübergestellt werden.

Grundlegende Entwicklungsarbeiten hierzu werden derzeit im Rahmen des 5. und 6. Rahmenprogramms der EU-Forschungsarbeiten zur thermochemischen Wasserstoffherstellung durchgeführt. Dabei werden sowohl Verfahren zur Nutzung von Abwärme aus Hochtemperaturreaktoren, als auch der Einsatz konzentrierter Solarstrahlung untersucht. Auch wenn die zeitliche Perspektive dieser Verfahren weit in die Zukunft reicht, sind die hier zu lösenden grundlegenden Probleme von erheblicher Bedeutung. Verfahrenstechnische Fragen der Hochtemperaturtechnik und die Lösung von Materialproblemen sind wie die Entwicklung von

Hochtemperatur-Separationsprozessen für Wasserstoff auch in anderen energietechnischen Bereichen wie etwa Kohle- oder Biomassevergasung von Relevanz.

Photochemische Umwandlung

Neben der Nutzung von Solarenergie in thermochemischen Prozessen wird die Möglichkeit erforscht, Wasserstoff über photochemische Reaktionen zu erzeugen. Der Grundgedanke besteht darin, die Solarstrahlung direkt zu nutzen, indem energiereiche Photonen von Reaktanden absorbiert werden. Hierzu sind Halbleitermaterialien notwendig, deren Energielücke so groß ist, dass durch die Aufnahme von Lichtquanten dem Wasser Elektronen entzogen werden können, was zur Wasserspaltung führt.

Durch den Einsatz von Photokatalysatoren sollen die dabei angeregten Umwandlungsprozesse erleichtert bzw. ermöglicht werden. Das Hauptproblem liegt darin, dass die photoaktiven Materialien katalytisch hochaktiv und gleichzeitig im Kontakt mit Wasser langfristig stabil sein müssen. Langfristig erscheint auch die Kombination von photo- und thermochemischen Verfahren Erfolg versprechend.

Biologische Wasserstoffgewinnung

Eine ebenfalls in einem frühen Forschungsstadium befindliche Technik ist die biologische Wasserstoffgewinnung, bei der Wasserstoff von Mikroorganismen in biologischen Prozessen erzeugt wird. In den Jahren 1989 bis 1994 wurde in Deutschland zu diesem Themenkomplex ein umfassendes Forschungsprogramm bearbeitet. Auch wenn derzeit noch keine Konkurrenzfähigkeit mit den etablierten Methoden der Wasserstofferzeugung gegeben ist, erlaubt der erreichte Kenntnisstand, biologische Wasserstoffproduktion im Labormaßstab darzustellen und Optimierungsstrategien im Experiment auszuloten.

Der zentrale Schritt aller Verfahren zur biologischen Wasserstofferzeugung ist die enzymatische Umsetzung von Protonen und Elektronen zu molekularem Wasserstoff. Die hierfür möglichen Stoffwechselwege lassen sich in drei Verfahren unterteilen: Die biophotolytische Wasserstofferzeugung durch Grünalgen, die Photoproduktion von Bakterien und die Vergärung von Biomasse.

Ausgangsprozess der **Biophotolyse** ist die Photosynthese, bei der Wasser mit Hilfe des Sonnenlichts in Sauerstoff, Protonen und Elektronen aufgespaltet wird (Wasserspaltung). Normalerweise werden anschließend die dabei freiwerdenden Elektronen gemeinsam mit dem in der Luft vorhandenem Kohlendioxid zum Aufbau von Biomasse verwendet. Bestimmte Grünalgen und Cyanobakterien sind aber auch in der Lage, die Elektronen auf Protonen zu übertragen und damit molekularen Wasserstoff zu bilden. Der große Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass als Ausgangsmaterial nur Wasser benötigt wird. Das ist einerseits von besonderem Interesse für die Realisierung technischer Verfahren und eröffnet andererseits neue Perspektiven, ohne Freisetzung von CO₂ nur mit Hilfe von Wasser und Sonnenenergie Wasserstoff zu produzieren.

Im Gegensatz dazu benötigen **phototrophe Bakterien** (Purpurbakterien) ein Nährmedium aus organischen Stoffen. Diese zur Gruppe der anoxygenen phototrophen gehörenden Bakterien sind in der Lage, die aus geeigneten organischen Verbindungen (beispielsweise Biomasse) gewonnenen Protonen zu reduzieren und in Form von gasförmigem Wasserstoff abzugeben. Mit Purpurbakterien lassen sich derzeit unter optimierten Bedingungen pro Kilogramm Biomasse Produktionsraten von rund 150 l H₂ pro Stunde erzielen, was einer Umsetzung von etwa 70 % des theoretischen Maximums entspricht.

Sehr Erfolg versprechend scheint die Kombination von Algen und Purpurbakterien in einem Verbundreaktor zur Wasserstoffproduktion zu sein. In einem zweistufigen Prozess wird von den Grünalgen nach dem Photosyntheseprozess zunächst CO₂ gebunden und Kohlenhydrat aufgebaut, das von den Purpurbakterien in der zweiten Stufe zu CO₂ und H₂ umgesetzt wird. In

einem geschlossenen CO₂-Kreislauf stellt die erste Stufe sozusagen den Nährstoff für den zweiten Prozess bereit, in dem der Wasserstoff produziert wird. In der Summe wird so aus Wasser und Sonnenlicht Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt.

Anders als die bisher beschriebenen biologischen Erzeugungsverfahren von Wasserstoff können **Vergärungsprozesse** unabhängig von Sonnenlicht ablaufen. Dabei wird mit Hilfe von Mikroorganismen aus energiereichen organischen Substanzen Wasserstoff erzeugt. Für eine verfahrenstechnische Umsetzung haben Gärungsprozesse den großen Vorteil, dass sie sehr einfach etabliert werden können und ohne großen technischen Aufwand in geschlossenen Gefäßen ablaufen können. Zudem kann eine Vielzahl verschiedenster organischer Einsatzstoffe für die Wasserstoffproduktion genutzt werden.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit von Vergärungsprozessen besteht darin, dass neben der Umsetzung von Zucker zu H₂ und CO₂ in der Realität ein erheblicher Anteil an organischen Säuren, Alkoholen und letztlich Methan gebildet wird, so dass die Ausbeute an Wasserstoff gering bleibt. Aufgabe der weiteren Forschung muss es demnach sein, neben dem Verständnis der ablaufenden Prozesse auch weiterhin die Suche nach geeigneten thermophilen Bakterien zu verfolgen und die für die Wasserstoffproduktion optimalen Rahmenbedingungen zu erforschen.

Tabelle 2-1: F&E-Bedarf im Bereich H₂-Erzeugung

Verfahren	F&E Bedarf	Kostenreduktion und Serienfertigung
Elektrolyse Hochdruckelektrolyse Hochtemperaturelektrolyse	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Druckniveaus • Integrierte Konzepte • Werkstoffe, Katalysatoren • Wirkungsgrade 	
Dampfreformierung	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine Reformer • H₂-Qualität • Werkstoffe, Katalysatoren • Teillastverhalten 	
Kohlevergasung und partielle Oxidation		
Biomassevergasung	<ul style="list-style-type: none"> • Verfahrensoptimierung • Werkstoffe • H₂-Qualität 	
Kvaerner-Verfahren		
Sonstige Verfahren Thermochemische Erzeugung Photochemische Verfahren Biologische Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagenforschung 	

2.2 Wasserstofflogistik

2.2.1 Gasförmiger Wasserstoff

2.2.1.1 Kompression

Die Wasserstoffverdichtung erfolgt in Analogie zur Erdgasverdichtung. Es können teilweise sogar dieselben Kompressoren verwendet werden, sofern man die Dichtigkeit durch für Wasserstoffgas (GH_2) geeignete Dichtungen (z. B. Teflon) sicherstellt und die Ölfreiheit des komprimierten Gases gewährleistet ist. Somit ist die Technik ausreichend erprobt und verfügbar.

Neuentwicklungen befassen sich vor allem mit einer Optimierung der Aggregate im Gesamtzusammenhang, wobei primäre Anwendungen die Hochdruckverdichtung an Tankstellen verfolgen. Typische Druckniveaus liegen bei 3 bis 4 MPa der Vorverdichterstufe zur Befüllung eines Sammel tanks, sowie zur Verdichtung auf bis zu 80 MPa zur Befüllung des Speichers einer Schnellbetankungseinrichtung, wobei die Schnellbetankung durch Überströmen auf ein Tankdruckniveau von ca. 70 MPa erfolgt. Die Wahl des oberen Druckniveaus hängt dabei primär vom max. zulässigen Befülldruck des Wasserstoffspeichers ab.

Der Wirkungsgrad heutiger Wasserstoffverdichter liegt bei ca. 80 %. Aufgrund des logarithmischen Zusammenhangs von Druck und Verdichtungsarbeit erhöht sich der energetische Mehraufwand bei höherem Befülldruck nur unwesentlich. So verbraucht z. B. die Verdichtung von 0,1 auf 30 MPa nur etwa 10 % mehr Energie als die Verdichtung von 0,1 auf 20 MPa.

Alle gängigen Erdgasverdichter können mit kleinen Adaptionen auch für eine Wasserstoffverdichtung genutzt werden. Daher ist das ganze Spektrum von kleinen Verdichtern mit einem Durchsatz von einigen Nm^3/h bis zu einigen hundert Nm^3/h verfügbar. Primär kommen Verdichter für einen Einsatz zur Befüllung von stationären Hoch- (70 - 80 MPa) oder Niederdruckspeichern (1 - 5 MPa) in Betracht, wobei die Auslegung des oberen Druckniveaus erst im Verwendungszusammenhang festgelegt werden kann.

2.2.1.2 Pipeline-Ferntransport

Prinzipiell lässt sich Wasserstoff, wie heute bereits Erdgas, in Pipelines über weite Strecken, z. B. von Erzeugungsstandorten im Sonnengürtel zu den Verbrauchszentren in Zentraleuropa, transportieren. Zwei Besonderheiten sind beim Transport von Wasserstoff zu beachten: Die Dichte von Wasserstoff beträgt nur etwa ein Zehntel der von Erdgas. Dadurch ergibt sich bei gleichem Volumenstrom nur etwa ein Zehntel der Transportverluste im Vergleich zu Erdgas. Jedoch besitzt gasförmiger Wasserstoff nur rund ein Drittel der Energiedichte von Erdgas. Um also die gleiche Energiemenge zu transportieren, ist der dreifache Volumenstrom erforderlich.

Stand der Technik

Für den Ferntransport von Erdgas werden heute Rohrleitungen mit Nenndurchmessern bis 1.420 mm und Drücken bis 80 bar verwendet. Damit könnte eine jährliche Transportkapazität von bis zu 84 Mrd. m^3 Wasserstoff bereitgestellt werden. Die Rohrwandstärke beträgt üblicherweise 20 mm der Stahlqualität X70. Je nach Einsatzort kommen auch höherwertigere Stähle zum Einsatz. Zum Ausgleich der Druckverluste sind in regelmäßigen Abständen Verdichterstationen notwendig. Der Wirkungsgrad eines für den Pipelinetransport notwendigen Wasserstoffverdichters für die Verdichtung von 30 auf 80 MPa liegt heute bei ca. 80 %.

Entwicklungspotential

Die Entwicklung im Pipelinebau geht weiter zu höheren Rohrdurchmessern, höheren Betriebsdrücken und zu effizienteren Verdichterstationen auf Basis von Kombiprozessen. Der Einsatz dieser neuen Techniken ist jedoch derzeit aufgrund der mit der bestehenden Infrastruktur erreichten Versorgungssicherheit für Erdgas aus wirtschaftlichen Gründen nicht notwendig. Anders verhält sich die Situation beim Aufbau einer großtechnischen Wasserstoffversorgung, weil hier mit weitaus größeren Gasmengen gerechnet werden muss als bei der derzeitigen Erdgasversorgung. So ist damit zu rechnen, dass in einer Wasserstoff-Energiewirtschaft mit Rohrdurchmessern bis zu 1.600 mm und Betriebsdrücken bis zu 120 bar gearbeitet werden wird.

Durch das hohe Volumen der Pipeline ist es möglich, dass darin etwa der Gasinhalt eines Volllasttages gespeichert wird. Die Absenkung des Druckniveaus während der Nacht und Anhebung während des Tages kann so ausgeglichen werden, dass bei solar erzeugtem Wasserstoff die Pipeline nur während der Hellstunden gespeist wird. Auch ohne Verwendung zusätzlicher Speicher kann der Pipeline in Deutschland immer Wasserstoff entnommen werden. Diese Art der gleitenden Betriebsweise hat sich bereits in der Erdgasfernversorgung zum Ausgleich von Lastspitzen bewährt.

2.2.1.3 Verteilung mit Leitungsnetz

Wasserstoff lässt sich analog zu Erdgas über ein lokales Leitungsnetz verteilen. Im Gegensatz zum Erdgasnetz gibt es zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine leitungsgebundene Infrastruktur für eine flächendeckende Verteilung von Wasserstoff. Für eine zukünftige Wasserstoff-Energiewirtschaft ist es denkbar und nahe liegend, für Wasserstoff ebenso wie für Erdgas ein Verteilnetz zu betreiben, das zu einem geringen Teil durch Neubau und zu einem größeren Teil durch Umwandlung von dann nicht mehr benötigten Erdgasleitungen entstünde. Aufgrund der geringeren Dichte von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas wären allerdings besondere Vorkehrungen bezüglich der Dichtigkeit von Leitungen und Apparaturen zu treffen.

Ebenso wie das Erdgasnetz gliedert sich das Netz in überregionale Verteilung, regionale Verteilung und Ortsgasversorgung. Aus dem überregionalen Netz steht das Gas mit einem Druck von rund 70 bar zur Verfügung, womit das Gas bis zum Endverbraucher transportiert werden kann. Im regionalen Netz und im Ortsgasnetz, die über Drosseln und Entspannungsmaschinen zur Druckreduzierung an das überregionale Netz angebunden werden können, wären zusätzlich zur Nutzung der Rohratmung auch Gasspeicher zur Bezugsoptimierung notwendig. Im regionalen Netz wären Verdichterstationen für die Druckhaltung in Höchstlastzeiten zu installieren, deren Energiebedarf durch den Betrieb von Entspannungsturbinen teilweise kompensiert werden könnte. Da Wasserstoff nur rund ein Drittel der Energiedichte von Erdgas besitzt, ist zur Beibehaltung des gleichen Energiestroms der Volumenstrom zu verdreifachen, womit sich auch der erforderliche Verdichtungsaufwand entsprechend erhöht. Aufgrund der geringeren Dichte von Wasserstoff ist auch mit einem Anstieg der Leckagen in den verschiedenen Netzebenen und in Speichern zu rechnen.

Größere Wasserstoff-Pipelinesysteme existieren bereits an ausgedehnten Chemiestandorten in Belgien, Brasilien, Deutschland, Frankreich, Thailand und den USA. Von den insgesamt etwa 2.000 km Leitungslänge werden in Deutschland etwa 240 km im Ruhrgebiet und etwa 100 km in Leuna-Merseburg betrieben. Diese Pipelines verfügen weltweit über unterschiedliche Querschnitte und Druckniveaus (von rund 10 bar bis 300 bar). Ihr Sicherheitsstandard ist ausgezeichnet und hat sich in der industriellen Anwendung bewährt.

2.2.1.4 Wasserstoffgas-Tankstelle

Das GH_2 -Tankstellenkonzept beruht darauf, dass GH_2 in verdichteter Form gespeichert ist, so dass es während des Tankvorgangs nur noch in den Drucktank des Fahrzeugs umgefüllt werden muss. Hauptkomponenten einer GH_2 -Tankstelle sind somit der Verdichter, der Druckspeicher und die eigentliche Zapfsäule. Zusätzlich sind eventuell Filter- und Reinigungsanlagen zur Gaskonditionierung notwendig.

Der Kompressor ist üblicherweise mehrstufig ausgeführt und muss aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff erhöhten Dichtigkeitsanforderungen genügen. Die Druckspeicher werden in mehreren Speicherbänken ausgeführt, so dass der Verdichter kontinuierlich in die Speicher einspeisen kann, während aus einer anderen Speicherbank GH_2 entnommen wird. Die Kompression des Wasserstoffs erfolgt auf einen Druck von bis zu 800 bar, so dass der Wasserstoff zur Betankung der Fahrzeuge in deren Druckbehälter auf einen Druck von 700 bar entspannt werden kann.

Der Aufbau einer GH_2 -Tankstelle ist vergleichbar mit dem von Erdgas-Tankstellen, allerdings ergeben sich Unterschiede in der technischen Ausführung aufgrund der abweichenden physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff und Erdgas. Die Versorgung einer GH_2 -Tankstelle kann entweder durch Eigenerzeugung vor Ort (Elektrolyse, Erdgas-Reformierung) oder zukünftig, analog zu heutigen Erdgas-Tankstellen, durch Anschluss an ein GH_2 -Leitungsnetz erfolgen.

2.2.2 Flüssigwasserstoff

Der besondere Vorteil von Flüssigwasserstoff (LH_2) liegt in seiner hohen volumenbezogenen Energiedichte von rund 2,36 kWh/l, was ihn insbesondere für mobile Anwendungen interessant macht.

2.2.2.1 Verflüssigung

Zur Verflüssigung muss Wasserstoff auf etwa -253 °C abgekühlt werden. Hierzu wird das zu verflüssigende Gas in mehreren Stufen z. B. mit flüssigem Stickstoff bis etwa 80 K vorgekühlt, bis eine Temperatur erreicht ist, in der der Joule-Thomson-Effekt zum Tragen kommen kann. Die weitere Abkühlung bis zur Verflüssigungstemperatur erfolgt dann in mehreren Stufen. Bei der Entspannung auf Verflüssigungstemperatur wird nur ein Teil des Gasstromes flüssig. Das Restgas wird zur Kühlung einer vorgelagerten Stufe verwendet und anschließend wieder komprimiert. Zur beschleunigten Umwandlung von Ortho- in Parawasserstoff müssen Katalysatoren eingesetzt werden.

Bei der Verflüssigung von Wasserstoff muss dem Gas eine Wärmemenge von 0,97 kWh/kg, die Kondensationsenthalpie von 0,13 kWh/kg und die Energieabgabe der Ortho-Para-Umwandlung von 0,2 kWh/kg entzogen werden. Der theoretische Mindestenergiebedarf einer Verflüssigungsanlage liegt aber wegen des Carnot-Wirkungsgrads des idealen Kreisprozesses wesentlich höher und beträgt je nach Prozessführung und Rahmenbedingungen von 3,36 kWh/kg bis 4,42 kWh/kg.

Stand der Technik

Industriell eingesetzte Verflüssigungsanlagen basieren z. B. auf dem Claude-Verfahren: Hier wird die für den Prozess erforderliche Kälte auf drei Temperaturniveaus durch Stickstoff (80 K), Expansionsturbinen (80 - 30 K) und eine Joule-Thomson-Entspannung (30 - 20 K) erzeugt. Die Ortho-Para-Umwandlung wird mittels Katalysatoren bei vier verschiedenen Temperaturniveaus durchgeführt. Die Verflüssigungsleistung solcher Anlagen liegt bei ca. 4.300 kg/d (entsprechen ca. 2.000 Nm^3/h) und der spezifische Strombedarf liegt bei 13,4 kWh/kg.

Entwicklungspotential

Für eine zukünftige großtechnische Wasserstoffherzeugung sind die bestehenden Anlagen um den Faktor 20 bis 30 zu klein. Bei entsprechend größeren Anlagen, ausgestattet mit der heute verfügbaren Technik, ist mit einer Absenkung des spezifischen Strombedarfs auf etwa 10,5 kWh/kg zu rechnen. Durch Optimierung der Kältekreisläufe, Einsatz magnetokalorischer Kälteprozesse und Verlagerung der Ortho-Para-Umwandlung auf höhere Temperaturniveaus mittels elektromagnetischer Katalysatoren besteht weiteres Optimierungspotenzial von ca. 20 %.

2.2.2.2 Schiffsfernttransport

Soll LH₂ per Schiff in großem Umfang und über weite Entfernungen transportiert werden, ist ein integriertes Konzept für eine Wasserstoff-Infrastruktur erforderlich. Dabei sind drei Stufen zu unterscheiden:

- das Beladen der Schiffe mit LH₂ (Verladung)
- der Schiffstransport
- das Entladen und Zwischenspeichern im Zielhafen

Verladung

Beim Umschlag von Liquefied Natural Gas (LNG) wird das Flüssiggas heute mit Tauchpumpen, die innerhalb des Tanks angeordnet sind, an Land gepumpt. Derartige Pumpen stehen für Wasserstoff, insbesondere in dem für den schnellen Umschlag erforderlichen Leistungsbereich, nicht zur Verfügung. Hinzu kommt, dass der Energieeintrag in die Flüssigkeit mit anwachsender Umschlagrate erheblich zunimmt und jede Energiezufuhr zu einer Flüssigkeit in der Nähe ihres Siedepunktes zu einer unerwünschten Verdampfung führt. Aus diesen Überlegungen ergibt sich das Konzept, die LH₂-Tanks nicht fest in das Schiff einzubauen, sondern auch an Land als Speichertanks zu verwenden. Dadurch werden Umschlag und Entnahme bzw. Befüllen des LH₂ entkoppelt. Gleichzeitig werden zwei Pumpvorgänge mit ihren unvermeidlichen Verlusten eingespart und der Einsatz von Schiff und Tank lässt sich flexibler gestalten. Im Rahmen des Euro-Quebec-Hydro-Hydrogen-Pilot-Projekts (EQHHPP) wurde festgestellt, dass sich die Boil-off-Verluste bei der Befüllung der Speicher und beim Verladen der Tanks völlig vermeiden lassen.

