

- Holzhey, M. (1999): Koordinationseffizienz in der Theorie verkehrlicher Infrastruktur: Ein Überblick, in: Hartwig, Karl-Hans: Neuere Ansätze zu einer effizienten Infrastrukturpolitik, Heft 148 der Beiträge aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster, Göttingen
- Horn, M., G. Knieps und J. Müller (1988): Deregulierungsmaßnahmen in den USA: Schlußfolgerungen für die Bundesrepublik Deutschland, Baden-Baden
- Kommission Verkehrsinfrastrukturfinanzierung (2000): Schlußbericht, vom 5.9.2000, o.O.
- Lindemann, H. und D. Oelschläger (1998): Auf neuen Gleisen in die Zukunft: Bahnreformen in Europa, in: Internationales Verkehrswesen, 50. Jg., Heft 7+8/1998, S. 318 - 322
- Müller, J. und I. Vogelsang (1979): Staatliche Regulierung, Regulated Industries in den USA und Gemeinwohlbindung in wettbewerblichen Ausnahmebereichen in der Bundesrepublik Deutschland, Baden-Baden
- Munzert, R. (2000): Railway Infrastructure Management in the United States of America, Arbeitspapier Nr. 98 des Instituts für Volkswirtschaftslehre an der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt
- Rodi, H. (1996): Effizienz im Schienenverkehr, Göttingen
- Schneider, J. (1995): Die Privatisierung der Deutschen Bundes- und Reichsbahn. Institutioneller Rahmen - Wertkettenorientiertes Synergiekonzept - Analyse der Infrastrukturgesellschaft, Wiesbaden
- Schwalbach, M. (1997): Wettbewerb auf der Schiene: die Vergabe von Fahrbahntrassen nach der Bahnreform, Göttingen
- Soltwedel, R. (1986): Deregulierungspotentiale in der Bundesrepublik, Tübingen
- Stiglitz, J. E. (1988): Economics of the Public Sector, New York, London
- Suntum, U. v. (1986): Verkehrspolitik, München
- Vickers, J. und G. Yarrow (1991): Economic Perspectives on Privatisation, in: Economic Perspectives, Heft 5/1991, S. 111 -132
- Wieland, B. (1985): Größenvorteile und natürliches Monopol aus empirischer Sicht, Diskussionsbeiträge zur Telekommunikationsforschung, Nr. 13, Bad Honnef

Automobile mit Brennstoffzellen-Antrieb: Eine Zukunftslösung für den Individualverkehr?

VON FERDINAND DUDENHÖFFER, RECKLINGHAUSEN

1. Problemstellung

Im November 2000 hat DaimlerChrysler mit dem Nocar 5, einem auf Brennstoffzellen-Antrieb umgerüsteten Mercedes A-Klasse-Modell, eine letzte Vorserien-Erprobungsstufe seines Brennstoffzellen-Fahrzeugs vorgestellt. Spätestens 2004 sollen Brennstoffzellen-PKW bei DaimlerChrysler in die Serie gehen. Andere Autohersteller wie Opel-GM, Ford, Toyota und Renault-Nissan verfolgen ähnliche Großprojekte. Kommt mit der Brennstoffzelle die Ablösung des Verbrennungsmotors und wenn ja, wann können wir mit dem Auto ohne Abgase rechnen? In dem vorliegenden Artikel werden wichtige Einflussfaktoren für die Verbreitung von Brennstoffzellen-Kraftfahrzeugen dargestellt und daraus eine Marktabschätzung abgeleitet. Zentrales Ergebnis ist dabei, dass vor dem Jahr 2015 dem Brennstoffzellen-Antrieb allenfalls Nischenfunktion in den Weltautomobilmärkten zukommt. Erst ab dem Zeitraum 2015-2020 erscheint die Markteroberung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen realistisch, wobei ein Marktsprung und die flächendeckende Verbreitung ab dem Zeitraum 2020-2025 Gestalt annimmt.

Die Analyse zeigt, dass ein Hauptgrund für die langsame Verbreitung des Brennstoffzellen-Autos in den weltweit hohen Rohölreserven liegt. Der Preis von Rohöl wird zwar bis zum Zeitpunkt 2020 steigen, allerdings nicht ausreichend, um die schnelle Verbreitung von alternativen Antrieben zu ermöglichen. Hinzu kommen zukünftige Optimierungen des konventionellen Verbrennungsmotors, die den Kraftstoffverbrauch reduzieren und damit dem Brennstoffzellen-Fahrzeugen weitere Nachteile bescheren. Bedeutsamer für die Verbreitung alternativer Antriebe als die begrenzten Erdölvorräte sind die von Meteorologen nachgewiesenen Auswirkungen der Kohlendioxid-Abgase auf die Erderwärmung.

Investitionen, die erst nach 20 Jahren erste Erträge abwerfen, sind betriebswirtschaftlich kaum zu rechtfertigen. Zu groß ist der Zinseffekt, der Gewinne, die in 20 oder mehr Jahren anfallen auf heute fast unbedeutende Wert drückt. Um dem Brennstoffzellen-PKW mehr Schub zu geben und einen Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft schneller zu ermöglichen, ist deshalb die Umweltpolitik gefordert. Allerdings nicht mit so simplen Instrumenten wie der deutschen Ökosteuer sondern ökonomisch gestalteten Lenkungsmaßnahmen. Nicht eine Koh-

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Ferdinand Dudenhöffer
Direktor Center of Automotive Research (CAR)
Fachhochschule Gelsenkirchen
August-Schmidt-Ring 10
45665 Recklinghausen

b.o.c.e
✓
bu

lendioxid-Steuer, die heute eingeführt wird, setzt die richtigen Impulse, sondern eine heute fest verankerte Kohlendioxid-Steuer, die etwa im Jahre 2010 erhoben wird. Damit hat die Industrie 10 Jahre Zeit, die Infrastruktur für Brennstoffzellen-Fahrzeuge aufzubauen und der Verbraucher die Möglichkeit, durch Kauf eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs umweltfreundlich zu reagieren, ohne die individuelle Mobilität aufgeben zu müssen. Wird das Steueraufkommen dieser Kohlendioxid-Steuer darüber hinaus dazu verwendet, Brennstoffzellen-Autos zu subventionieren, tritt ein doppelter Preiseffekt ein, und das Brennstoffzellen-Auto wird für den Autofahrer schneller wirtschaftlich.

Die Autoindustrie erkennt sehr wohl solche Signale und richtet ihr Verhalten danach aus. Erwarten die Autohersteller und Zulieferer entsprechende Nachfrage nach Brennstoffzellen-Autos in überschaubaren Zeiträumen, sorgt der hohe Wettbewerbsdruck der Branche dafür, dass zügig in die neue Technik investiert wird.

2. Marktabschätzung für Brennstoffzellen-Kraftfahrzeuge

Drei Gruppen von Variablen sind bei der Einschätzung der Marktchancen von Brennstoffzellen-Fahrzeugen entscheidend: Die Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie (Angebotsstruktur), die Einschätzung des Kundenverhaltens (Nachfrage) und die zu erwartenden Gesetzgebungs-Initiativen (Marktrahmen-Bedingungen). Insbesondere die Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie sowie möglicher Gesetzgeber-Initiativen sind heute nur in Ansätzen abschätzbar. Um bei diesen Unsicherheiten Markteinschätzungen ableiten zu können, ist es hilfreich, die nachstehenden Entwicklungen zu untersuchen.

