



Hamburgisches  
WeltWirtschafts  
Institut

# Wasserstoff im Verkehr – Anwendungen, Perspektiven und Handlungsoptionen

Leon Leschus, Henning Vöpel

HWWI Policy

Report Nr. 9  
des

HWWI-Kompetenzbereiches  
Wirtschaftliche Trends

**HWWI Policy Report**  
**Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI)**  
**Heimhuder Str. 71 | 20148 Hamburg**  
**Tel +49 (0)40 34 05 76 - 0 | Fax +49 (0)40 34 05 76 - 776**  
**info@hwwi.org | www.hwwi.org**  
**ISSN 1862-4944 | ISSN (Internet) 1862-4952**

**Redaktion:**  
**Thomas Straubhaar (Vorsitz)**  
**Michael Bräuninger (verantw.)**  
**Silvia Stiller**  
**Matthias Busse**  
**Tanja El-Cherkeh**

**© Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI) | Oktober 2008**  
Alle Rechte vorbehalten. Jede Verwertung des Werkes oder seiner Teile ist ohne Zustimmung des HWWI nicht gestattet. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Mikroverfilmung, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Die Reihe wird in Deutschland gedruckt.

# Wasserstoff im Verkehr – Anwendungen, Perspektiven und Handlungsoptionen

Leon Leschus, Henning Vöpel

Studie im Auftrag der Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V.

Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI) | 2008

# Inhalts- verzeichnis

Executive Summary	5
<b>1 Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>2 Klima- und energiepolitische Szenarien</b>	<b>9</b>
2.1   Versorgungssicherheit und Klimawandel	9
2.2   Verkehr und nachhaltige Mobilität	11
<b>3 Wasserstoff im Verkehr</b>	<b>14</b>
3.1   Wasserstoff: von der Herstellung bis zum Verbrauch	14
3.2   Marktreife und alternative Technologien	16
3.3   Perspektiven und Potenziale von Wasserstoff	20
<b>4 Wirtschaftspolitische Förderung von Wasserstoff</b>	<b>23</b>
4.1   Initiativen und Förderprogramme	23
4.2   Strategien und Instrumente	25
4.3   Regionale Fördermaßnahmen	28
<b>5 Fazit und Politikempfehlungen</b>	<b>31</b>
<b>6 Literatur</b>	<b>33</b>
<b>7 Internetquellen</b>	<b>35</b>

# Abbildungs- verzeichnis

Abb. 1 Prognose der Weltenergienachfrage	9
Abb. 2 Förderung alternativer Technologien, Marktreife und Preispfad	11
Abb. 3 CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland nach Sektoren 2006	11
Abb. 4 Supply Chain des Wasserstoffs	14
Abb. 5 Umwandlungsketten für Wasserstoff	15
Abb. 6 Regionale und überregionale Verkehrsströme	29

# Tabellen- verzeichnis

Tab. 1 Verschiedene Antriebe und mit ihnen verbundene Probleme	19
Tab. 2 Förderprogramme für Wasserstofftechnologien	24
Tab. 3 Wirtschaftspolitische Instrumente zur Förderung von Wasserstoff	28

Angesichts endlicher fossiler Energieressourcen und eines drohenden Klimawandels stellt sich die Frage, welchen Beitrag der Einsatz der Wasserstofftechnologie zur Versorgungssicherheit und zur Reduzierung der Emissionen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) beitragen kann. Wasserstoff stellt keine primäre Energiequelle dar, sondern ist ein Energieträger, mit dessen Hilfe Erzeugung und Verwendung von Energie zeitlich und räumlich getrennt werden kann. Er lässt sich in der Stromwirtschaft und insbesondere im Verkehr einsetzen. Gegenwärtig werden im Verkehrsbereich noch fast vollständig fossile Energieträger eingesetzt, was dazu führt, dass der Verkehrssektor rund 21 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland verursacht. Hinzu kommt, dass das weltweite Verkehrsaufkommen in den nächsten Jahrzehnten – insbesondere getrieben durch die bevölkerungsreichen und schnell wachsenden BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und China) – stark zunehmen wird. Es gilt daher, die Nutzung erneuerbarer Energien auch für den Verkehr technologisch zu erschließen und Substitutionsmöglichkeiten zu fossilen Kraftstoffen zu schaffen. Der Einsatz von erneuerbaren Energien und alternativen Antriebstechnologien im Verkehr ist daher von großer Bedeutung für die nachhaltige Sicherung der Mobilität im 21. Jahrhundert. Je früher diese zur Marktreife gelangen, desto schneller lassen sich die Ziele Versorgungssicherheit und Klimaschutz erreichen. Auch die angesichts abnehmender Vorkommen und wachsender Nachfrage steigenden Ölpreise machen die frühzeitige Entwicklung alternativer Technologien zu einer wichtigen strategischen Aufgabe.

Grundsätzlich gilt es, durch wirtschaftspolitische Maßnahmen einen Wettbewerb der Technologien um die beste Lösung zu initiieren. Die Wasserstofftechnologie hat sich dabei als eine der vielversprechenden Zukunftstechnologien etabliert. Da beim Verbrauch von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle beim Auto ausschließlich Wasserdampf entweicht, kann der Einsatz von Wasserstoff im Verkehr einen Beitrag zu den klimapolitischen Zielen leisten. Zur Beurteilung der Umweltfreundlichkeit des Wasserstoffs ist die Erstellung einer Gesamtprimärenergie- und einer CO<sub>2</sub>-Bilanz von der Erzeugung bis zum Verbrauch wichtig. Insbesondere die Eigenschaft von Wasserstoff, Energie zu speichern und somit Erzeugung und Verwendung von Energie räumlich und zeitlich zu trennen, bietet interessante Möglichkeiten. So kann mit Hilfe von Wasserstoff aus sauberen Quellen wie zum Beispiel Windkraft erzeugte Energie im Verkehr eingesetzt werden. Wie viel Potenzial in der Wasserstofftechnologie gesehen wird, zeigen die vielfältigen Förderprogramme auf nationaler und supranationaler Ebene. Auch die Europäische Union (EU) hat eine Plattform zur Förderung der Wasserstofftechnologie und zum Austausch zwischen Stakeholdern aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft initiiert. Ziel ist die Weiterentwicklung der Wasserstofftechnologie zur Marktreife in der praktischen Anwendung.

Alternative Antriebstechnologien sind bislang jedoch kaum wettbewerbsfähig. Es stellt sich daher die Frage nach geeigneten Fördermaßnahmen und Anreizmechanismen. Ein Instrument zur Förderung neuer Antriebstechnologien besteht in einer CO<sub>2</sub>-Steuer im Verkehr. Eine weitere Möglichkeit wäre die Einbindung des Verkehrssektors in den CO<sub>2</sub>-Handel. Dadurch werden

neue, CO<sub>2</sub>-arme Technologien bereits über den Preismechanismus wettbewerbsfähiger und es bieten sich für private Anbieter Anreize für technologische Innovationen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion. Daneben bieten sich auch Ansätze für regionale Fördermaßnahmen, da durch das Engagement der Politik das Investitionsrisiko gemindert wird. Grundsätzlich können wirtschaftspolitische Fördermaßnahmen den Prozess zur Marktreife der Wasserstofftechnologie erheblich beschleunigen. Insbesondere die hohen Infrastrukturinvestitionen, die zum Aufbau eines entsprechenden Versorgungsnetzes notwendig sind, können für neue und effiziente Technologien den Markteintritt erschweren oder sogar verhindern. Staatliche Anfangsinvestitionen können erforderlich sein, um in den Bereich der wettbewerbsfähigen, kostenminimalen Serienproduktion zu gelangen. Ergänzend können auf regionaler Ebene durch öffentlich geförderte Anwendungsfelder der Wasserstoff- und Brennstofftechnologie ungenutzte Optimierungspotenziale und neue strategische Optionen erschlossen werden.

Für Deutschland birgt eine technologische Führerschaft in der Umwelt- und Klimatechnik in Verbindung mit der traditionell wichtigen Automobilindustrie große Ertragschancen. Dies setzt eine aktive Innovations- und Technologiepolitik im Bereich alternativer Antriebstechnologien voraus. Im Rahmen einer politischen Entwicklungsstrategie sollte auch die Wasserstofftechnologie eine wichtige Säule bilden. Ferner existieren auch regionale Ansätze zur Förderung von Wasserstoff. Gerade in Ballungszentren kann der Aufbau einer regionalen Subinfrastruktur effizient und der Einsatz von Wasserstoffautoflotten sinnvoll sein. Für Hamburg besteht hier die Chance, auf den bestehenden Strukturen im Bereich der Wasserstofftechnologie aufzusetzen und die erworbene Reputation zu stärken. Für Metropolregionen ist es zunehmend wichtig, den Wirtschaftsstandort über Spitzentechnologien zu fördern. In der Zukunft ist im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie eine überregionale Vernetzung anzustreben.

Als Ergebnis der Studie lassen sich die folgenden zehn Punkte festhalten:

1. Um die klima- und energiepolitischen Ziele der CO<sub>2</sub>-Reduktion und Versorgungssicherheit zu erreichen, müssen auch im Verkehr alternative, saubere Antriebstechnologien entwickelt werden und zum Einsatz kommen.
2. Innovative Antriebstechnologien sollten im Wettbewerb weiterentwickelt werden. Die Beschränkung auf eine Technologie allein birgt das Risiko, auf die „falsche“ Technologie zu setzen.
3. Im Verkehr bestehen erhebliche Synergien von Wasserstoff und elektrischen Antrieben, die genutzt werden können. Wasserstoff und Brennstoffzellen liegen mit elektrischen Antrieben auf dem gleichen technologischen Entwicklungspfad.
4. Um die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff und Brennstoffzellen im Verkehr zu erreichen, müssen Fahrzeuge weiter optimiert und die Infrastruktur auf- bzw. ausgebaut werden. Hebel dazu sind nachfrageabhängige Skaleneffekte und die Erprobung in der Praxis.
5. Der öffentliche Verkehr kann erheblich zur Nachfragsteigerung und zu einer schnellen Erschließung von Optimierungspotenzialen in der Praxis beitragen.
6. Hamburg hat als Keimzelle für eine künftige Wasserstoffwirtschaft bereits funktionstüchtige Strukturen aufgebaut.

7. Wasserstoff als Energieträger und Brennstoffzellen als Antriebe bieten für Hamburg Chancen beim Klimaschutz und können neue Märkte erschließen.
8. In der Zukunft muss ein überregionaler Ausbau und die Vernetzung mit anderen Anwendern in Deutschland und Europa verstärkt werden. Beim weiteren Ausbau insbesondere von Infrastruktur müssen die Förderangebote des Bundes und der EU aktiv genutzt werden.
9. Die Wasserstoffaktivitäten sollten im Rahmen einer übergeordneten Zukunftsstrategie der Hansestadt ausgebaut werden. Dabei sollte der Fokus auf der Nutzung von Wasserstoff aus regenerativen Quellen liegen.
10. Im Mittelpunkt sollten weitere Anwendungen in der Praxis stehen, um Zukunftstechnologien frühzeitig zur Marktreife zu führen.

# 1 | Einleitung

Auch der Verkehr muss einen Beitrag zu Klimaschutz und Versorgungssicherheit leisten.

Neue Technologien sind hierfür erforderlich.

Wasserstoff ist eine der zentralen Zukunftstechnologien.

Knapper werdende fossile Energiereserven, ein weltweit steigender Energiebedarf sowie der drohende Klimawandel lenken den Blick auf die Frage, wie in Zukunft eine nachhaltige und klimaverträgliche Energieversorgung gewährleistet werden kann. Erneuerbare Energien und neue Technologien sind der Schlüssel zu mehr und vor allem mehr sauberer Energie sowie zu höherer Energieeffizienz. Die Entwicklung und der Einsatz neuer Technologien betreffen vor allem den Verkehrssektor, der in Deutschland rund 21 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht und in dem es bislang zu fossilen Kraftstoffen kaum marktfähige Alternativen gibt.

Die Erforschung neuer Technologien und ihre zeitnahe Weiterentwicklung zur Marktreife sind daher zwingend erforderlich. Dies gilt umso mehr, als das weltweite Verkehrsaufkommen in den nächsten Jahren deutlich anwachsen wird. Es stellt sich daher die Frage, welchen Beitrag der Verkehr zu den klimapolitischen Zielen leisten kann und wie Mobilität angesichts wachsenden Verkehrsaufkommens sowohl im Personen- als auch im Gütertransport nachhaltig gesichert werden kann. Eine der möglichen und Erfolg versprechenden Zukunftstechnologien ist die Wasserstofftechnologie. Eine Voraussetzung für die Etablierung neuer Technologien ist deren Erprobung in der Praxis. Frühe Anwendungen schaffen Ansatzpunkte und Anreize für eine Weiterentwicklung neuer Technologien zur Marktreife.

Im Folgenden werden die Stufen der Supply Chain des Wasserstoffs von der Herstellung bis zum Verbrauch, der Stand der Technik, Pilotprojekte und aktuelle Förderprogramme von Wasserstoff dargestellt. Anschließend werden die Perspektiven von Wasserstoff und wirtschaftspolitische Instrumente zur Förderung analysiert. Gegenstand der Studie sind ausdrücklich nicht Einschätzungen und Prognosen zu den technologischen Entwicklungsmöglichkeiten der Wasserstofftechnologie. Es geht vielmehr um eine strategische Ausleuchtung der Fragen, unter welchen klima- und energiepolitischen Bedingungen die Wasserstofftechnologie einen Beitrag zu Klimaschutz und Versorgungssicherheit im Verkehrssektor leisten kann und wie durch Fördermaßnahmen sowohl in Forschung und Entwicklung (F&E) als auch in der praktischen Anwendung vorhandene Optimierungspotenziale erschlossen und eine frühzeitige Marktreife erreicht werden können.