LH₂-Schiffstransport

Der Transport von flüssigen Gasen wie LNG ist Stand der Technik. Die bei LNG angewendeten Transportkonzepte sind auf den LH₂-Transport jedoch wegen der niedrigeren Verflüssigungstemperatur von 20 K nicht bzw. nur bedingt anwendbar. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Euro-Quebec-Projektes und von BMBF-Vorhaben zwei verschiedene Konzepte zum LH₂-Schiffstransport erarbeitet:

In EQHHPP wurden zum Transport von LH₂ schwimmfähige Barge vorgesehen, auf denen die Tanks montiert sind. Die Tanks werden mit einem Dockschiff transportiert, das fünf dieser Barge aufnehmen kann. Da die Tankbarge auch die Funktion der landseitigen Speicherbehälter übernehmen sollen, müssen diese in die dortige Infrastruktur integriert werden.

Für den zukünftigen großtechnischen Wasserstofftransport bietet sich als Alternative das SWATH-Schiffs-Konzept an. SWATH steht für Small Waterplane Area Twin Hull. Charakteristisch für dieses Schiffskonzept sind die beiden Schwimmkörper des mehr als 300 m langen Schiffes. Diese tragen fünf Kugeltanks, in denen insgesamt 115.000 m³ Flüssigwasserstoff transportiert werden können. Die Tanks sind einzeln auf Plattformen installiert, die seitlich überstehen, damit sie von der Außenseite her vom Schiff getrennt werden können. Der Vergleich eines Wasserstoffgroßtankschiffes vom SWATH-Typ mit einem großen Öltankschiff zeigt, dass bei gleicher Schiffsgröße mehr als das doppelte Tankvolumen und ein vielfaches an Masse mit dem Öltanker transportiert werden können. Ein Rohöltanker kann trotz der hohen Energiedichte des Flüssigwasserstoffes rund die 9-fache Energiemenge transportieren. Daraus

ergibt sich, dass bei einem nennenswerten Anteil von Wasserstoff an der Energieversorgung mit einem hohen Transportvolumen und damit Verkehrsaufkommen gerechnet werden muss.

Um Verluste des Schiffstanks aufgrund wiederholter Abkühlung zu vermeiden, wird das Schiff während der Rückreise zum Verladehafen auf tiefer Temperatur gehalten. Dazu verbleibt immer ein Rest von LH₂ im Tank, so dass die tatsächliche Transportkapazität rund 5 % unter der Nennkapazität liegt.

2.2.2.3 Verteilung mit LH₂-LKW

So genannter „Merchant Hydrogen“, also Wasserstoff, der frei in den Handel kommt und nicht in Industriekomplexen sofort wieder verbraucht bzw. über Pipelines an andere Verbraucher geleitet wird, wird per Bahn, meistens aber per Sattelschlepper zum Kunden geliefert. Als Sattelaufleger kommen dabei Druckspeicher-Röhren (200 bar), Flaschenbündeln (200 oder 300 bar – 300 bis 530 kg H₂ je Ladung) oder kryogene Flüssigwasserstoffspeicher mit einem maximalen Transportvolumen von 53.000 l (entsprechend 3.400 kg H₂) zum Einsatz. Auf den öffentlichen Straßen in Deutschland werden so jährlich über 200 Mio. Nm³ Wasserstoff transportiert.

2.2.2.4 LH₂-Tankstelle

Eine LH₂-Tankstelle verfügt im wesentlichen über die gleichen Anlagenkomponenten wie eine konventionelle Tankstelle, die Hauptkomponenten sind der LH₂-Speicher, die Zapfsäule und die dazwischen liegenden Armaturen und Leitungen. Dabei müssen alle Komponenten einer LH₂-Tankstelle mit einer besonderen Wärmeisolierung versehen sein. Tanksysteme nach dem heutigen Stand der Technik ermöglichen einen für Kunden akzeptablen Betankungsvorgang für 100 l LH₂ in zwei Minuten und auch die schnelle Abfolge mehrere Betankungen hintereinander ist möglich.

2.2.3 Druckspeicher und Flüssigwasserstoff-Speicherung

2.2.3.1 Druckspeicher

Je nach Verwendungszweck unterscheiden sich Druckspeicher für gasförmigen Wasserstoff grundsätzlich in ihrer Art und Größe. Dabei wird üblicherweise differenziert nach stationären Großspeichern, stationären Kleinspeichern und mobilen Speichern.

Stationäre Großspeicher

Zur Speicherung von gasförmigem Wasserstoff in Großspeichern können ausgesolte Salzkavernen oder ausgeförderte Gas- und Öllagerstätten verwendet werden. Im Vergleich zur Erdgasspeicherung ist allerdings mindestens mit einer Verdoppelung der spezifischen Speicherkosten zu rechnen, da bei gleichem Energieinhalt das dreifache Speichervolumen bereitgestellt werden muss. Die bei Drücken von bis zu 50 bar (Salzkavernen) betriebenen Speicher besitzen typischerweise Speicherkapazitäten von einigen Mio. bis hunderten Mio. Nm³.

Dezentrale Druckspeicher

Für eine dezentrale Speicherung bieten sich Druckbehälter an, wie sie auch für die Speicherung von Erdgas verwendet werden. Je nach Anwendungsfall und Dimensionierung werden hierfür ortsfeste Speicherbehälter (Druckröhrentanks, stehende oder liegende Tanks, Kugelbehälter) verschiedener Größe eingesetzt. Die geometrischen Volumen von Tankanlagen reichen von 5 bis rund 100 m³, worin Wasserstoff bis zu einem Druck von 800 bar gespeichert wird.

Mobile Druckspeicher

Für den mobilen Einsatz werden Druckspeicher aus Aluminium/CFK-Behälter eingesetzt. Die geometrischen Volumina dieser Tanks reichen von 50 bis etwa 400 Liter, wobei je nach Anwendungsfall meist mehrere Einzelbehälter zu einer Speicherbatterie zusammengeschaltet sind.

Mit den derzeit in vielen H₂-Pkw-Prototypen verwendeten 350 bar Drucktanks aus Verbundwerkstoffen sind heute Reichweiten von ca. 150 km möglich. Erst mit weiter optimierten 700-bar-Tanks lässt sich mit einer Wasserstoff-Tankfüllung eine für den Kunden akzeptable Reichweite von über 600 km erreichen.

2.2.3.2 Flüssigwasserstoff-Speicherung

Stationäre Speicher

Die Speicherungstechnik von flüssigem Wasserstoff ist heute insbesondere aufgrund intensiver Anwendungen in der Raumfahrt Stand der Technik. Die Speicherung erfolgt dabei vor allem in Lagertanks mit Perlit-Vakuumisolierung. Derartige Tanks gibt es in großer Zahl in den USA, den größten dieser Art in Cape Canaveral bei der NASA. Er hat ein Speichervolumen von etwa 3.800 m³ (ca. 270 t LH₂). Bei einem äußeren Kugeldurchmesser von ca. 20 m lässt sich damit eine Abdampftrate unter 0,03 % pro Tag erreichen. Dies würde eine Speicherdauer über mehrere Jahre erlauben. Gegenüber Druckgasspeichern lassen sich für große Wasserstoffmengen günstigere Speicherkosten erreichen.

Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff in kleineren Stand- bzw. Transportbehältern bis herab zu etwa 100 l ist heute in ähnlicher Weise Stand der Technik wie bei flüssigem Helium. Größere Behälter werden zum Teil auch in Perlit-Vakuumisolierung ausgeführt, während kleinere Speicher stets mit Superisolierung und kontinuierlicher Abgaskühlung versehen sind. Vakuumsuperisolierte Tanks erreichen Abdampfraten in der Gegend von 0,4 % pro Tag, große Tanks mit Vakuumpulverisolierung haben je nach Geometrie Verluste von 1 – 2 % pro Tag. Übliche Standtanks reichen von etwa 1.500 l Inhalt (ca. 1.100 Nm³) bis 75.000 l (ca. 60.000 Nm³).

Die Entwicklung geht vor allem dahin, kostengünstige Isolationsmaterialien und Produktionsmethoden zu finden.

Mobile Speicher

In Deutschland wurden im Zusammenhang mit den Aktivitäten für Wasserstofffahrzeuge mobile Kleinspeicher entwickelt. Heute sind entsprechende Tanks für Pkw (eingebaut in den Versuchsfahrzeugen von BMW) und für Busse (eingebaut im MAN-BUS SL 202) als Einzelstücke verfügbar, wobei der Bustank aus drei identischen Einzeltanks mit elliptischem Querschnitt von jeweils 190 l Fassungsvermögen besteht (dies entspricht einem Energieinhalt von 450 kWh oder 150 Nm³). Es werden Energiedichten von 4,5 kWh/kg bzw. 2,13 kWh/l erreicht. Die Tanks bestehen aus bis zu 200 - 300 Lagen dünner Isolierfolien (Multi Layer Insulation, MLI). Damit werden Abdampfraten um 1 % pro Tag erreicht. Der verdampfende Flüssigwasserstoff führt zu einem Druckanstieg im Behälter, bis sich das Sicherheitsventil öffnet. Die sog. "Haltezeit", d. h. die Zeit, bis sich das Sicherheitsventil öffnet, liegt bei Fahrzeugtanks typischerweise im Bereich zwischen drei und fünf Tagen.

2.2.4 Hydridspeicher und Speicherung in neuen Materialien

Eine weitere Methode der Wasserstoffspeicherung besteht darin, Wasserstoff mit Hilfe von speziellen Metall-Legierungen, die ein Hydrid bilden, chemisch zu speichern. In Metall-Legierung können derzeit bis zu 1,8 Gew.-% Wasserstoff gespeichert werden, was einer Speicherdichte von etwa 0,6 kWh/kg entspricht. Der hohe Aufwand für Gehäuse und sonstige Einrichtungen zur Druck- und Temperaturregelung reduziert die erreichbare Speicherdichte des Gesamtsystems jedoch deutlich um bis zu 50 %.

Ausgehend von einem Hochtemperaturhydrid werden durch Zulegieren von anderen Komponenten und Ausbildung nanokristalliner Gefüge neue Werkstoffe für die reversible Speicherung von Wasserstoff bei Temperaturen unter 200 °C entwickelt. Zusätzliche Verbesserungen sollen durch die Anwendung von Leichtbauwerkstoffen für das Speichergehäuse erreicht werden, so dass eine Speicherdichte von mindestens 0,7 kWh/kg bzw. 2,5 kWh/l möglich wird.

Wesentlicher Nachteil dieser Speichertechnologie ist die geringe erreichbare gravimetrische Speicherdichte. Ein Vorteil von Hydridspeichern besteht darin, dass der Speichervorgang selbst nicht verlustbehaftet ist. Energetische Aufwendungen fallen nur für die Temperierung an, wenn zum Entladen Wärme zugeführt werden muss. Diese Verluste können reduziert werden, indem die beim Laden anfallende Wärme zwischengespeichert wird oder auch durch Nutzung von Verlustwärme (beispielsweise Motorabwärme) zum Entladen des Speichers.

Der Einsatz von Hydridspeichern wurde sowohl für den stationären Einsatz als auch zur Verwendung als Fahrzeugtank entwickelt, ebenso wie zur Energieversorgung von portablen elektronischen Geräten. Allerdings liegt die gravimetrische Speicherdichte deutlich unter der von Flüssigwasserstoff, wie er für den PKW-Einsatz favorisiert wird, so dass die Chancen von Metallhydridspeichern für den mobilen Einsatz abgesehen von Nischenanwendungen (z. B. Gabelstapler) derzeit eher als gering gesehen werden. Ein sehr weites Einsatzgebiet für diese Speichertechnologie könnte sich in portablen Geräten ergeben, da hier die hohe volumetrische Speicherdichte und die Sicherheit der Metallhydridspeicher einen großen Vorteil darstellen.

Eine weitere, viel versprechende Technologie zur Speicherung von Wasserstoff ist die Verwendung von Nanostrukturen aus Graphit. Auch wenn die publizierten Werte der erzielten Speicherdichte nicht immer der kritischen Betrachtung standhielten und die Mechanismen der Wasserstoff-Einlagerung noch nicht geklärt sind, besteht die Möglichkeit, dass technisch interessante Speicherkapazität erreicht werden können.

Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Suche nach geeigneten Metallen und Legierungen, auch finden Versuche mit verschiedenen geometrischen Anordnungen der Strukturen statt. Ziel ist dabei eine hohe Speicherdichte unter Druck- und Temperaturverhältnissen, die nahe an den üblichen Umgebungsbedingungen liegen.

Darüber hinaus werden eine große Reihe weiterer Materialien, wie z. B. Natriumborhydrid, Microspheres oder leitfähige Polymere (Polyanilin, Polypyrrol), auf Ihre Tauglichkeit zur Wasserstoffspeicherung untersucht. Diese Arbeiten befinden sich jedoch zum Großteil noch in der Grundlagenforschung und eine Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit ist zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich.

Tabelle 2-2: F&E-Bedarf im Bereich H₂-Logistik

	Technik	F&E Bedarf	
Gasförmiger Wasserstoff	Vor-Ort Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"> On-site Reformer 	Kostenreduktion und Serienfertigung
	Pipeline-Ferntransport		
	Verteilung mit Leitungsnetz	<ul style="list-style-type: none"> Kostenoptimierung für innerstädtische Netze 	
	Druckspeicherung	<ul style="list-style-type: none"> Hochdrucksysteme (> 700 bar) Großspeicher (~10.000 m³) Werkstoffe 	
	GH ₂ -Tankstelle	<ul style="list-style-type: none"> Kompressor (Standzeit, Kosten) Hochdruckspeicher Optimierung Tankstellenintegration und Systemauslegung 	
	Hydridspeicher	<ul style="list-style-type: none"> Speicherkapazität, Niedertemperatur Hydride 	
	fortgeschrittene Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> Neue Speicherkonzepte Werkstoffe 	
	Verflüssigung	<ul style="list-style-type: none"> Optimierung Wirkungsgrad 	
Flüssigwasserstoff	LH ₂ -Tank		
	Schiffsferntransport	<ul style="list-style-type: none"> Konzepte 	
	Verteilung mit LH ₂ -LKW	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierung Füllverluste 	
	LH ₂ -Tankstelle	<ul style="list-style-type: none"> Optimierung Tankstellenintegration und Systemauslegung Standzeitverlängerung Rückverflüssigung Reduzierung Boil-off 	
Sicherheitstechnik	Sensorik und Sicherheitsmanagement		

2.3 Wasserstoffanwendungen

Wasserstoff als Energieträger ist vielfältig einsetzbar. Dabei unterscheidet man zwischen der portablen Anwendung von Wasserstoff in tragbaren Kleingeräten, der mobilen Verwendung im Verkehr und dem stationären Einsatz von Wasserstoff zur Hausenergieversorgung oder in der Kraftwerkstechnik.

2.3.1 Mobile Anwendungen

Die Nutzung von Wasserstoff im Transportbereich kann grundsätzlich im Straßenverkehr, im Flugverkehr, in der Schifffahrt und auch im schienengebundenen Verkehr erfolgen. Die treibende Kraft jedoch ist die Nutzung im automobilen Bereich für die Sicherung der individuellen Mobilität über das Zeitalter von Erdöl und Erdgas hinaus.

Traditionelle Antriebskonzepte auf Basis des Verbrennungsmotors haben in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierliche Verbesserungen erfahren und es ist davon auszugehen, dass die Technologie heutiger Fahrzeugantriebe noch über erhebliche Potenziale zur Senkung von Verbrauch und Emissionen, aber auch zur Steigerung von Leistung und Zuverlässigkeit verfügt.

Im Sinne eines nachhaltigen Handelns ist es erforderlich, schon jetzt nach alternativen Lösungen für den Antrieb der Zukunft zu suchen. Neben der Übertragung des verbrennungsmotorischen Prinzips auf den Kraftstoff Wasserstoff wird derzeit intensiv die Nutzung des Wasserstoffs in Brennstoffzellensystemen in Verbindung mit Elektroantrieb vorangetrieben.

Gemeinsam sind beiden Systemen die Herausforderungen des Aufbaus einer Infrastruktur zur Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Kosten und der Frage der optimalen Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug. Darüber hinaus bestehen für jedes System spezifische Vor- und Nachteile. Bei der Beurteilung der Techniken ist generell zwischen realisierten Systemeigenschaften und projektierten Zielgrößen zu unterscheiden.

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale von Wasserstoff-Verbrennungsmotor und Brennstoffzellen-Antrieb sind:

Wirkungsgrad:

Brennstoffzellenfahrzeuge erreichen schon heute Fahrzeugwirkungsgrade von $> 37\%$ im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus; dies entspricht z. B. beim DaimlerChrysler F-Cell-Pkw (A-Klasse) einem $3,8\text{ l} / 100\text{ km}$ Dieseläquivalent) und haben das Potential 45% zu erreichen. Mit diesen Fahrzeugwirkungsgraden ergeben sich sogar bei der Verwendung von aus Erdgas hergestelltem Wasserstoff Well-To-Wheel-Wirkungsgrade und CO_2 -Emissionen, die mit heutigen optimierten Diesel-Fahrzeugen vergleichbar sind.

Die Wirkungsgrade von Fahrzeugen mit wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotoren liegen derzeit bei 26% im NEFZ. Dies entspricht bei einem Referenzfahrzeug der Golf-Klasse einem Verbrauch von $4,7\text{ l} / 100\text{ km}$ Dieseläquivalent ($3,9\text{ l} / 100\text{ km}$ bei zusätzlichem Hybridsystem, EUCAR Well-To-Wheel-Study). Längerfristig werden von BMW Verbesserungspotentiale von bis zu 35% (Gesamtsystem max. 50% gegenüber heute 37%) gesehen.

Zukünftig ist außerdem auch eine neue Art von Hybrid denkbar: die Kopplung von Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor. Die Darstellung der Potentiale dieses innovativen Ansatzes ist Aufgabe zukünftiger Forschungsprojekte.

Emissionen:

Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge sind Zero-Emission-Vehicle. H_2 -betriebene verbrennungsmotorische Fahrzeuge sind, abgesehen von sehr geringen Mengen an NO_x , nahezu emissionsfrei.

Aktuell erreichter technischer Stand und notwendige Entwicklungszeiträume:

Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff als Treibstoff sind schon heute in etwa auf dem Kostenniveau von Dieselmotoren herzustellen, wobei derzeit aufgrund der Bivalenz noch Mehrkosten zu akzeptieren sind, die bei einer späteren monovalenten Auslegung (bei ausreichend verfügbarer Infrastruktur) nicht mehr zum Tragen kommen. Eine aus Gründen der Wirkungsgradoptimierung evt. notwendige Hybridisierung des H₂-Verbrennungsmotorsantriebes würde jedoch die Fahrzeugherstellungskosten wieder erhöhen. Demgegenüber sind im Bereich der Brennstoffzellensysteme mit Elektroantrieb durch intensive Forschungsarbeiten erst noch die Voraussetzungen zu schaffen, damit innerhalb der nächsten zehn Jahre eine Markteinführung möglich ist.

Volumetrische und gravimetrische spezifische Systemkenngrößen:

Die spezifischen Leistungsgrößen heutiger Brennstoffzellensysteme liegen deutlich unterhalb denen von Verbrennungsmotoren. Eine adäquate Motorisierung von Kompakt- bis Mittelklassefahrzeugen (Radleistungen bis 80 kW) mit BZ-Antrieben ist mittelfristig möglich. Die technischen Ziele sind aber von den praktischen Systemanforderungen abzuleiten. Diese müssen auch realistisch sein, so dass im Einzelfall die letztlich durch die derzeit eingeführten Technologien und Verbrauchergewohnheiten vorgegebenen Anforderungen hinterfragt werden müssen.

Abhängigkeit von der Dichte des Versorgungsnetzes (Tank-Reichweite):

Aufgrund der Bivalenz heutiger verbrennungsmotorischer H₂-Antriebe hat die Dichte des H₂-Tankstellennetzes hier eine geringere Bedeutung als für monovalente Fahrzeuge. Jedoch kann erst bei monovalent ausgelegten H₂-Verbrennungsmotoren die Wirkungsgraddifferenz zu den Brennstoffzellensystemen verringert werden. Somit ist für beide Systeme eine ausreichende Dichte des Versorgungsnetzes eine grundlegende Voraussetzung für die Markteinführung.

Bestehende Abweichungen zwischen Ist-Stand und Zielgrößen bei Wirkungsgrad, Kosten, Lebensdauer, Alltagstauglichkeit, Funktionsfähigkeit unter allen klimatischen Bedingungen:

Die theoretischen Potentiale der Brennstoffzellen zeigen deutliche Wirkungsgradvorteile gegenüber dem derzeitigen Stand der Verbrennungsmotorentechnik. Im Hinblick auf die Potentiale der anderen Zielgrößen sind jedoch auch mögliche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Lösungsparametern zu berücksichtigen und für verschiedene Markt- und Kundenanforderungsprofile zu optimieren.