2.1. Reichweite von Erdöl

Erdöl ist mit einem Anteil von etwa 40% am Weltenergieverbrauch derzeit der wichtigste Energieträger der Weltwirtschaft und in seinem Vorrat begrenzt. Das Gesamtpotenzial an konventionellem Erdöl wird nach verschiedenen geologischen Schätzungen¹ auf etwa 350 Mrd. t veranschlagt. Dieses Gesamtpotenzial teilt sich dabei auf in 35% bereits verbrauchte Bestände (bisher gefördert), 40% Reserven² sowie 25% noch zu findende Vorräte.

Unberücksichtigt sind in dieser Rechnung erhebliche nichtkonventionelle Erdölbestände, die sich aus Schwerstöl, Ölsand, Ölschiefer und synthetischem Erdöl, das aus Erdgas oder Kohle hergestellt werden kann, zusammensetzen. Schätzungen der unkonventionellen Bestände legen eine Vielzahl von Annahmen zugrunde und sind daher mit hoher Unsicherheit behaftet. Für unsere Analyse gehen wir davon aus, dass sich diese Bestände auf 300 Mrd. t belaufen.

¹ Vgl. hierzu auch Rempel, 2000.

² Reserven sind definiert als die in den bekannten Lagerstätten mit heutigen Technologien bei einer Ausbeutungsrate von 40% (Stand der Technik) wirtschaftlich förderbare Vorräte.

Die Förderung bzw. Verarbeitung dieses nichtkonventionellen Erdöls ist bei den heute erzielten Erölpreisen nicht wirtschaftlich. Bei Erdölpreisen, die in der Größenordnung von 30 US-\$ pro Barrel liegen, wird die Exploration dieser unkonventionellen Vorräte zusehends attraktiv. Modellrechnungen über die Reichweite der Erdölvorräte greifen oft auf konventionelle Bestände zurück und berechnen die Reichweite bekannter Bestände aus dem erwarteten Verbrauch (Fördermengen). Dieses einfache Reichweitenmodell (vgl. Tabelle 1) lässt dabei wichtige ökonomische Variablen, wie etwa verbesserte Energienutzung durch technischen Fortschritt, die verbesserte Exploration der bekannten und das Auffinden neuer Lagerstätten sowie die wirtschaftliche Nutzung unkonventioneller Erdölvorräte außer Betracht. Diese simple Reichweitenmodell lag den wohl größten Fehlprognosen auf dem Energiesektor, den „Club of Rome“-Prognosen Anfang der 70er Jahre zugrunde.

	1985	1990	1995	2000
Bekannte Reserven in Mrd. t	95,5	135,7	137,9	139,7
Förderung pro Jahr in Mrd. t	2,7	3,2	3,3	3,4
Statische Reichweite in Jahren	35	42	42	41

Tabelle 1: Bekannte Erdöl-Reserven und Verbrauch weltweit

Für die vorliegende Analyse soll eine Grobabschätzung der Reichweite herangezogen werden, die sowohl auf unkonventionelle Bestände als auch auf unterschiedliche Ausbeutungsraten heute bekannter Lagerstätten zurückgreift. Um eine Grobaussage über eine erwartete Reichweite zu erhalten, scheint die Prämisse einer normalverteilten Zufallsvariablen „Reichweite“ plausibel (vgl. Abb. 1).

Abb. 1 illustriert, dass zwar die Reichweite der Erdölvorräte beschränkt ist, allerdings in den nächsten 100 Jahren kaum mit der Erschöpfung zu rechnen ist. Aufgrund des weltweiten Verbrauchs ist zu vermuten, dass nach dem Jahr 2010 weitere Preissprünge für Erdöl erfolgen, die dann zur stärkeren Exploration unkonventioneller Vorkommen führen. So rechnet etwa die Internationale Energie Agentur (IEA) ab 2010 mit steigenden Erdölpreisen, die inflationsbereinigt bis 2020 auf 28 US-\$ pro Barrel prognostiziert werden (vgl. *Internationale Energie Agentur*, 2000). Das Argument „begrenzte Erdölvorräte“ scheint nach unserer Einschätzung in den nächsten 25 Jahren wenig bedeutsam für den Serieneinsatz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben. Ein Effekt ergibt sich allerdings durch die steigenden Benzin- und Dieselpreisen, der ab 2010 stärker zu berücksichtigen ist.

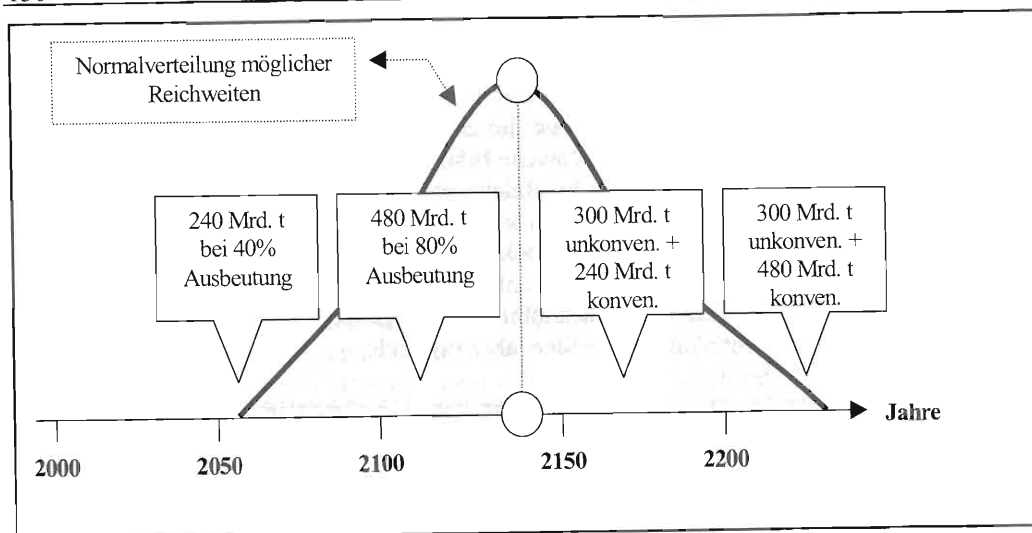


Abb. 1: Reichweite Erdöl weltweit bei heutigem Verbrauch (3,5 Mrd. t)

2.2. Global Warming und CO₂ Emission

Wesentlich stärker als das Argument beschränkter Erdöl-Reichweiten wirken die den CO₂ Emissionen zugeschriebenen Klimaveränderungen als Treiber für alternative Antriebskonzepte. Dabei ist in den nächsten 20 Jahren mit einem erheblichen Anstieg der CO₂ Emissionen weltweit zu rechnen. So geht etwa die Internationale Energie Agentur (IEA) in ihrem 2000 veröffentlichten World Energy Outlook bis zum Jahr 2020 von einer 60%igen Zunahme der CO₂ Emissionen aus.

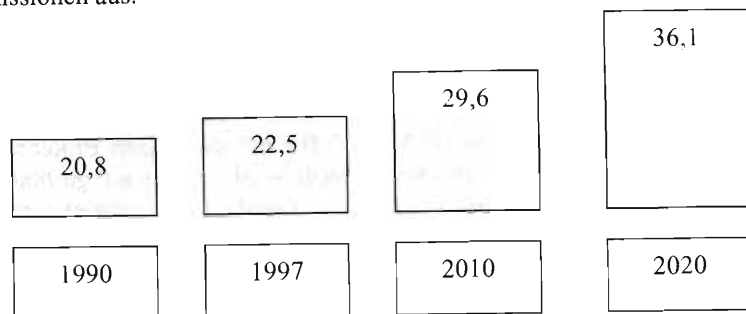


Abb. 2: CO₂ Emissionen in Mrd. t nach IEA-Prognose (vgl. IEA, 2000)

Bereits heute destabilisiert die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre das hochkomplexe Klimasystem. Beobachtbar wird die Zunahme der globalen Oberflächentemperatur, steigende Meeresspiegel und Wetterzonen-Verschiebungen. So treten Dürren, intensive Regenfälle, Wirbelstürme seit den 90er Jahren häufiger in Regionen auf, die solche Phänomene seltener erlebt haben. Nach dem im Januar 2001 veröffentlichten dritten Report³ des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ist die weitere Beschleunigung der Klimaerwärmung nicht mehr anzuzweifeln⁴. Pro Dekade steigen derzeit die Durchschnittstemperaturen auf der Erdoberfläche um 0,1 bis 0,4 Grad.