## 2 | Klima- und energiepolitische Szenarien

### 2.1 | Versorgungssicherheit und Klimawandel

Fossile Energieträger stehen nur endlich zur Verfügung. Hinzu kommt, dass die Energienachfrage insbesondere durch die wachsende Weltbevölkerung und die bevölkerungsreichen und schnell wachsenden BRIC-Staaten in den nächsten Jahrzehnten stark steigen wird (vgl. Abbildung 1). Die zunehmende Knappheit an Energie führt zu steigenden Preisen und gefährdet die Versorgungssicherheit.

Ein weltweit steigender Energiebedarf ...

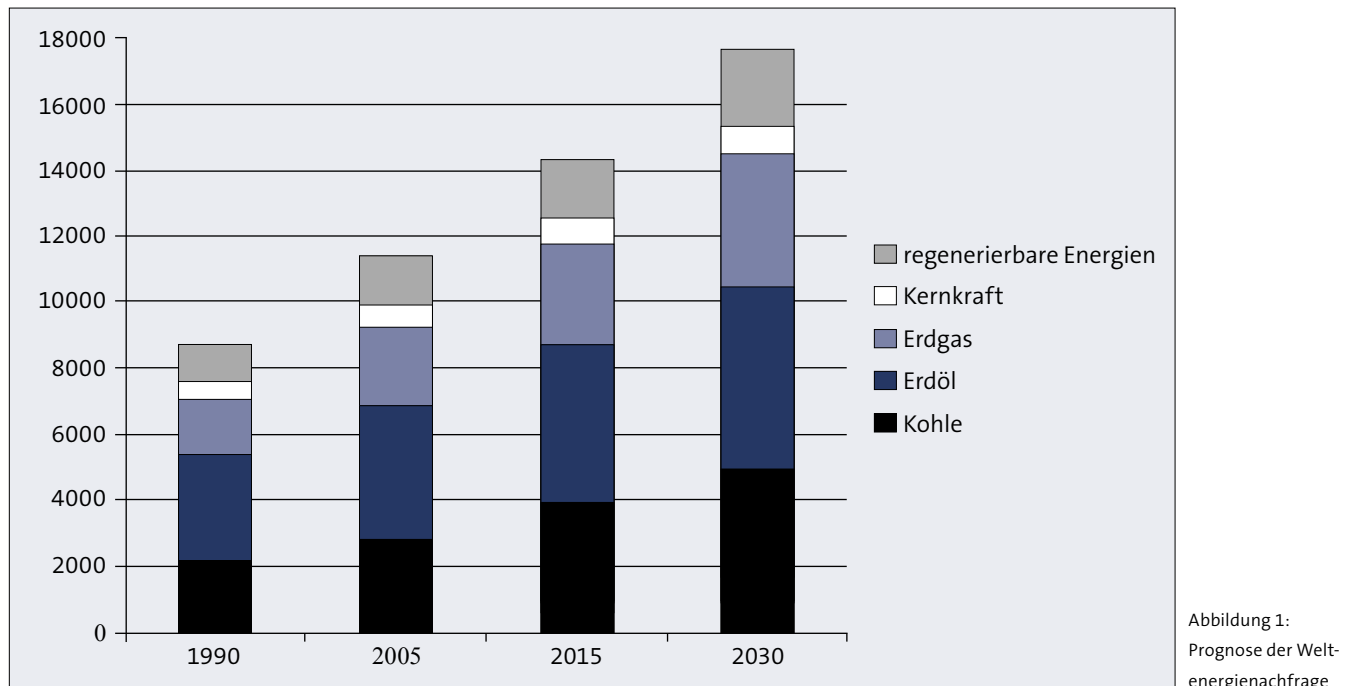


Abbildung 1:  
Prognose der Weltenergienachfrage

Quelle: IEA 2007.

Neben der Versorgungssicherheit und den Energiepreisen spielt der Klimawandel in der gegenwärtigen Energiepolitik eine wichtige Rolle. Auf Ebene der EU hat man sich auf eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2020 um 20 Prozent gegenüber dem Basisjahr 1990 geeinigt. In diesem Zeitraum soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Energiemix der EU von derzeit 6,5 Prozent auf 20 Prozent steigen. Deutschland hat auf der Kabinettsklausur in Meseberg 2007 Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund 40 Prozent beschlossen. Hamburg strebt im Rahmen einer politischen Schwerpunktbildung „Klimaschutz“ bis zum Jahr 2012 eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um zwei Millionen Tonnen pro Jahr gegenüber dem Jahr 2007 an; dies entspricht einer Verdopplung des Minderungsvolumens von jährlich rund 1,7 Millionen Tonnen, das seit 1990 erreicht worden ist (vgl. Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft, Drucksache 18/6803, 2007).

Die steigende Energienachfrage einerseits und der drohende Klimawandel andererseits erfordern mehr Energie und vor allem mehr saubere Energie. Es gilt daher von Seiten der Energiepolitik, heute Maßnahmen einzuleiten, die langfristig eine sichere und nachhaltige Energieversorgung gewährleisten. Hierbei spielen neue Energie- und Umwelttechnologien eine entscheidende Rolle. Hinzu kommen klima- und energiepolitische Entwicklungen, die

... und der Klimawandel zwingen die Politik zum Handeln.

Dabei spielt die Förderung sauberer Energietechnologien eine wichtige Rolle.

entsprechende Maßnahmen umso dringlicher werden lassen. Aus heutiger Sicht scheinen unter besonderer Berücksichtigung des Verkehrssektors und im Hinblick auf die Marktfähigkeit erneuerbarer Energien und neuer Technologien folgende Szenarien wahrscheinlich zu sein:

**1. Das weltweite Mobilitätsaufkommen steigt deutlich:**

Damit ist in Zukunft auch ein höherer Beitrag des Verkehrs zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen erforderlich.

**2. Das Vorkommen an fossilen Brennstoffen wie Erdöl und Kohle verringert sich:**

Steigende Preise für fossile Brennstoffe machen alternative Technologien und erneuerbare Energien attraktiver.

**3. Politischer Ausstieg aus Kernkraft und/oder Kohle:**

Um die entstehende Versorgungslücke zu schließen, müssen alternative Energieträger stärker gefördert werden.

**4. Biokraftstoffe verlieren aufgrund ihrer teilweisen Verwendungskonkurrenz zu Nahrungsmitteln politisch an Akzeptanz:**

Im Verkehr müssen Alternativen zu Biokraftstoffen vor allem der ersten Generation entwickelt und zur Marktreife geführt werden.

**5. Ausbau von erneuerbaren Energien:**

Es besteht der politische Beschluss zum Ausbau erneuerbarer Energien. Der Anteil erneuerbarer Energien ist in Deutschland im Jahr 2007 auf rund 6,7 Prozent gestiegen (BMU, 2008). Ein weiterer Anstieg ist zu erwarten und notwendig, um die klimapolitischen Ziele bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erreichen.

... erhöhen die Notwendigkeit zeitnaher Lösungen.

Die genannten Entwicklungen und energie- und klimapolitischen Ziele stellen erhebliche Restriktionen dar, welche die Menge an möglichen alternativen Technologien einschränken und den Zeitdruck für deren Entwicklung zur Marktreife deutlich erhöhen. Da die Energienachfrage zumindest kurzfristig sehr unelastisch in Bezug auf den Preis reagiert, können die Preissteigerungen bei sinkendem Angebot an fossilen Energien sehr kräftig ausfallen. Dadurch werden schon jetzt alternative Energien wettbewerbsfähiger. Dies kann zu positiven Angebotseffekten führen. Zudem werden Investitionen zur Erhöhung der Energieeffizienz rentabel. Neue Technologien schaffen Substitutionsmöglichkeiten zu fossilen Energieträgern und können die Preissteigerungen erheblich dämpfen. Der Preismechanismus führt zu verhaltensinduzierten Anpassungen, die den Prozess zur Marktreife erheblich beschleunigen können. Gleichwohl sind begleitende wirtschaftspolitische Maßnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien und alternativer Technologien sinnvoll. Frühes Handeln verschiebt den Entwicklungsprozess zeitlich nach vorne und kann so zu einem deutlich niedrigeren Preispfad führen (vgl. Abbildung 2). Dadurch werden zukünftige Preisspitzen bei fossilen Energieträgern (insbesondere Öl) vermieden.

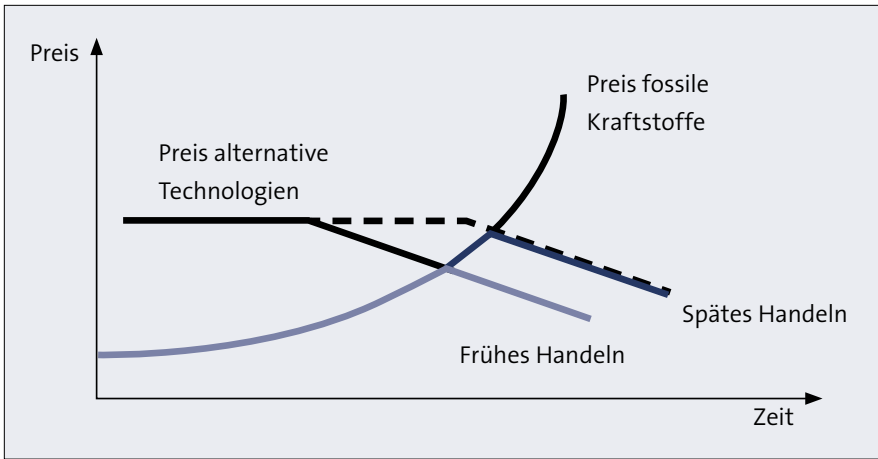


Abbildung 2: Förderung alternativer Technologien, Marktreife und Preisfad

Quelle: Darstellung des HWWI.

## 2.2 | Verkehr und nachhaltige Mobilität

Versorgungssicherheit und Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind angesichts abnehmender Reserven an fossilen Energieressourcen und des drohenden Klimawandels die zentralen Ziele der Energie- und Klimapolitik. Dem Verkehrssektor kommt insbesondere bei den CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen eine entscheidende Bedeutung zu. In Deutschland verursacht der Verkehr rund 21 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen (vgl. Abbildung 3).

Der Verkehr trägt wesentlich zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei.

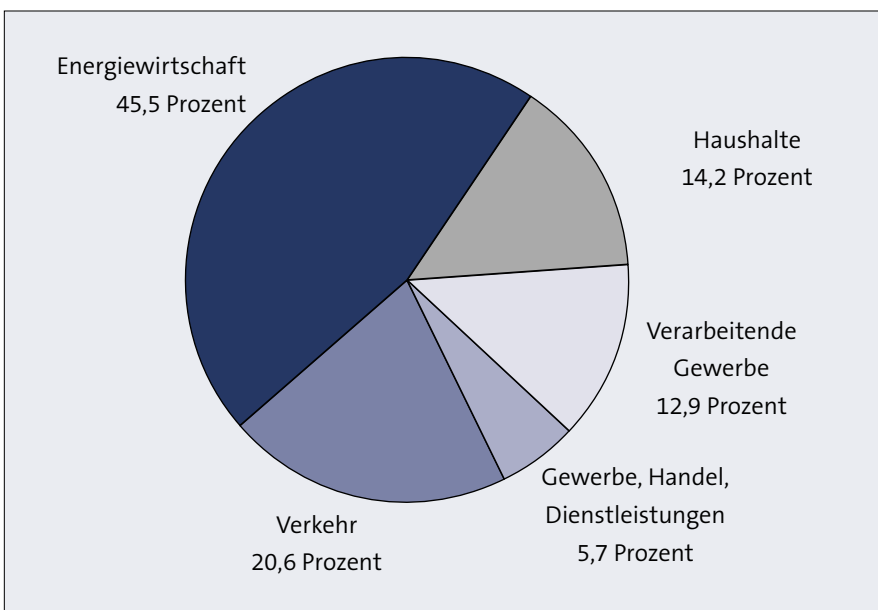


Abbildung 3: CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland nach Sektoren 2006

Quelle: Umweltbundesamt 2007.

Das Problem verkehrsbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen wird sich – weltweit betrachtet – in Zukunft deutlich verschärfen. Eine steigende Weltbevölkerung und die schnell wachsenden Einkommen in den bevölkerungsreichen Ländern werden in Zukunft zu einer stark wachsenden Nachfrage nach Mobilität führen. Der Pkw-Bestand allein in China wird sich Schätzungen zufolge in den nächsten Jahrzehnten auf 250 Millionen Fahrzeuge verzehnfachen. Und auch der länderübergreifende Gütertransport hat in den letzten Jahren infolge der Globalisierung, einer Liberalisierung des Handels und sich öffnender Märkte deutlich zugenommen. Der Welthandel ist dabei stärker gewachsen als die Weltproduktion. Spezialisierung, Arbeitsteilung und die weiter voranschrei-

Dieses Problem droht sich durch ein weltweit zunehmendes Verkehrsaufkommen zu verschärfen.