Langfristige Potenziale im Hinblick auf die Systemkenngrößen:

Wenn es gelingt, die theoretischen Perspektiven der Brennstoffzellensysteme zu wettbewerbsfähigen Kosten in die Praxis umzusetzen und regenerativer Wasserstoff zunehmend zur Verfügung gestellt werden kann, dann wäre dies eine wichtige Stufe zu einer wasserstoffbasierten Transportwirtschaft. Dies würde die Einführung dieser Antriebsvarianten in den unteren Fahrzeugklassen unterstützen. Eine mögliche Ausweitung des Produktangebotes auch in die Klasse leistungsfähigerer, größerer Fahrzeuge als Alternative zum Verbrennungsmotor hängt im Wesentlichen von der zukünftigen Verbesserung der volumetrischen und gravimetrischen spezifischen Systemkenngrößen ab. Mit regenerativem Wasserstoff betriebene Verbrennungsmotoren für die oberen Fahrzeugklassen sind dann ebenfalls denkbar.

Herstellungsprozesse inklusive erforderlicher Investitionen und Herstellkosten:

Für die Herstellung von H₂-Verbrennungsmotoren sind die bekannten und kostenoptimierten Produktionstechniken konventioneller Verbrennungsmotoren einsetzbar. Demgegenüber sind die Verfahren zur Massenproduktion von Brennstoffzellen noch zu entwickeln; aufgrund der hohen Gleichteilanzahl werden aber erhebliche Kostenreduktionspotenziale gesehen.

2.3.1.1 Verbrennungsmotoren

Bei der Nutzung von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren sind technische Lösungen mit äußerer (Saugrohreinspritzung) und innerer Gemischbildung (Direkteinspritzung) zu unterscheiden.

Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor mit äußerer Gemischbildung erlaubt derzeit eine Leistungsdichte etwa auf dem Niveau heutiger Benzinmotoren. Gleichzeitig liegt der Wirkungsgrad bei niedriger und mittlerer Last über dem Niveau heutiger Dieselmotoren. Diese Potenziale werden mit äußerst geringen Abgasemissionen realisiert, die unter 1 % (HC, CO) bzw. unter 9 % (NO_x) der nach EU4 erlaubten Emissionen liegen.

Bei der tiefkalten äußeren Gemischbildung werden durch Kühlung der angesaugten Luft mit dem bei -253 °C flüssig gespeicherten Wasserstoff weitere Potenziale zur Steigerung der spezifischen Leistung um ca. 15 % erwartet.

Auch die innere Gemischbildung besitzt das Potenzial einer höheren Leistungsdichte, da durch die geringere spezifischere Dichte des Kraftstoffes Wasserstoff die Luftverdrängung im Zylinder vermieden wird. Hierbei wird der gasförmige Wasserstoff während der Verdichtungsphase direkt in den Brennraum eingebracht. Die konkrete Umsetzung dieses Konzeptes wird in der nächsten Generation von H₂-Verbrennungsmotoren etwa ab dem Jahr 2010 erfolgen.

Einzig relevante Emissionen eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors sind die bei höheren Lasten aufgrund der hohen Verbrennungstemperatur auftretenden Stickoxide. Eine geeignete Betriebsstrategie in Verbindung mit einem Abgasnachbehandlungskonzept kann auch diese Emissionen auf ein unbedeutendes Maß reduzieren:

Betriebsstrategien

- Bei niedrigen Lasten können Wasserstoff-Luft-Gemische im ungedrosselten homogenen Magerbetrieb mit NO_x-Emissionen nahe Null verbrannt werden. Geringe Ladungswechselverluste dank der ungedrosselten Betriebsweise und eine stabile Verbrennung ergeben einen günstigeren Wirkungsgrad als bei aktuellen Dieselmotoren.
- Bei höherer Motorlast reduziert eine Abgasnachbehandlung mit einem konventionellen Reduktionskatalysator die NO_x-Emissionen auf nahe Null. Dies erfordert einen stöchiometrischen Betrieb (Luftverhältnis $\lambda = 1$) mit Lastregelung über Drosselung der Einlassluft. Eine externe Abgasrückführung (AGR) gewährleistet den sehr guten Wirkungsgrad auf dem Niveau des drosselfreien Magerbetriebs.
- Oberhalb der saugmotorischen Volllast kann mittels Aufladung im stöchiometrischen Betrieb eine hohe Leistungsdichte bei gleichzeitiger NO_x-Reduktion im Katalysator erzielt werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich des H₂-Verbrennungsmotors

- Bereitstellung des Wasserstoffs im Fahrzeug mit gewünschtem Druck bzw. Temperatur
- optimale Auslegung und Funktion des Injektors
- Optimierung des Verbrennungsverfahrens inkl. der Brennraumgeometrie
- Betriebsstrategie für stöchiometrischen Betrieb (Luftverhältnis $\lambda = 1$)

2.3.1.2 Brennstoffzellensysteme

Brennstoffzellensysteme liefern elektrische Energie mit hohem Wirkungsgrad und ohne toxische Emissionen. Einzige Nebenprodukte sind Abluft, Wasser (-dampf) und Abwärme. Die erzeugte elektrische Energie kann im Fahrzeug zum Antrieb und/oder zum Betrieb elektrischer Verbraucher genutzt werden.

Der wichtigste Vorteil von Brennstoffzellensystemen für den Antrieb im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist der besonders hohe Energiewandlungs-Wirkungsgrad im Teillastbereich, weil in diesem Leistungsbereich die meisten Fahrten eines Fahrzeugs stattfinden (v. a. Stadtfahrten). Hier macht sich ein hoher Wirkungsgrad durch den daraus resultierenden geringen Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs besonders bemerkbar.

Daneben führt das höhere Drehmoment bzw. der günstigere Drehmomentverlauf von Elektromotoren gegenüber Verbrennungsmotoren bei gleicher Motorleistung zu besseren Beschleunigungswerten. Auch benötigt ein Elektromotor kein mehrstufiges Getriebe und ist vergleichsweise leise. Beides dient der Steigerung des Fahrkomforts.

Nutzung zur Energieversorgung des Antriebs im PKW

Für den PKW-Antrieb werden Brennstoffzellensysteme meist auf Basis der PEM-Brennstoffzelle entwickelt. Aus einem Vergleich mit den verfügbaren bzw. zukünftigen Verbrennungsmotoren lassen sich folgende Anforderungen bzw. Zielwerte an Brennstoffzellensysteme zum Antrieb von Fahrzeugen ableiten:

Tabelle 2-3: Anforderungen an Brennstoffzellensysteme für den PKW-Antrieb

Parameter	Größe
Netto-Systemleistung	60 – 120 kW (ggf. auch mehr)
Systemwirkungsgrad BZ (NEFZ)	> 45 %
Leistungsgewicht	< 3 kg/kW
Lebensdauer	5.000 h über 10 Jahre
Kaltstartfähigkeit bei - 20 °C	< 15 sec
Dynamik (Leerlauf bis 90%)	< 1 sec
Kosten	< 50 €/kW
Reichweite	> 500 km

Entscheidend sind darüber hinaus:

- ein geringer Geräuschpegel
- die Sicherstellung vergleichbarer Fahrzeugleistungen bei hohen Umgebungstemperaturen
- eine gute Bergsteigfähigkeit sowie
- gutes Fahrverhalten auch in großen Höhen (> 2.000 m).

Um diese Ziele erreichen zu können, müssen gegenüber dem heutigen Stand der Technik für die Komponenten der Brennstoffzellen-Antriebssysteme signifikante Fortschritte erreicht werden:

Luftversorgungssystem

- Das Luftversorgungssystem muss effizienter und insbesondere im Teillastverhalten und für größere Luftmengen bei moderatem Druck ausgelegt werden.

Befeuchtung

- Es werden effizientere, möglichst passive Befeuchtungstechnologien für die Anode und die Kathode benötigt, die ohne Flüssigwasser auskommen und eine Minimalbefeuchtung sicherstellen können.

Steuersysteme

- Für die Steuerung der BZ-Systeme werden intelligente, „mitdenkende“ Regeltechniken benötigt, die in der Lage sind, den Stack-Betriebszustand zu diagnostizieren.

Stack-Technologie

- Es werden Membranen benötigt, bei denen der Protonentransport weitgehend unabhängig vom Wassergehalt ist. Die Membranen müssen über den gesamten Temperaturbereich von - 25 °C bis + 140 °C bei stark schwankendem Wassergehalt voll funktionsfähig und langzeitstabil sein.
- Kaltstartfähigkeit des Systems auch bei – 25 °C innerhalb weniger Sekunden
- Bei den Elektrokatalysatoren muss die Stabilität (insb. CO-Toleranz) und die Aktivität gegenüber dem heutigen Stand signifikant erhöht werden. Für platinbasierte Katalysatoren muss gegenüber dem Stand der Technik die Platin-Beladung pro Flächeneinheit um den Faktor 3 verringert und die Leistungsdichte pro Flächeneinheit um den Faktor 2 verbessert werden.
- Insgesamt bedeutet dies eine Verbesserung der Aktivität der Katalysatoren um den Faktor 6. Für nicht-edelmetallhaltige Katalysatoren gilt eine ähnliche Anforderung bzgl. der Verbesserung der Aktivität des Katalysators in der Elektrode.
- Die Lebensdauer der nicht-edelmetallhaltigen Katalysatoren muss um den Faktor 20 erhöht werden.

Die technische Machbarkeit von Brennstoffzellenantrieben in Automobilen wurde erfolgreich gezeigt. Um diese Technologie in Serienprodukten einzuführen, sind weiterhin signifikante Anstrengungen insbesondere für die Entwicklung der Basiskomponenten notwendig.

Brennstoffzellen zur Bordnetzversorgung

Die stark zunehmende Anzahl von elektrischen Funktionen in Fahrzeugen erfordern immer neue Strategien, um den steigenden Strombedarf zu befriedigen. Schon aus Gründen der kontinuierlich angestrebten Verringerung des Kraftstoffverbrauchs ist es nicht zielführend, die erforderliche elektrische Energie durch Einsatz immer größerer Generatoren und Batterien bereitzustellen. Hier kann die Brennstoffzelle als APU, unabhängig von der Bauart (PEMFC für Wasserstoff, SOFC für herkömmlichen Motorenkraftstoff) ihre Systemvorteile voll zum Einsatz bringen:

Strombereitstellung mit höherem Wirkungsgrad

- Der Strom wird aufgrund der elektrochemischen Wandlung im Vergleich zum konventionellen Weg „Motor - Generator - Batterie“ mit einem höheren Wirkungsgrad bereitgestellt. Dies trägt zu einer Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei.
- Der modulare Aufbau einer Brennstoffzelle ermöglicht es, sie optimal an die spezifischen Anforderungen zukünftiger Fahrzeugbordnetze bzgl. Spannungsniveau und Leistung anzupassen.

Motorunabhängiger Betrieb

- Durch die vom Antriebsmotor entkoppelte Betriebsweise der Brennstoffzellen-APU ist eine Energieversorgung des Fahrzeuges auch bei Stillstand des Motors möglich.
- Dies eröffnet die Möglichkeiten zum Angebot neuer Funktionalitäten wie z. B. Standklimatisierung oder Standheizung. Gerade diese erweiterten, kundenwertigen Funktionalitäten könnten in der späteren Markteinführungsphase der Brennstoffzellen-APUs eine entscheidende Rolle spielen.

2.3.1.3 Nutzung einer Brennstoffzellen-APU in Flugzeugen

Die Stromversorgung von Passagierflugzeugen erfolgt heutzutage über eine mit Kerosin betriebene Turbine und ist mit hohen Verlusten und Emissionen (Lärm, Schadstoff) verbunden. In modernen Flugzeugen wird verstärkt auf die Verwendung elektropneumatischer und elektrohydraulischer Komponenten gesetzt. Den dadurch erhöhten Strombedarf effizient, d. h. mit geringeren Betriebskosten, zu decken und zukünftige Umweltschutzauflagen zu erfüllen, kann durch den Einsatz einer Brennstoffzellen-APU erfolgen.

Nachdem der Einsatz von Wasserstoff im Flugverkehr eine langfristige Option darstellt, wird in den ersten Generationen von Brennstoffzellen-APUs für Flugzeugen Kerosin als Brennstoff eingesetzt und durch Entschwefelung, Reformierung und Gasreinigung zu Wasserstoff aufbereitet werden. Derartige Systeme befinden sich bei den großen Flugzeugherstellern schon in der Entwicklung. Dabei haben sich insbesondere die Entschwefelung und das Reformieren von Kerosin als technologische Schwerpunkte herauskristallisiert.

Im Vergleich zu stationären Anwendungen oder zur Automobilindustrie stellt die Luftfahrtindustrie die höchsten technischen Anforderungen, bietet aber auch das höchste Wertschöpfungspotenzial. Auch mit geringen Stückzahlen kann die Anwendung von Brennstoffzellensystemen an Bord von Flugzeugen durch Synergieeffekte in anderen Anwendungsgebieten zur Industrialisierung der Brennstoffzellentechnik beitragen.

2.3.2 Stationärer Bereich

Die Wasserstofftechnologien in der stationären Anwendung können sich den zukünftigen Herausforderungen an die Energieversorgung stellen:

- Integration von fluktuierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen
- Aufrechterhaltung der Netzstabilität
- steigende Anforderung an den Umweltschutz und die Energieeffizienz
- hoher Investitionsbedarf durch notwendige Erneuerung des Kraftwerkspark.

Wasserstoff bietet grundsätzlich die Möglichkeit, die zeitlich schwankenden Energiemengen aus erneuerbaren Quellen zu speichern. Der Anteil an fluktuierender Leistung im Netz wird jedoch kontinuierlich größer, so dass der Aufwand an Reservekapazität und Regelleistung zur Gewährleistung der Netzstabilität steigt. Intelligente Systeme aus Wasserstoffherzeugung, -speicherung und -nutzung in Gasturbinen und Brennstoffzellen können dazu beitragen, dass die in das elektrische Netz eingespeiste Energie aus regenerativen Quellen mit geringeren zeitlichen Schwankungen zur Verfügung gestellt und gleichzeitig überschüssiger Wasserstoff als Energieträger für z. B. Anwendungen im Transportsektor erzeugt wird.

Ein weiteres Anwendungsfeld bieten die steigenden Emissions- und Effizienzanforderungen an die konventionelle Stromerzeugung. Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme mit geringen CO₂-Emissionen in dezentralen Brennstoffzellen bietet ein großes Marktpotenzial. Dies kann noch verstärkt werden, wenn viele kleine Erzeugungseinheiten in virtuellen Kraftwerken zu einem zuverlässigen und regelbaren System kombiniert werden können. Den kleineren dezentralen Anlagen kommt zugute, dass die Planungssicherheit im Bezug auf Brennstoffbeschaffung und Energieabsatz für die Investition in große Kraftwerke abgenommen hat.

Insgesamt gilt, dass für die stationäre Energieversorgung in Deutschland in den nächsten 20 Jahren ein Ersatz für rund 40.000 MW – mehr als ein Drittel des bestehenden Kraftwerk-parks – geschaffen werden muss. Bei rechtzeitigem Erreichen der Entwicklungsziele werden Wasserstofftechnologien auf der Basis von Gasturbine und vor allem Brennstoffzellen ein großes Marktpotenzial haben.

2.3.2.1 Turbomaschinen

Die heutige Stromerzeugung beruht fast ausschließlich auf Turbomaschinen mit Synchron-generatoren. Sie zeichnen sich durch hohe Effizienz bei größter Zuverlässigkeit, langer Lebensdauer und niedrige Kosten aus und bilden als Bestandteil konventioneller thermischer Kraftwerke die Grundlage für die wirtschaftliche Nutzung elektrischer Energie. Alle Technologien zur Stromerzeugung – außer für Nischenmärkte – müssen sich daher an dieser Technik messen.

Bei der Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen haben Gasturbinen eine große Bedeutung. Mit Erdgas erreichen zwischengekühlte Gasturbinen von 100 MW Leistung Wirkungsgrade bis annähernd 40 %. Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke wandeln heute bis 60 % der chemischen Energie in elektrische Energie. Hohe Dynamik und Intervalle von 25.000 Betriebsstunden zwischen kompletten Revisionen sind charakteristisch für Turbinen. Deutschland nimmt in dieser Technik weltweit eine führende Stellung ein. In der Entwicklung befindliche Kraftwerkstechniken mit vorgeschalteter Kohlevergasung nutzen ein wasserstoffreiches Brenngas für die Gasturbine, aus deren Verbrennungsgas CO₂ abgetrennt und endgelagert werden soll. Zudem sind für die Speicherung und Transport von Wasserstoff Kompressoren und Entspannungsturbinen erforderlich.

Evolutionäre und marktnahe Entwicklung

- Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Turbinen für reinen Wasserstoff denen konventioneller Turbinen entsprechen. Schon zwischen 2008 und 2010 können erste kommerziell einsatzfähige Systeme der Einführung der H₂-Technik den Weg bereiten.

Entwicklungsbedarf H₂-Turbinen

- Die H₂-Turbine benötigt einen Brenner, der auf das im Vergleich zu Erdgas extrem unterschiedliche Zündverhalten und die höhere Flammgeschwindigkeit des Wasserstoffes ausgelegt ist und gleichzeitig niedrige NO_x-Werte aufweist.
- Optimierung der Werkstoffe im Hinblick auf Temperaturstabilität bei sehr hohen Temperaturen.
- Peripherie-Komponenten erfordern neue Materialien; Regelung wie Sicherheitstechnik sind auf Wasserstoff anzupassen. Die Kühlung der Maschine ist zu verbessern und der höhere Wasserdampfgehalt im Verbrennungsgas stellt höhere Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit der Materialien.

Zukünftige Generationen von Gasturbinen

- Die nächste Generation von H₂-Turbinen mit höheren Eintrittstemperaturen steigert den Wirkungsgrad um einige Prozentpunkte. Alle Entwicklungen werden auch der Turbinentechnik für konventionelle Brennstoffe zugute kommen. Für die Umstellung heutiger Turbinen ist bis 2010 von ca. 10 Mio. € auszugehen. Eine Größenordnung darüber liegen die Entwicklungskosten um H₂-Turbinen bis 2015 marktfähig zu machen.

2.3.2.2 Brennstoffzellensysteme

Der Einsatz von stationären Brennstoffzellensystemen ist charakterisiert durch die Größe der eingesetzten Anlagen. Im Leistungsbereich < 50 kW werden Brennstoffzellen als KWK-Anlagen vorrangig in der Gebäudeversorgung eingesetzt, während größere Anlagen auch bei industriellen Kunden Anwendung finden. Als Brennstoff wird in aller Regel Erdgas eingesetzt, welches durch Reformieren zu Wasserstoff, Kohlendioxid und geringe Anteile Kohlenmonoxid umgewandelt wird.

Bei den kleineren Systemen sind bislang PEMFC- oder SOFC-Technologie in der Leistungsklasse von 1 bis 12 kW_{el} in der Entwicklung bzw. in der Felderprobung. Der Zielpreis für das komplette System variiert zwischen 1.200 und 2.000 €/kW_{el}. Diese Anlagen werden weitestgehend wärmegeführt betrieben, wobei eine Anlage zur Spitzenlastabdeckung bzw. ein Pufferspeicher zusätzlich notwendig ist. Zielwert für die Lebensdauer des Zellstapels und wesentlicher Anlagenteile wie des Reformers liegt über 40.000 Betriebsstunden und für das gesamte System bei 15 Jahre.

Hauptziel der weiteren technischen Entwicklung ist das Erreichen der Marktfähigkeit durch Kostenreduzierung. Hierzu ist es notwendig, Komplexität und Abmessungen des Brennstoffzellensystems zu reduzieren. Zusätzlich muss die Einbindung im Gebäude durch Schnittstellenoptimierung vereinfacht werden. Die Zuverlässigkeit im Betrieb muss erhöht und eine lange Jahresnutzungsdauer durch höhere Flexibilität der Brennstoffzellensysteme in Bezug auf Start-Stopp-Zyklen, Anschlusstemperaturen und Leistungsregelung erreicht werden.

Zum Erreichen dieser Ziele muss der technische Aufbau der Brennstoffzellensysteme vereinfacht werden. Dafür ist an einigen Komponenten noch Grundlagenforschung notwendig. Bei der PEMFC-Technologie ist ein Entwicklungsschwerpunkt die Betriebstemperatur im Zellstapel durch eine veränderte Membran zu erhöhen. Im Nebeneffekt können die Gasaufbereitung und das Wassermanagement vereinfacht und die Wärmeauskopplung erleichtert werden. Ein anderer Schwerpunkt ist die Entwicklung standardisierter Komponenten wie Inverter, Dosierpumpen kleiner Leistung sowie geeignete Ventile für feuchtes Reformat.

Brennstoffzellensysteme größerer Bauart werden mit MCFC-, SOFC- und PEMFC-Technologie entwickelt. Die MCFC und die SOFC charakterisiert eine hohe Betriebstemperatur, womit sie zur Prozessdampferzeugung mit typischerweise ganzjähriger Nutzung geeignet sind. Neben Erdgas können Brennstoffe wie z. B. Gruben-, Klär- und Biogas zum Einsatz kommen. Die dabei erforderlichen Gasreinheiten variieren stark zwischen den Brennstoffzellen-Typen.