Obgleich nach den Beschlüssen des Klimagipfels von 1997 (Kyoto Protocol) und den Folgekonferenzen, wie 2000 in Den Haag, wenig Einvernehmen über die Umsetzung der vereinbarten CO₂ Reduktionen erzielt wurde, ist mittelfristig mit stärkeren gesetzlichen Vorgaben beim CO₂ Ausstoß bei Kraftfahrzeugen zu rechnen. So formuliert etwa das Bundesumweltministerium in seinem Climate Protection Program⁵ „Anxious at the rise in the CO₂ emissions in the transport sector, the Federal Government feels it is particular important to make significant headway in this area...“. Es deuten viele Anzeichen darauf hin, dass das Problem des schleichenden Klimawandels eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts wird. Um den Trend zur Klimaerwärmung zu stoppen, wird es notwendig, mittelfristig Energie effizienter einzusetzen und langfristig die Abkehr von fossilen Brennstoffen einzuleiten. Obwohl Anfang 2001 die Bush-Administration in USA die deutliche Abkehr von den Klimazielen des Kyoto Protokolls vollzogen hat und damit beim größten Energieverbraucher und CO₂-Verursacher auf absehbare Zeit eine klare Industriepolitik Vorrang genießt, wird in dem vorliegenden Marktszenario unterstellt, dass nach dem Jahr 2010 sich in den umweltpolitischen Debatten in den Industriestaaten verstärkt die CO₂ Steuer durchsetzt. Damit werden die Preise für konventionelle Kraftstoffe erhöht und die Vermarktung brennstoffzellen-getriebener Fahrzeuge unterstützt. Aufgrund des prognostizierten starken Anstiegs der CO₂ Emissionen wird im vorliegenden Marktszenario die Dynamisierung der CO₂ Steuer nach 2015 erwartet.

2.3. Schrittmacher: California Zero-Emission-Vehicle (ZEV) Program

Bereits in den 70er Jahren waren kalifornische Gesetze Auslöser einer großen Innovationswelle in der Fahrzeugindustrie, dem Einsatz von Abgas-Katalysatoren. Inzwischen wird in den Industrieländern kein benzingetriebenes Automobil ohne 3-Wege-Katalysator vermarktet. Auch aus dieser Erfahrung heraus sollte das schon 1990 verabschiedete Zero Emission Vehicle (ZEV)-Programm des US-Bundesstaates Kalifornien⁶ nicht unterschätzt werden. Das 1990 im Prinzip auf Elektrofahrzeuge ausgelegte ZEV-Programm sah vor, dass bis 1998,

³ Vgl. UNEP 2001.

⁴ Das IPCC wurde 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (Unep) und der Meteorologischen Organisation der Vereinten Nationen (WMO) eingesetzt.

⁵ Vgl. Bundesministerium für Umwelt-, Naturschutz und Nuklearsicherheit, 2000.

⁶ Zu den Zielen des ZEV-Programms bis Ende 2000 vgl. California Environmental Protection Agency, 2000.

2001, 2003 jeweils 2%, 5% und 10% aller in Kalifornien verkauften Neuwagen frei von Emissionen sein müssen. Obwohl die 1990 formulierten Ziele im Laufe der Zeit revidiert wurden, hält der Air Resource Board (ARB) weiter an seinem Ziel fest, ZEV-Fahrzeuge in California zum flächendeckenden Einsatz zu bringen. In den neusten Regulierungen (vgl. *California Environmental Protection Agency*, 2000) ist dazu ein Punkte- und Kreditmodell geschaffen worden, dass PZEV (teilweise emissionsfreie Fahrzeuge) und Hybrid-Fahrzeuge in einem Übergangszeitraum bei der Zielerfüllung mit berücksichtigt. Die Zielvorgabe lautet dabei, dass im Zeitraum 2003 bis 2008 jährlich 10% aller verkauften Neuwagen ZEV-Fahrzeuge sein müssen und sich dieser Prozentsatz dann bis zum Jahr 2018 schrittweise auf 16% erhöht. Dabei hat der Neuwagenmarkt Kaliforniens mit 1,8 Mio. verkauften Fahrzeugen im Jahr 1999 und einem Anteil am US-Gesamtmarkt von 11% nicht nur aufgrund seines Volumens Bedeutung. In Kalifornien sind Oberklasse-Fahrzeuge und damit japanische und europäische Hersteller überproportional im Markt vertreten. Damit kann Kalifornien als eine Art Lead-Market für USA interpretiert werden.

Obwohl am 25. Januar 2001 die ursprünglich sehr ambitionöse Vorgabe für ZEV ab 2003 auf „nur“ 2% der verkauften Personenwagen in Kalifornien, die dann abgasfrei sein müssen, reduziert wurde⁷, zeigt die kalifornische Abgasgesetzgebung Wirkung. Betroffen von der neuen Regelung sind dabei nur diejenigen Hersteller, von denen mehr als 35.000 Fahrzeuge im Jahr in Kalifornien zugelassen werden. Ausgehend von den heutigen Verkaufszahlen gilt damit die Regelung für DaimlerChrysler, Ford, GM, Honda, Nissan und Toyota.

Zusätzlichen Schub erhält die Kalifornia-Initiative durch das mittlerweile weitreichende Forschungsprogramm California Fuel Cell Partnership, einem Forschungskonsortium aus 19 Automobilherstellern, Brennstoffzellen-Entwicklern, Mineralölkonzernen und Regierungsbehörden, deren gesamte Entwicklungsbudgets für Brennstoffzellen-Fahrzeuge 15 Mrd. US-Dollar überschreiten. Das Bündnis hat im November 2000 den ersten Flottenversuch gestartet, an dem sich insgesamt 50 Brennstoffzellen-Fahrzeuge beteiligen. Nach Presseinformationen planen dabei die Automobilhersteller DaimlerChrysler, Ford, GM, Toyota bis 2005 Brennstoffzellen-Forschungsbudgets von jeweils 2 Mrd. US-Dollar einzusetzen. Renault-Nissan hat Investitionen in der Größenordnung von 1 Mrd. US-Dollar im selben Zeitraum angekündigt. Gleichzeitig hat Ballard Power Systems Ende Dezember 2000 die Errichtung einer ersten Brennstoffzellen-Fabrik (Plant 1) angekündigt. DaimlerChrysler scheint dabei in der Brennstoffzellen-Technologie eine Spitzenstellung einzunehmen. So wurde im November

⁷ In seinem Board Meeting von 25. Januar 2001 verabschiedete der Air Resources Board (ARB) eine weitere Lockerung seiner ZEV-Regulierungen. Diese Änderungen wurden nach Hearings von verschiedenen Industriegruppen, die im Oktober bis Dezember 2000 stattfanden, vorgeschlagen. Der ARB begründet dabei: „the modification was designed to maintain progress towards commercialization of ZEVs while recognizing constraints due to cost, lead-time, and technical changes“. Die wichtigsten Änderungen laufen dabei darauf hinaus, in den ersten Jahren die Zahl der ZEV-Fahrzeuge um etwa 50% zu reduzieren und stärker PZEV-Fahrzeuge bei der Zielerfüllung zu berücksichtigen. Die Anzahl der reinen ZEV-Fahrzeuge wird damit bis zum Jahre 2005 bei unter 10.000 Fahrzeugenverkäufen pro Jahr liegen. Bis zum Jahr 2009 wird diese Zahl dann auf 11% aller verkauften Fahrzeuge stufenweise erhöht (vgl. *California Environmental Protection Agency*, 2001).