Eine nachhaltige Mobilität muss gewährleistet werden.

tende weltwirtschaftliche Integration vieler Schwellen- und Entwicklungsländer werden auch in den nächsten Jahrzehnten ein wachsendes Handelsvolumen und somit auch ein steigendes Transport- und Verkehrsaufkommen nach sich ziehen. Im 21. Jahrhundert wird die Frage einer nachhaltigen Sicherung von Mobilität von großer Bedeutung sein. Dies schließt nicht nur den steigenden Energiebedarf im Verkehrssektor, sondern auch die Entwicklung neuer, vor allem sauberer und energiesparender Antriebstechnologien zur wirksamen Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr ein. Der Grad an Mobilität wird jedoch nicht allein durch die Nachfrage nach Mobilität bestimmt. Neue Technologien im Verkehr, aber auch Innovationen in den Telekommunikations- und Informationstechnologien sowie steigende Energiepreise werden in Zukunft zu einem veränderten, angebotsinduzierten Mobilitätsverhalten führen (vgl. Box 1).

*„Ich glaube an das Pferd. Das Automobil ist nur eine vorübergehende Erscheinung.“  
(Kaiser Wilhelm II.)*

Das Ausmaß und die Art der Mobilität unterliegen einem permanenten Wandel. Insbesondere die technologischen Entwicklungen, deren Tempo und Auswirkungen typischerweise unterschätzt werden, hat den Mobilitätsgrad in der heutigen Gesellschaft deutlich erhöht. Der Grad an Mobilität in einer Gesellschaft hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Zunächst wird Mobilität kurzfristig durch die vorhandene Infrastruktur begrenzt. Langfristig wird sie durch die Nachfrage als Ausdruck der gesellschaftlichen Präferenz für Mobilität bestimmt. Zu den wesentlichen Bestimmungsfaktoren der Nachfrage nach Mobilität gehören das Einkommen und der Preis für Mobilität. In Deutschland gaben die privaten Haushalte 2003 rund 15 Prozent ihres Nettoeinkommens für Mobilität aus (vgl. Statistisches Bundesamt, 2007). Die Ausgaben für Mobilität dürften mit steigendem Einkommen zunehmen. Auch soziodemografische Merkmale wie das Alter oder die Haushaltsgröße beeinflussen das Mobilitätsverhalten. So wendeten Einpersonenhaushalte, zu denen besonders ältere, allein stehende Menschen gehören, rund 17 Prozent der Haushaltsausgaben für den öffentlichen Personenverkehr auf, während andere Haushaltsgrößen im Durchschnitt nur sechs bis acht Prozent dafür ausgaben. Der Fahrzeugbestand in Deutschland betrug 2005 rund 54,9 Millionen Fahrzeuge, darunter allein 46,1 Millionen Pkw. Der Fahrzeugbestand hat gegenüber dem Jahr 1996 um 13 Prozent zugenommen. Nach einer Projektion von Shell steigt allein der Pkw-Bestand in Deutschland von heute ca. 45 Millionen bis 2030 auf 49 bis zu 53,5 Millionen an (vgl. Shell, o. J.).

Neben dem Grad an Mobilität lässt sich auch deren Struktur nach Personen- und Güterverkehr, Privat- und Berufsverkehr sowie private und öffentliche Verkehrsträger unterscheiden. Diese hängt neben geografischen Gegebenheiten wie der Fläche eines Landes und demografischen Faktoren wie der Bevölkerungsgröße, der Altersstruktur und Besiedlungsdichte weiterhin von ökonomischen Faktoren wie dem Warenverkehr sowie Transport und Logistik ab. Der Modal Split zwischen den Verkehrsträgern (Straße, Schiene, Wasser etc.) und das Niveau des Verkehrsaufkommens unterliegen dabei einem ständigen Wandel. Die Straße ist dabei der am meisten benutzte Verkehrsweg. Im Güterverkehr wurden 2005 rund 77 Prozent der Transportleistungen über die Straße abgewickelt. Im Personenverkehr fanden sogar knapp 97 Prozent aller Fahrten auf der Straße statt, 13 Prozent im öffentlichen Straßenpersonenverkehr und 84 Prozent im motorisierten Indivi-

alverkehr. Über die Schiene wurden drei Prozent der Fahrten und nur 0,2 Prozent mit dem Flugzeug zurückgelegt.

Ein weiterer Grund für die Zunahme der Mobilität ist die Globalisierung und die Liberalisierung des Handels. Während der Binnenverkehr in den letzten zehn Jahren um 11 Prozent zurückgegangen ist, stieg der grenzüberschreitende Verkehr im selben Zeitraum um 37 Prozent an. Vor allem der Seeverkehr verzeichnet mit 39 Prozent hohe Wachstumsraten. Nicht nur in Deutschland, sondern weltweit wird die Nachfrage nach Mobilität weiter stark steigen. Dies betrifft sowohl den Gütertransport infolge der weltwirtschaftlichen Integration als auch den Personen- und vor allem den Individualverkehr, der insbesondere in den bevölkerungsreichen und schnell wachsenden Ländern wie China und Indien stark ansteigen wird. Weltweit ist bis 2050 mit einer Zunahme des Straßenverkehrsaufkommens um 200 Prozent zu rechnen (vgl. World Business Council for Sustainable Development, 2004; Umweltbundesamt, 2008).

Unter den beschriebenen klima- und energiepolitischen Szenarien wird dem weltweit wachsenden Verkehrssektor eine besondere Bedeutung beim Klimaschutz zukommen. Steigende Kosten der Mobilität werden das Mobilitätsverhalten in Zukunft zudem verändern. Aber auch demografische Faktoren, die zunehmende Urbanisierung und Bildung von Agglomerationsräumen sowie neue Informationstechnologien können andere und neue Verkehrssysteme hervorrufen, die sich in ihrer Struktur und ihrer Funktion von heutigen unterscheiden. Um die klima- und energiepolitischen Ziele der CO<sub>2</sub>-Reduktion und der Versorgungssicherheit zu erreichen, müssen neue und saubere Technologien – insbesondere im Verkehr – möglichst schnell zur Marktreife geführt werden. Auf dem Weg dorthin können zum Beispiel Hybridfahrzeuge als eine Art „Brückentechnologie“ zu einem grundsätzlich emissionsarmen Antrieb fungieren. Eine wichtige, im Wettbewerb zu entscheidende Frage wird sein, ob sich eine Technologie durchsetzen wird oder mehrere komplementäre Technologien nebeneinander existieren können.

Box 1: Zukunft der Mobilität –  
Mobilität der Zukunft

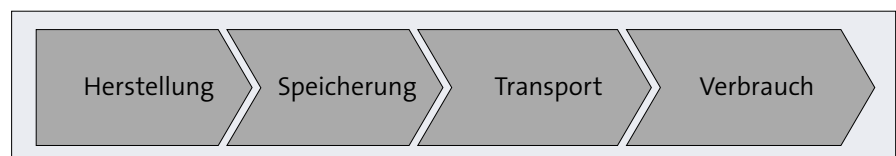
# 3 | Wasserstoff im Verkehr

## 3.1 | Wasserstoff: von der Herstellung bis zum Verbrauch

Zur Beurteilung der Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Bilanz des Wasserstoffs muss die komplette Supply Chain betrachtet werden.

Um zu beurteilen, welchen Beitrag der Wasserstoff zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und zur Versorgungssicherheit durch eine hohe Energieeffizienz leistet, ist es notwendig, die komplette Supply Chain des Wasserstoffs zu betrachten. Die Supply Chain reicht von der Herstellung des Wasserstoffs über seine Speicherung, Transport und Betankung bis hin zum Verbrauch. Zwar wird beim Verbrauch des Wasserstoffs mit Hilfe einer PEM-Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane) nur Wasserdampf ausgestoßen, es kann jedoch in den vorgelagerten Stufen der Supply Chain zu erheblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen kommen, die sich negativ auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz des entsprechenden Wasserstoffs auswirken. Der jeweilige Wasserstoff leistet über seine Energieeffizienz einen unterschiedlich hohen Beitrag zur Versorgungssicherheit. Da der Wasserstoff ausschließlich ein Energieträger ist, ist es entscheidend, dass über die gesamte Supply Chain möglichst wenig Energie verloren geht, also der Wasserstoff möglichst energieeffizient hergestellt und dem Endverbrauch zugeführt wird. In der folgenden Abbildung ist die Supply Chain des Wasserstoffs idealtypisch dargestellt.

Abbildung 4: Supply Chain des Wasserstoffs



Quelle: Darstellung des HWWI.

**Herstellung:** Zurzeit wird Wasserstoff überwiegend über Gasreformierung produziert.

Da Wasserstoff in reiner Form nicht in der Natur vorhanden ist, stellt die Herstellung des Wasserstoffs die erste Stufe der Supply Chain dar. Wasserstoff muss aus einer Primärenergiequelle wie beispielsweise aus Gas, Kohle, Öl oder regenerativer Energie gewonnen werden. Zurzeit wird der Wasserstoff überwiegend mit Hilfe der Gasreformierung hergestellt, weil es gegenwärtig ein energieeffizientes und das kostengünstigste Verfahren zur Wasserstoffgewinnung darstellt. Bei der Erdgasreformierung enthält der Wasserstoff letztlich 76 Prozent der aufgewendeten Primärenergie. Ein weiteres Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff ist die Elektrolyse, bei der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt wird. Bei dieser Aufspaltung des Wassers ist ein Energieeinsatz in Form von Strom erforderlich, wobei die Energieeffizienz zurzeit bei 62 bis 70 Prozent liegt, es werden aber Potenziale für die Zukunft bis hin zu 85 Prozent gesehen (EUCAR/JRC/CONCAWE, 2007b). Das Verfahren, mit Hilfe von Bakterien oder Algen Wasserstoff zu gewinnen, ist gegenwärtig noch in der Entwicklungsphase, könnte aber für die Zukunft Potenziale bieten (Ramesoh et al., 2006).

Regenerative Energien bieten die Möglichkeit, Wasserstoff besonders emissionsarm herzustellen.

Im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Wasserstoffs spielt es eine wichtige Rolle, welches Herstellungsverfahren angewendet wird. Bei dem Prozess der Gasreformierung zur Wasserstoffgewinnung wird CO<sub>2</sub> in die Luft emittiert. Dies ist insbesondere bei der Vergasung von Kohle der Fall, die im Vergleich zum Mineralöl noch in großen Mengen verfügbar ist (Ramesoh et al., 2006). Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß könnte bei der Herstellung vermieden oder möglichst gering gehalten werden, wenn regenerative Energien für die Herstellung von Wasser-

stoff eingesetzt werden. Alternativ ließe sich Wasserstoff durch Wind- oder Wasserkraft sowie durch Vergasung von Biomasse oder den Einsatz von Solar-energie herstellen (vgl. Abbildung 5). Neben den regenerativen Energien hätte auch die Kernkraft für die CO<sub>2</sub>-freie Herstellung von Wasserstoff herangezogen werden können. Diese Option entfällt jedoch in Deutschland, weil auf politischer Ebene der Ausstieg aus der Atomkraft beschlossen wurde.

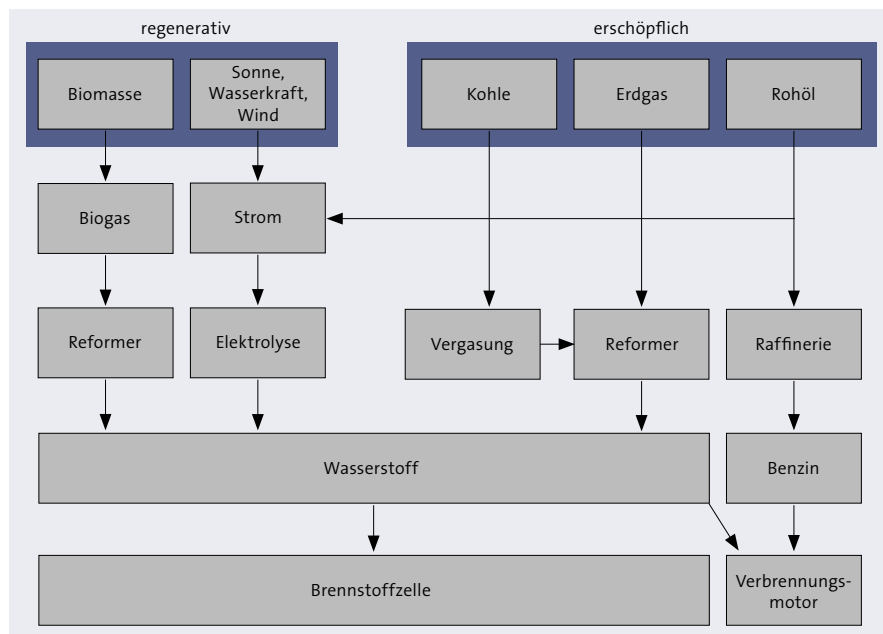


Abbildung 5: Umwandlungsketten für Wasserstoff

Quelle: nach Ramesoh et al. (2006).