Der elektrische Wirkungsgrad sollte typischer Weise über 40 % liegen (MCFC erreicht heute einen elektrischen Systemwirkungsgrad von > 46 %), und insgesamt sollte eine Brennstoffausnutzung von 80 % erreicht werden. Der Zielpreis für ein kommerzielles System liegt bei rund 1.200 - 1.500 €/kW_{el} (inklusive der Kosten für die Installation) und damit leicht oberhalb der konventionellen, verbrennungsmotorischen Blockheizkraftwerke. Eine Lebensdauer von 40.000 Stunden gilt als minimale Anforderung, wenn nach diesem Zeitraum durch einen Austausch des Zellstapels das Gesamtsystem weiter betrieben werden kann.

Notwendige Entwicklungsarbeiten bestehen bei der SOFC hinsichtlich der Zell-/Stacktechnologie und der Optimierung der Systemintegration auch für hybride Anlagen, bei der MCFC hinsichtlich der erforderlichen Betriebsmittel und des An- und Abfahrverhaltens, bei der

PEMFC-Technologie hinsichtlich des einfachen Systemaufbaus, des elektrischen Wirkungsgrad und des Wasser- und Temperaturhaushalts. Bei allen Systemen sind weitergehende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten an der Zellstapeltechnologie notwendig, um Produktionsweise, Betriebstemperatur, An- und Abfahrverhalten und Lebensdauer und vor allem die Kosten zu verbessern. Außerordentlich wichtig ist die Entwicklung einer Fertigungstechnologie im Pilotmaßstab für Zellen und System, um den Einstieg in den Markt zu ermöglichen. Insgesamt sind die Systeme bislang noch deutlich zu komplex um die Zielpreise zu erreichen.

Komplexität des Brennstoffzellen-Systems reduzieren

- Verkleinerung des Brennstoffzellensystems durch Reduzierung der Anzahl von Komponenten
- Nutzung standardisierter Komponenten aus der Zulieferindustrie
- Höhere Zuverlässigkeit im Betrieb durch reduzierte Anzahl der Komponenten
- Erhöhung der Betriebstemperatur im Zellstapel vereinfacht die Gasaufbereitung, das Wassermanagement und die Wärmeauskopplung

Forschung und Entwicklung an Kernkomponenten

- Zellstapelentwicklung mit dem Ziel einer Reduktion von Materialaufwand und Erhöhung der Lebensdauer
- Komponentenentwicklung hin zu integrierten und kompakten Baugruppen für z. B. Brenngasaufbereitung
- Aufbau von Fertigungstechnologien für Zellstapel und Gasaufbereitung

Verbesserung der Betriebsergebnisse

- Steigerung der Anlageneffizienz durch leistungsfähigere Zellen und reduzierte parasitäre Verbraucher
- Steigerung der Betriebsstundenzahl durch Reduzieren der Fehlerquellen und durch flexiblere Betriebsparameter
- Optimierte Anlageneinbindung

2.3.2.3 Katalytischer Brenner

Brennstoffzellensysteme nutzen die Brenngase in der Regel nicht vollständig. Die Restgase bestehen überwiegend aus H_2 sowie Methan im Falle der Verwendung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern. Diese Gase müssen verbrannt bzw. katalytisch umgesetzt werden und die entstehende Prozesswärme wird meistens im System verwendet. Darüber hinaus müssen in Brennstoffzellensystemen zum Einsatz kommende Brennereinheiten schnell anfahrbar, dynamisch zu betreiben, kompakt, leistungsstark, zuverlässig und kostengünstig sein. In den letzten drei Jahrzehnten wurde mit besonderer Intensität an der Entwicklung katalytischer Verbrennungskonzepte gearbeitet. Hinsichtlich ihrer Strömungsführung und Wärmeauskopplung werden vier unterschiedliche Konzepte zur katalytischen Verbrennung (siehe **Tabelle 2-4**) unterschieden. Entwicklungspotentiale liegen sowohl in der Katalysatorentwicklung als auch wesentlich im Reaktordesign.

Tabelle 2-4: Konzepte und Daten unterschiedlicher katalytischer Brenner

		Strömungsführung	
		überströmt	durchströmt
Wärmeauskopplung	Konvektion	selbstbegrenzender Katalytbrenner - Leistungsdichte: 10 – 20 kW/m ² - Betriebstemperatur: 120 – 250 °C	Hochtemperatur-Katalytbrenner - Leistungsdichte: > 1 MW/(bar m ³) - Betriebstemperatur: 800 – 1.500 °C
	Strahlung	Diffusionsbrenner - Leistungsdichte: 10 – 30 kW/m ² - Betriebstemperatur: 330 – 500 °C	katalytischer Strahlungsbrenner - Leistungsdichte: 10 – 120 kW/m ² - Betriebstemperatur: 360 – 800 °C

Katalysatorentwicklung

- Bei der katalytischen Totaloxidation fällt die Methanverbrennung durch unakzeptabel geringe Volumenleistung und hohe Anspringtemperaturen von mehr als 330 °C auf. Die nahezu schadstofffreie Umsetzung von Methan ist jedoch für den Brennstoffzelleneinsatz mit Reformerbetrieb unabdingbar.
- Die Entwicklung effizienter Katalysatoren zur Methanverbrennung mit deutlich höheren Volumenleistungen ist deshalb von großer Bedeutung. Ob die Anspringtemperatur gesenkt werden kann, ist fraglich. Katalysatoren für die Wasserstoffumsetzung stehen zur Verfügung.

Reaktorentwicklung

- Reaktoren werden bisher auf Basis von Erfahrungen ausgelegt. Systematische Verfahren zur Reaktorauslegung auf der Basis kinetischer Daten sind zu entwickeln. Auslegungsziele der Reaktoren sind Kompaktheit, Leistungsdichte, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit. Dabei gilt es, die Leistungsdichten von derzeit 3,5 kW/l auf 10 kW/l zu erhöhen.

2.3.3 Portabler Bereich

Der Bereich der portablen Brennstoffzellenanwendungen kann in zwei Bereiche unterteilt werden: zum Einen Brennstoffzellen als Batterieersatz im Bereich der Consumer-Electronic mit Leistungen bis ca. 50 W (Laptops, Telefon, Video-Kameras etc.), zum Anderen Brennstoffzellen als netzunabhängige Stromversorgung im Leistungsbereich bis ca. 5 kW (z. B. Notstrom, Camping). Für diese Anwendungen können hauptsächlich wasserstoffbetriebene Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen aber auch Direkt-Methanol-Brennstoffzellen zum Einsatz kommen. Als Energieträger dient Wasserstoff oder Methanol. Methanol kann direkt in der DMFC eingesetzt werden oder in H₂-PEMFC-Systemen über Reformierung.

Im Bereich der Consumer-Electronic ist die Kapazität und die Aufladezeit der Batterien oft ein begrenzender Faktor für die Einsetzbarkeit von portablen Geräten. Mini- und Mikro-Brennstoffzellensysteme können dazu beitragen, diese Einschränkungen zu überwinden und eine lange netzunabhängige Nutzungsdauer sicherstellen.

Je nach Anwendung ist eine Lebensdauer der Brennstoffzellen von 1.000 h - 5.000 h in einem Zeitraum bis zu fünf Jahren gefordert. Diese Lebensdauern sind mit der heute verfügbaren Technologie teilweise erreichbar. So wurde im Bereich der netzunabhängigen Stromversorgung mit Brennstoffzellensystemen Lebensdauern von einigen tausend Stunden im Dauerbetrieb erreicht. Die Lebensdauer liegt damit im Bereich konventioneller Notstromaggregate auf der Basis von Verbrennungsmotoren. Die Herstellkosten sind jedoch zurzeit um mindestens eine Größenordnung höher als die Verkaufspreise der konkurrierenden konventionellen Aggregate.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Anfahrtszeit der Systeme. Bei Zimmertemperatur sind die H₂-Brennstoffzellen innerhalb weniger Sekunden betriebsbereit. Die maximale Leistung steht nach dem Erreichen der Betriebstemperatur, d. h. nach wenigen Minuten, zur Verfügung. Batterie-Brennstoffzellen-Hybridssysteme können eine sofortige Verfügbarkeit der Geräte sicherstellen.

Folgende Faktoren spielen im Bereich der portablen Brennstoffzellensysteme eine wichtige Rolle:

Hoher Kundennutzen im Bereich der Consumer-Electronic

- Der Leistungsbedarf portabler Geräte (Consumer-Electronic) steigt schneller als die verfügbare Kapazität von Akkumulatoren.
- Ein langer netzunabhängiger Betrieb der Geräte an beliebigen Orten ist nur durch Brennstoffzellentechnologie möglich.
- Brennstoffzellen benötigen keine Ladezeit wie Akkumulatoren. Sofort nach und teilweise auch während des Wechsels der Brennstoffkartusche sind die Geräte betriebsbereit.
- Selbstentladung bei längerem Nichtgebrauch, wie bei Akkumulatoren, tritt nicht auf. Die Geräte sind auch nach langen Stillstandszeiten sofort einsatzfähig.

Kurzfristige Markteinführung realisierbar

- Die derzeitige Technologie erlaubt eine baldige Markteinführung.
- Ein Kostenniveau vergleichbar mit Li-Ion Akkus ist kurzfristig realisierbar.
- Hohes, steigendes Marktvolumen im Bereich der Consumer-Electronic ermöglicht schnelle Weiterentwicklung der Technologie.
- In weiten Bereichen können Akkumulatoren ersetzt werden. Dies verringert das Batterie-Müllaufkommen mit seinem Schwermetallproblem.

Hohe Mobilität und geringe Umweltbelastung bei der netzunabhängigen Stromversorgung

- Bei Einsatz von Wasserstoff entstehen lokal keine schädlichen Abgase.
- Im Gegensatz zu derzeit verfügbaren konventionellen Technologien (z. B. Notstromaggregate auf Basis von Verbrennungsmotoren) entsteht keine Lärmbelastung.
- Ein Einsatz in Naturschutzgebieten (z. B. Gewässerschutz) ist aufgrund der Emissionsfreiheit möglich.
- Die Aggregate sind aufgrund fehlender mechanischer Komponenten weitestgehend wartungsfrei.
- Auch höchste Leistungsanforderungen im militärischen Bereich können durch die Technologie erfüllt werden.

In **Tabelle 2-5** ist der F&E-Bedarf im Bereich der portablen Brennstoffzellen dargestellt.

Tabelle 2-5: Zukünftiger F&E-Bedarf im Bereich der portablen Brennstoffzellen

Entwicklungsfeld	F&E-Bedarf
Brennstoffzellenstack	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Produktion von Stacks im Bereich 500 W, 1 kW und 2 kW auf Basis „genormter“ Flächen, als Voraussetzung für breite Systementwicklung • Entwicklung von portablen PEMFC-Systemen im Leistungsbereich bis 1 kW • Direkt-Methanolsysteme für portable Anwendungen im wenigen 100 W Bereich
Kostenreduzierung und Effizienzsteigerung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Katalysatormaterialien mit geringeren spezifischen Kosten • Neue Materialien für die Bipolarplatten, die auch eine Massenproduktion zulassen • Entwicklung neuer Membranmaterialien • Entwicklung neuer Dichtungskonzepte und günstiger Dichtungsmaterialien
Verbesserung der Funktionalität und Langzeitstabilität der einzelnen Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Verminderung der Sauerstoffreduktionsverluste • Betriebstemperatur-Erhöhung der PEMFC-Stacks (für größere Anwendungen) • Erhöhung der spezifischen Leistung im Raumtemperaturbereich
Modellierung und Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Modellierungs- und Simulationstools für die BZ-Systeme und deren Komponenten (dynamisch und stationär) • Entwicklung von Betriebsführungsstrategien und regelungstechnischen Modellen
Periphere Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von miniaturisierten Komponenten z. B. Gebläse, Ventile
Brenngasversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau einer Brenngasinfrastruktur als Voraussetzung für den verbreiteten Einsatz der Brennstoffzellen

2.4 Zusammenfassung zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf

2.4.1 Erzeugung

Für eine Wasserstoff-Energiewirtschaft ist H_2 in großen Mengen und möglichst kostengünstig zur Verfügung zu stellen. Die Wasserstoffherzeugung wird dort stattfinden, wo kostengünstige regenerative Energie oder andere CO_2 -freie bzw. CO_2 -neutrale Energiesysteme zur Verfügung stehen. In Deutschland wird aus diesem Grund vor allem die Entwicklung und Herstellung von Erzeugungs- und Anwendungstechniken stattfinden. Aber auch die heimischen Ressourcen (regenerative Energien oder Kohle) zur H_2 -Herstellung müssen genutzt werden. Die Entwicklung von Verfahren zur kostengünstigen und treibhausgasneutralen Wasserstoff-Herstellung ist die Aufgabe

In Deutschland werden zurzeit etwa 20 Mrd. Nm^3 Wasserstoff jährlich bereitgestellt. Eine verstärkte Nutzung der Wasserstofftechnologien bedarf einer wettbewerbsfähigen Ausweitung der Erzeugungs- und Logistikkapazitäten. Für die Deckung von 10 % des jährlichen Stromverbrauchs müssten je nach Anwendungstechnologie zusätzlich 35 bis 40 Mrd. Nm^3 H_2 bereitgestellt werden. Im Verkehrssektor entsprechen 10 % des Energieinhalts aller getankten Kraftstoffe 22 Mrd. Nm^3 Wasserstoff.

Um die Kostenhürden bei der Einführung von Wasserstofftechniken zu verringern, ist die CO_2 -arme Wasserstoffherstellung aus Erdgas sinnvoll, insbesondere dann, wenn sich durch eine hohe Effizienz der Anwendungstechnik Energieeinsparungen oder verringerte (lokale) Schadstoffemissionen realisieren lassen. Die Dampfreformierung von Erdgas hat heute einen technischen Stand erreicht, der eine verstärkte Forschungsförderung als nicht dringend erforderlich erscheinen lässt.

Demgegenüber ist die Entwicklung von CO_2 -neutralen Prozessen zur Herstellung von Wasserstoff verstärkt zu intensivieren. Im Besonderen gilt dies für die CO_2 -freie Biomassevergasung, die Kohlevergasung mit CO_2 -Abtrennung und Deponierung und die im COORETEC Bericht beschriebenen Möglichkeiten zum CO_2 -neutralen Kraftwerk. Hier ist ggf. eine Kooperation innerhalb der EU-Initiative HYPOGEN sinnvoll, in der ebenfalls eine großtechnische Anlage zur Wasserstoffherzeugung auf fossiler Basis mit CO_2 -Sequestrierung demonstriert werden soll.

Die Entwicklung von kleinen, dezentralen Reformern für die Versorgung von portablen Anwendungen, stationären Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung oder zur Wasserstoffbereitstellung an Tankstellen muss weiter vorangetrieben werden. Hier besteht vor allem Handlungsbedarf bei der Erforschung kostengünstiger Katalysatormaterialien und effizienter Systeme. Ebenso sind Elektrolysesysteme zur lokalen Wasserstoffherzeugung an Tankstellen weiterzuentwickeln. Speziell für Wasserstoff-Tankstellen muss das Gesamtsystem, d. h. Erzeugung – Speicherung – Abgabe durch Systemanalysen optimiert werden.

Erheblicher Förderungsbedarf besteht bei der Entwicklung von Verfahren zur Wasserstoffherzeugung aus regenerativen Energiequellen. Dabei bestehen Aufgabenstellungen von der Grundlagenforschung über die anwendungsnahe Entwicklung bis hin zu Demonstrationsvorhaben (vgl. auch Tabelle 5-1). Die Elektrolyse mittels aus erneuerbaren Energien gewonnenen Stroms stellt nur eine der Möglichkeiten dar und setzt ein (lokales) Überangebot des Sekundärenergieträgers Elektrizität voraus. Andere alternative Verfahren wie photobiologische oder photochemische Prozesse bieten ein großes Potenzial zur kostengünstigen Wasserstoffherzeugung, bedürfen jedoch noch erhebliche Forschungsbemühungen.

Auch bei einer anfänglichen Herstellung von Wasserstoff über fossile Energieträger mit CO_2 -Emissionen muss der Übergang zu einer CO_2 -freien Wasserstoffherzeugung aus regenerativen Quellen oder anderen CO_2 -freien bzw. -neutralen Techniken sichergestellt bleiben.

Im Rahmen des EU-weiten CO₂-Emissionshandels steht ein geeignetes Mittel zur Verfügung, suboptimale Entwicklungen zu verhindern.

Die Technologiebewertung und systemanalytische Untersuchungen der verschiedenen Wasserstoff-Erzeugungstechniken und ganzer Wasserstoff-Nutzungspfade sind notwendig, um die aus ökonomischer und ökologischer Sicht besten Techniken zu identifizieren und Förderungsmaßnahmen daran auszurichten. Auch können mit den Mitteln der ganzheitlichen Bilanzierung frühzeitig Nutzungskonflikte z. B. bei der Verwendung von Biomasse aufgezeigt werden und falsche Entwicklungen vermieden werden.

Konkret ergeben sich folgende Empfehlungen:

Auch wenn eine Vielzahl von Verfahren zur Wasserstoffherzeugung möglich ist, wird empfohlen, sich im Sinne einer Einführungsstrategie auf kurz- bis mittelfristig einsetzbare Verfahren zu konzentrieren. Diese umfassen:

- On-site Elektrolyse und On-site Reformer
- Zentrale Produktion und Nutzung neuer Verflüssigungsverfahren
- Zur kurzfristigen Umsetzung: Nutzung des By-Produktes Wasserstoff aus Raffinerien oder Chemieparcs
- Mittelfristig müssen Verfahren zur großtechnischen CO₂-freien Erzeugung weiterentwickelt werden, auch unter dem Gesichtspunkt der Nutzung heimischer Ressourcen (Kohle mit CO₂-Sequestrierung, Wind, Biomasse), um sie ab 2015 im technischen Maßstab einsetzen zu können
- Markteinführung und F&E-Aktivitäten müssen eine langfristige, konsistente Perspektive aufweisen, um für die Industrie verlässliche Rahmenbedingungen zu gewährleisten.
- Systemanalyse der Treibhausgasbilanz einer Wasserstoffwirtschaft mit Life Cycle Assessment ist notwendig zum Vergleich der Prozessketten/Verfahren
- Dynamische Einsatzeffizienz- und Konkurrenzanalyse (konkurrierende Verwendung der Primärenergiequellen im Zeitverlauf, resultierendes Benchmarking).

2.4.2 Logistik

Die technologischen Grundlagen für eine Wasserstofflogistik sind zwar zu einem Großteil bekannt und haben sich über viele Jahre in der Industrie bewährt, jedoch fehlen Komponenten und Erfahrungen für einen zukünftigen flächendeckenden Einsatz in einer Wasserstoff-Energiewirtschaft.

Insbesondere geeignete technische Einrichtungen und die Sicherheitstechnik für öffentliche Wasserstofftankstellen sind weiter zu entwickeln und in der Praxis zu erproben, um in Zukunft auch dem ungeschulten Laien den sicheren Umgang mit Wasserstoff zu ermöglichen.

Um die Speicherung und den Transport von Wasserstoff in flüssiger Form als energie-wirtschaftlich sinnvolle Option einsetzen zu können, sind die energetischen Verluste bei der Verflüssigung auf ein Minimum zu reduzieren.

Die bisherigen Wasserstoff-Speichertechnologien für Kraftfahrzeuge genügen noch nicht den Anforderungen bzgl. Reichweite und Integrationsfähigkeit in das Fahrzeug. Aus diesem Grund sind neue Speichertechnologien zu erforschen bzw. die bestehenden weiter zu entwickeln, um dem Kunden mindestens die gewohnten Fahrzeugeigenschaften zu bieten. Dazu sind die Entwicklung neuer Materialien und die Untersuchung der Eigenschaften von Speicherma-terialien notwendig.

Für eine Übergangsphase kann es sinnvoll sein Wasserstoff-Erdgasgemische („Hythane“) einzusetzen. Zu klären ist hierbei, inwiefern die bestehende Infrastruktur und die aktuell

benutzen Anwendungstechniken für Hythane geeignet sind oder Maßnahmen zur Anpassung getroffen werden müssen. Darüber hinaus werden Untersuchungen benötigt, in denen Wasserstoff-Pipeline-Systemen zur Versorgung von Tankstellen und anderen Großverbrauchern analysiert werden.

Konkret ergeben sich folgende Empfehlungen:

- H₂-Management an Tank- oder Kartuschen-Befüllungsstationen
- Mobile Tank- oder Kartuschen Befüllungsstationen
- Erfahrungen aus laufenden, auch europäischen (z. B. CUTE) und internationalen Projekten sollten weitestgehend genutzt werden.
- Zu Beginn sollte die Markteinführung konzentriert in einigen Clustern erfolgen, um eine optimale Auslastung der Infrastruktur zu gewährleisten, Know-how zu konzentrieren und Risiken zu minimieren (z. B. durch Redundanz von Tankstellen).
- Die Markteinführung muss durch förderliche Regelsetzung, Schulung und Akzeptanzschaffung begleitet werden.
- Die Erstellung einer Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, eingebettet in einen europäischen Kontext, sollte einer der nächsten Schritte sein.

2.4.3 Anwendung

Die in einer großen Anzahl bestehenden Techniken zur Wasserstoffnutzung sind weiter zu verbessern und für den Alltagsgebrauch zu optimieren. So sind für den Einsatz von Wasserstoff in Gasturbinen geeignete Brenner zu konstruieren und Materialien für die Turbinenschaufeln zu erforschen. Katalytische Brenner zur Brenngasaufbereitung und -umsetzung in den verschiedensten Anwendungstechniken müssen hinsichtlich der Eigenschaften von Wasserstoff optimiert werden und einen sicheren Einsatz gewährleisten.