2000 mit dem Necar 5 ein A-Klasse Prototyp vorgestellt, der über einen Methanol-Reformer Wasserstoff zur Brennstoffzellen-Versorgung erzeugt und Vorläufer für den 2004 geplanten PKW-Serieneinsatz sein wird. Bereits ab 2002 werden nach DaimlerChrysler-Planung Stadtbusse mit Brennstoffzellen-Antrieb zum Einsatz kommen, wobei Wasserstoff als Energieträger getankt wird. Die Vorserienphase für Brennstoffzellen-Antriebe kündigt sich an. Die Entwicklungs-Engagements lassen es realistisch erscheinen, dass für viele heute noch offene Fragen, wie etwa Miniaturisierung oder Kühlleistungen, Lösungen gefunden werden. Eines der zentralen Themen ist dabei sicher die H₂-Speicherung im Fahrzeug. Die Lösung dieses Problem ist gleichbedeutend damit, über den Brennstoffzellen-Antrieb das ZEV zu verwirklichen. Mit dieser Innovation ist das Schlüsselproblem des Automobilverkehrs, die Abgasemission, endgültig gelöst und die Grundvoraussetzung für der Erfolg des Individualverkehrs weit nach dem Jahre 2100 hinaus gesichert. In unserer Markteinschätzung unterstellen wir, dass für diese Schlüsselfrage im Zeitraum um das Jahr 2015 (vgl. Abb. 3) eine marktfähige Lösung gefunden wird.

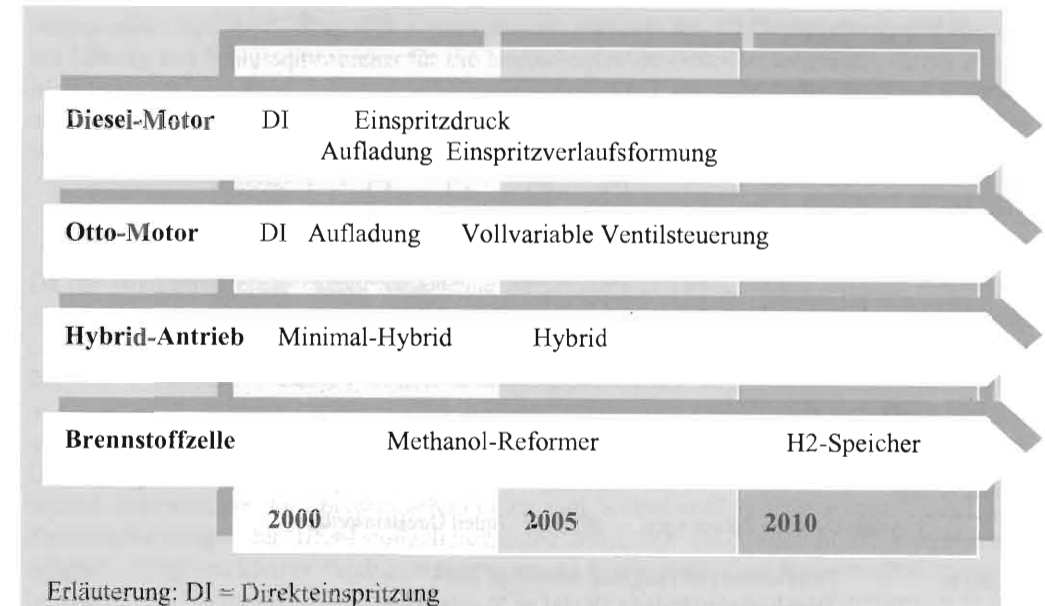


Abb. 3: Wettbewerb der Antriebssysteme

2.4. Die Wettbewerber der Brennstoffzellen-Antriebe

Ausgereifte Technik, das Effizienzpotenzial bei weitem nicht ausgeschöpft und flächendeckende Tank-Infrastruktur: dies sind Argumente, die auch im Jahre 2020 dem konventionellen Verbrennungsmotor Bedeutung geben. Wichtige Schritte sind hierbei die in Abb. 3 skizzierten Entwicklungen zur weiteren Optimierung des Verbrennungsprozesses. Dabei werden die

Getriebeentwicklungen, wie kurz- und mittelfristig die CVT-Getriebe (Continuously Variable Transmissions) und längerfristig die elektro-mechanischen Getriebe, weitere Verbesserungen des Treibstoff-Nutzungsgrads ermöglichen.

Denkbar ist in dieser Periode, dass die seit langem mögliche Umrüstung der Verbrennungsmotoren auf Erdgas stärkere Verbreitung findet. Dabei zeigt die bisher eher bescheidene Verbreitung von Erdgas-betriebenen Fahrzeugen, dass die Argumente flächendeckendes Tanknetze⁸ nicht zu unterschätzen sind. Langfristig scheint Erdgasantrieb aufgrund seines geringeren Wirkungsgrades, der derzeit zwischen 5-10% unter Normalbenzin und 15% unter Dieseldieselkraftstoff liegt, seiner begrenzten Lagerstätten, seinen CO₂ Emissionen und dem nach wie vor in Konsumenten-Meinung erhöhtem Explosions-Risiko gegenüber flüssigen Kraftstoffen, mit einer Reihe von Nachteilen verbunden, die ihn nicht als die neue Energielösung für das nächste Jahrhundert auszeichnen.

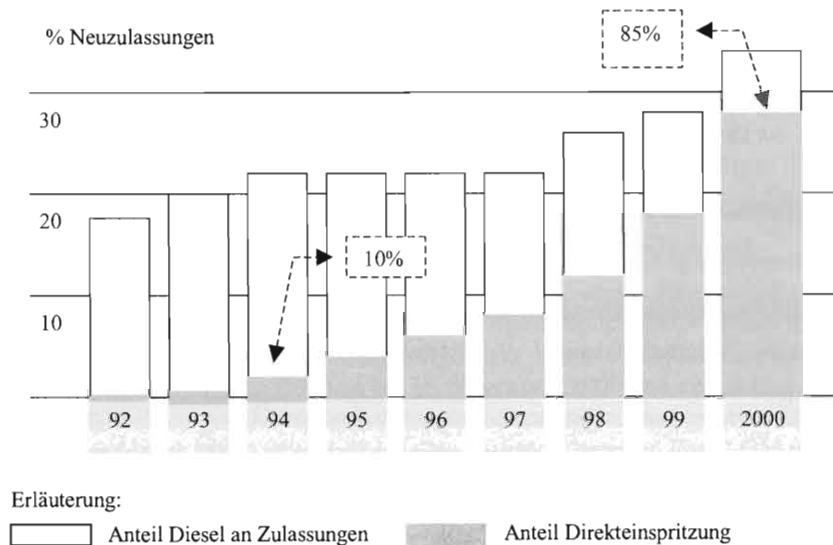


Abb. 4: Marktdurchdringung benötigt Zeit. Direkteinspritzung Diesel in Westeuropa

Bei all den zu erwartenden Optimierungserfolgen darf allerdings nicht vergessen werden, dass Fahrzeuggewicht und Fahrdynamik auch in der Zukunft ihren Kraftstoff-Tribut fordern werden. Die Erfahrung aus dem Kundenverhalten der letzten 30 Jahre lehrt, dass mit zunehmenden Einkommen Käufer vermehrt Wert auf Sicherheit, Ausstattungsfülle und -Komfort legen. Spartanisch ausgestattete Fahrzeuge werden bei Konstanz des Kundenverhaltens auch

⁸ Im Jahr 2000 waren etwa 160 Tankstellen in Deutschland vorhanden.