Die zweite Stufe der Supply Chain stellt die Speicherung des Wasserstoffs dar. Wasserstoff ist das Gas mit der geringsten Energiedichte, so dass für den Transport Wege gefunden werden müssen, um das Volumen des Wasserstoffs zu reduzieren. Geeignete Verfahren sind nach aktuellem Stand der Technik die Lagerung unter hohem Druck oder in flüssigem Aggregatzustand bei -253°Celsius. Beide Verfahren benötigen zusätzliche Primärenergie. Flüssiger Wasserstoff kann während der Lagerzeit durch den sogenannten Boil-Off, das heißt einen Wechsel des Aggregatzustandes, verloren gehen. Mögliche Verluste schlagen sich negativ auf die Energiebilanz des in verflüssigter Form gespeicherten Wasserstoffs nieder. Der Vorteil des verflüssigten Wasserstoffs gegenüber dem gasförmig komprimierten liegt in dem weniger benötigten Speicherplatz, was für den Einsatz im Fahrzeugbereich vorteilhaft ist. Jedoch ist beim Vorgang der Verflüssigung ein höherer Energieeinsatz erforderlich als bei der Speicherung über eine Komprimierung. So erfordert die Verflüssigung je nach Verfahren etwa 20 bis 40 Prozent der im Wasserstoff enthaltenen Energie, während der Energieverlust bei der Komprimierung bei unter 10 Prozent liegt (IEA, 2005; EUCAR/JRC/CONCAWE, 2007b). Wasserstoff lässt sich auch mit Hilfe von Metallhydriden speichern, die den Wasserstoff aufnehmen. Wird das Metallhydrid erwärmt, so wird der Wasserstoff wieder freigegeben (Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen Verband, 2007). Der Vorteil bei der Einlagerung des Wasserstoffs in Metallen liegt in der Sicherheit, jedoch besteht ein Nachteil in dem hohen Gewicht des Metallhydrids und in dem benötigten Energiebedarf zur Wiederfreisetzung des Wasserstoffs.

In gespeicherter Form wird der Wasserstoff dann an die Tankstellen geliefert. Der Transport des Wasserstoffs stellt somit die dritte Stufe der

Speicherung: Die Verflüssigung von Wasserstoff ist energieintensiver als seine Komprimierung.

Transport: Je nach Speicherung bieten sich unterschiedliche Möglichkeiten des Transports.

Verbrauch: Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle spielt eine wichtige Rolle.

In der Praxis wird Wasserstoff schon mit Hilfe von erneuerbaren Energiequellen per Elektrolyse hergestellt.

Supply Chain dar. Für den Transport des Wasserstoffs zur Tankstelle wird Energie benötigt. Je komprimierter die Speicherung des Wasserstoffs erfolgte, desto geringer ist der Energieaufwand beim Transport. Die Lieferung kann über Pipelines aus rostfreiem Stahl, Lkws, Züge oder via Tanker erfolgen. Mit Hilfe der Wasserstoffverflüssigung können Tanker den Wasserstoff über weite Strecken transportieren. Dabei werden Economies of scale genutzt und der internationale Handel mit erneuerbaren Energien wird möglich. Damit die Anlieferung möglichst energieeffizient und mit einem geringen CO<sub>2</sub>-Ausstoß erfolgt, wäre es vorteilhaft, wenn nur kurze Anfahrtswege zurückgelegt würden, also der Wasserstoff nahe bei dem Verbraucher oder sogar unmittelbar vor Ort hergestellt werden würde.

Die letzte Stufe der Supply Chain von Wasserstoff stellt der Verbrauch dar, bei dem letztlich von den Fahrzeugen ausschließlich Wasserdampf emittiert wird. Mit Hilfe einer Brennstoffzelle werden Wasserstoff und Sauerstoff in Energie für den Elektromotor des Fahrzeugs und in Wasserdampf elektrochemisch umgewandelt. Beim Verbrauch spielt es letztendlich eine wichtige Rolle, welchen Wirkungsgrad die Brennstoffzelle besitzt. Wasserstoff ist nicht ausschließlich an eine Brennstoffzelle gekoppelt, sondern kann auch in einem Verbrennungsmotor als Kraftstoff eingesetzt werden. Jedoch hat eine Brennstoffzelle mit Elektromotor mit ca. 60 Prozent einen höheren Wirkungsgrad als ein Verbrennungsmotor mit knapp 30 Prozent (IEA, 2005; National Hydrogen Association, 2008), weil in ihr eine chemische Umwandlung vollzogen wird und Energie nicht in mechanische Kraft transformiert wird. Auf der Verbrauchsstufe kann Wasserstoff aufgrund dieser Eigenschaften zusätzlich zur Reduzierung der Lärm- und Feinstaubbelastung insbesondere in Ballungsräumen beitragen.

Über die komplette Supply Chain des Wasserstoffs sind damit folgende Ziele zu verfolgen: Einen möglichst geringen CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu erlangen, eine hohe Effizienz mit geringen Energieverlusten zu erzielen und bezüglich weiterer Umweltaspekte eine saubere Nutzung zu gewährleisten. An diesen Zielen ist die Förderung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie auszurichten.

### 3.2 | Marktreife und alternative Technologien

Über die Supply Chain hinweg wurden bis heute unterschiedliche moderne Technologien erforscht, entwickelt und auf ihre Alltagstauglichkeit hin untersucht. Im Bereich der Herstellung von Wasserstoff wurden beispielsweise in dem Kooperationsprojekt HyWindBalance mit privaten Unternehmen und der Universität Oldenburg als Partner Wind-Wasserstoff-Systeme getestet. Dabei ist es das Ziel, optimale Verfahren zu erforschen, mit denen Spitzenlasten bei der Windenergie in Form von Wasserstoff zwischengespeichert werden können. Der Wasserstoff kann dann über eine Brennstoffzelle wieder in das Stromnetz eingespeist oder alternativ als Treibstoff für Fahrzeuge verwendet werden. Mit Hilfe von Strom aus regenerativer Energie ist es technisch möglich, gasförmigen Wasserstoff mit hoher Qualität für die Brennstoffzellen durch Elektrolyse herzustellen. Es gibt Demonstrationsprojekte, bei denen der Druckwasserstoff direkt vor Ort bei der Wasserstofftankstelle produziert wird (Wasserstofftankstellen in Berlin und Hamburg). Alternativ wird flüssiger Wasserstoff zentral in einer Großanlage hergestellt, der dann



an die Tankstellen geliefert wird. Der Wasserstoff für die Hamburger Bustankstelle wird vom Energieunternehmen Vattenfall mittels erneuerbarer Energien über das Verfahren der Elektrolyse hergestellt. In Hamburg sind zurzeit vier Wasserstofftankstellen in Betrieb.

Im Hinblick auf die Speicherung von Wasserstoff betreibt das Unternehmen Linde bisher die einzige großtechnische Wasserstoffverflüssigungsanlage in Deutschland. In Berlin wurden zwei Wasserstofftankstellen im Rahmen der Clean Energy Partnership – ausgestattet mit den neuesten Technologien (bei beiden kann Wasserstoff sowohl in flüssiger als auch in gasförmiger Form getankt werden) – auf ihre Alltagstauglichkeit hin überprüft. Während der flüssige Wasserstoff vom Unternehmen Linde über Tankcluster angeliefert wird, wird der gasförmige Wasserstoff direkt an der Tankstelle hergestellt oder wird aus der Verdampfung des flüssigen Wasserstoffs gewonnen. Die Speicherung flüssigen Wasserstoffs ist insbesondere angeraten, wenn kontinuierlich Wasserstoff abgenommen wird. Längere Standzeiten wirken sich negativ als Verlust (Boil-Off) aus. Inzwischen wurden jedoch bereits erste Ansätze für eine technische Überwindung dieser Verluste realisiert. So wird in der Hamburger Anlage für den Wasserstoff des Alsterdampfers erstmalig ein innovatives Boil-Off-Management getestet, das Wasserstoffverluste weitgehend verhindert. Zu dem Umgang mit dem verdampfenden Wasserstoff gibt es die Überlegung, ihn lokal über eine Brennstoffzelle zu nutzen oder ihn lokal wieder in flüssigen Wasserstoff zurück zu verwandeln. Eine höhere Effizienz bei der Elektrolyse wird erwartet, wenn es infolge einer gestiegenen Nachfrage zu einer größeren Auslastung kommt. Wie die Betankung der Fahrzeuge mit Wasserstoff an den Tankstellen möglichst ohne Energieverlust, bequem und sicher erfolgt, wurde ebenfalls an Pilotanlagen getestet (CEP, 2007).

Um die Betankungsinfrastruktur auf ihre Leistungsfähigkeit untersuchen zu können, muss eine ausreichend große Fahrzeugflotte vorhanden sein. Verschiedene Automobilhersteller haben Fahrzeuge entwickelt, die sich mit Wasserstoff betanken lassen.

BMW und Mazda haben bereits Autos gebaut, die sowohl mit flüssigem Wasserstoff als auch mit Benzin fahren können. Das bringt den Vorteil mit sich, dass der BMW Hydrogen 7 und der Mazda Hydrogen RX-8 auch in einer Übergangsphase mit einer lückenhaften Infrastruktur für Wasserstoff einsetzbar sind. Daimler hat mit seiner A-Klasse F-Cell eines der ersten Wasserstoffautos in Kleinserie gefertigt. Der F-Cell fährt mit komprimiertem, gasförmigem Wasserstoff, hat eine Reichweite von 200 Kilometern und eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Wie beim F-Cell ist auch beim Honda FCX das Brennstoffzellensystem im Wagenboden eingebaut. Der FCX verfügt über drei Elektromotoren für den Antrieb und erzielt bei einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h eine Reichweite von über 450 Kilometern. Einer der Elektromotoren ist ein Radnabenmotor, in dem Bremsenergie zurückgeführt wird. Der Ford Focus Brennstoffzelle Hybrid wird mit gasförmigen Wasserstoff betankt und mit ihm kann eine Reichweite von über 300 Kilometern erreicht werden (CEP, 2007; Löwer, 2008). Auch weitere Konzerne, unter anderem Opel (HydroGen3), Toyota und Volkswagen haben Brennstoffzellenautos entwickelt. Am Hamburger Flughafen wird ein mit Wasserstoff betriebener Fiat Doblo eingesetzt.

Auch bei der Speicherung wird in Pilotprojekten nach effizienten Verfahren gesucht.

Automobilhersteller arbeiten gleichzeitig an der Marktreife von Wasserstofffahrzeugen.

Wasserstoffbusse fahren  
in Hamburg und Berlin.

Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts HyFLEET:CUTE fahren Wasserstoffbusse in Berlin und Hamburg. In der Hansestadt ist geplant, bis 2010 Wasserstoffbusse der zweiten Generation einzusetzen, die mit Radnabenmotoren bestückt werden. Diese Hybrid-Busse sollen eine wesentlich bessere Energieausbeute haben, weil Bremsenergie für das Aufladen der Lithium-Ionen-Batterie genutzt wird. Zurzeit ist es noch eine technische Herausforderung, eine erschwingliche Hochleistungsbatterie für den Bus zu konstruieren.

Die Wasserstofftechnologie  
und der elektrische Antrieb  
mit Batterie beschreiten einen ge-  
meinsamen Entwicklungspfad.

Die Wasserstofftechnologie steht zu Hybridfahrzeugen und Elektroautos im Wettbewerb. Dabei wird jedoch der gleiche Pfad beschritten, denn bei der Entwicklung einzelner Komponenten existieren Komplementaritäten und Synergien. Autos mit Elektromotoren können über das Stromnetz aufgeladen werden, dann handelt es sich um sogenannte Plug-in-Fahrzeuge. Darüber hinaus können Elektroautos mit einem Generator ausgestattet werden, der mit fossilem Kraftstoff oder Biokraftstoff angetrieben wird und nur zum Einsatz kommt, um die Batterie des Elektrofahrzeuges wieder aufzuladen. Hybridfahrzeuge werden überwiegend mit Hilfe eines Elektromotors und eines Verbrennungsmotors angetrieben.

Im Herbst 2010 hat der General-Motors-Konzern geplant, mit dem Chevrolet Volt ein marktfähiges Plug-in-Elektroauto anzubieten. Mit dem Volt soll es möglich werden, mehr als 60 Kilometer rein elektrisch zu fahren. Bei längeren Fahrten wird ein Verbrennungsmotor eingeschaltet, der mit Biokraftstoff betrieben werden kann. Auch Nissan und Renault wollen gemeinsam ein Elektrofahrzeug spätestens 2012 auf den Markt bringen. Die Batterie soll dabei eine Reichweite bis zu 150 Kilometer haben und das Auto lässt sich an das Stromnetz anschließen. Der iMiev von Mitsubishi Motors ist mit einem Lithium-Ionen Akku ausgestattet und erste Fahrzeuge, die bis zu 160 Kilometer fahren können, werden schon in der Praxis getestet. Das kalifornische Unternehmen Tesla, das sich auf Elektrofahrzeuge spezialisiert hat, bietet einen Roadster mit einem Elektromotor an, der in der Spitze 210 km/h fährt. Volkswagen hat in einer Konzeptstudie Space Up Blue einen Elektromotor präsentiert, der über eine Lithium-Ionen-Batterie angetrieben wird, die sich über das Stromnetz oder eine Brennstoffzelle aufladen lässt. Auch Volvo hat mit dem „ReCharge Concept“ einen Plug-in-Hybrid mit Elektro-Radnabenmotor vorgestellt. Weitere Elektrofahrzeuge sind der indische Reva, der in China produzierte ZX40S und der in Norwegen hergestellte Th!nk City (Herz/Schneider, 2008; WWF, 2008). Toyota hat mit dem Prius ein erstes Hybrid-Großserienfahrzeug auf den Markt gebracht, bei dem ein Elektromotor über einen Verbrennungsmotor mit Hilfe eines Generators aufgeladen wird. Der Elektromotor kann in bestimmten Fahrsituationen (beispielsweise bei geringem Beschleunigen und Rückwärtsfahren) das Auto antreiben (Toyota, 2008).

Auch Elektroautos werden  
weiterentwickelt und in  
der Praxis getestet.