Verbrennungsmotoren ermöglichen gegenüber der Brennstoffzellentechnik eine frühzeitigere Verwendung von Wasserstoff im Verkehr unter der Voraussetzung, dass das Problem der H₂-Speicherung schnell gelöst werden kann. Durch den Einsatz von noch zu entwickelnden optimierten H₂-Verbrennungsmotoren kann ein effizienterer und umweltfreundlicherer Individualverkehr realisiert werden

Im Bereich der Brennstoffzellentechnik ist zum Teil auch heute noch Grundlagenforschung für die Materialentwicklung notwendig. Für die mobile Anwendung haben Forschung und Entwicklung von verbesserten PEMFC Stacks die höchste Priorität. Hier ist insbesondere die Substitution von perfluorierten Membranen durch Materialien anzustreben, die für eine hohe Betriebstemperatur geeignet sind und zu geringen Kosten hergestellt werden können. Weitere Beispiele sind die Entwicklung platinfreie Katalysatoren für die PEMFC sowie kostengünstige und langlebige Elektrolyte für die MCFC und SOFC. Auf der anderen Seite sollte aber auch bereits mit der Entwicklung von Fertigungsverfahren für alle Arten von Brennstoffzellen begonnen werden, um die notwendigen Kostenreduktion durch Massenproduktion frühzeitig zu erreichen. Bisher sind die Kompetenzen zur Fertigung von Brennstoffzellenstapeln, einer der wichtigsten Komponente für die H₂-Anwendung, vor allem außerhalb Deutschlands angesiedelt. Des Weiteren sind Komponenten z. B. zur Luft- und Brennstoffversorgung an die Brennstoffzellensysteme anzupassen. Zu weiteren notwendigen Forschungsaufgaben im Bereich der Brennstoffzellentechnik sei auf die Strategie der Arbeitsgruppe BERTA verwiesen.

3 Rechtliche Rahmenbedingungen

3.1 Anforderungen an die Einführung Wasserstoff basierter Technologien

Wasserstoff ist bei Umgebungsbedingungen ein Gas und wird in Behältern und Rohrleitungen gasförmig unter Druck, tiefkalt verflüssigt oder an Metalle angelagert gespeichert, transportiert und verarbeitet. Die Erfahrungen zeigen, dass eine Wasserstoffwirtschaft sicherheitstechnisch beherrschbar ist. Der sichere Umgang mit Wasserstoff erfordert aber speziell angepasste Technologien und Maßnahmen. Um aus der industriellen Erfahrung rechtliche Rahmenbedingungen zu erhalten, die eine weiträumige Anwendung der Technologien erlauben, ist die Vereinheitlichung von Regelwerken für die europa- und weltweite Genehmigung und Zulassung von Wasserstoff-Technologien sowie die Standardisierung von Komponenten und Subsystemen möglichst auf internationaler Ebene erforderlich.

3.2 Status quo nationaler und internationaler Regelwerke

3.2.1 Stationärer Einsatz von Wasserstoff

Wasserstoff findet im stationären Bereich heute hauptsächlich Anwendung als Grundstoff für die chemische Industrie. In diesem Bereich bestehen etablierte Zulassungs- und Genehmigungsprozesse, ausgehend von entsprechenden gesetzlichen Grundlagen:

- Bundes-Immissionsschutz-Gesetz
- Baurechtliche Anforderungen
- Betriebssicherheitsverordnung

Für die öffentliche Energieversorgung zeigt sich eine andere Situation, Wasserstoff wird in diesem Sektor zurzeit nicht verwendet.

Normung und Regelwerke in der Gaswirtschaft

Ein hohes Sicherheitsniveau der Gasnetze ist seit jeher das besondere Anliegen der deutschen Gaswirtschaft. Über den DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches) ist ein umfassendes Regelwerk erarbeitet worden. Das Regelwerk beinhaltet Anforderungen für einen sicheren Betrieb der Netze und der Anwendung. Es ist im Energiewirtschaftsgesetz verankert und wird permanent weiterentwickelt. In der Gaswirtschaft liegt damit auch eine umfassende Erfahrung mit Erzeugung, Verteilung und Verwendung von wasserstoffreichen Gasen (z. B. Stadtgas) vor. Sie sollte für einen möglichen Wasserstoffeinsatz in der Energieversorgung genutzt werden.

Zurzeit hat der DVGW ca. 830 einzelne Regelwerke veröffentlicht. Sie umfassen das gesamte Spektrum der Gasversorgung:

- Gastransport und -speicherung
- Gasverteilung
- Gas-Druckregelung
- Gasmessung
- Gasverwendung (häuslich, gewerblich und industriell)

Seit rund zehn Jahren findet die Normung verstärkt auf der europäischen Ebene statt. CEN, die europäische Normenkommission, hat dazu Strukturen geschaffen. Die Koordination der europäischen Normungsprojekte im Bereich Gas ist über das „CEN Sector Forum Gas“ - unter deutscher Federführung - sichergestellt.

Die rechtlichen Grundlagen dieser Projekte sind zum größten Teil in europäische Richtlinien begründet, wie etwa die „Gasgeräte-Richtlinie“ (30/396/EWG). Diese Richtlinie beinhaltet technische Anforderungen an „Gasverbrauchseinrichtungen“, die mit brennbaren Gasen betrieben werden, also auch für Wasserstoff. Ziel ist die Erteilung eines CE-Zeichens als Konformitätsbestätigung mit den Anforderungen der Richtlinie. In Deutschland ist diese Richtlinie über das Gerätesicherheitsgesetz in das geltende Recht umgesetzt.

Es gibt eine Vielzahl aktueller Normungsprojekte im europäischen Bereich (CEN), wie z. B. für Gas-Raumheizer, Gasbrenner, Gaszähler u. v. m. Internationale ISO-Normungsgremien befassen sich mit Gasbeschaffenheiten, Wasserstoff und Brennstoffzellen.

Stadtgas mit hohem Wasserstoffanteil

Seit Beginn der öffentlichen Gasversorgung in Deutschland in der Mitte des 19. Jahrhunderts wurde so genanntes Stadt- oder Ferngas für die Energieversorgung erzeugt und verteilt. Erst mit der zunehmenden Versorgung mit Erdgas seit den 60er-Jahren des letzten Jahrhunderts wurde Stadtgas als Brenngas zurückgedrängt.

Stadtgas besteht hauptsächlich aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Noch heute ist nach geltendem Regelwerk der Wasserstoffgehalt dieses technisch erzeugten Gases mit bis zu 67 % angegeben.

Strategischer Ansatz für eine Wasserstoff-Normung

Erdgas ist eine mögliche Brückenenergie zum Wasserstoff. Normen und Regelwerke für Wasserstoff sollten auf den vorliegenden Strukturen und Erfahrungen aufbauen. Einige Wasserstoff-spezifischen Anforderungen sind zu ergänzen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um die Berücksichtigung spezieller Eigenschaften, wie:

- weiter Zündbereich mit Luft
- Deflagrations- und Detonationsverhalten (hohe laminare Abbrenngeschwindigkeit)
- korrosives Verhalten zu manchen Materialien und
- nicht sichtbare Flamme.

Aber auch zusätzliche Aspekte sind zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich zunächst um die sichere Detektion möglicher Wasserstoffaustritte, etwa bei Leckagen. Dem Erdgas wird ein Geruchsstoff mit charakteristischem Warngeruch beigemischt. Ein entsprechendes Warnsystem muss auch für Wasserstoff installiert werden.

Weiterhin bedingt der verhältnismäßig geringe Heizwert (rd. 1/3 des Erdgases) eine angepasste Infrastruktur. Das Leitungssystem mit den technischen Einrichtungen (z. B. Verdichter, Druckregelungen) muss entsprechend verändert werden. Ein weiterer Aspekt ergibt sich aus der Anwendung des Wasserstoffes selbst: Ein sicherer Umgang bei den Kunden (derzeit rund 18 Mio. Gas-Kunden) muss sichergestellt werden.

Eine Wasserstoff-Normung muss eine starke Verankerung in der europäischen Normung haben, da die gesetzlichen Grundlagen für die Energieversorgung zum großen Teil aus europäischen Richtlinien stammen. Dennoch sollte dafür Sorge getragen werden, dass europäische Normen, wo sinnvoll und erforderlich, in ISO und IEC Standards überführt werden, respektive ISO und IEC Standards in CEN Normen reflektiert werden, um den freien Austausch von Komponenten und Produkten kosteneffizient und global sicherzustellen.

Zulassung von stationären Anwendungen

Der mehrmonatige Genehmigungsprozess für stationäre Anlagen einschließlich Vorrichtungen für die Wasserstoffversorgung von Fahrzeugen umfasst die folgenden Schritte:

- Antrag zur Zulassung
- Antwort der Behörde: Eine Genehmigung mit detaillierter Beschreibung aller Anforderungen
- Öffentliche Anhörung zum Genehmigungsdokument
- Genehmigung zum Bau der Einrichtungen
- Besichtigung der errichteten Einrichtungen durch öffentliche Behörden/zugelassene Körperschaft
- abschließende Genehmigung der Einrichtungen und Betriebsgenehmigung

Behördliche Genehmigung, Zulassung und Zertifizierung:

- Baugenehmigung
- umweltrechtliche Genehmigung
- Betriebsgenehmigung
- CE-Zertifizierung mit detaillierter Dokumentation der Ausrüstung
- Dokument/Zertifikat der Abnahme durch unabhängigen Experten

Die normalerweise in den Genehmigungsprozess involvierten Behörden sind:

- Umweltbehörde
- Feuer- und Explosionsschutzbehörde
- örtliche Baubehörde
- Arbeitsschutzbehörde

Wichtige Aspekte hinsichtlich der behördlichen Genehmigung:

- anwendbare nationale Regelwerke
- Risikoabschätzung (das Wissen hinsichtlich aller sicherheitstechnisch relevanten Parameter, der Betriebs- und Unfallstatistik ist unvollständig oder fehlt)
- CE-Markierung (abhängig von erfolgreicher Risikoanalyse, Prüfung und Betriebs- erfahrung),

ISO- und IEC-Normen werden benötigt für:

- Aggregate zur H₂-Erzeugung, -Handhabung und -Nutzung – anwendbar: ISO/TC 197
- H₂-Tankstellen – anwendbar: ISO/TC 197
- H₂-Füllkupplungen – anwendbar: ISO/TC 197 und subsumiert ISO/TC 22
- Brennstoffzellen – anwendbar : IEC/TC 105
- fahrzeug-bordseitig installierte H₂/BZ-Aggregate – anwendbar: ISO/TC 197, ISO/TC 22 und IEC/TC105

Vorschlag für die nächsten Schritte:

Weiterer Ausbau des normungsrelevanten Know-hows über Wasserstoff

- Sicherheitsaspekte beim Kunden
- Materialfragen

Schaffung der Grundlagen für die Normung

- Screening der aktuellen Gas-Regelwerke
- Definition des „Delta“ Erdgas / Wasserstoff
- Festlegung der Normungsinhalte für Wasserstoff
- Festlegung der Strukturen bei CEN (Ziel: Erweiterung der laufenden Projekte, keine zusätzlichen Projekte)
- Entwicklungsbegleitende Normung
- Internationale Normung auf ISO- und IEC-Ebene

Demonstrationsprojekte

- Wasserstoffbeimischungen zum Erdgas
- Sammeln von Betriebserfahrungen mit Wasserstoff bzw. wasserstoffreichen Gasen (z. B. Nutzung von Chemienebenproduktwasserstoff in Demonstrationen für mobile und stationäre Anwendungen)

Fertigstellung der Normen

3.2.2 Zulassung und Genehmigung von mobilen Anwendungen

Straßenfahrzeuge erhalten heutzutage soweit möglich nur noch eine europaweite Betriebs-erlaubnis. Dies erfolgt in Anwendung der EU-Richtlinien, die von den Mitgliedstaaten in nationale Regelwerke umzusetzen sind.

Der gleiche Prozess wird auch für Wasserstoff-Fahrzeuge Anwendung finden. Die Gesamt-betriebserlaubnis eines Fahrzeugs kann entweder auf Systemgenehmigungen nach UNECE basieren oder alternativ auf Systemgenehmigungen nach EU-Richtlinien (vgl. Abbildung 3-1).

Die europäische Fahrzeugindustrie hat sich entschieden, im Rahmen der UN-Organisation UNECE WP29 einen europa- und weltweit harmonisierten Prozess für wasserstoffrelevante Systemgenehmigungen von Straßenfahrzeugen zu initiieren. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass durch den Mechanismus der Anerkennung von ECE Regeln durch die Signatarstaaten eine nationale Genehmigung leichter erhältlich ist, da sie nicht für jeden Mitgliedsstaat einzeln durchgeführt werden muss. Außerdem wurde die UNECE Plattform gewählt, da nach dem 1998er Abkommen (E/ECE/TRANS/132 AND Corr.1) in Zukunft ein global harmonisiertes Genehmigungsprozedere von Wasserstoff-Straßenfahrzeugen möglich ist.

Da es bis heute kein europaweites Regelwerk für wasserstoffspezifische Komponenten und Sub-systeme von Straßenfahrzeugen (H₂-Speicher, H₂-Versorgung, H₂-Sicherheitskomponenten) gibt, wurde bereits 1999 im Rahmen des EU geförderte EIHP (European Integrated Hydrogen Project) begonnen, Entwürfe für ein solches Regelwerk zu erstellen. Diese Regelwerksentwürfe sowie andere wasserstoffrelevante ECE Regelwerke und EU Richtlinien (z. B. über das Crashverhalten, den Kraftstoffverbrauch, Fahrzeugemissionen, etc.) werden für den Betrieb von Wasserstofffahrzeugen erstellt bzw. angepasst. Änderungsvorschläge wurden u. a. zu den Bereichen Emissionen, Kraftstofftanks, Kraftstoffverbrauch, Frontalaufprall, CO₂-Labeling und Elektrofahrzeuge eingereicht.

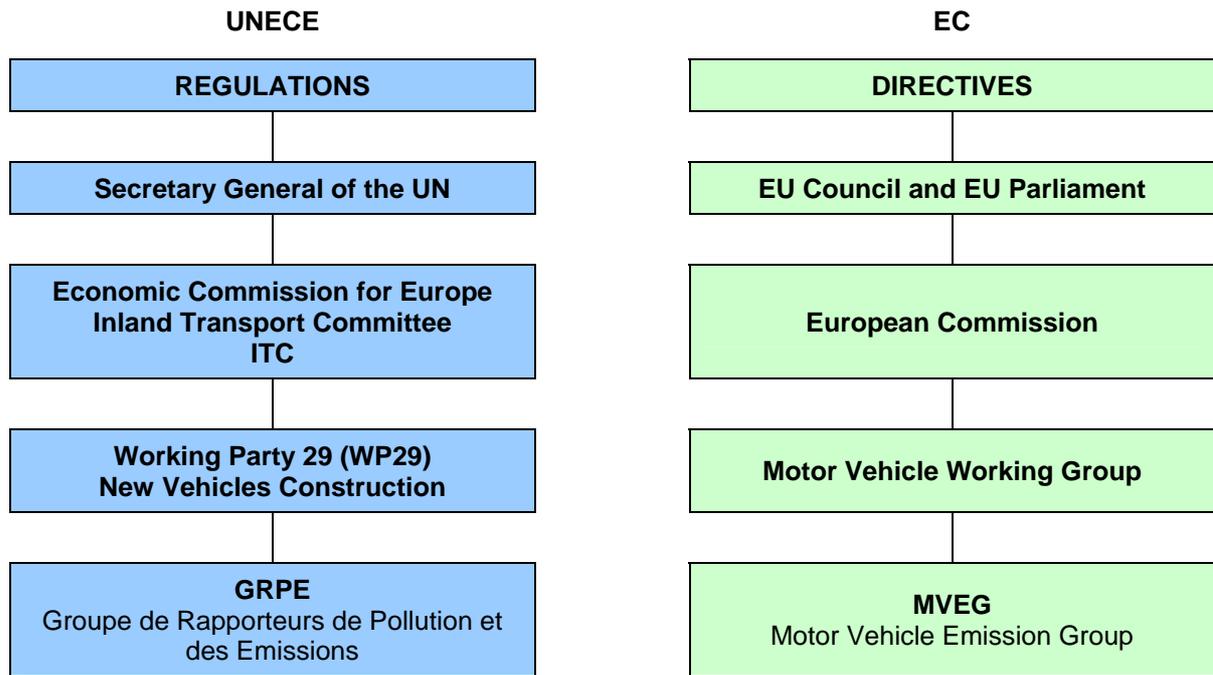


Abbildung 3-1: Systemgenehmigungen für Straßenfahrzeuge

Darüber hinaus ist sich die europäische Industrie einig, dass eine weltweite Harmonisierung der Genehmigungsanforderungen im Rahmen eines globalen technischen Regelwerks (Global Technical Regulation - GTR) herbeigeführt werden sollte, um kostenträchtige unterschiedliche Fahrzeugentwicklungen für die größten Märkte Europa, Nordamerika, Japan und China zu vermeiden. Ein GTR-Entwurf würde ebenfalls bei der UNECE in Genf eingereicht werden.

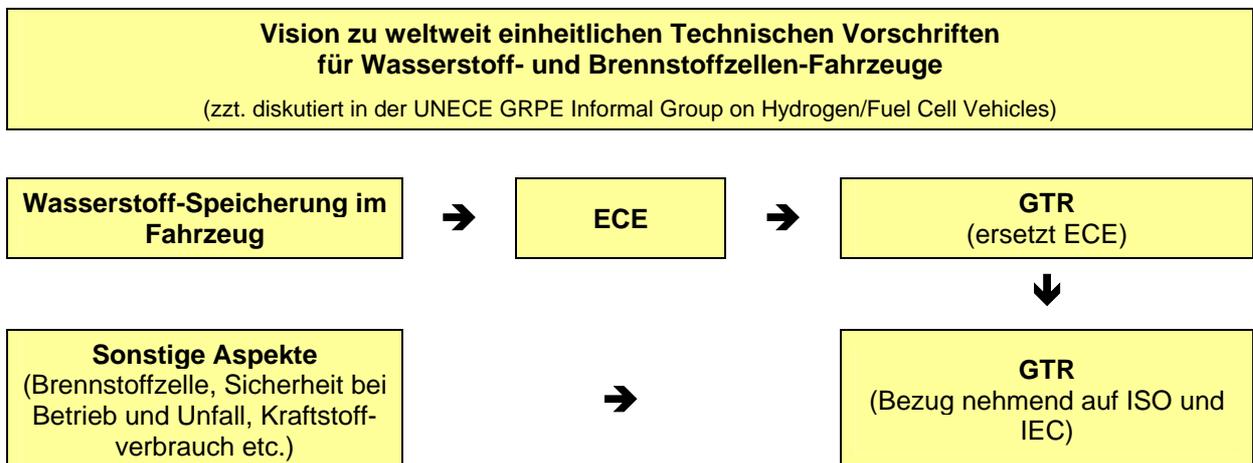


Abbildung 3-2: Pfade zu einem globalen technischen Regelwerk (GTR) für H₂- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge

In eine (oder mehrere) GTR(s) sollten, soweit möglich, alle wasserstoffrelevanten und sicherheitstechnischen Aspekte Eingang finden. Sowohl die H₂-Speicher und -Versorgungssysteme an Bord des Fahrzeugs (wie sie das UNECE-Regelwerk regeln soll), als auch die anderen sicherheitsrelevanten Themen, wie z. B. die Brennstoffzelle, Sicherheit unter normalen Betriebsbedingungen, Kraftstoffverbrauch (also die Aspekte die bisher in anderen UNECE-Regelwerken bereits geregelt sind) sollen zusammengeführt werden.

Wasserstoffkomponenten für den Einsatz an Bord von Straßenfahrzeugen und Komponenten für die Verbindung des Fahrzeugs mit stationären Einrichtungen, wie z. B. die Betankungskupplung mit der Tankstelle, aber auch Einrichtungen in der Tankstelle selbst, sollen möglichst auf internationaler Ebene über die ISO (International Organisation for Standardisation) genormt werden. Brennstoffzellenspezifische Belange für den mobilen, wie auch für den stationären Einsatz sollen auf internationaler Ebene über die IEC (International Electrotechnical Committee) genormt werden.

Folgende technische Ausschüsse beschäftigen sich bereits mit den angesprochenen Fragestellungen:

- ISO/TC 197 – Hydrogen Technologies
- ISO/TC 22 – Road Vehicles
- ISO/TC 58 – Gas Cylinders
- ISO/TC 220 – Cryogenic Vessels
- IEC/TC 105 – Standards related to Fuel Cell Technologies
- UNECE/ WP29/ GRPE

3.2.3 Zulassung von portablen Anwendungen

Mit Wasserstoff beladene Metallhydrid-Behälter durften bisher nicht oder nur mit Sondergenehmigung auf der Straße oder mit der Bahn transportiert werden, weil sie in den Listen der jeweiligen Gefahrgutverordnungen nicht enthalten waren. Die Gemeinsame Tagung von ADR (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route; zuständig für den Transport von Gefahrgut auf der Straße) und RID (Règlement International concernant le transport des marchandises Dangereuses par chemin de fer; Eisenbahn) hat Anfang Oktober 2003 eine Ergänzung der Stofflisten beschlossen. „Wasserstoff in einem Metallhydrid-Speichersystem“ ist jetzt ein Gefahrstoff der Klasse 2 mit der UN-Nummer 3468. Alle Mitgliedstaaten, auch die Staaten der EU, müssen diese Regelung in nationales Recht umsetzen. Zum 1. Januar 2005 treten die neuen Regeln in Kraft.