2020 nicht zu erwarten sein. Der Trend der hochwertigen Ausstattung wird sich damit fortsetzen. Neue Ausstattungs-Features im Sicherheits- und Kommunikationsbereich werden hinzu kommen. Interior-Entwicklungen, wie etwa bei dem Johnson Controls Sitzsystem des Opel Zafira oder bei den Sitzsystemen der Mercedes S-Klasse, zeigen Ansätze auf, die hohen Kundennutzen schaffen. In der Innenraum-Gestaltung der heutigen Fahrzeuge steckt noch viel Entwicklungspotenzial. Damit ist bei den Optimierungslösungen beim Treibstoffverbrauch zu beachten, dass Sicherheit, Fahrdynamik und Komfort in Zukunft einen Teil der Optimierung des Verbrennungsprozesses wieder aufbraucht. Nach heutiger Einschätzung bleiben damit im Flottenverbrauch Werte von 5 Liter Kraftstoff je 100 km oder 120 g CO₂ vermutlich auch im Jahr 2015 oder 2020 ein anspruchsvolles Ziel.

Gerade aus diesen Erwägung heraus macht die Hybrid-Entwicklung Sinn. Hybrid-Fahrzeuge sind Zwitter, die in einem Übergangszeitraum sinnvoll sein können⁹. Zumindest für die Erfüllung von Umweltauflagen in Ballungsräumen, wie eben in Kalifornien. Die BMW-Versuche mit H₂-Verbrennung können ebenfalls als solch ein Zwischenschritt interpretiert werden. Wobei allerdings die Lösung des Kernproblems, nämlich die H₂-Speicherung, gleichzeitig die Lösung des Schlüsselproblems für die Brennstoffzellen-Antriebe ausmacht. Damit ist aus Marktsicht zu vermuten, dass der H₂-Verbrennungsmotor erst eine späte Marktreife erzielt und dann im Wettbewerb mit der Brennstoffzelle aufgrund von Effizienzschlüssen eine schwierige Marktstellung hat.

3. Ableitung des Markt-Szenarios

Da die Brennstoffzellen-Technologie heute nur in Ansätzen abschätzbar ist, sind Prognosen über Marktpotenziale nur unter der Prämisse möglich, dass sich die Technik wie vermutet entwickelt. Es werden dabei zwei Entwicklungsphasen unterstellt: einmal bis zum Zeitpunkt 2015, in der Reformer die Wasserstoffversorgung der mobilen Brennstoffzellen ermöglichen, und zum zweiten, ab 2015, die Einführung von mobiler Wasserstoffspeichertechnik und damit die Ablösung des Reformers. Ferner wird unterstellt, dass die Ingenieure marktfähige Lösungen für viele heute noch offene Fragen in einem Zeitverlauf von 10 Jahren finden. Dies betrifft insbesondere die Speichertechnologien von Wasserstoff in Fahrzeugen. Damit sind Preisabschätzungen für Brennstoffzellenantriebe heute nur unter sehr hoher Unsicherheit möglich. Aufgrund kleiner Produktionsvolumen wird unterstellt, dass Brennstoffzellenantriebe erhebliche Nachteile (anfänglich bis zu 30%) in den Fahrzeug-Anschaffungskosten in den nächsten 10 Jahren haben werden.

⁹ Die Hybrid-Entwicklung hat mit den PZEV-Regulierungen in USA weiteren Auftrieb erhalten. Dabei werden von den US-Autoherstellern neben den Voll-Hybrid-Fahrzeugen, wie etwa dem Toyota Prius und dem Honda Insight, auch Mini-Hybrid-Lösungen getestet. Diese Mini-Hybrids sind mit traditionellen Verbrennungsmotoren ausgestattet, die in bestimmten Fahrsituationen elektrisch unterstützt werden. Die elektrische Unterstützung arbeitet dabei mit niedrigeren elektrischen Spannungen und ist daher kostengünstiger darstellbar. Einen Überblick hierzu gibt u.a. Bradsher, 2001.

Bei den Anpassungsmustern der Autokäufer wird eher vorsichtiges Verhalten unterstellt. Zum einen ist bekannt, dass Käufer Produkte mit hohen Preisnachteilen (3 Liter Lupo-Effekt) kaum annehmen. Zum zweiten kommt bei den Brennstoffzellen-Antrieben für die Käufer das nicht einschätzbare „Alltags-Dauerhaftigkeits-Zuverlässigkeits“-Problem. Eine dritte Unsicherheit für den Käufer ergibt sich aus dem zeitintensiveren Ausbau eines flächendeckenden Tanknetzes für Reformier-Kraftstoffe, wie etwa Methanol, und später für Wasserstoff. Aus diesen Gründen unterstellt das Markt-Szenario eine zeitintensive Markteinführung.

3.1 Potenzielles Marktvolumen

Aufgrund der hohen Preise der neuen Antriebstechnologie unterstellen wir, dass nur in umweltsensiblen Regionen und Ballungszentren moderner Volkswirtschaften bis 2020 ein Marktpotenzial für Brennstoffzellen-Automobile vorliegt. Dieses Marktpotenzial umfasst damit nur ein Teil des Weltfahrzeugmarktes und wird nachstehend als „theoretisches Marktpotenzial“ bezeichnet. Damit lässt sich die Analyse auf drei Marktgebiete konzentrieren:

1. US-Ballungsgebiete und US-Staaten mit hoher Umweltsensibilität, wie California, Connecticut, Florida, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New Jersey, New York, Washington. Da diese Fahrzeugmärkte gesättigt sind, lassen sich die Verkaufszahlen des Jahres 1999 als grober Indikator für das mittel- und längerfristige US-Marktpotenzial heranziehen. Für die vorliegende Analyse kann damit das theoretische US-Marktpotenzial auf 6 Mio. Fahrzeugverkäufe (PKW und Light Truck) pro Jahr quantifiziert werden.
2. Japan
Analog zu den US-Ballungszentren ist der japanische Fahrzeugmarkt in einem Sättigungszustand, womit sich das Japan-Marktpotenzial mit 4 Mio. PKW-Verkäufen pro Jahr quantifizieren lässt.
3. Ballungszentren in Europa
Wie in den USA gehen wir davon aus, dass in Europa Brennstoffzellen-Fahrzeuge hauptsächlich in Ballungszentren zum Einsatz kommen. Insbesondere ist es aufgrund der tendenziell höheren Umweltsensibilität in Mittel- und Nordeuropa naheliegend, das Marktpotenzial auf Ballungszentren dieser Staaten zu konzentrieren. Für unsere Analyse ermitteln wir damit das Europa-Marktpotenzial auf 4 Mio. Fahrzeug-Verkäufe pro Jahr.

Damit ergibt sich ein theoretisches Marktpotenzial für Brennstoffzellen-Antriebe in Höhe von 14 Mio. Fahrzeugverkäufen pro Jahr. Bei einem Weltgesamtmarkt von 56 Mio. Einheiten (weltweite Verkäufe 1999) entspricht damit der theoretisch denkbare Markt für Brennstoffzellen-Fahrzeuge 25% des Welt-Gesamtmarktes¹⁰.