Der Schwerpunkt der Forschung liegt zurzeit im Bereich der Elektroautos in der Lithium-Ionen-Technik. Von Lithium-Ionen-Batterien, die zurzeit schon bei Mobiltelefonen und Laptops eingesetzt werden, versprechen sich die Automobilhersteller eine bessere Reichweite und Haltbarkeit. Wenn Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt werden, stellt sich die Frage, wie sich ein Recycling umsetzen lässt (WWF, 2008) und ob überhaupt genügend Lithium zur Verfügung stünde. Zudem spielt es auch eine wichtige Rolle, dass sich die Batterien schnell aufladen lassen und ein mehrmaliges Aufladen ohne Verlust an Spei-

cherkapazität über den Zeitverlauf garantiert wird. Eine diskutierte Möglichkeit wäre ein mit weniger Zeit verbundener Austausch der Batterien an den Tankstellen, weil damit ein lang währendes Aufladen der Batterien wegfiel. Der Einsatz von Elektroautos würde hier einen Aufbau einer Infrastruktur erforderlich machen. Im Großversuch „E-Mobility Berlin“ planen der Energie-unternehmen RWE und der Autokonzern Daimler in Kooperation 500 Lade-stationen für 100 Elektro-Smarts aufzustellen (Bundesregierung, 2008). Letztlich können Elektroautos aber auch nur insoweit sauber für die Umwelt sein, wie sie regenerative Energie aus dem Stromnetz beziehen.

Außerdem wird nach Lösungen geforscht, mit denen Ottokraft- und Dieselmotoren alternativ zu Mineralöl angetrieben werden können. Über Beimischungsverpflichtungen und -ziele haben Politiker der Industriestaaten Anreize für die zunehmende Verbreitung von Biokraftstoffen gesetzt. In Amerika führte dies zu einem starken Ansteigen der Bioethanolproduktion als Ersatz für Benzin und in Europa erhöhte sich besonders die Biodieselproduktion. Während die Biokraftstoffe der ersten Generation noch aus Pflanzenfrüchten hergestellt werden, werden die Biokraftstoffe der zweiten Generation aus Pflanzenresten, Wildgräsern oder schnell wachsenden Hölzern produziert. Biokraftstoffe können jedoch in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen und sogar eine schlechtere CO<sub>2</sub>-Bilanz aufweisen als fossile Kraftstoffe. Dies ist im besonderen Maße der Fall, wenn für den Anbau von Energiepflanzen Urwälder abgerodet werden. Dies wirkt sich sehr negativ auf die C O 2 - Bilanz des entsprechenden Biokraftstoffes aus, weil Urwälder viel CO<sub>2</sub> aufnehmen und sich darüber hinaus durch eine besondere Artenvielfalt auszeichnen. Biokraftstoffe der zweiten Generation entschärfen das Problem mit der Nahrungsmittelkonkurrenz. Jedoch ist zu bedenken, dass ein großer Teil der Pflanzenreste für die Düngung der Felder benötigt wird (Bräuninger et al., 2007). Biomasse steht damit nur begrenzt für die Biokraftstoffproduktion zur Verfügung.

Biokraftstoffe können Mineralöl teilweise ersetzen. Jedoch besteht das Problem der Nahrungsmittelkonkurrenz.

Antrieb	Verbrennungsmotor	Elektrofahrzeug	Wasserstofffahrzeug
<b>Probleme</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralöl: CO<sub>2</sub>-Ausstoß und endliche Verfügbarkeit</li> <li>• Biokraftstoff</li> <li>1. Generation: Nahrungsmittelkonkurrenz</li> <li>• Biokraftstoffe</li> <li>2. Generation: Verfügbarkeit Biomasse</li> <li>• Geringe Motoreffizienz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batterie: Gewicht, Reichweite, Kosten und Haltbarkeit</li> <li>• Aufbau einer Infrastruktur</li> <li>• Regenerative Energie aus dem Stromnetz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Energieeffizienz über die komplette Supply Chain</li> <li>• Aufbau einer Infrastruktur</li> <li>• Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emission bei der Produktion des Wasserstoffs</li> </ul>

Tabelle 1: Verschiedene Antriebe und mit ihnen verbundene Probleme

Quelle: Darstellung des HWWI.

### 3.3 | Perspektiven und Potenziale von Wasserstoff

Wasserstoff kann einen Beitrag zur Versorgungssicherheit ...

Die Wasserstofftechnologie kann durch ihren vermehrten Einsatz im Verkehr einen positiven Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und Versorgungssicherheit in Deutschland leisten. In Bezug auf die Versorgungssicherheit ist der Einsatz von Wasserstoff attraktiv, da Deutschland, das zum größten Teil seinen Energiebedarf mit Importen deckt, den Wasserstoff selber produzieren kann. Zugleich wird mit Hilfe von Wasserstoff als Speichermedium erneuerbare Energie international handelbar; damit würde im Verkehr eine Alternative zu fossilen Energieträgern geschaffen. Verflüssigtes Erdgas wird schon weltweit gehandelt. Vieles würde daher auch dafür sprechen, dass ein Handel von verflüssigtem Wasserstoff möglich ist und die für die Erdgaslieferungen aufgebaute Infrastruktur auch für Wasserstoff genutzt werden könnte. So wäre eine Zumischung in das Erdgasnetz von 20 Prozent technologisch unproblematisch, jedoch könnte eine größere Beimischung zur Versprödung von Materialien führen (Grünwald, 2006; Nitsch, 2003).

... und zur CO<sub>2</sub>-Reduktion leisten.

Zur sauberen Herstellung des Wasserstoffs bieten sich regenerative Energien mit Spitzenlasten an.

Zugleich kann Wasserstoff einen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen liefern, da er aus jeder regenerativen Energiequelle hergestellt werden kann (Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen Verband, 2007). Regenerative Energien mit Spitzenlasten wie Windkraft sind besonders vorteilhaft, weil Wasserstoff die Möglichkeit bietet, Energie zu speichern, die möglicherweise sonst verloren ginge. Bei der Windkraft droht bei Spitzenlasten eine Überlastung des Stromnetzes, so dass die Windräder abgestellt werden müssten. Hier bietet Wasserstoff – insbesondere bei dem geplanten Ausbau der erneuerbaren Energien – die Möglichkeit, diese Spitzenlasten aufzufangen. Gleichzeitig leistet Wasserstoff einen besonders hohen CO<sub>2</sub>-Reduktionsbeitrag, wenn dieser mit erneuerbaren Energien hergestellt wird. Erneuerbare Energien können über diesen Weg auch im Verkehr eingesetzt werden. Damit also der CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit Hilfe von Wasserstoff signifikant reduziert werden kann, muss ein Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland ohne Verzögerungen erfolgen. In dem Gutachten GermanHy wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahre 2050 die CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Pkw in Deutschland durch den Einsatz von Wasserstoff – unter Berücksichtigung der kompletten Supply Chain – je nach unterstelltem Szenario wenigstens 44 Prozent bis 66 Prozent reduziert werden könnten (GermanHy, 2008). Die „Sauberkeit“ des Wasserstoffs hängt sehr stark davon ab, welche Primärenergiequelle für seine Herstellung eingesetzt wird. Wird der Wasserstoff etwa über eine Vergasung von Erdöl gewonnen, wirkt sich dies in einem erheblichen Maße negativ auf seine CO<sub>2</sub>-Bilanz aus. Vor dem Hintergrund der gesetzten CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen haben Umwelt verschmutzende Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff keine langfristige Perspektive und sollten höchstens zur Überbrückung einer Übergangsphase eingesetzt werden. Eine Möglichkeit um zu vermeiden, dass die CO<sub>2</sub>-Abgase in die Luft gelangen, könnte die Einlagerung des CO<sub>2</sub> in den Erdboden darstellen. Für dieses CCS-Verfahren (Carbon Capture and Storage) werden noch Untersuchungen zu dessen Umsetzbarkeit durchgeführt (Ramesoh et al., 2006; Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2007).

Wasserstoff wurde schon erfolgreich auf seine Alltagstauglichkeit hin überprüft, ...

Neben seinem möglichen Beitrag zur Versorgungssicherheit und zu den CO<sub>2</sub>-Minderungszielen auf Bundes- und EU-Ebene spricht darüber hinaus für eine erhöhte Verbreitung von Wasserstoff, dass schon Technologien bei der Herstellung, Speicherung und der Fahrzeugtechnik im Bereich der Wasser-

stofftechnik entwickelt und hinsichtlich ihrer Alltagstauglichkeit erfolgreich erprobt wurden (siehe vorheriges Kapitel). Dabei besitzen die Brennstoffzellen eine höhere Energieeffizienz als Verbrennungsmotoren. Den Wasserstoff als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren einzusetzen, wäre als Übergangstechnologie denkbar, um den Aufbau einer Infrastruktur für Wasserstoff zu fördern. Ansonsten ist es von der Energieeffizienz und der CO<sub>2</sub>-Bilanz aus betrachtet, günstiger den Verbrennungsmotor direkt über Erdgas anzutreiben als den Umweg über Wasserstoff zu gehen (EUCAR/JRC/CONCAWE, 2007a). Das Problem des Wasserstoffs besteht jedoch darin, dass es sich bei ihm um einen Energieträger handelt, der über die Induktionsstufen hinweg – Herstellung, Speicherung, Transport und Umfüllen für den Verbrauch – sehr energieintensiven Umwandlungen unterliegt. Um die Potenziale von Wasserstoff zu verbessern, gilt es also Lösungen zu finden, die es ermöglichen, dass dieser Energie schonender die Wertschöpfungskette durchläuft. Damit besteht Forschungsbedarf bei der effizienten Speicherung von Wasserstoff, bei der Verbesserung der modernen Elektrolyseverfahren und bei der Haltbarkeit und Effizienz der Brennstoffzellen.

Um die Verbreitung der Wasserstofftechnik voranzutreiben, haben Deutschland, Europa und andere Länder verschiedene Förderprogramme schon beschlossen und umgesetzt (siehe folgendes Kapitel). Jedoch stellt sich die Frage, inwieweit sich die Politik auch in Zukunft dazu entscheidet, die Forschung im Bereich der Wasserstofftechnik zu fördern. Die Verbreitung der Wasserstofftechnik hängt sehr stark von den gesetzten politischen Rahmenbedingungen ab, die den Aufbau einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur und den Einsatz von Fahrzeugflotten fördern. Wasserstoff steht in einem Wettbewerb mit anderen Technologien, die auch Ziele der CO<sub>2</sub>-Reduktion und der Versorgungssicherheit erfüllen können. Für Konkurrenztechnologien wie Elektroautos und Biokraftstoffe bestehen ebenfalls Förderprogramme in Deutschland (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2008) und Europa. Zudem plant die Bundesregierung einen „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ auszuarbeiten, der in die Klima- und Energiestrategie eingebunden werden und im November vom Kabinett verabschiedet werden soll. Dabei ist vorgesehen, einen Schwerpunkt auf die Forschung und Entwicklung von leistungsstarken Batterien zu legen (Bundesregierung, 2008).

Es gibt noch Probleme sowohl beim Elektroantrieb als auch beim Wasserstoff zu lösen: Bei Elektroantrieben steht noch die Entwicklung von Batterien aus, die eine größere Reichweite liefern, sich schneller aufladen lassen und leichter sind. Solche leistungsfähigen Batterien könnten auch für das Lastmanagement von Strom eingesetzt werden, indem sie Überschussstrom speichern.

Letztlich lässt sich damit festhalten, dass die Potenziale der Wasserstofftechnologie und ihre Verbreitung davon abhängen, welche technologischen Bereiche der Staat insbesondere in der Initialphase fördert, weil damit die Chancen für den technischen Durchbruch der entsprechenden Technologie steigen. Im Bereich der Wasserstofftechnik wurden alltagstaugliche Verfahren entwickelt, die die Förderung von Wasserstoff rechtfertigen. Darüber hinaus spielen für die Verbreitung von Wasserstoff aber auch Faktoren wie die Ölpreisentwicklung oder eine mögliche Zunahme klimabedingter Umweltkatastrophen eine Rolle. Während ein hoher Ölpreis gerade für die Forschung und raschere Verbreitung von alternativen Kraftstoffen förderlich sein könnte, könnten Klimakatastrophen den Druck verstärken, CO<sub>2</sub>-arme Technologien

... aber es besteht noch weiterer Forschungsbedarf im Hinblick auf die effiziente Produktion und Nutzung von Wasserstoff.

Die Verbreitung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie hängt stark vom politischen Handeln ab.

Auch bei den Konkurrenztechnologien existieren noch Entwicklungsprobleme.

Alltagstaugliche Verfahren rechtfertigen die Förderung von Wasserstoff. Dabei sind die Weiterentwicklung der Technik und die Realisierung von Skaleneffekten von zentraler Bedeutung.

einzusetzen. Sprunghafte, unprognostizierbare Entwicklungen in einem Technologiebereich können zukünftig erheblich die Entwicklung auf dem Kraftstoffmarkt und die Verbreitung von Antriebssystemen beeinflussen. Für die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie ist es wichtig, dass durch weitere Forschung, praktische Anwendungen und wachsende Märkte technische Optimierungspotenziale erschlossen und Skaleneffekte realisiert werden. Unter diesen Voraussetzungen stellt sie sowohl ökologisch als auch ökonomisch einen wichtigen Entwicklungspfad zu einer emissionsarmen Mobilität dar. So geht GermanHy davon aus, dass Mobilität mit Brennstoffzelle und Wasserstoff zu heutigen Kosten von fossilen Kraftstoffen möglich ist, wenn es gelingt, die Entwicklungsziele bei Brennstoffzellenfahrzeugen zu erreichen (GermanHy, 2008).