3.3 Steuerrechtliche Behandlung von Wasserstoff

Die steuerliche Behandlung von Wasserstoff als Energieträger erfolgt über das Mineralölsteuergesetz mit neuesten Steuersätzen gültig seit 01.01.2004⁶. Danach wird Wasserstoff als Kraftstoff grundsätzlich mit dem Steuersatz für Erdgas (13,90 €/MWh) besteuert. Nur wenn er aus Biomasse hergestellt wird und damit die Anforderungen des § 2a Mineralölsteuergesetz erfüllt, bleibt er steuerfrei. Hingegen Wasserstoff zur Verwendung als Heizstoff ist unabhängig von seiner Herkunft kein Steuergegenstand im Sinne des Mineralölsteuergesetzes, da er keine Kohlenwasserstoffe enthält.

⁶ MinöStG vom 21.12.1992 (BGBl. I S.2150, 2185, 1993 I S. 169, 2000 I S. 147), Stand 01.01.2004

4 Vergleichende Bewertung der Wasserstoff-Energietechnologie

Eine Bewertung verschiedener Wasserstoff-Energietechnologien auf Basis der Ergebnisse der wiba-Perspektiven-Studie „Technik und Systeme zur Wasserstoffbereitstellung“⁷ wird im Folgenden dargestellt. Hierbei werden der Kumulierte Energieaufwand, die CO₂-Emissionen und die Kosten bezogen auf 1 kWh_{H2} am Einsatzort (Endverbraucher) bilanziert. Die Auswahl der Prozessketten ergibt sich aus sinnvollen Kombinationen einzelner Verfahren auf den Stufen des eingesetzten Energieträgers, der Erzeugung und der Logistik. Dem aktuellen Stand der Technik wird eine Abschätzung für das Jahr 2025 gegenübergestellt.

Eine Bewertung der Nutzung von Wasserstofftechnologien wird erst durch den Vergleich mit konventionellen Anwendungs-Technologien möglich. Hierzu werden die Energieflüsse beider Alternativen einer mobilen, stationären und portablen Anwendung gegenübergestellt.

4.1 Bewertungskriterien

Kumulierter Energieaufwand

Grundlage für die Bilanzierung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) bildet die VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden“. Entsprechend

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$$

lässt sich der KEA aus den kumulierten Energieaufwendungen von Herstellung (KEA_H), Nutzung (KEA_N) und Entsorgung (KEA_E) des Produktes berechnen. Dabei sind die stofflichen und primärenergetischen Aufwendungen für die einzelnen Schritte der Prozesskette von der Exploration der Grundstoffe bis zur Entsorgung des Produktes zu bilanzieren.

Da auch bei regenerativen Systemen der tatsächliche Primärenergieeintrag gezählt werden muss, führt das Verfahren des Kumulierten Energieaufwands zu einem vergleichsweise schlechten Abschneiden der regenerativen gegenüber den konventionellen Energiesystemen. Die Qualität der verschiedenen Energieträger und -techniken geht bei dieser Art der Betrachtung verloren. Allerdings wird durch die getrennte Bilanzierung von regenerativen und nicht-regenerativen Energieaufwendungen eine Beurteilung der unterschiedlichen Qualität der einzelnen Techniken möglich. Im Folgenden wird insbesondere der nicht-regenerative Energieaufwand (KNRA) bewertet.

CO₂-Emissionen

Im Hinblick auf die Klimagasreduktionsziele werden im Rahmen der Prozesskettenanalyse die CO₂-Emissionen bilanziert. Auf Basis von Verbrauchsmengen, des Heizwertes und der Brennstoffzusammensetzung lassen sich für feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe die CO₂-Emissionen ermitteln. Für die Erzeugung elektrischer Energie ergeben sich die CO₂-Emissionen aus den gewichteten Emissionsfaktoren der im Erzeugungsmix eingesetzten Kraftwerke.

Kosten

Für die Potenzialabschätzung neuer Technologien sind insbesondere die aktuellen und zukünftigen Kosten entscheidend. Analog zur ganzheitlichen energetischen Bilanzierung werden bei der ökonomischen Analyse zunächst die Kosten für die einzelnen Prozessschritte ermittelt.

⁷ Angloher, J.; Dreier, Th.: *Techniken und Systeme zur Wasserstoffbereitstellung, Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft Teil 1*, Koordinationsstelle der Wasserstoff-Initiative Bayern (wiba), München, 2000

Die in /ANG 00/ erarbeiteten Daten sind jedoch nicht mehr in allen Fällen in vollem Umfang belastbar. Die kalkulierten Kosten stellen eine Abschätzung dar und sollen eine Einordnung und einen Vergleich der Verfahren ermöglichen.

4.2 Ganzheitliche Bewertung der Wasserstoffbereitstellung

Eine Bewertung der Wasserstoffbereitstellung muss alle der Anwendung vorgelagerten Stufen umfassen. Die Systematik der Prozesskettenvernetzung basiert auf den Energiebilanzen der Einzelprozesse. In Prozessketten werden die Bilanzen der gewählten Einzeltechniken miteinander verknüpft, so dass alle zu- und abfließenden Energieströme enthalten sind. Im Folgenden werden ausgewählte Wege der Wasserstoffbereitstellung für stationäre, portable und mobile Anwendungen bilanziert. Je nach Betrachtungszeitpunkt müssen die technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen entsprechend angepasst werden (z. B. technischer Fortschritt, Kostendegression durch Massenfertigung etc.).

4.2.1 Kumulierter nicht regenerativer Energieaufwand

Die Wahl des eingesetzten Primärenergieträgers und der Logistik hat wesentlichen Einfluss auf den KNRA pro bereitgestellte kWh Wasserstoff. In **Abbildung 4-1** sind ausgewählte Bereitstellungspfade für mobile, stationäre und portable Anwendungen dargestellt.

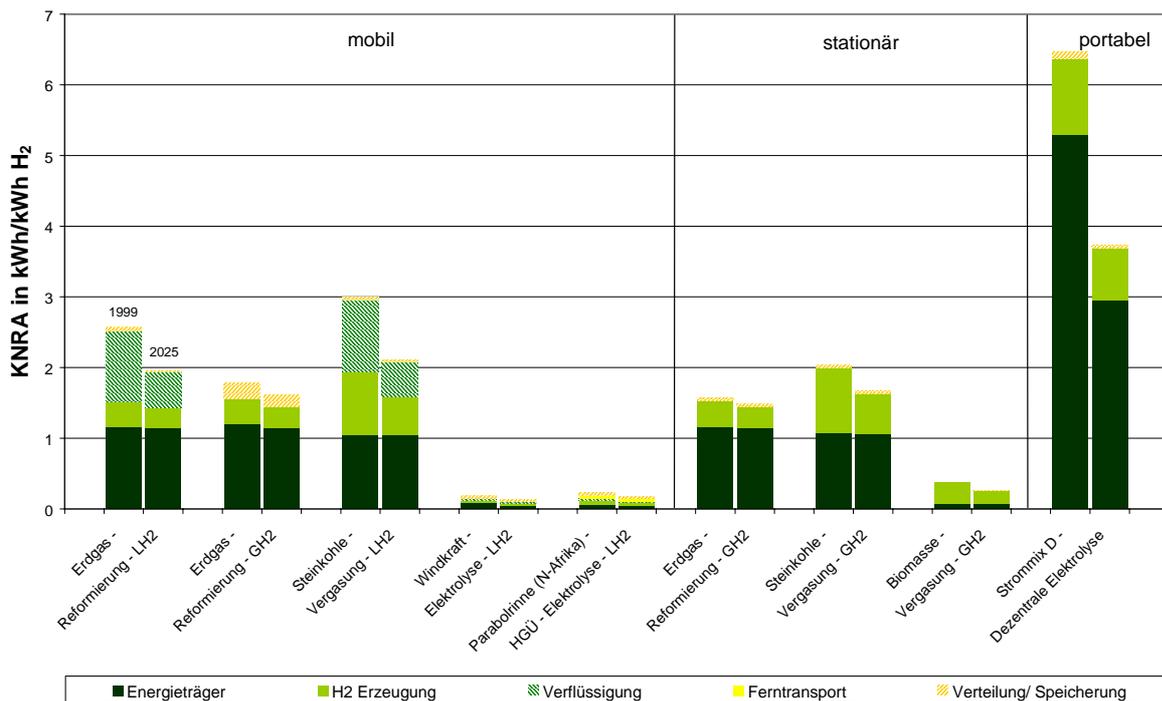


Abbildung 4-1: KNRA ausgewählter H₂-Bereitstellungspfade

Abbildung 4-1 zeigt, dass Bereitstellungspfade basierend auf regenerativen Primärenergieträgern deutlich geringere KNRA aufweisen als Bereitstellungen auf Basis fossiler Brennstoffe. Für die Erzeugung von Wasserstoff aus der Elektrolyse von Windstrom wird der geringste KNRA bilanziert. Aus energetischer Betrachtung ist die Stromerzeugung in einem Parabolrinnenkraftwerk in Nord-Afrika eine weitere Alternative mit geringem KNRA. Der Transport kann mit

einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung oder nach Elektrolyse mit Pipeline (GH₂) bzw. Schiff (LH₂) vorgenommen werden. Die Dampfreformierung von Erdgas weist im Bereich der fossilen Energieträger den geringsten KNRA auf.

Ein wichtiger Aspekt der mobilen Wasserstoffanwendung ist die Technik der Speicherung im Fahrzeug. Aufgrund der geforderten Reichweite wird der Einsatz von Flüssigwasserstoff in Betracht gezogen, aber auch die Verwendung von Druckspeichern kann zielführend sein. Die energetischen Aufwendungen für die Verflüssigung machen einen wesentlichen Anteil des KNRA aus. Hierbei ist zu beachten, dass in Abbildung 4-1 in den regenerativen Ketten die Verflüssigung entsprechend Windstrom und Solarstrom vorgenommen wird und die KNRA daher deutlich geringer ausfallen. Grundsätzlich sind die spezifischen Energieaufwendungen für die Verflüssigung unabhängig vom Bereitstellungspfad. Dies ermöglicht auch einen Vergleich der alternativen GH₂-Bereitstellungen anhand der dargestellten LH₂-Pfade. Die Aufwendungen im Bereich der Verteilung sind für mobile Anwendungen höher als bei stationären Anwendungen bei ansonsten gleichem Pfad, da die Bereitstellung über Tankstellen deutlich über denjenigen für die Verteilung mit einem Rohrnetz liegen (vgl. Kette 1 und Kette 6).

Im stationären Bereich dürften Brennstoffzellen ganz überwiegend zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme zum Einsatz kommen. Wenn somit das Zielprodukt Strom sein soll, scheiden Pfade aus, in denen Strom schon in einer vorherigen Stufe der Umwandlungskette vorliegt, der dann besser direkt und ohne weitere Umwandlungsverluste genutzt werden kann. Eine Ausnahme ist gegeben, wenn eine zeitliche Asynchronität zwischen Stromerzeugung und -bedarf besteht, wie etwa bei Wind- und Solarstrom. Damit stehen zunächst die thermischen Verfahren der Wasserstoffherzeugung aus fossilen Quellen im Vordergrund, wie beispielsweise die Bereitstellung aus Erdgas und Kohle. Die Anwendung in stationären Brennstoffzellenanlagen unterliegt nicht der Anforderung nach möglichst hoher Speicherdichte wie beim Pkw-Einsatz, so dass zur Vermeidung der hohen Verflüssigungsaufwendungen der Einsatz von gasförmigem Wasserstoff favorisiert wird. In großtechnischem Maßstab kann die Versorgung von Brennstoffzellen-BHKWs nur leitungsgebunden erfolgen, so dass für die GH₂-Verteilung ein Rohrnetz ähnlich dem Erdgasnetz angenommen wird. Eine Ausnahme besteht in der Vergasung nachwachsender Rohstoffe, wie sie in der Biomasse-Kette bilanziert wird. Diese regenerative Variante weist erwartungsgemäß geringere KNRA als die fossilen Bereitstellungspfade auf. Bei den fossilen Alternativen erweist sich die Erdgas-Dampfreformierung als energetisch günstigste Variante.

Die Verwendung von Wasserstoff als Energiespeicher in portablen Geräten ist energie-wirtschaftlich von untergeordneter Bedeutung. Für die Wasserstoffversorgung portabler Geräte ist prinzipiell sowohl eine dezentrale als auch eine zentrale Bereitstellungsstruktur denkbar: Soll eine Brennstoffzelle mit H₂-Speicher wie ein Akkumulator eingesetzt werden, muss als Pendant zum Batterieladegerät ein Elektrolyseur als Kleingerät den Wasserstoff erzeugen, der dann in einem Hydridspeicher eingespeist wird. Die Versorgung des Elektrolyseurs kann über die allgemeine Stromversorgung oder alternativ aus einem Photovoltaikmodul erfolgen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Speicher aus einer Wasserstoff-Druckflasche zu laden, die bei einem Gas-Lieferanten befüllt wird. Damit erfolgt die Wasserstoffherzeugung zentral, wobei zusätzliche Aufwendungen für die Verteilung der Druckflaschen anfallen, die günstigeren Erzeugungsbedingungen in zentralen Großanlagen gegenüberstehen. In Abbildung 4-1 ist die dezentrale Elektrolyse mittels Strommix bilanziert. Dieser Bereitstellungspfad zeigt aufgrund der Zusammensetzung des deutschen Strommixes mit einem hohen Anteil an thermischen Kraftwerken die hohen energetischen Aufwendungen für den Energieträger und die H₂-Erzeugung.

Im COORETEC-Bericht⁸ wurden Konzepte der CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung untersucht. Die Technik der Gaswäschen zur CO₂-Abscheidung ist demnach im Prinzip bekannt.

⁸ BMWA (Hrsg.): Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke, 2003

Verfügbarkeit und Wirkungsgrad unter Kraftwerksbedingungen in Pilotanlagen müssen jedoch noch demonstriert werden. Bei entsprechender technischer Verfügbarkeit ergibt sich somit als weiterer Bereitstellungspfad die Möglichkeit, mittels Strom aus zentralen Kraftwerken mit CO₂-Sequestrierung dezentral Wasserstoff per Elektrolyse z. B. an Tankstellen zu erzeugen. In Abbildung 4-1 ist zu erkennen, dass die Erzeugung aus dem Strommix einen sehr hohen KNRA aufweist. Dieses Verhältnis würde sich noch weiter verschlechtern, da sich laut COORETEC-Bericht Wirkungsgradeinbußen von 6 bis 14 Prozentpunkten ergeben und somit bei gleicher Nennleistung ein Mehrbedarf an Brennstoff von 10 bis 35 % notwendig ist. Hinzu kommen noch Aufwendungen für Transport und Speicherung des CO₂. Diese würden auch bei den thermischen Verfahren zur Wasserstoffherstellung mit entsprechender CO₂-Sequestrierung anfallen. Ein weiteres mögliches Konzept der Kraftwerksprozesse mit CO₂-Sequestrierung basiert auf Kohlevergasung mit pre-combustion capture. Der hiermit erzeugte Wasserstoff könnte somit auch unmittelbar verwendet werden. Die Aufwendungen für die nachgelagerten Stufen der Wasserstoff-Bereitstellung würden je nach Anwendung denjenigen in Abbildung 4-1 entsprechen.

4.2.2 CO₂-Emissionen

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen dem nicht-regenerativen Energieeinsatz und den dazugehörigen CO₂-Emissionen (vgl. **Abbildung 4-2**).

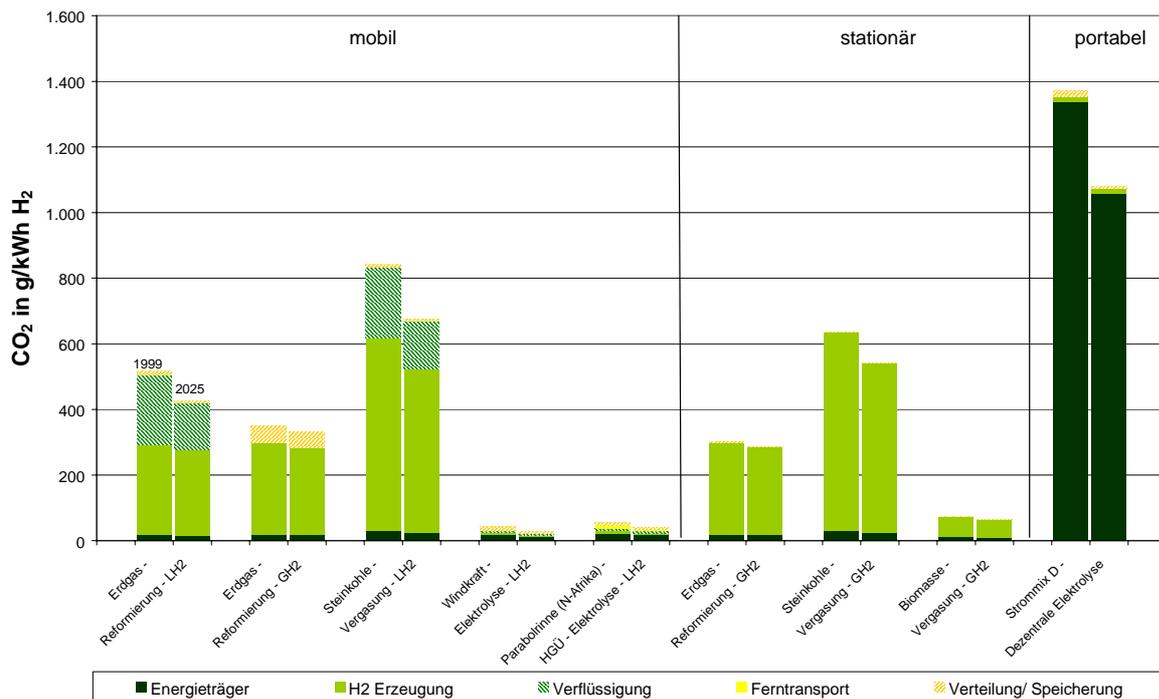


Abbildung 4-2: CO₂-Emissionen ausgewählter H₂-Bereitstellungspfade

Die regenerativen Pfade schneiden erwartungsgemäß auch bei den CO₂-Emissionen deutlich günstiger als die fossilen Varianten ab. Die Unterschiede innerhalb der fossilen Erzeugungsvarianten sind im Vergleich zum KNRA noch verstärkt, weil bei der Dampfreformierung von Erdgas neben höheren Wirkungsgraden auch ein deutlich günstigeres H/C-Verhältnis zum Tragen kommt. Der bei der Vergasung von Biomasse als CO₂ frei werdende Kohlenstoff wurde während der pflanzlichen Wachstumsphase gebunden und wird daher als neutral bewertet. Die

ausgewiesenen CO₂-Emissionen entstehen durch Brennstoffaufbereitung, -transport und Anlagenherstellung.

Bereitstellungspfade mit CO₂-Sequestrierung würden die CO₂-Bilanz erheblich verbessern, da für Energieträger und H₂-Erzeugung je nach Abscheidungsrate nur sehr geringe CO₂-Emissionen entstehen. Für die nachgelagerten Stufen würden jedoch weiterhin entsprechende CO₂-Emissionen anfallen.

4.2.3 Kosten

Im Vergleich zu den KNRA und den CO₂-Emissionen zeigt sich bei den Kosten in Abbildung 4-3 ein völlig anderes Bild.