¹⁰ Zur Zahlenbasis vgl. auch ACEA, 2000, sowie Automotive News Data Center, 2000.

Phase 1	Phase 2	Phase 3
<ul style="list-style-type: none"> • Erste Serienfahrzeuge • Hoher Imagegewinn für Autohersteller • Hoher Preisnachteil (30% über konvent. Antrieb) • Unsicherheit über Alltags-Tauglichkeit beim Verbraucher • Geringe Infrastruktur Service- und Tanknetz 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Preisnachteil (20% über konvent. Antrieb) • Dünne Infrastruktur Service- und Tanknetz • Priv. Nachfrage ZEV in Ballungszentren • Verbrennungsmotor, Hybrid-Antrieb als Wettbewerber • Begrenzter Reformier-Vorteil 	<ul style="list-style-type: none"> • Preisnachteil (10% über konvent. Antrieb) Anschaffungskosten kompensiert durch Preisvorteil beim Tanken (CO₂ Steuer) (Vielfahrer) • Ablösung Reformier-Technik • CO₂ Steuer Push • Ausbau flächendeckendes Tanknetz
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kaum priv. Nachfrage ➤ Bus-Einsatz Ballungsgebiete (Großtests) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sehr moderate private Nachfrage (Nische) ➤ Busse im Ballungsgebiet Volumenträger 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Priv. Nachfrage springt an ➤ Brennstoffzellen-Busse 50%-Fuhrpark

Abb. 5: Die Szenario-Prämissen im Überblick

3.2. Szenario: Phase 1 bis 2015

Aus den Entwicklungsschritten der Autohersteller kann gefolgert werden, dass in einer ersten Phase, Brennstoffzellen-Kraftfahrzeuge ihre Energie nicht aus einem Wasserstoff-Tank im Fahrzeug beziehen, sondern Hilfsttechnologien eingesetzt werden. Wasserstoff wird damit in Phase 1 im Fahrzeug mit Hilfe von Reformern gewonnen. Als Reformier-Technologien sind heute Methanol und Benzin-Reformier in der Entwicklung bzw. Erprobung. Die Reformier-Technologie schwächt dabei einige der großen Vorteile der Brennstoffzelle wieder ab. Reformier erzeugen CO₂ und erlauben damit nur eine Teilwirkung beim Klimaproblem. Ferner wird der Wirkungsgrad der Energieausbeute aus Methanol und Benzin reduziert. Damit kon-

kurriert die Brennstoffzelle in dieser Periode stark mit den optimierten Verbrennungsmotoren (vgl. Abb. 3). Aus heutiger Sicht erscheint damit kein entscheidender Vorteil der Brennstoffzellen-Antriebe ableitbar.

Aufgrund der hohen erwarteten Markteinführungspreise der Brennstoffzellen-Antriebe (kleine Stückzahlen) und der eher begrenzten Vorteile wird kaum mit Nachfrage gerechnet. Im Szenario gehen wir von einem Preisnachteil von Brennstoff-Kraftfahrzeugen von bis zu 30% gegenüber dem Ottomotor-Antrieb aus. Es liegt eine Art „3-Liter-Lupo“-Effekt vor. Jeder findet die Sache gut, aber der hohe Preis, die zu erwartende dünne Infrastruktur in Service, die für den Käufer unzureichenden Erfahrungen im Dauerbetrieb und der Alltagstauglichkeit lassen den Brennstoffzellen-Antrieb eher die Ausnahme sein. Im Punkte der Zero-Emissions-Fahrzonen, die u.a. in USA in Ballungszentren zu erwarten sind, kann in der Zeit bis 2015 zusätzlich mit der Weiterentwicklung der Hybrid-Fahrzeuge gerechnet werden. Ähnlich wie der Toyota Prius werden andere Hersteller Hybrid-Konzepte im Markt vorstellen, die Wettbewerb für die Brennstoffzellen-Antriebe darstellen. Damit ist auch aus diesen Aspekten eher mit einer verhaltenen Markt-Entwicklung der Brennstoffzellen-Antriebe in der Phase bis 2015 zu rechnen.

Die reinen Wasserstoff-Verbrennungs-Motoren (BMW-Ansatz) könnten ebenfalls in einer Zwischenperiode (bis 2015) als Wettbewerber der Brennstoffzellen-Antriebe auftreten. Aufgrund der bisher nicht erkennbaren H₂-Speicherlösung und der eher ungünstigen Wirkungsgrade der Wasserstoff-Verbrennungsmotoren erscheint diese Technologie allerdings weniger tragfähig.

Zwischenfazit: Der schnelle Umstieg in alternative Antriebe ist aus Marktsicht eher nicht realistisch. Alternative Konzepte (Hybrid, Mini-Hybrid, Wasserstoff-Verbrennung, Brennstoffzelle) münden in einer Fragmentierung des Marktes für alternative Antriebe. Fragmentierte Märkte erhöhen die Kundenverunsicherung – der Kunde wartet, welche Technologie sich durchsetzt, bevor er sich entscheidet.

3.3. Brennstoffzellen-Technologie: Phase 2 nach 2015

Die hohen Forschungs-Engagements lassen vermuten, dass um den Zeitpunkt 2015 marktfähige H₂-Speicher Lösungen in Fahrzeugen in die Serienproduktion münden. Brennstoffzellen-Kraftfahrzeuge ohne Reformier-Zwischenlösung sind damit im Angebot. Die wahren Vorteile der Brennstoffzellen können jetzt genutzt werden: Null-Emission und der Eintritt in eine Wasserstoffwirtschaft mit Wasserstoffgewinnung durch zum Beispiel Sonnenfarmen erlauben eine grundlegende Lösung des CO₂-Problems. Der flächendeckende Aufbau der Versorgungsinfrastruktur (H₂-Tankstellen) wird in Angriff genommen.