# 4 | Wirtschaftspolitische Förderung von Wasserstoff

## 4.1 | Initiativen und Förderprogramme

Neben den USA, Kanada und Japan unterstützen auch Deutschland und die EU die Förderung und Erforschung von Wasserstofftechnologien über Programme, die eine Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie vorsehen (IEA, 2005). Um die Wasserstofftechnologie zu fördern, hat die Bundesregierung das Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (NIP) ausgearbeitet (BMW, 2006). Dabei fördert die Bundesregierung in Kooperation mit der Industrie Forschungsprojekte im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Im Vordergrund der öffentlich-privaten Partnerschaft steht dabei, anwendungsnahe Ergebnisse zu erzielen. In den nächsten sieben Jahren stellen Bundesregierung und Industrie jeweils 700 Millionen Euro zur Verfügung. Zudem wurde Anfang 2008 die Nationale Organisation Wasserstoffzellentechnologie (NOW) gegründet, die in das NIP eingebettet ist. Sie soll die Entwicklung und Markteinführung von Produkten der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie unterstützen (Bundesregierung, 2007). Das Projekt HyWindBalance, bei dem Technologien zur Zwischenspeicherung von Windenergie in Wasserstoff erforscht und getestet werden, wird vom Land Niedersachsen gefördert (HyWindBalance, 2008).

Auf europäischer Ebene wurde eine Technologieplattform mit der Unterstützung der Europäischen Kommission aufgebaut, die einen Beitrag zur Abstimmung der EU-Prioritäten im Bereich der Wasserstofftechnologie leisten soll. Auf ihr treffen sich Vertreter aus der Politik, Wissenschaft und Industrie, um sich darüber auszutauschen, wie das durch Forschung und Entwicklung entstandene Know-how in marktfähige Produkte umgesetzt werden kann. Ziel der Europäischen Technologieplattform ist es, einen Beitrag zur Gestaltung von EU-Strategien und Politiken zu leisten sowie öffentliche und private Fördermittel zu mobilisieren (European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, 2008; Europäische Kommission, 2004).

Kontinuierlich gestaltet die Europäische Kommission das für den Zeitraum von 2007 bis 2013 vorgesehene siebte Programm zur Erforschung und Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien. Dabei will sie in Kooperation mit der Wirtschaft im Rahmen der JTI (Joint Technology Initiative) 470 Millionen Euro für Forschung, Entwicklung und Demonstrationsprojekte investieren (Europäische Kommission, 2007). In dieser Public-Private-Partnership sind beide Partner mit 50 Prozent beteiligt, das heißt jedem öffentlich finanzierten Beitrag steht ein privatwirtschaftliches Engagement in gleicher Höhe gegenüber. Bei ihrer Planung von Projekten wird die Kommission von dem Forschungsprojekt Roads2HyCom unterstützt, in dem Strategien für die zukünftige Verbreitung im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie entwickelt und abgestimmt werden (Roads2HyCom, 2008). In enger Koordination zum Roads2HyCom-Projekt steht das Projekt HyLights, das für die Planung großer Demonstrationsvorhaben zuständig ist (HyLights, 2008). Das Roads2HyCom-Projekt und das Projekt HyLights sind beide Teil der europäischen Plattform für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene unterstützt die EU finanziell ihre Mitgliedsländer im Bereich der Wasserstofftechnologie.

Nicht nur in Deutschland, ...

... sondern auch in der EU gibt es zahlreiche Initiativen und Förderprogramme.

Im Rahmen von PPP werden öffentliche und private Forschungsaktivitäten koordiniert.

Als weitere Beispiele für Projekte auf EU-Ebene lassen sich die Projekte RES2H2, NaturalHy und EUHYFIS nennen. Während das Projekt RES2H2 darauf ausgelegt ist, Lösungen für Wind-Wasserstoff Systeme zu entwickeln und zu erproben – dafür wurden zwei Teilprojekte in Spanien und Griechenland gestartet (RES2H2, 2008) –, geht es beim NaturalHy um die Überprüfung, wie das bestehende Erdgasnetz für die Wasserstoffwirtschaft genutzt werden könnte (NaturalHy, 2008). Bei dem EUHYFIS-Projekt ist es das Ziel, ein abgestimmtes Gesamttanksystem zu entwickeln, das die Sicherheitsanforderungen erfüllt und den Vorgang der Elektrolyse optimiert (EUHYFIS, 2008). Im schon abgeschlossenen EU-Projekt HyWays, das im Zeitraum vom April 2004 bis zum Juni 2007 umgesetzt wurde, wurden die möglichen Potenziale für den Einsatz der Wasserstofftechnologien in zehn verschiedenen europäischen Ländern – darunter auch Deutschland – untersucht (Hyways, 2008).

Die EU hat über das sogenannte CUTE-Projekt (Clean Urban Transport in Europe) den Einsatz von Wasserstofftechnik in neun Großstädten in Europa, unter anderem Hamburg, Stuttgart, Amsterdam, London, Madrid und Barcelona gefördert. In diesen Städten wurden von 2003 bis Ende 2005 Brennstoffzellen-Busse im Alltag erprobt. Die Mehrzahl der Teilnehmer an dem CUTE-Projekt nimmt auch an dem Projekt HyFLEET:CUTE teil. Das Ziel dieses Nachfolgeprojektes besteht darin, die Antriebskonzepte für die Wasserstoffbusse und die bestehende Wasserstoffinfrastruktur noch weiterzuentwickeln und zu optimieren (EU, 2006).

Hamburg hat schon früh mit der Erforschung und Anwendung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie begonnen.

Hamburg ist Mitglied am HyFLEET:CUTE-Projekt und hat sich im Bereich der Wasserstofftechnik positioniert. Im Jahre 1989 wurde die Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V. gegründet, um den Einsatz von Wasserstoff in verschiedenen Anwendungsgebieten zu erforschen und zu erproben (Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V., 2008). Später, im Jahre 2005, wurde die Gesellschaft hySOLUTIONS mit dem Ziel gegründet, Wasserstoff- und Brennstoffzellenanwendungen zu fördern und auszuweiten. Zudem wird angestrebt, Hamburg als einen Wirtschaftsstandort mit Anwendungen zu etablieren, die wirtschaftlich sind. Konkrete Anwendungen in Hamburg sind unter anderem: Einsatz von Wasserstoffbussen, Nutzung von Brennstoffzellenschleppern, die Errichtung von Heizanlagen in der Hamburger HafenCity und der Einsatz einer Alsterfähre mit Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik (hySOLUTIONS, 2008).

Tabelle 2: Förderprogramme für Wasserstofftechnologien

Ebene	Förderprogramme
International	USA (Hydrogen Research Initiative), Japan (Japan Hydrogen and Fuel Cell Project), Kanada (Roadmap for Canada's transition to a Hydrogen Economy)
EU	European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform (HFP) / Joint Technology Initiative (JTI)
Bund (Deutschland)	Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie / Nationale Organisation Wasserstoffzellentechnologie (NOW)
Hamburg und andere regionale Programme	Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V. / hySOLUTIONS / Landesinitiative Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Quelle: Darstellung des HWWI.



## 4.2 | Strategien und Instrumente

### *Ordnungspolitische Grundsätze einer staatlichen Energie- und Klimapolitik*

Grundsätzlich stellt sich für die Wirtschaftspolitik die Frage, welche Ziele durch den Markt bzw. durch marktkonforme Instrumente erreicht werden können und wo aufgrund von Marktversagen ein regulierender bzw. lenkender Eingriff des Staates notwendig sein kann. CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen weltweit erhebliche negative Externalitäten, das heißt die Kosten des Klimawandels tragen nicht allein die CO<sub>2</sub>-Emittenten. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind höher als die privaten Kosten. Werden die Kosten, die durch CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen, nicht in voller Höhe vom Verursacher selbst getragen, besteht kein ausreichender Anreiz, den Ausstoß von CO<sub>2</sub> zu vermeiden. Umgekehrt besteht ein Anreiz, sich im Klimaschutz als Trittbrettfahrer zu verhalten – mit der Folge, dass Umwelt- und Klimatechnik privat zu wenig nachgefragt wird. Die Folge ist ein – aus gesamtwirtschaftlicher Sicht – zu hoher CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Für eine Regulierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen stehen verschiedene Instrumente zur Verfügung, zum Beispiel eine CO<sub>2</sub>-Steuer oder aber die Ausgabe von Emissionsrechten. Letztere ist insoweit effizient, als damit der gewünschte Umfang an CO<sub>2</sub>-Emissionen zielgenau gesteuert und gleichzeitig zu minimalen Kosten erreicht werden kann. Durch die Handelbarkeit der CO<sub>2</sub>-Zertifikate ist zudem eine intertemporale Kostenminimierung der CO<sub>2</sub>-Vermeidung gewährleistet. Aus Effizienzüberlegungen heraus wäre eine Einbeziehung des Verkehrssektors in den Emissionshandel wünschenswert.

### *Ordnungspolitische Grundsätze einer staatlichen Innovations- und Technologiepolitik*

Bislang haben sich im Verkehr technologische Entwicklungen vor allem in der Motorleistung und im Kraftstoffverbrauch gezeigt. Alternative Antriebstechnologien haben sich in der Praxis gegenüber fossilen Kraftstoffen bisher kaum etablieren können. Es gibt jedoch erfolgversprechende Pilotprojekte, die einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur Marktreife markieren. Antriebstechnologien sind jedoch sogenannte Netzwerktechnologien, die sich unter Umständen, obwohl vorteilhaft, auf privaten Märkten nicht ohne Weiteres durchsetzen können. Für die Politik stellt sich die Frage, welche Handlungsoptionen bestehen, um den Weg für alternative Technologien zu ebnen und um deren Entwicklung zur Marktreife zu beschleunigen. Oft stehen am Anfang neuer Technologien aufgrund des hohen Entwicklungsrisikos und unsicherer Renditeerwartungen staatliche Investitionen in Forschung und Entwicklung. Dies gilt vor allem bei Grundlagenforschung, die typischerweise vom Staat finanziert wird, damit die Ergebnisse als „öffentliches Gut“ allen zugänglich gemacht werden und kein privates Eigentum an diesen besteht. Erst ab einem bestimmten Punkt der Praxistauglichkeit und Marktreife treten an die Stelle öffentlicher dann private F&E-Investitionen, die aus Grundlagenforschung technologische Innovationen machen. Insoweit können staatliche Maßnahmen zur Förderung neuer Technologien sinnvoll sein. Ein frühzeitiges Engagement könnte sich trotz temporär höherer Kosten langfristig auszahlen. Für die Politik gilt jedoch der Grundsatz einer technologie-neutralen Förderung, das heißt es sollte breit und ergebnisoffen gefördert werden, ohne die Zukunftschancen einzelner Technologien damit zu präjudizieren. Zugleich kann das Forschungsrisiko dadurch diversifiziert werden.

Sollten sich eine oder mehrere Technologien jedoch bereits eindeutig als Zukunftstechnologie herausgestellt haben, kann neben privaten F&E-Aktivi-

Im Klimaschutz sollten markt-konforme Instrumente eingesetzt und zusätzliche Anreize geschaffen werden.

Neue Technologien sollten sich im Wettbewerb durchsetzen und daher vom Staat neutral gefördert werden.

Bei der Durchsetzung neuer Technologien kann es zu Markt- aber auch zu Staatsversagen kommen.

täten auch eine staatliche Förderung sinnvoll sein. Dies gilt für den Fall, dass bei Netztechnologien auf privaten Märkten Koordinationsprobleme auftreten und eine Durchsetzung effizienter Technologien scheitert (vgl. Box 2). Weiterhin kann ein staatliches Engagement die privaten Aktivitäten erhöhen und dadurch den Entwicklungs- und Marktreifeprozess beschleunigen. Da sich die Bedeutung alternativer Antriebstechnologien im Verkehr für den Klimaschutz politisch manifestiert hat, ist eine staatliche Förderung aus wirtschafts- und ordnungspolitischer Sicht sinnvoll. Darüber hinaus kann es spezifische wirtschafts- und industriepolitische Argumente für eine staatliche Förderung bestimmter Branchen, Technologien oder Forschungszweige geben. Zum Beispiel kann die technologische Führerschaft auf bestimmten Gebieten ein langfristiges Ziel sein, um über „First-mover“-Vorteile langfristige Rendite zu erzielen. Der Chance einer technologischen Führerschaft („First-mover“) steht jedoch das Risiko gegenüber, auf die „falsche“ Technologie zu setzen. Zudem können sich durch Netzexternalitäten bzw. hohe Marktaustrittskosten ineffiziente Technologien durchsetzen und etablieren („Lock-in“-Effekte).