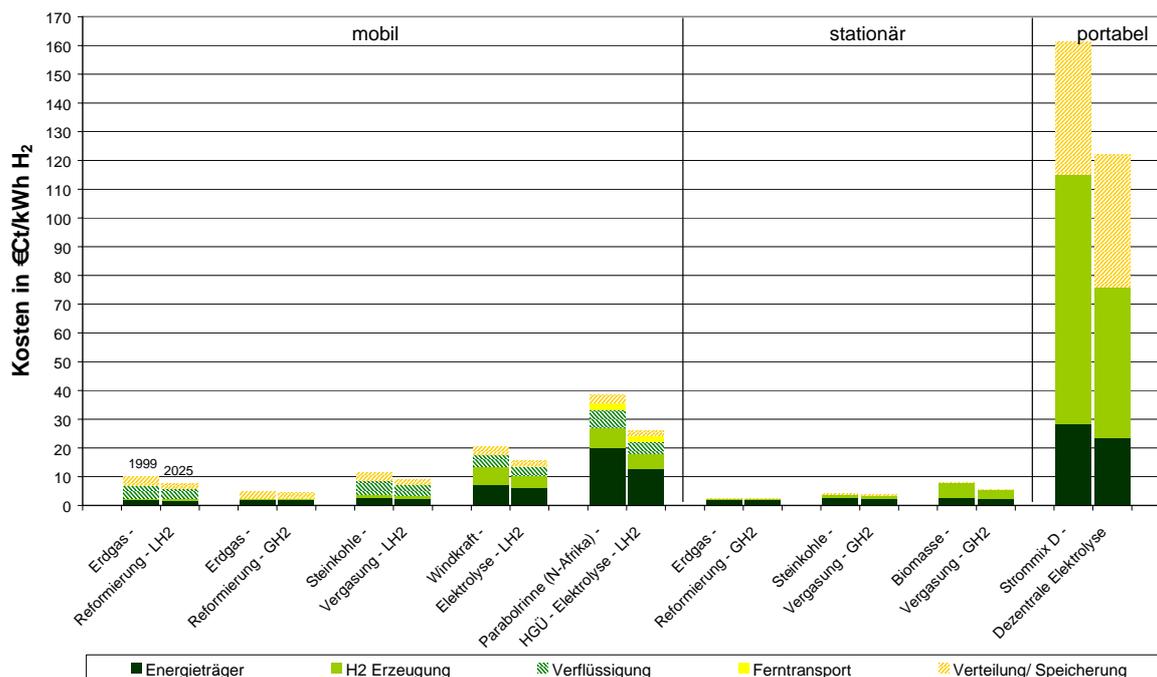


Abbildung 4-3: Kosten ausgewählter H₂-Bereitstellungspfade

Eindeutige Vorteile ergeben sich für die fossilen Bereitstellungspfade, die um den Faktor fünf bis zehn unter den solaren Varianten liegen. Auch die Variante Elektrolyse aus Windstrom liegt noch in etwa doppelt so hoch wie die Bereitstellung aus Erdgas-Dampfreformierung. Einzig die Wasserstofferzeugung aus Biomasse kommt zukünftig in den Kostenbereich fossiler Erzeugung. Eine zentrale Wasserstofferzeugung im Bereich der portablen Anwendung ist aufgrund der hohen Kosten für die Verteilung in etwa um den Faktor zehn höher als eine dezentrale Lösung. Aber auch bei den dezentralen Alternativen sind die spezifischen Kosten noch deutlich über diejenigen für die mobilen und stationären Anwendungen, da weitere Kosten für Kleinstelektrolyseur und Hydridspeicher entstehen.

Bereitstellungspfade mit CO₂-Sequestrierung würden die Kosten erheblich erhöhen. Am Beispiel von Kraftwerken mit Abscheideverfahren würden zusätzliche Investitionen von 30 bis 150 % notwendig. Die zusätzlichen Kosten für Transport und Speicherung würden in Deutschland weitere 10 bis 24 €/t CO₂ betragen. Entsprechende Abschätzungen sind für Reformierungs- und Vergasungsprozesse erforderlich.

4.3 Vergleich konventioneller Technologien mit Wasserstofftechnologien

4.3.1 Pkw-Antriebstechniken im Vergleich

In der wiba-Studie „Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien“⁹ wurden im Rahmen der primärenergetischen Analyse der Herstellung und Nutzung von Antriebstechnologien auch zwei wasserstoffbetriebene Varianten untersucht. Einige Ergebnisse hieraus sind in **Abbildung 4-4** dargestellt.

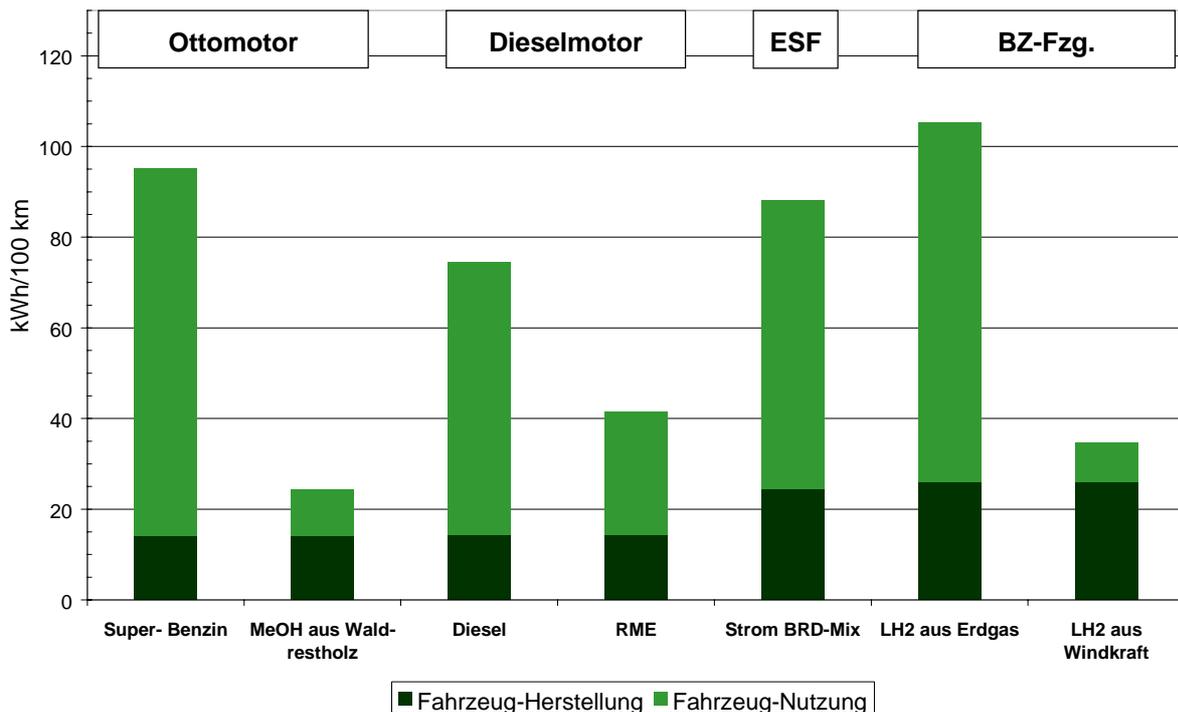


Abbildung 4-4: KNRA verschiedener Antriebskonzepte über den Lebenszyklus

Der Einsatz von Wasserstofftechnologien im Verkehrssektor kann neben der Reduktion lokaler Emissionen zu einer Verringerung der KNRA führen. Die Aufwendungen für die Herstellung des Fahrzeugs (insbesondere für die Brennstoffzelle) sind für die wasserstoffbetriebenen PEMFC-Fahrzeuge deutlich höher als für Fahrzeuge mit konventionellen Verbrennungsmotoren. Dennoch können über den gesamten Lebenszyklus aufgrund des vergleichsweise hohen Wirkungsgrads der Brennstoffzelle geringere KNRA pro Fahrstrecke bilanziert werden. Für die Energiebilanz ist der zu Grunde gelegte Bereitstellungspfad für Wasserstoff entscheidend. In der in **Abbildung 4-4** dargestellten Bilanzierung der Fahrzeugnutzung sind jedoch nicht die Aufwendungen für die Wartung des Fahrzeugs und für die Infrastruktur berücksichtigt. Für die Energiebilanz mobiler Wasserstoff-Anwendungen ist der zu Grunde gelegte Bereitstellungspfad entscheidend.

⁹ Corradini, R.; Krimmer, A.: *Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien – Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung alternativer Antriebstechnologien im Vergleich zu konventionellen Systemen für den PKW-Bereich, Perspektiven einer Wasserstoff-Energiwirtschaft Teil 4*, Koordinationsstelle der Wasserstoff-Initiative Bayern (wiba), München, 2003

4.3.2 Beispiel für die stationäre Anwendung

Eine mögliche Anwendung von Wasserstofftechnologien ist die Hausenergieversorgung. In der wiba-Studie „Das Virtuelle Brennstoffzellen-Kraftwerk“¹⁰ wurde die Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung mit Brennstoffzellen einer konventionellen Versorgung gegenübergestellt. Der Vergleich der Energieflüsse ist in **Abbildung 4-5** und **Abbildung 4-6** dargestellt.

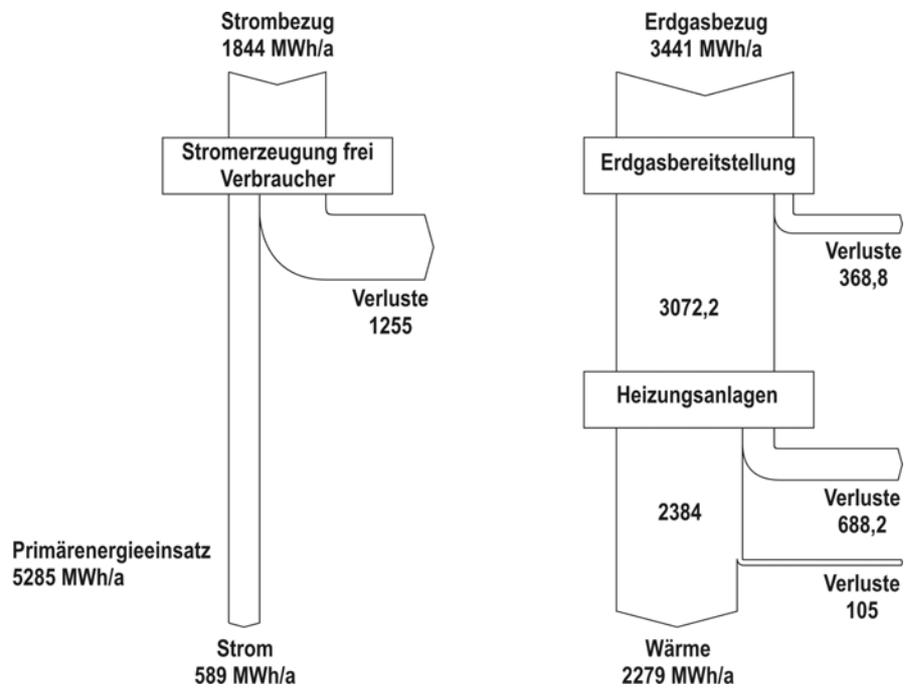


Abbildung 4-5: Konventionelle Strom- und Wärmebedarfsdeckung einer Siedlung (Bestand)

¹⁰ Arndt, U.; Köhler, D.; Krammer, T.; Mühlbacher, H.: *Das Virtuelle Brennstoffzellen-Kraftwerk, Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft Teil 3*, Koordinationsstelle der Wasserstoff-Initiative Bayern (wiba), München, 2002

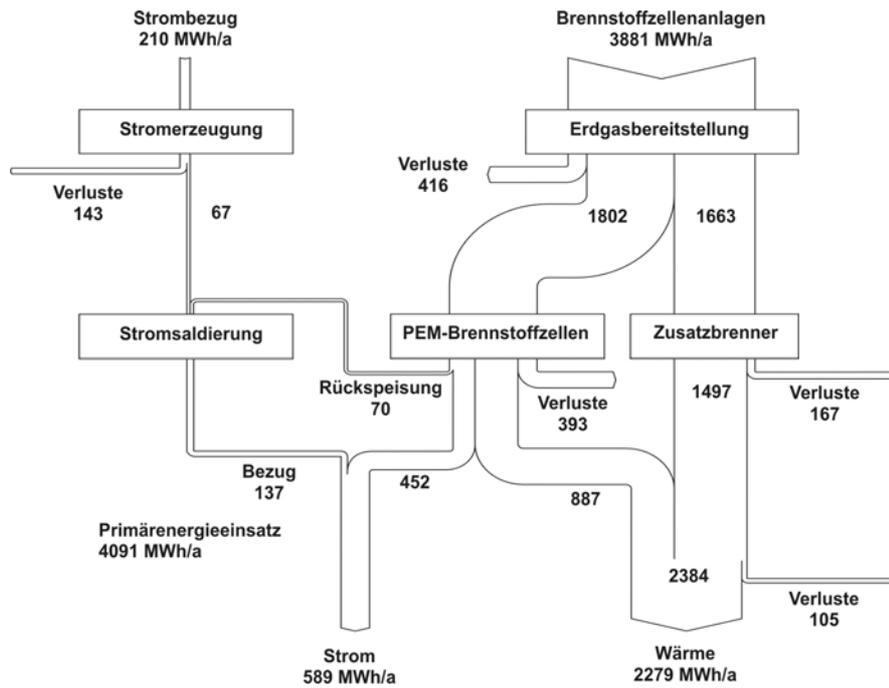


Abbildung 4-6: Strom- und Wärmebedarfsdeckung einer Siedlung mit Strom geführter PEM-Brennstoffzellenanlage

Der Vergleich der dargestellten Alternativen zur Hausenergieversorgung zeigt, dass die dezentrale Stromerzeugung mittels PEM-Brennstoffzellen zu Einsparungen des Primärenergieeinsatzes führen kann. Die dargestellten Einsparungen von 23 % gegenüber der konventionellen Bereitstellung von Strom und Wärme werden jedoch nur erzielt, wenn die erwarteten Wirkungsgrade und Betriebszeiten der PEM-Brennstoffzellen erreicht werden. Setzt man anstelle der Nutzungsgrade für den Technikbestand eine Referenzvariante mit Brennwert-Kessel und GuD-Kraftwerk an, so ergibt sich im Vergleich zur Brennstoffzellen-Variante nahezu der gleiche Primärenergieverbrauch. In der in **Abbildung 4-6** dargestellten Variante wird der Wasserstoff aus Erdgas dezentral mit einem in das Brennstoffzellensystem integrierten Reformers hergestellt. Der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems würde sich bei der Verwendung von Wasserstoff erhöhen, jedoch ist auch in diesem Fall die Wahl der Wasserstoffbereitstellung für die energetische Gesamtbilanz entscheidend. Der Einsatz von regenerativen Energieträgern zur Erzeugung von Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen im Bereich der Hausenergieversorgung könnte zur deutlichen Reduzierung des KNRA führen.

4.3.3 Beispiel für die portable Anwendung

Die Technikbewertung und Potenziale von Brennstoffzellensystemen für portable Kleingeräte wurde in /ARN 03/¹¹ erarbeitet. Ein Energieversorgungssystem für Notebooks auf Basis von Li-Ionen-Akkus wurde mit einem PEM-Brennstoffzellensystem verglichen. Die Bereitstellung der elektrischen Energie wurde für die konventionelle Alternative mit der Prozesskette Deutscher Strommix – Akku-Ladegerät – Li-Ion-Akku und für die auf Wasserstoff basierende Alternative mit der Kette Erdgas-Dampfreformierung – Druckgasflaschen – Metallhydridspeicher – PEM-Brennstoffzelle bilanziert (vgl. **Abbildung 4-7**).

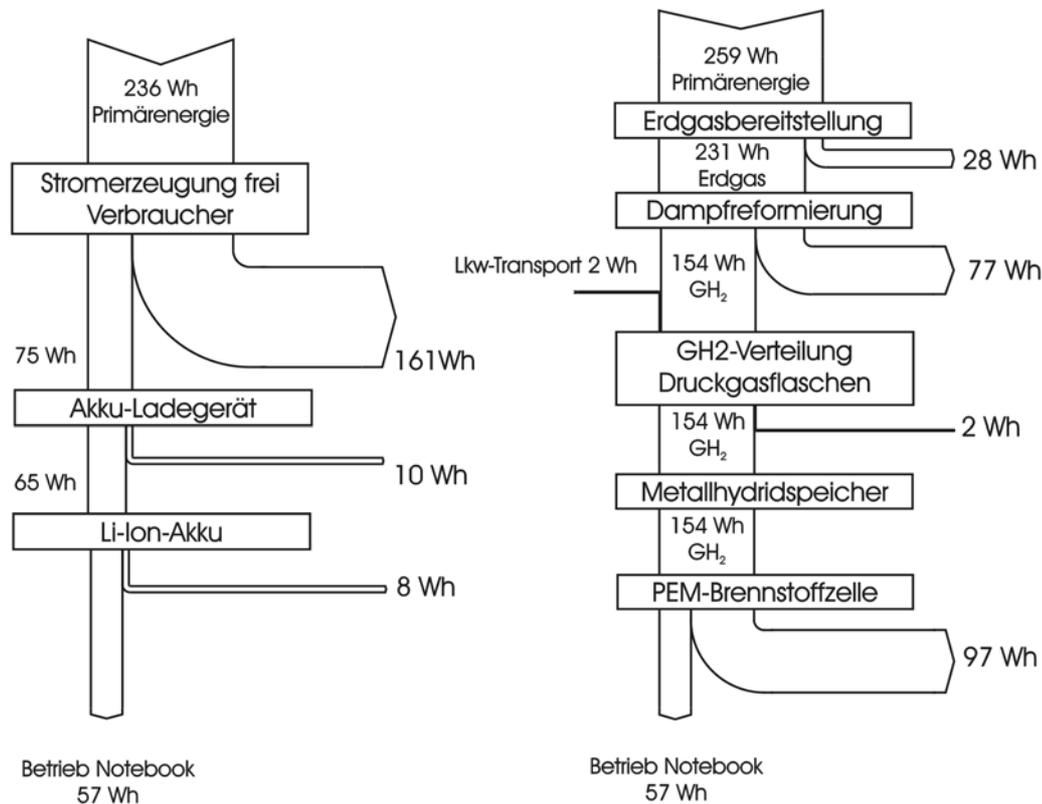


Abbildung 4-7: Energieflussdiagramme eines Notebooks mit Li-Ionen-Akku und eines Notebooks mit PEM-Brennstoffzellenversorgung

Die Brennstoffzellen-Variante weist mit einem KEA von 4,54 kWh/kWh_{el} gegenüber 4,14 kWh/kWh_{el} der Li-Ionen-Akku-Variante einen energetischen Mehraufwand von etwa 10 % auf. Das PEMFC-System kann mit einem elektrischen Wirkungsgrad von durchschnittlich 37 % die Verluste der Erdgasreformierung nicht kompensieren. Die energiewirtschaftliche Relevanz von portablen Kleingeräten ist jedoch gering. Marktchancen von Wasserstofftechnologien in portablen Anwendungen ergeben sich durch die höhere gravimetrische und volumetrische Energiedichte des Energiespeichers im Vergleich zu Akku-Technologien und den somit erreichbaren längeren Laufzeiten.

¹¹ Arndt, U.; Hauptmann, F.; Kraus, D.; Richter, S.: *Brennstoffzellensysteme für portable und stationäre Kleingeräte – Technikbewertung und Potenziale*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2003

5 Empfehlungen des Strategiekreises

Der Aufbau eines Energiesystems mit Nutzung von Wasserstofftechnologie bedarf einer langfristig angelegten Forschungs- und Umsetzungsstrategie, die es erlaubt, Risiken bei der Etablierung von Entwicklungsschritten für die öffentliche Hand einerseits und für industrielle Organisationen und Investoren andererseits handhabbar zu machen. Eine breite Einführung von Wasserstofftechniken erfordert sehr hohe Investitionen in Erzeugungskapazitäten, in die Infrastruktur und die diversen Anwendungsmöglichkeiten, die von einzelnen Unternehmen alleine nicht getragen werden können. Kooperationen können darüber hinaus helfen, die Risiken einer heute noch bestehenden geringen Wirtschaftlichkeit einiger Wasserstofftechniken zu mindern.

Die Treiber für die Markteinführung von Wasserstoff sind Energieversorgungssicherheit, Luftqualität und Gesundheitsschutz sowie globaler Klimaschutz und damit im Wesentlichen politisch-gesellschaftlicher Art, die keine direkten Anreize für betriebswirtschaftliches Handeln darstellen. Nur mit klaren politischen Signalen und daraus resultierenden ökonomischen Anreizen für Wasserstoff basierte Anwendungen werden die Marktteilnehmer sich an diesen Entwicklungskosten substantiell beteiligen. Mit diesen Maßnahmen kann auch die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie im internationalen Rahmen gestärkt werden. Öffentliche Gelder zur Förderung von Forschungsentwicklungen und deren Markteinführung sind daher unumgänglich. Dabei ist es auch wichtig, andere Politikfelder wie Umwelt und Steuern konsistent gegenüber einer Förderung der entsprechenden Technologie zu gestalten.

5.1 Aktualisierte Förderpolitik im Bereich der Wasserstofftechnologie

Um die Akteure in Forschung, Entwicklung und Industrie für die Wasserstofftechnologie und Know-how in Deutschland zu erhalten bzw. neu zu gewinnen, ist eine langfristige und stetige ideelle Unterstützung sowie finanzielle Förderung von Seiten der Politik, des Bundes und der Länder erforderlich. Hierzu soll die bisherige Förderungspolitik der Bundesregierung im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik aktualisiert werden. Dabei muss die zurzeit stark im Vordergrund stehende Brennstoffzellentechnik weiterhin mindestens im bestehenden Umfang gefördert werden. Die Vielfalt der einzusetzenden Brennstoffe ermöglicht den Durchbruch der Brennstoffzellen auch ohne Wasserstoff. Auf der anderen Seite kann Wasserstoff auch ohne die Brennstoffzelle zu einem wichtigen Bestandteil einer zukünftigen Energieversorgung werden. Deshalb ist bei der Forschung und Entwicklung der Wasserstofftechnik an die Bemühungen und Erfolge der 90er Jahre anzuknüpfen.

Verbunden mit klaren politischen Signalen und ökonomischen Anreizen müssen die Vorreiter bei der Entwicklung der Wasserstofftechnik und beim Aufbau erster Bausteine einer Wasserstoff-Infrastruktur unterstützt werden. Langfristig kann so die Privatwirtschaft für die in erheblichen Umfang benötigten Investitionen in eine Wasserstoff-Energiewirtschaft gewonnen werden.

Ziel dieser Politik muss sein, die wichtigsten Forschungsarbeiten und technischen Entwicklungen in Deutschland voranzutreiben. Nur so kann das notwendige Know-how gewonnen werden, um eine Vorreiterrolle bei der Einführung einer Wasserstoff-Energiewirtschaft einzunehmen und durch den Export von Produkten und Dienstleistungen die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie zu erhalten.