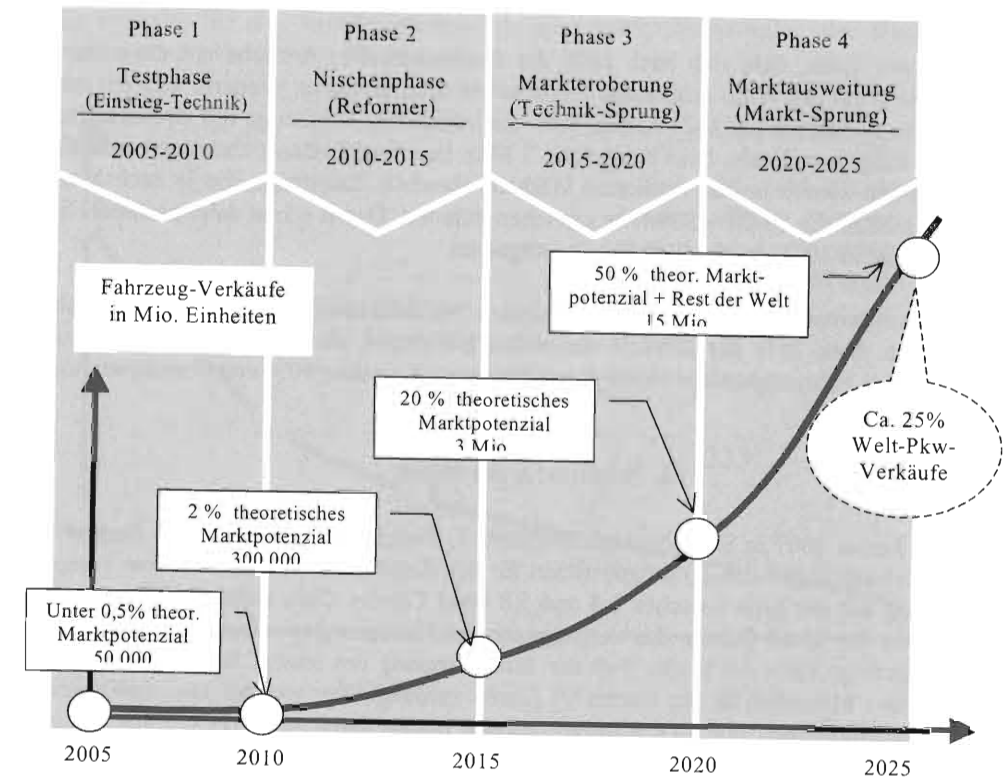


Abb. 6: Szenario-Brennstoffzellen-Antriebe

In den Potenzialmärkten (US-Ballungsgebiete, europäische Ballungsgebiete und Japan) erfolgt jetzt Stück für Stück der Einstieg in die neue Antriebstechnologie. Dabei besitzen Brennstoffzellen-Antriebe weiter den Nachteil höherer Anschaffungskosten (über 10% in unserem Szenario). Da konventionelle Treibstoffe bis zum Jahre 2020 knapper werden, eine mögliche CO₂-Steuer den Benzin- und Dieselpreis weiter erhöht, wird das Brennstoffzellen-Fahrzeug erst bei höheren jährlichen Fahrleistungen wettbewerbsfähig. Damit kann eine Analogie zur Verbreitungsgeschwindigkeit des Dieselmotors hergestellt werden. Für das Szenario wird daher eine Verbreitung der Brennstoffzellen-Fahrzeuge unterstellt, die dem in Abb. 4 skizzierten Dieselmotor-Verbreitungsmuster entspricht.

Für unser Szenario ergibt sich damit die Einschätzung, dass bis zum Jahr 2020 etwa 20% des theoretischen Marktpotenzials ausschöpfbar wird: Dies entspricht 3 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeugverkäufe pro Jahr.

3.4. Marktsprung-Phase von 2020 bis 2025

Es spricht viel dafür, dass sich nach 2020 die Brennstoffzellen-Antriebe auf die anderen Marktgebiete (Rest der Welt) ausbreiten. Unter einem optimistischen Szenario könnten dann in den Potenzialmärkten bis 2025 bereits 50% der verkauften Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb ausgestattet sein. Dies entspräche 7 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeugenverkäufen pro Jahr. Hinzu kämen in den restlichen Märkten ebenfalls Nachfrage, die je nach Markt ebenfalls bis 2025 die 10-20% Schwelle erreichen könnten. Damit wären dann nochmals 5-7 Mio. Fahrzeuge in 2025 mit Brennstoffzellen abgesetzt.

Ausgehend von einem sehr konservativ geschätzten Weltautomobilmarkt von 60 Mio. Fahrzeugen wären dann 25% der jährlich verkauften Neuwagen mit Brennstoffzellen-Antrieb ausgerüstet. Der Fahrzeugbestand bleibt dabei immer noch zu über 90% verbrennungsmotorisiert.

4. Schlussfolgerungen

Der am 21. Januar 2001 in Shanghai veröffentlichte 3. Bericht des Internationalen Gremiums für Klimaveränderungen (IPCC) prognostiziert für den Zeitraum 1990 bis 2100 eine Temperaturerhöhung auf der Erde zwischen 1,4 und 5,8 Grad Celsius. Dem steht eine Temperaturerhöhung von 0,6 Grad Celsius des vergangenen Jahrhunderts gegenüber. Neueren IPCC-Hinweisen zufolge kann der größte Teil der Erderwärmung des letzten Jahrhundert auf die Aktivitäten des Menschen in den letzten 50 Jahren zurückgeführt werden. Die stark ansteigenden CO₂-Emissionen und CO₂-Konzentrationen bilden damit nach IPCC-Einschätzung eine sehr ernstzunehmende globale Bedrohung. Unep-Direktor Klaus Töpfer zeigte sich in Presseinterviews bei der Vorstellung des IPCC-Berichts äußerst besorgt über die Entwicklungen.

In der vorstehenden Analyse wurde deutlich, dass die Brennstoffzellen-Fahrzeuge der 2. Generation (ohne Reformer) vielversprechende Lösungsansätze für das CO₂-Problem für den Verkehrsbereich darstellen und Grundlagenvoraussetzungen für den Übergang in die saubere Wasserstoffwirtschaft stellen. Allerdings ist aufgrund der abgeleiteten Marktbedingungen davon auszugehen, dass die Brennstoffzelle aus unternehmerischer Perspektive durch ihre sehr lange Pay-Off Periode nicht den vollen Schub entwickelt. Bei erwarteter Marktfähigkeit nach einem 20 Jahreszeitraum ist zu erwarten, dass die Zulieferindustrie eher zögerlich mit heutigen Investitionen reagiert¹¹. So hat zum Beispiel der VW-Forschungs- und Entwicklungsvorstand Winterkorn in einem dpa-Interview¹² auf der Detroit Motorshow Mitte Januar 2001 wissen lassen, dass Brennstoffzellen-Fahrzeuge nach seiner Meinung erst nach zehn bis 15 Jahren in Großserie gehen werden.

¹¹ Vgl. hierzu u.a. *Brendel*, 2001. Auch die dpa-Stellungnahme des VW-Entwicklungschefs kann eher als vorsichtiges investieren mit eher abwartender Haltung interpretiert werden, vgl. *Deutsche Presseagentur*, 2001.

¹² Vgl. *Deutsche Presseagentur*, 2001.

„Natürlich muss man Visionen entwickeln und versuchen, sie umzusetzen. Aber das muss sich rechnen, für den Kunden ebenso wie den Automobilhersteller, der Geld verdienen muss“, so Winterkorn¹³.