Bei Netztechnologien, also solchen, zu deren Nutzung eine Infrastruktur erforderlich ist, kann es zu Marktversagen kommen (vgl. zum Beispiel Holzhausen, 2004). Eine Nachfrage entsteht erst dann, wenn eine ausreichende Infrastruktur existiert (supply leading). Umgekehrt rentiert sich der Aufbau einer solchen Infrastruktur erst dann, wenn eine hinreichende Nachfrage besteht (demand following). Eine befestigte Straße zu einem Bergdorf zu bauen, in dem es keine Autos gibt, mag ökonomisch zunächst wenig effizient erscheinen. Ohne Straße indes besteht es für die Anwohner auch kein Grund zur Anschaffung eines Autos. Dieses Beispiel illustriert, dass private Märkte in der Bereitstellung einer Infrastruktur versagen können. Ursache hierfür sind sogenannte „Netzexternalitäten“. Je größer das Netzwerk oder die Infrastruktur ist, desto größer ist der Nutzen für den Verbraucher und desto geringer sind die Kosten für den Anbieter. Aufgrund dieser Zusammenhänge kann eine kritische Größe existieren, die nur erreicht werden kann, wenn die Etablierung einer neuen Technologie exogen „angestoßen“ wird. Ein weiterer Punkt betrifft die Frage der Nutzung oder des Zugangs zu einer Infrastruktur oder eines Netzwerks. Oft ist der Zugang an technische Eigenschaften geknüpft, das heißt ein Endgerät etwa muss kompatibel zu dem Netz sein. Da der Aufbau eines Netzes einen oft sehr großen Fixkostenblock darstellt, existieren nur selten mehrere Netze nebeneinander. Dies bewirkt, dass einmal etablierte Netztechnologien ein großes Verharrungsvermögen aufweisen. Selbst effizientere und überlegene neue Technologien setzen sich nicht durch, da der Aufbau eines Netzes bzw. einer Infrastruktur hohe Kosten verursacht, die von privaten Investoren nur selten getragen werden können. Die Wahl einer Technologie ist also sehr stark pfadabhängig, das heißt bereits etablierte Technologien haben einen Vorteil gegenüber neuen Technologien, für die die Markteintrittskosten oft prohibitiv sind. Um wettbewerbsfähig zu werden, ist es für neue (Netz-)Technologien mit hohen Fixkosten wichtig, in den Bereich der effizienten und kostenminimalen

Box 2: Marktreife und Durchsetzung neuer Technologien

### *Konkrete Fördermaßnahmen für die Wasserstofftechnologie*

Die Wasserstofftechnologie hat sich – neben der aufkommenden Elektromobilität – als eine der vielversprechenden, zukunftsfähigen Alternativen zum fossilen Verbrennungsmotor entwickelt. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf das Ziel der Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr. Unter dieser Prämisse ist eine konkrete und praktische Förderung von Wasserstoff als alternative Antriebstechnologie im Verkehr sinnvoll. Fördermaßnahmen für Wasserstoff können grundsätzlich an der Nachfrage- und der Angebotsseite ansetzen. Die Nachfrage nach Wasserstofffahrzeugen bzw. nach CO<sub>2</sub>-armen Antriebstechnologien kann gefördert werden, indem statt einer Kfz-Steuer eine CO<sub>2</sub>-Steuer eingeführt wird. Diese entfaltet direkte Lenkungswirkung, indem sie CO<sub>2</sub>-arme Technologien honoriert und diese bereits über den Preismechanismus, also marktkonforme Instrumente, wettbewerbsfähiger macht. Zu beachten ist hierbei jedoch die gesamte CO<sub>2</sub>-Bilanz entlang der Supply Chain von Wasserstoff. Ein mit regenerierbaren Energien erzeugter Wasserstoff ist dabei in der Förderung gegenüber einem zum Beispiel mit Kohle hergestellten Wasserstoff zu begünstigen. Damit werden die negativen externen Effekte, die von den CO<sub>2</sub>-Emissionen von der Herstellung bis zum Verbrauch ausgehen, effizient internalisiert. Ferner bieten sich durch eine CO<sub>2</sub>-Steuer den privaten Anbietern positive dynamische Anreize für technologische Innovationen zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung. Eine Einbeziehung des Verkehrssektors in den Emissionshandel wäre aus Effizienzgründen sinnvoll, ist aber politisch derzeit nicht durchsetzbar. Alternativ zur CO<sub>2</sub>-Steuer können mögliche Umrüstungsinvestitionen, die beim Wechsel von der „alten“ auf die Wasserstofftechnologie entstehen, subventioniert werden. Dadurch kann auch die Ersetzung der mit alter Technologie ausgerüsteten Flotte durch neue Antriebstechnologien wie der Wasserstofftechnologie beschleunigt werden.

Die Anwendung von Wasserstoff als alternative Antriebstechnologie kann auch über die Angebotsseite gefördert werden. Dies kann mit Hilfe verschiedener Instrumente geschehen. Der Staat kann zunächst einen Teil der Infrastrukturkosten übernehmen. Diese können insoweit ein Problem darstellen, als private Märkte in der Bereitstellung einer Infrastruktur versagen können (vgl. Box 2). Das heißt der Staat übernimmt einen Teil des Investitionsrisikos, indem er Anfangsinvestitionen tätigt und dadurch die Markteintrittskosten für private Anbieter reduziert. Darüber hinaus können private Investitionen in Forschung und Entwicklung alternativer Antriebstechnologien steuerlich begünstigt werden. Dadurch sinken die Investitions- und Kapitalkosten und die Grenzinvestitionen verschieben sich, das heißt es werden mehr Investitionen getätigt. Eine direkte Subventionierung des Verkaufspreises von Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen ist nicht sinnvoll, da es hier – zumal bei unvollständigem Wettbewerb zwischen den Anbietern – zu Mitnahmeeffekten kommen kann.

Maßnahmen, die weniger stark an einzelnen Technologien ansetzen, betreffen die allgemeine Verbesserung des Technologietransfers von der Grundlagenforschung in die praktische Anwendung. Die Entwicklung von Basisinnovationen zu marktfähigen Produkten stellt in Deutschland nach wie vor ein gravierendes Problem dar. Deutschland trägt die Forschungs- und Entwicklungskosten, andere Länder transformieren daraus marktfähige Produkte mit hohen Pioniergewinnen. Hier können Maßnahmen zu einem deutlich besseren und schnelleren Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis beitragen. Eine staatliche Förderung alternativer Antriebstechnologien kann zu-

Auf der Nachfrageseite können über eine CO<sub>2</sub>-Steuer, ...

... auf der Angebotsseite durch einen Ausbau der Forschungsförderung ...

dem über die Entwicklung von marktfähigen Brückentechnologien – dies können bei Hybridfahrzeugen auch Kombinationen verschiedener Technologien sein – den technologischen Wandel erheblich beschleunigen.

... staatliche Anreize für eine beschleunigte Marktreife einer sauberen Wasserstofftechnologie gesetzt werden.

Neben anderen Technologien, wie dem elektrischen Antrieb über Batterien, hat sich Wasserstoff als eine der vielversprechenden und zukunftsfähigen alternativen Antriebstechnologien etabliert. Dies zeigen nicht zuletzt die starken internationalen und auch auf Ebene der EU koordinierten Förderprogramme. Insoweit ist eine spezifische Förderung der Wasserstofftechnologie aus wirtschafts- und ordnungspolitischer Sicht zu empfehlen. Fördermaßnahmen sollten dabei an zwei Punkten ansetzen: Zum einen an der Weiterentwicklung der technischen Komponenten der Wasserstofftechnologie und zum anderen an einer zeitnahen und verstärkten praktischen Umsetzung. Im Rahmen einer politischen Entwicklungsstrategie für alternative, saubere Antriebstechnologien im Verkehr ist frühes Handeln geboten. Mit neuen Technologien im Verkehr verbinden sich in Zukunft auch große Ertragschancen. Für die in Deutschland wichtige Automobilindustrie ist es dabei von großer Bedeutung, die technologische Führerschaft zu erhalten und bereits heute Innovationsstrategien zu entwickeln. Die Wasserstofftechnologie bildet hierbei eine der zentralen Säulen.

Ebene	Maßnahme	
Allgemeine Wirtschafts- und Innovationspolitik	Stärkung des Forschungsstandorts Deutschland	
	Stärkung der Vernetzung und des Wissenstransfers zwischen Forschung und Praxis	
	Ausbau des technologischen Führerschaft im Bereich der Umwelt- und Klimatechnologien	
Spezifische Instrumente zur Förderung von Wasserstoff bzw. alternativen Antriebstechnologien	<b>Nachfrageseite:</b>	<b>Angebotsseite:</b>
	Ersetzung der Kfz-Steuer durch eine CO <sub>2</sub> -Steuer (sofern kein Emissionshandel im Verkehrssektor)	Übernahme von Infrastrukturinvestitionen
	Subventionierung des Austauschs der „alten“ durch umweltfreundliche Flotten	Steuerliche Begünstigung von F&E-Investitionen in neue Antriebstechnologien
		Initiativen und Projekte im Bereich „Wasserstoff“ (zum Beispiel „Public-Private-Partnership“)

Tabelle 3: Wirtschaftspolitische Instrumente zur Förderung von Wasserstoff

Quelle: Darstellung des HWWI.

### 4.3 | Regionale Fördermaßnahmen

Auch regionale Maßnahmen ...

Neben überregionalen Fördermaßnahmen der allgemeinen Wirtschaftspolitik existieren durchaus auch regionale Ansätze, die Wasserstofftechnologie zu fördern. Dies betrifft vor allem Pilotprojekte, die auf praktische Anwendungen ausgerichtet sind und auf diese Weise einen erheblichen Signal- und Leuchtturmcharakter entfalten können. Eine Reihe solcher Projekte besteht bereits (vgl. Abschnitt 4.1). Hamburg unternimmt intensive Bemühungen um eine frühe Anwendung der Wasserstofftechnologie in der

Praxis. So kommen Wasserstoffbusse im regulären Linienverkehr zum Einsatz, um deren grundsätzliche Praxistauglichkeit zu erproben und nachzuweisen. Hindernis für einen flächendeckenden Einsatz der Wasserstofftechnologie ist die fehlende Infrastruktur, das heißt die Versorgung der Wasserstofffahrzeuge über Tankstellen. Ein wichtiger nächster Schritt besteht folglich darin, eine solche Infrastruktur aufzubauen. Da Verkehrssysteme typischerweise große Distanzen überbrücken, ist die Errichtung einer Infrastruktur auf regionale Initiative hin nahezu ausgeschlossen. Für bestimmte Flotten allerdings, nämlich solche, die regional begrenzte Verkehrsströme aufweisen, ist dies über den Aufbau von regionalen Subnetzen möglich. In Abbildung 6 sind exemplarisch und stilisiert regionale Verkehrsströme unterschiedlicher Flotten dargestellt. Die „blaue“ Flotte erbringt Fahrleistungen (mit blauen Pfeilen gekennzeichnet) ausschließlich in dem hellblau unterlegten, eher kleinen Gebiet. Die „graue“ Flotte dagegen erbringen Transportleistungen (graue Pfeile) über dieses Gebiet hinaus. Taxis sind typischerweise Flotten, die ihre Fahrleistungen zu einem überwiegenden Teil in einem Gebiet mit begrenztem Radius erbringen, während zum Beispiel Lkws über größere Strecken und Entfernungen Güter transportieren.

... zum Aufbau einer Infrastruktur für lokale Flotten können die Marktreife beschleunigen.

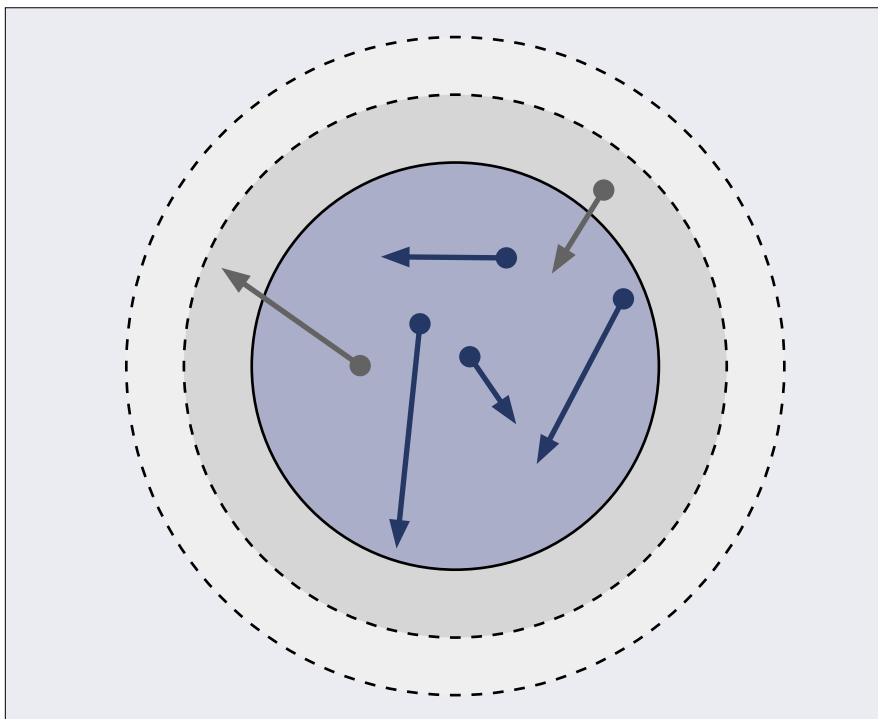


Abbildung 6: Regionale und überregionale Verkehrsströme

Quelle: Darstellung des HWWI.