5.2 Empfohlene Schwerpunktsetzungen in der F&E-Förderung

Um die Vorteile der Wasserstoff-Energietechnik nutzen zu können und auch wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen, ist längerfristig eine kontinuierliche Förderung notwendig. Diese muss sowohl Forschungs- und Entwicklungsvorhaben als auch Demonstrationsprojekte und zukünftige Unterstützungen zur Markteinführung umfassen.

Generell darf hierbei keine politisch motivierte Präferenz von einzelnen Techniken stattfinden, die Entscheidung über den Einsatz bestimmter Technologien (z. B. Speicherung flüssig oder gasförmig, Kfz-Antrieb mittels Brennstoffzelle oder Verbrennungsmotor) muss durch den Markt bzw. den Anwender erfolgen.

Die einzelnen Wasserstofftechniken befinden sich in sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Während teilweise Grundlagenforschung vor allem zu neuen Materialien notwendig ist, bestehen daneben Techniken und Anwendungen, die kurz vor einem Markteintritt stehen. Mit geeigneten Förderstrategien kann auf diese Inhomogenität eingegangen werden und in den verschiedenen Technologiefeldern die Förderung so angepasst werden, dass keiner der Bereiche Erzeugung, Logistik und Anwendung sich als Engpass in einer aufkommenden Wasserstoff-Energiewirtschaft erweisen wird. Die im Strategiekreis diskutierten wesentlichen Förderschwerpunkte sind in **Tabelle 5-1** zusammengestellt.

Einer der ersten Schritte in Richtung einer koordinierten und langfristigen Förderung der Wasserstoff-Energietechnik sollte die Erstellung einer Wasserstoff-Strategie für Deutschland (National Hydrogen Energy Roadmap) sein. Eingebettet in das europäische und internationale Umfeld müssen hierin die Forschungsschwerpunkte der nächsten Jahre aufgezeigt, für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur eine Strategie entwickelt und Wege zur Markteinführung von Anwendungstechniken dargestellt werden.

Zwei wichtige übergeordnete Forschungsschwerpunkte sind bereits zum heutigen Zeitpunkt ersichtlich:

- CO₂-neutrale Erzeugung von Wasserstoff und
- die Wasserstoff-Speicherung für den mobilen und portablen Einsatz.

Ergänzend wäre auch Forschungsförderung in den Anwendungstechniken wichtig. Es besteht auch hier dringender Handlungsbedarf zur Entwicklung geeigneter technischer Lösungen, um den Durchbruch der Wasserstoff-Anwendungen auf dem freien Markt zu ermöglichen.

Tabelle 5-1: Technologiefelder mit hoher Forschungspriorität

Förderungsbereiche				
	Systemanalyse	Grundlagenforschung	Anwendungsnahe F&E	Demonstrationsprojekte
Erzeugung		alternative H ₂ -Erzeugungstechniken Katalysatortechnik für dezentrale Reformer CO ₂ -Abscheidung und Speicherung bei Vergasungstechniken	HD-Elektrolyse H ₂ aus Vergasungstechniken, z. B. aus Kohle oder Biomasse H ₂ aus (Offshore-)Windenergie Systemfragen zu dezentralen Reformern (für Tankstelle, die stationäre und portable Anwendung) H ₂ -permeable Membranen Gasaufbereitung /-reinigung	
	Logistik	Ganzheitliche Technologiebewertung insb. Nutzungskonflikte	Gasabtrennung (H ₂ und CO ₂) neue Speichertechnologien	hocheffiziente Verflüssigungsanlagen GH ₂ - und LH ₂ -Speicher Tankstellenkomponenten Pipeline-Systeme und Hythane Sicherheitstechnik
Anwendung		Materialentwicklung für PEM, MCFC und SOFC Materialentwicklung für HD-H ₂ -Turbinen	H ₂ -Verbrennungsmotor H ₂ -Brenner für Gasturbinen katalytische Brenner Membran-Fertigung BZ-Fertigung Peripherie-Komponenten für BZ- und H ₂ -Anwendungen	
Technologiebereich				

5.3 Demonstrationsvorhaben

Groß angelegte Demonstrationsprojekte (z. B. EU-weite Lighthouse Projects), in denen die Erzeugung, Verteilung und Infrastruktur für Wasserstoff zusammen mit Anwendungen getestet werden, bieten deutschen Entwicklern und Herstellern die Möglichkeit, ihre Techniken zu testen und im internationalen Maßstab zu vergleichen. Die im Rahmen solcher Projekte gesammelten Praxiserfahrungen über die Alltagstauglichkeit und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten sind ein wichtiger Bestandteil der Technikentwicklung und die beteiligten Firmen gewinnen hierdurch einen bedeutenden Wissensvorsprung. Die Erkenntnisse können auch in internationalen Gremien zur Normung und Standardisierung eingebracht werden.

Die politische und finanzielle Unterstützung von EU-Lighthouse Projects und nationalen Pilotprojekten (z. B. H₂-Autobahn) ist notwendig, um international agierende Großunternehmen und auch kleine und mittelständische Unternehmen in ihrem Engagement zu bestärken. In Zukunft können Regionen mit Wasserstoff-Demonstrationsprojekten und geeigneter Infrastruktur als Keimzellen für eine Wasserstoff-Energiewirtschaft dienen.

5.4 Gesetzgebung und Standardisierung

Die heutige Gesetzgebung zum Gebrauch von Wasserstoff ist nicht für eine alltägliche Wasserstoff-Energiewirtschaft geeignet. So sind die hohen Kosten für H₂-Einrichtungen (z. B. Tankstellen) teilweise auch dadurch begründet, dass die vorgeschriebenen Genehmigungsverfahren sehr zeit- und arbeitsintensiv sind.

Aus diesem Grund ist es notwendig, eine praxistaugliche und einheitliche Rechtsgrundlage für Herstellung, Logistik und Anwendung von Wasserstoff zu schaffen. Hierfür müssen nicht in allen Bereichen neue Regelwerke geschaffen werden, es genügt vielfach, bestehende anzupassen und deren Anwendung zu erleichtern, z. B. durch eine Reduktion der an der Genehmigung beteiligten Institutionen. Europäische Richtlinien, die in allen Mitgliedsländern zügig und in gleicher Art und Weise in nationales Recht umgesetzt werden können, sind wünschenswert.

International definierte Gesetze und Vorschriften beschleunigen eine gemeinsame Entwicklung und Markteinführung der Wasserstofftechnik. Die Schaffung und Umsetzung solcher Richtlinien muss zügig vonstatten gehen, damit diese nicht als Hindernis wirken, sondern als Hilfe dienen und planerische Sicherheit ermöglichen.

Von der Industrie vereinbarte Normen erleichtern und beschleunigen die Marktdurchdringung der Wasserstofftechnik. Die Festschreibung dieser Normen ist Aufgabe der beteiligten Unternehmen, die Schaffung geeigneter rechtlicher und politischer Rahmenbedingungen ist durch staatliche Stellen zu gewährleisten.

5.5 Schnittstellen zu internationalen Aktivitäten

Kooperationen auf europäischer und internationaler Ebene wie die EU H₂/FC-TP und die IPHE sind erforderlich, um durch einen Austausch von Know-how die Entwicklung zu beschleunigen, Grundlagenwissen im weltweiten Maßstab zu messen und Wege für die international notwendige Standardisierung von Basistechnologie zu erreichen.

Sowohl die europäische H₂/FC TP als auch die internationale IPHE sind erst Ende 2003 mit großer politischer Unterstützung ins Leben gerufen worden. Die Gremien der beiden Initiativen sind wenige Male zusammengetroffen und es bleibt für die deutschen Delegierten noch genügend Raum, mit koordinierten Vorschlägen und Projektideen diese Initiativen mit Leben zu füllen und für einen Mehrwert für Deutschland zu sorgen. Die Koordinierung all dieser Aktivitäten ist notwendig, um die Effizienz der Arbeiten zu steigern und den Wert der F&E-Anstrengungen zu erhöhen und Doppelarbeit zu vermeiden.

Das deutsche Engagement in den europäischen und internationalen Aktivitäten bringt nur dann den angestrebten Mehrwert, wenn diese Aktivitäten auf nationaler Ebene abgestimmt und gebündelt werden und verstärkt, um zielgerichtet Möglichkeiten des Informationsaustauschs mit den deutschen Unternehmen, Wissenschaftseinrichtungen und beteiligten Ministerien auf Bundes- und Länderebene zu schaffen. Hierzu bildet der BMWA Strategiekreis eine hervorragende Plattform, weil hier neben den Wasserstoff-Akteuren auch die Brennstoffzellen-Experten des BERTA-Kreises einbezogen sind. Auch sind die Vertreter der Bundesländer involviert, die auf dem Gebiet der Brennstoffzellen und des Wasserstoffes aktive Programme haben.

5.6 Die Zukunft des Strategiekreises

Der H₂-Strategiekreis hat mit der Abfassung dieses Berichts zur technologischen Wasserstoffstrategie seine erste Aufgabe abgeschlossen.

Es wurde jedoch angeregt, aus dem H₂-Strategiekreis und dem BERTA-Kreis einen gemeinsamen Beirat HYBERT zu schaffen, der Empfehlungen an die beteiligten Bundesministerien entwickeln soll. Ferner soll er die Strategie für die deutsche Rolle in der europäischen und internationalen Zusammenarbeit erarbeiten und die nationale Koordination zwischen den Bundesministerien sowie den Ländern, der Industrie und der Forschung erleichtern.

Für die oben genannten Aufgaben sind ggf. Strukturen aufzubauen, die von der Informationsbeschaffung und -aufbereitung bis zur Informationsvermittlung gehen und das Management eines solchen Beirats transparent, unabhängig und effektiv gestalten. In diesem Zusammenhang wird die Schaffung eines "Koordinierungsbüros Wasserstoff und Brennstoffzellen", welche zurzeit ins Auge gefasst wird, vom Strategiekreis grundsätzlich befürwortet.

6 Anhang

6.1 Die Teilnehmer des Strategiekreises Wasserstoff im BMWA

Sprecher des Strategiekreises

Prof. Dr. U. Wagner *	Forschungsstelle für Energiewirtschaft / TU München
Prof. Dr. J. Garcke *	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung
Dr. H.J. Neef *	Forschungszentrum Jülich

Sprecher der Arbeitsgruppen

Dr. K. Willnow *	Siemens	AG 1 Rahmenbedingungen
Dr. J. Wolf / Dr. O. Weinmann *	Linde Vattenfall Europe	AG 2 Bereitstellung und Logistik
Dr. K. Scheuerer *	BMW	AG 3 Anwendungstechnologien

Teilnehmer des Strategiekreises (* Mitautoren des Strategiepapiers)

H. Baues	Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung, NRW
F. Bonaldo	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Dr. K. Bonhoff	DaimlerChrysler
G. Brandes	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Dr. H.-J. Cirkel *	Siemens
A. Dahlen	Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung, NRW
Dr. R. van Doorn	Audi
Dr. G. Eisenbeiß	Forschungszentrum Jülich
Dr. B. Emonts	Forschungszentrum Jülich
Dr. R. Ewald	Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen
Dr. M. Fishedick *	Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie
Dr. Ch. Fricke	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Dr. H. Geipel	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
H. Grubel *	Hamburgische Electricitäts-Werke
H. Harting	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Dr. H. Heinrich	Volkswagen
U. Herrlett	Lurgi
W. Heuer *	DaimlerChrysler
Dr. M. Hinricher	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
Prof. Dr. B. Höhle *	Forschungszentrum Jülich

R. Kaiser	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
T. Knobloch	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
O. Kopp	Stadtwerke Düsseldorf
Dr. K. Kübler	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Dr. W. Lehnert *	Forschungsallianz Brennstoffzellen Baden-Württemberg
P. Lück	Volkswagen
Dr. H. W. Lüke	Shell Global Solutions (Deutschland)
P. Malinowski	Forschungszentrum Jülich
H. Markus	Forschungszentrum Jülich
Dr. W. Mauch	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
Dr. Ch. Mohrdieck *	DaimlerChrysler
W. Müller	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Dr. G. Olk	Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, BY
N. Parker	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
J. Reijerkerk	Linde
Dr. V. Riechmann	Ministerium für Wirtschaft u. Mittelstand, Technologie und Verkehr, NRW
Chr. dos Santos Costa	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, BaWü
J. Schindler	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik
T. Schlick	Verband der Automobilindustrie
H. Schneider	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Dr. W. Schnurnberger *	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
Dr. J. Seier *	Forschungszentrum Jülich
M. Stefener	SFC Smart Fuel Cell
Prof. Dr.-Ing. D. Stolten *	Forschungszentrum Jülich
G. Stempel	BP Deutschland
Dr. R. Urban	Ministerium für Wissenschaft und Forschung, NRW
M. Weltmeyer	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
R. Wurster *	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik
Chr. Zeiss	Deutsche Energieagentur

Redaktionelle Leitung

Prof. Dr. U. Wagner*	Forschungsstelle für Energiewirtschaft / TU München
S. Richter*	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
S. von Roon*	Forschungsstelle für Energiewirtschaft

6.2 Darstellung der Landesinitiativen in Deutschland



Abbildung 6-1: Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiativen in Deutschland

Übersicht der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Landesinitiativen Deutschlands

Bundesland:	Baden-Württemberg
Bezeichnung:	Brennstoffzellen-Initiative Baden-Württemberg Dach von: <ul style="list-style-type: none"> • Forschungsallianz Brennstoffzellen Baden-Württemberg (FABZ) • Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V. (WBZU) • Kompetenz und Innovationszentrum Brennstoffzelle der Region Stuttgart (KIBZ)
Träger:	FABZ: Ministerium für Wissenschaft Forschung und Kunst Baden-Württemberg und Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg WBZU: Land Baden-Württemberg und Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit KIBZ: Mitglieder
Gründung:	Mai 2001
Förderung:	Gesamtvolumen: ca. €4 Mio. pro Jahr
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	Projekte in den Bereichen Forschung, Entwicklung, Weiterbildung, Technologieumsetzung
Anzahl der Mitglieder:	über 60 Mitglieder aus Bildung, Forschung, Wirtschaft und Verbänden
Angesiedelt bei:	FABZ bei ZSW-Stuttgart, WBZU: Helmholtzstraße 6, 89081 Ulm, KIBZ bei DLR Stuttgart
Ansprechpartner:	FABZ: Dr. W. Lehnert, WBZU: Dipl.-Ing. (FH) T. Aigle, KIBZ: Dr. B. Schaible
Internet:	www.brennstoffzellen-initiative.de
E-Mail	werner.lehnert@zsw-bw.de , info@wbzu.de , dbs-consult@t-online.de

Bundesland:	Bayern
Bezeichnung:	wiba – Wasserstoff-Initiative Bayern
Träger:	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie
Gründung:	1996
Förderung:	ca. €25 Mio.
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	seit 1997 mehr als 30 Projekte mit einem Finanzvolumen von ca. €75 Mio.
Anzahl der Mitglieder:	ca. 50 Projektpartner
Angesiedelt bei:	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Ansprechpartner:	Prof. Dr.-Ing. U. Wagner
Internet:	www.wiba.de
E-Mail:	info@wiba.de

Bundesland:	Hamburg
Bezeichnung:	Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V.
Träger:	---
Gründung:	1997
Förderung:	---
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	3 / ---
Anzahl der Mitglieder:	---
Angesiedelt bei:	---
Ansprechpartner:	Dr. W. Fürwentsches
Internet:	www.h2hamburg.de
E-Mail:	---

Bundesland:	Hessen
Bezeichnung:	Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen e.V.
Träger:	Mitglieder (Unternehmen, Institute, Einzelpersonen); Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung über die Technologie Stiftung Hessen GmbH
Gründung:	April 2002
Förderung:	keine institutionelle Förderung
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	Projekte in den Bereichen Forschung, Entwicklung, Weiterbildung, Technologieumsetzung
Anzahl der Mitglieder:	15
Angesiedelt bei:	Infraserv GmbH & Co. Höchst KG
Ansprechpartner:	Dr. H. Lienkamp
Internet:	www.brennstoffzelle-hessen.de
E-Mail:	heinrich.lienkamp@infraserv.com

Bundesland:	Niedersachsen
Bezeichnung:	Landesinitiative Brennstoffzelle Niedersachsen
Träger:	Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur Niedersächsisches Umweltministerium
Gründung:	April 2004
Förderung:	€9,5 Mio. für 2004 - 2007
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	---
Anzahl der Mitglieder:	derzeit ca. 12 Partner
Angesiedelt bei:	Sperlich Consulting GmbH
Ansprechpartner:	Dipl.-Ing. W. Axthammer
Internet:	www.brennstoffzelle-nds.de
E-Mail	info@brennstoffzelle-nds.de

Bundesland:	Nordrhein-Westfalen
Bezeichnung:	Kompetenz-Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW
Träger:	Ministerium für Energie, Verkehr und Landesplanung des Landes NRW Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes NRW
Gründung:	April 2000
Förderung:	€50 Mio. aus Mitteln des Energie- und des Wissenschaftsministeriums NRW
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	50 Projekte, Gesamtvolumen €100 Mio.
Anzahl der Mitglieder:	ca. 250 Unternehmen und 50 Forschungseinrichtungen
Angesiedelt bei:	Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, Düsseldorf
Ansprechpartner:	Prof. Dr. Ing. D. Stolten, Forschungszentrum Jülich
Internet:	www.brennstoffzelle-nrw.de
E-Mail:	brennstoffzelle@energieland.nrw.de

Bundesland:	Mecklenburg-Vorpommern
Bezeichnung:	Wasserstofftechnologie-Initiative Mecklenburg-Vorpommern e.V.
Träger:	Wirtschaftsministeriums Mecklenburg-Vorpommern
Gründung:	Februar 2002
Förderung:	Projektförderung durch das Land Mecklenburg-Vorpommern in Höhe von €614.000,- bis 2005
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	seit 2000 zehn Projekte mit einem Volumen von ca. €15 Mio.
Anzahl der Mitglieder:	ca. 19
Angesiedelt bei:	---
Ansprechpartner:	Dr.-Ing. Gerhard Buttkewitz
Internet:	www.wti-mv.de
E-Mail:	info@wti-mv.de

Bundesland:	Rheinland-Pfalz
Bezeichnung:	Zukunftstechnologie Brennstoffzelle Rheinland-Pfalz
Träger:	Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau, Rheinland-Pfalz
Gründung:	April 2002
Förderung:	€360.000,- (für 3 Jahre)
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	---
Anzahl der Mitglieder:	---
Angesiedelt bei:	---
Ansprechpartner:	Prof. Dr. K. Keilen
Internet:	---
E-Mail:	---

Bundesland:	Sachsen
Bezeichnung:	PEM-Brennstoffzelle Sachsen
Träger:	Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit
Gründung:	2003
Förderung:	---
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	---
Anzahl der Mitglieder:	12
Angesiedelt bei:	ZTS Zentrum für Technologiestrukturentwicklung
Ansprechpartner:	Dipl.-Ing. S. Stöhr
Internet:	http://www.pem-brennstoffzelle-sachsen.de/
E-Mail:	stor@zts.de

Bundesland:	Sachsen-Anhalt
Bezeichnung:	Brennstoffzellenverband Sachsen-Anhalt
Träger:	---
Gründung:	---
Förderung:	---
Projekte: (Anzahl/Projektvolumen)	---
Anzahl der Mitglieder:	---
Angesiedelt bei:	---
Ansprechpartner:	Dr. I. Benecke
Internet:	http://www.brennstoffzelle-sa.de
E-Mail:	info@brennstoffzelle-sa.de

Abkürzungsverzeichnis

ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route
AGR	Abgasrückführung
APU	Auxilliary Power Unit
ARGEMUC	Arbeitsgemeinschaft Wasserstoffprojekt Flughafen München
BERTA	Brennstoffzellen: Entwicklung und Erprobung für stationäre, mobile und portable Anwendungen
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
BREZEL	Fachausschuss Brennstoffzelle des VDI
BZ	Brennstoffzelle
CEN	Comite Europeen de Normalisation
CFK	Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COORETEC	CO ₂ -Reduktionstechnologien
CUTE	Clean Urban Transport for Europe
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen Verband
ESF	Elektro-Straßenfahrzeug
FCE	Fuel Cell Europe
GH ₂	Gaseous Hydrogen
GRPE	Groupe de Rapporteurs de Pollution et des Emissions
GTR	Global Technical Regulation
GuD	Gas- und Dampfturbinenanlage
H ₂ /FC TP	Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform
HC	Hydrocarbons
IBZ	Initiative Brennstoffzelle
IEC	International Electrotechnical Commission
IPHE	International Partnership for the Hydrogen Economy
ISO	International Standards Organisation
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KNRA	Kumulierter nicht-regenerativer Energieaufwand
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LH ₂	Liquid Hydrogen
LNG	Liquified Natural Gas
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NGSA-Verfahren	Natural Gas Assisted Steam Electrolyser

NO _x	Stickoxide (Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO ₂)
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PtJ	Projektträger Jülich
RME	Raps-Methyl-Ester
RID	Règlement International concernant le transport des marchandises Dangereuses par chemin de fer
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SWATH	Small Waterplane Area Twin Hull
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
VES	Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie
VM	Verbrennungsmotor
wiba	Wasserstoff-Initiative Bayern
ZIP	Zukunftsinvestitionsprogramm der Bundesregierung