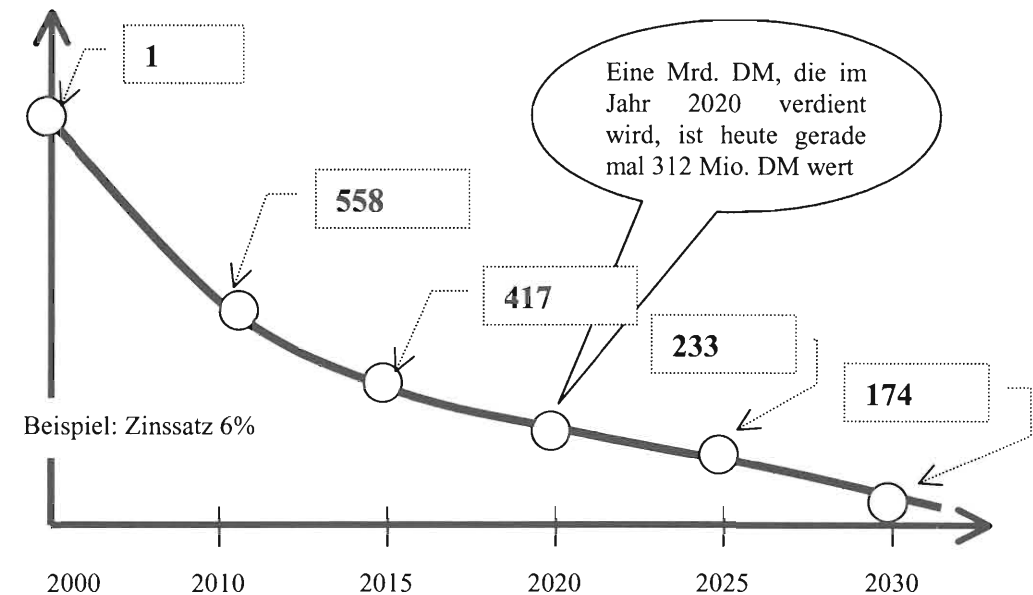


Abb. 7: Der Zinseffekt bremst die Investition in Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Aus Unternehmerperspektive ist das Risiko einer hohen Investition, die erst nach 20 bis 30 Jahren erste Erträge ausweist, wenig zu rechtfertigen. Allein die Wirkung des Zinseffekts sorgt dafür, dass die in 20 Jahren erzielten Erträge nur „ein Drittel“ in heutigen Geldeinheiten wert sind. Ein einfaches Beispiel, das Abb. 7 visualisiert, illustriert dies. So ist bei einem Zinssatz von 6% ein Gewinn von 1 Mrd. DM, der im Jahre 2010 anfällt in heutigen Geldeinheiten 558 Mio. DM wert. Fällt der Gewinn von 1 Mrd. DM erst im Jahre 2020 an, ist der heutige Wert gerade mal noch 312 Mio. DM. Fällt der Gewinn erst 2030 an, ist bei 6% Zins der heute Wert mit 174 Mio. DM noch geringer. Das Beispiel zeigt die starke Wirkung des Zinssatzes. Investitionen, die in der fernen Zukunft zu Gewinnen führen, werden bereits in diesem einfachen Beispiel wirtschaftlich sehr schwer darstellbar. Dabei sind Unsicherheitsüberlegungen noch überhaupt nicht berücksichtigt.

Wegen des hohen Gefährdungspotenzials – also der hohen externen Effekte – kann es wirtschaftspolitisch angebracht sein, den langsamen Markteroberungsweg der Brennstoffzelle abzukürzen. Ansätze in Kalifornien sind mit der ZEV-Regulierung vorhanden. Für Europa

¹³ Vgl. *Deutsche Presseagentur*, 2001.

und für Deutschland wird damit die zuvor diskutierte CO₂-Steuer bedeutsam. Im Vergleich zur heutigen Ökosteuer empfiehlt es sich allerdings, eine solche Steuer intelligenter auszugestalten. Die heutige Ökosteuer verfehlt wesentliche Lenkungseffekte und zielt stärker auf die Sanierung von Rentenkassen ab statt auf ökologische Steuerungen. Einfach deshalb, weil die entsprechende Ausweichmöglichkeit durch die Verkehrsinfrastruktur kaum vorhanden ist. Der Ökosteuer auszuweichen ist damit in einem Großteil der Fälle gleichbedeutend, immobil zu werden. Eine nicht gerade ermutigendes Szenario für eine moderne Volkswirtschaft.

Eine intelligente CO₂-Steuer setzt dann ein, wenn die Substitutionsmöglichkeit vorhanden ist. Dann wäre das Modell so zu spezifizieren, dass etwa ab dem Zeitpunkt 2010 die CO₂-Steuer zum Einsatz kommt, deren Einnahmen gleichzeitig für die Subvention von Brennstoffzellen-Fahrzeugen genutzt werden. Die Steuer wird allerdings heute schon spezifiziert, so dass der Industrie genügend Zeit verbleibt, Anpassungen vorzunehmen und die Produkte, sprich Brennstoffzellen-Fahrzeuge, auch im Markt anzubieten. Da in diesem Modell die CO₂-Steuereinnahmen gleichzeitig für die Subventionierung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen genutzt werden, entsteht ein „doppelter Preiseffekt“ – und das Verhalten kann weit im voraus von Industrie und Verbraucher auf Substitution eingestellt werden. Ein kalkulierbarer Weg, der eine Lösung bietet, um wertvolle Zeit besser zu nutzen. Eine Lösung, welche die Mobilität unserer Gesellschaft nicht zerstört.

Die in USA von der Bush-Administration im März 2001 verkündete eindeutige Abkehr von den Zielen des Kyoto-Abkommen lässt Auflagen zur CO₂-Reduktion in der US-Wirtschaft in den nächsten Jahren sehr unwahrscheinlich werden. Diese neue Politik-Unsicherheit erhöht das Investitionsrisiko in Brennstoffzellen-Fahrzeuge zusätzlich und zeigt die schwierige Berechenbarkeit von Investitionen in die neue Technologie. Die Rentabilität und damit die Vermarktung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen haben einen langen Weg vor sich. Es wäre bedauerlich, wenn – wie die Financial Times Deutschland titelte¹⁴ – die dort engagierten Unternehmen „vor allem Dollars verbrennen“ würden.

Abstract

The article analyses important factors for the marketing of fuel-cell cars and offers a market-scenario for fuel-cell vehicles. To deduct the scenario forecast three groups of variables will be analysed: the development of mobile fuel-cell technology (structure of supply), reactions of customers (structure of demand) and the expected moves in legislation (framework for regulation). Our main findings are, that we do not expect serious demand for fuel-cell vehicles before 2015. The period 2015-2020 provides a starting point for slowly increasing penetration. After 2020 it seems to be possible that demand for fuel cell cars to increase above 10% of world car production. Thus, despite its advantages as regards to energy cleanness it takes a long road to write a market success story for fuel-cell cars. As investment decisions with long time horizons become hardly profitable due to discounting losses of future incomes and rising uncertainties, a “wait and see” attitude should result under rational behaviour in the automotive industry. Thus, it seems to be necessary that political decisions have to be taken to promote the new powertrain concept. The major reason for that conclusion are the detrimental effects of combustion engines on deterioration of world climate.

¹⁴ Vgl. *Brendel*, 2001.

Literatur

- ACEA (Hrsg.)* (2000), Passenger Car Registration Reports, verschiedene Jahrgänge, ACEA (Association European Automobile Manufacturer), Brüssel.
- Automotive News Data Center (Hrsg.)* (2000), Market Data Book, Jahrgang 2000, Crain Communications Inc., Detroit.
- Bradsher, K.* (2001), Detroit Revs Up “Hybrid” Models: Key Is Electrical Assist to Engine, International Herald Tribune, 21. Februar 2001.
- Brendel M.* (2001), Ballards Brennstoffzelle verbrennt vor allem Dollar, Financial Times Deutschland, 26. März 2001.
- Bundesministerium für Umwelt-, Naturschutz und Nuklearsicherheit* (2000), Germany’s National Climate Protection Program, Okt. 2000.
- California Environmental Protection Agency* (2000), Air Resources Board, Proposed Amendments To The California Zero Emission Vehicle Program Regulations, December 8, 2000.
- California Environmental Protection Agency* (2001), Air Resources Board, ARB Fact Sheet, Zero Emission Vehicle Program Changes, February 23, 2001, www.arb.ca.gov.
- Deutsche Presseagentur (dpa)* (2001), VW-Forschungschef: Brennstoffzelle erst in zehn Jahren in Großserie, 10. Januar 2001.
- Dudenhöffer, F. / Dittler, T. / Thies C.* (1998), Schlüsseltrends im Automobilgeschäft Europas, in: Internationales Verkehrswesen, 50 Jg., 10/1998, S.441-448.
- Internationale Energie Agentur (IEA)* (2000), World Energy Outlook 2000, Paris.
- Kuhn L. / T. Melfi* (2000), Kühne Pioniere, in: Wirtschaftswoche, 9. November 2000, S. 217-223.
- Rempel, H.* (2000), Geht die Kohlenwasserstoff-Ära zu Ende, Vortrag 23.5.2000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Röthlein, B.* (2001), Wasserstoff – Kraftstoff der Zukunft ?, Neue Züricher Zeitung, 2. März 2001.
- UNEP* (2001), United Nations Environmental Programme, New Evidence Confirms Rapid Global Warming, Say Scientists, Shanghai, 22. January 2001, www.unep.org