Die Umrüstung einer Flotte mit einer neuen Technologie setzt zunächst voraus, dass auf den relevanten Strecken eine Infrastruktur existiert, die mit dieser Technologie kompatibel ist. Der Auf- und Ausbau einer flächendeckenden Infrastruktur ist umso leichter und kostengünstiger, je kleiner das Gebiet ist, innerhalb dessen die Flotte ihre Fahrleistungen erbringt. Regionale Förderprogramme sind daher möglich und sinnvoll, sofern lokale Flotten existieren, für die eine Infrastruktur auch von Städten oder Regionen finanzierbar ist. Typische Beispiele für solche regionalen Flotten sind der öffentliche Nahverkehr, Busse, Taxis etc. In Hamburg ist neuerdings ein Alsterschiff mit der Wasserstofftechnologie ausgerüstet worden. Im Rahmen eines Clusters „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik“ sollen in Hamburg weitere Projekte

Hamburg hat bereits mehrere Pilotprojekte umgesetzt und damit Strukturen für den Ausbau einer Wasserstoffwirtschaft geschaffen.

umgesetzt werden. Hierzu gehören die Nutzung von Gabelstaplern im Hafen, von APUs (Auxiliary Power Units) bei Flugzeugen und Schiffen und der modellhafte Einsatz von Hybridfahrzeugen im Taxengewerbe. Der Germanische Lloyd untersucht darüber hinaus das Marktpotenzial der Brennstoffzellentechnologie im maritimen Sektor (vgl. Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft, 2007). Hamburg hat sich damit als Region eine Art Modellcharakter für Anwendungen der Wasserstofftechnologie erworben. Diese vorhandenen Strukturen können im Rahmen einer Zukunftsstrategie ausgebaut werden. Dabei könnte es für Hamburg erstrebenswert sein, die Forschung besser mit der Entwicklung und Anwendung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie zu verknüpfen.

Regionale Maßnahmen sollten  
in überregionale Förder-  
programme eingebunden sein.

Damit lässt sich festhalten, dass gerade in Ballungsräumen für eine große Anzahl von Personen und Fahrten die Errichtung einer regionalen Infrastruktur effizient sein kann. Die regionalen Fördermaßnahmen sollten jedoch immer in nationale und supranationale Programme eingebunden sein. Daher sollte Hamburg für den weiteren Ausbau der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie die Förderung durch den Bund nutzen. Anderenfalls sind die Investitionsrisiken für untergeordnete Gebietskörperschaften zu hoch. Perspektivisch besteht die Möglichkeit, dass mehrere regionale Subnetze sich zu einem überregionalen Netz zusammenschließen.

## 5 | Fazit und Politikempfehlungen

Versorgungssicherheit und Klimaschutz sind die zentralen Themen der energie- und klimapolitischen Diskussion. Abnehmende Vorkommen an fossilen Energieressourcen, eine weltweit schnell ansteigende Energienachfrage und der drohende Klimawandel sind die Gründe hierfür. Angesichts eines in der Zukunft stark steigenden Mobilitätsaufkommens, insbesondere in den bevölkerungsreichen und schnell wachsenden Ländern wie China und Indien, kommt dem Verkehrssektor hierbei eine zentrale Bedeutung zu. Dies gilt umso mehr, als sich im Verkehr bislang kaum Alternativen zu fossilen Kraftstoffen etablieren konnten.

Die Sicherung einer nachhaltigen Mobilität für das 21. Jahrhundert erfordert die zügige Entwicklung neuer, sauberer Antriebstechnologien zur Marktreife. Die Wasserstofftechnologie kann zu den Zielen Versorgungssicherheit und Klimaschutz einen wichtigen Beitrag leisten und hat sich dadurch als eine der zentralen Zukunftstechnologien etabliert. Insbesondere die Eigenschaft von Wasserstoff, Energie zu speichern und somit Erzeugung und Verwendung von Energie räumlich und zeitlich zu trennen, bietet interessante Möglichkeiten. So kann mit Hilfe von Wasserstoff aus sauberen Quellen wie zum Beispiel Windkraft erzeugte Energie im Verkehr eingesetzt werden. Zahlreiche Förderprogramme auf nationaler und supranationaler Ebene zeigen das Potenzial, das generell in der Wasserstofftechnologie gesehen wird.

Hohe Infrastrukturkosten und die zu geringe private Nachfrage nach Umwelt- und Klimatechnik machen eine staatliche Förderung sinnvoll. Eine Besteuerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr „belohnt“ saubere Antriebstechnologien und macht diese bereits über den Preismechanismus wettbewerbsfähiger. Es sollte dabei aber nicht allein der Verbrauch, sondern die gesamte Supply Chain im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen zugrunde gelegt werden. Eine CO<sub>2</sub>-Steuer ist auch dynamisch effizient, da sie positive Anreize zur Entwicklung innovativer Technologien zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung gibt. Vorzuziehen wäre allerdings eine Einbeziehung des Verkehrssektors in den Emissionshandel, da die Vermeidungskosten von CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Fall über alle Bereiche minimiert werden können. Grundsätzlich können verschiedene Technologien diese Ziele erreichen. Es ist daher sinnvoll, einen Wettbewerb zwischen den Technologien um die beste Lösung zu initiieren. In diesem Sinne ist aus ordnungspolitischer Sicht im Grundsatz eine technologie-neutrale Förderung anzustreben. Die Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellentechnologie und die Elektrofahrzeuge haben sich zwar noch nicht etabliert, zeigen aber bereits in der frühen Anwendungsphase ihr grundsätzliches Marktpotenzial. Synergien, etwa in der Entwicklung bestimmter Komponenten – vor allem der Batterietechnik –, sollten durch eine öffentliche Förderung genutzt werden. Auf diese Weise können beide Technologiepfade effizient vorangebracht werden. Beide Technologien lassen sich bereits heute in Hybridfahrzeugen einsetzen. Um diese „Brückenfunktion“ zu nutzen, ist eine staatliche Förderung von Wasserstoff im Rahmen einer politischen Entwicklungsstrategie für neue Technologien im Verkehr sinnvoll. Für Deutschland bietet eine technologische Führerschaft im Bereich der Klima- und Umwelttechnik in Verbindung mit

der wichtigen Automobilindustrie große Chancen.

Konkrete Fördermaßnahmen können ferner an der praktischen Umsetzung und Anwendung dieser Technologie ansetzen, um den Prozess der Marktreife zu beschleunigen. Hier ergeben sich auch regionale Förderansätze, zum Beispiel beim Aufbau einer Infrastruktur für regionale Verkehrssysteme. Insbesondere der öffentliche Verkehr kann zu Nachfragesteigerungen und zum Ausbau der Infrastruktur beitragen. In Hamburg sind diesbezüglich bereits Strukturen für die Wasserstoffwirtschaft vorhanden. Diese Strukturen können im Rahmen einer Zukunftsstrategie ausgebaut werden. Dabei sollte auch die Forschung verstärkt eingebunden werden. Hamburg kann damit als Modellregion die Entwicklung der Wasserstofftechnologie sowohl in Forschung als auch in der praktischen Anwendung vorantreiben. Dabei ist in Zukunft eine überregionale Vernetzung mit anderen Ballungsräumen anzustreben. Hierfür sollten auch die Fördermaßnahmen des Bundes und der EU genutzt werden. Hamburg kann mit einem Ausbau der Wasserstofftechnologie zugleich die internationale Reputation des Wirtschaftsstandorts im Bereich der Spitzen- und Zukunftstechnologien profilieren und stärken.



*Bräuninger, Michael/Leschus, Leon/Vöpel, Henning (2007):* Biokraftstoffe und Nachhaltigkeit – Ziele, Probleme, Instrumente, Lösungen, HWWI Policy Report Nr. 5, Hamburg.

*Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (2007):* Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft, Drucksache 18/6803, 2007.

*Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (2008):* Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2007 – Stand: 12. März 2008, Berlin.

*Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi (2006):* Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin.

*Bundesregierung (2008):* Rede von Bundeskanzlerin Angela Merkel bei der Veranstaltung der Daimler AG und der RWE AG anlässlich ihres Kooperationsprojektes Elektromobilität, 5.9.2008.

*Bundesregierung (2007):* Die saubere Alternative: Wasserstoffautos „Made in Germany“, <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Magazine/emags/economy/047/t-6-die-saubere-alternative-wasserstoffautos-made-in-germany.html> (25.08.08).

*CEP Clean Energy Partnership (2007):* Bericht 2002-2007, Bonn-Berlin.  
*Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (2007)* Wasserstoff der neue Energieträger, Kremen.

*EUCAR/JRC/CONCAWE (2007a):* Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context – Well-to-Wheels Report, March 2007. o.O.

*EUCAR/JRC/CONCAWE (2007b):* Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context – Well-to-Tank Report, March 2007. o.O.

*Europäische Kommission (2007):* Vorschlag für eine Verordnung des Rates zur Gründung des gemeinsamen Unternehmens „Brennstoffzellen und Wasserstoff“, Nr. 2007/0211, 9.10.2007, Brüssel.

*Europäische Kommission (2004):* Science and technology, the key to Europe's future - Guidelines for future European Union policy to support research, Brüssel.

*Europäische Union (2006):* Commission presents the outstanding results of the CUTE project and announces new action for Clean Public Transport, Nr.: IP/06/604, Brüssel.

*GermanHy (2008):* Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?, Präsentation der Ergebnisse vom 26. Juni 2008, [http://www.germanhy.de/page/fileadmin/germanhy/media/GermanHy\\_Ergebnisfolien\\_Buenger\\_01.pdf](http://www.germanhy.de/page/fileadmin/germanhy/media/GermanHy_Ergebnisfolien_Buenger_01.pdf)

*Grünwald, Reinhard (2006):* Perspektiven eines CO<sub>2</sub>- und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick, Berlin.

*Herz, Carsten/Schneider, Mark (2008):* Autobranche fährt mit dem Strom, Handelsblatt vom 20. Mai 2008.

*Holzhausen, Antje (2004):* Durchsetzung neuer Antriebstechnologien bei Automobilen – Eine netzwerkökonomische Betrachtung, Diss., Berlin.

*HyWays (2008):* Roadmap – The European Energy Roadmap, o. O.

*International Energy Agency IEA (2005):* Prospects for Hydrogen and Fuel Cells, Paris.

*International Energy Agency IEA (2007):* World Energy Outlook 2007, Paris.

*Löwer, Chris (2008):* Zukunftsmotor geht in Serie – Fahrzeughersteller Honda macht Tempo beim Bau von Brennstoffzellenautos, Handelsblatt vom 19.8.08.

*Nitsch, Joachim (2003):* Potenziale der Wasserstoffwirtschaft, Heidelberg.

*Ramesoh, Stephan, et al. (2006):* Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe, insbesondere regenerativ erzeugten Wasserstoffs, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, o. O.

*Shell Deutschland (o. J.):* Shell Pkw-Szenarien bis 2030 – Flexibilität bestimmt Motorisierung, Hamburg.

*Statistisches Bundesamt (2007):* Im Blickpunkt: Verkehr in Deutschland 2006, Wiesbaden.

*Umweltbundesamt (2008):* Climate Change and Environmental Issues in Transportation (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3493.pdf>), Dessau.

*World Business Council for Sustainable Development (2004):* Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability, Genf.

*Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie (2007):* Geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung als klimapolitische Handlungsoption – Technologien, Konzepte, Perspektiven, Wuppertal.

*WWF European Policy Office (2008):* Plugged in – The End of the Oil Age, Brussels.

# Internetquellen

*EUHYFIS (19.8.08):* <http://www.euhyfis.com/>

*Bundesministerium für Bildung und Forschung (25.08.08):*  
<http://www.bmbf.de/foerderungen/11799.php>

*European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (14.05.2008):*  
<https://www.hfpeurope.org/>

*HyLights (19.8.08):* <http://www.hylights.org/>

*HySOLUTIONS (20.8.08):* <http://www.hysolutions-hamburg.de/>

*HyWindBalance (19.8.08):* <http://www.hywindbalance.de/>

*National Hydrogen Association (20.08.08):*  
<http://www.hydrogenassociation.org/general/basics.asp>

*NaturalHy (19.8.08):* <http://www.naturalhy.net/start.htm>

*RES2H2 (19.8.08):* <http://www.res2h2.com/goalso.htm>

*Roads2HyCom (19.8.08):* <http://www.roads2hy.com/>

*Toyota (29.8.08):* [http://www.toyota.de/cars/new\\_cars/prius/index.aspx](http://www.toyota.de/cars/new_cars/prius/index.aspx)

*Umweltbundesamt (2007):* Online-Datenabfrage

*Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V. (20.8.2008):*  
<http://www.h2hamburg.de/index.php>

In der Reihe „HWWI Policy Reports“ sind folgende Publikationen erschienen:

8. Rohstoffpreise 2008  
*Klaus Matthies*
7. Politik-Check Pharmastandort Deutschland: Potenziale erkennen –  
Chancen nutzen,  
*Michael Bräuninger et al.*
6. Konjunktur 2008  
*Michael Bräuninger et al.*
5. Biokraftstoffe und Nachhaltigkeit – Ziele, Probleme, Instrumente, Lösungen  
*Michael Bräuninger, Leon Leschus, Henning Vöpel*
4. Konjunktur 2007  
*Michael Bräuninger et al.*
3. The Costs and Benefits of European Immigration  
*Rainer Münz, Thomas Straubhaar, Florian Vadean, Nadia Vadean*
2. Wirtschaftsfaktor Fußball  
*Henning Vöpel*
1. Biokraftstoffe – Option für die Zukunft? Ziele Konzepte, Erfahrungen  
*Michael Bräuninger, Leon Leschus, Henning Vöpel*

Mehr Informationen unter: [www.hwwi.org](http://www.hwwi.org) (Publikationen).



Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI)

Heimhuder Straße 71 | 20148 Hamburg

Tel +49 (0)40 34 05 76 - 0 | Fax +49 (0)40 34 05 76 - 776

infowww.hwwi.org