

Wasserstofftechnik für Kraftfahrzeuge

Helmut Buchner

1. Überblick

Nach dem heutigen Stand der Technik können Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren völlig schadstofffrei betrieben werden, wenn als Kraftstoff statt Benzin Wasserstoff eingesetzt wird.

Wasserstoff kann an jeder Steckdose aus Wasser (Elektrolyse) und an jedem Erdgasanschluß mit Hilfe von Erdgasspaltanlagen [1] hergestellt und damit in die existierende Energielandschaft von der Haustankstelle bis zur Großtankstelle (flächendeckend) integriert werden. Damit ließe sich das Problem der zunächst fehlenden Infrastruktur für gasförmigen Wasserstoff lösen. Die Speicherung des Wasserstoffs in Fahrzeugen erfolgt aus Gründen der Sicherheit, der kompakten Bauweise und der Anpassung an die verfügbare Wasserstoffversorgung mittels chemischer Bindung in Metallhydriden.

Aus den umfassenden internationalen Forschungsergebnissen, die auf dem Gebiet der Wasserstofftechnik während der letzten 30 Jahre erarbeitet wurden, sind für den mobilen Einsatz neben dem schadstofffreien Fahrzeugantrieb mit Verbrennungsmotoren (Wasserstoff-Magermotorkonzept) noch folgende Anwendungen von besonderem Interesse :

- Bordstromerzeugung mittels Brennstoffzellen kleiner Leistung (1 - 5 kW_{el.}) in Ergänzung zur konventionellen Lichtmaschine
- Standheizung mittels katalytischer Wasserstoffverbrennung
- Hybrid-Klimaanlage und eine
- Wasserstoffzufuhr in den Dieselabgaskatalysator (< 10 g H₂/h) zur Absenkung der NO_x-Emissionen um 60 - 90 %.

Die genannten Anlagen zur Komforterrhöhung in Fahrzeugen können - auch im Stand bei abgestelltem Motor - mit Wasserstoff ohne Emission von Schadstoffen betrieben und vor allem auch in Fahrzeugen mit Diesel- und Benzinmotoren eingesetzt werden. Im Stadtbetrieb sind damit Einsparungen an konventionellen Kraftstoffen von 2 - 3 l / h (30 - 50%) und entsprechende Emissionsminderungen möglich (Abb. 1, 2).

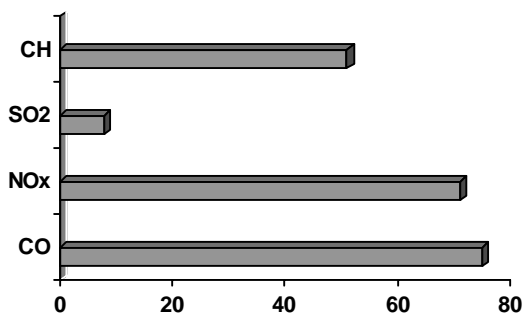


Abb. 1 : Anteil (%) KFZ an der Luftverschmutzung

Vor allem aber kann dadurch der Fahrzeugmarkt von der Wasserstofftechnik erreicht werden, ohne den Antrieb des Fahrzeugs ändern zu müssen. Hieraus ergeben sich neue Produkte und Marktchancen für die Zulieferindustrie.

Univ.-Doz. Dr. Helmut Buchner, Institut für Experimentalphysik, TU-Wien
Vortrag bei der 54. Fortbildungswoche

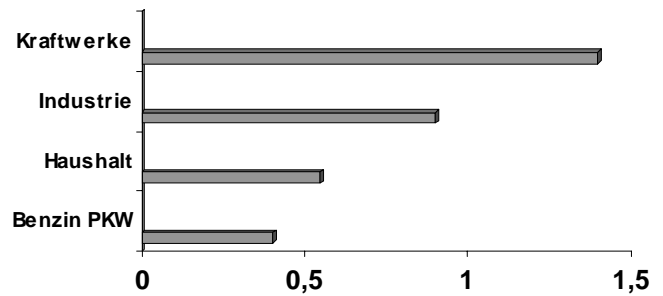


Abb. 2 : Globaler CO₂-Anteil (%) aus D (Energienutzung)

2. Wasserstofferzeugung

Wasserstoff liegt bei der Erzeugung als geruchloses, farbloses, ungiftiges, nicht kanzerogenes aber leicht brennbares Gas vor, das leichter als Luft ist, unter Einsatz von Energie aus Wasser gewonnen und wieder zu Wasser verbrannt werden kann. Die Art der eingesetzten Energie bestimmt damit die Gesamtemission der Wasserstofferzeugung, wobei Strom aus Wasserkraft oder Kernenergie dies schadstofffrei und wirtschaftlich ermöglicht.

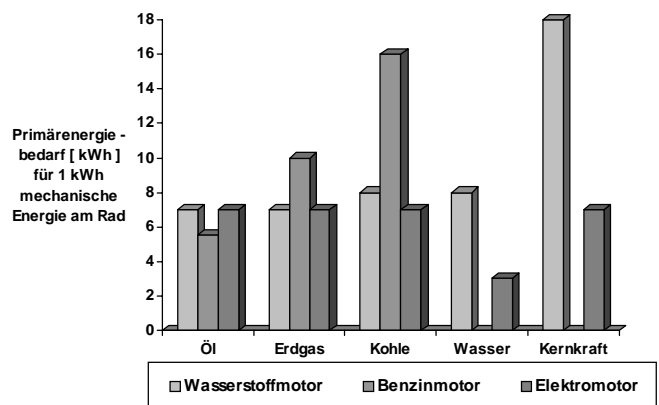


Abb. 3: Energiebedarf alternativer Antriebe

Bei der Elektrolyse wird Wasser nach der Gleichung $H_2O + \text{Strom} \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$ gespalten. Abhängig von Bauart, Größe und Anlagenzustand beträgt der Energiebedarf für 3 m³ Wasserstoff (Energieinhalt: 9 kWh entsprechend 1 l Benzin) mittels konventioneller Elektrolyse zwischen 12 und 14 kWh Strom. Wird der gleichzeitig anfallende Sauerstoff zur Trink- und / oder Abwasseraufbereitung verwendet, kann dadurch der spezifische Energiebedarf zur Wasserstofferzeugung auf ca. 10 kWh Strom gesenkt werden. Außerdem verringert der Marktpreis des Sauerstoffs auch die Herstellungskosten des Wasserstoffs, die dann - unverteuert - unter den Tankstellenpreisen für versteuertes Benzin liegen. Darüber hinaus kann die Elektrolyseabwärme, da sie bei ca. 80°C anfällt, vor allem im Falle einer Garagentankstelle zur Brauchwassererwärmung im Haus genutzt werden, womit der Stromwirkungsgrad in diesem Wasserstoff/Wärme-Verbundsystem praktisch 100% erreicht.

Grundsätzlich sollte der zur Wasserelektrolyse verwendete Strom aus nicht fossilen Energiequellen (Wasserkraft, Wind-

kraft, Kernenergie) stammen, da alle fossilen Energieträger mit weitaus höherem Wirkungsgrad direkt in Wasserstoff umgewandelt werden können (Abb. 3).

3. Anwendung im Fahrzeug

Wasserstoff ist seit langem als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren bekannt. Für den Antrieb eines Fahrzeugs können modifizierte Ottomotoren eingesetzt und sowohl mit Wasserstoff (monovalent) als auch wechselweise mit Benzin (bivalent) betrieben werden. Bei der Verbrennung von Wasserstoff im Motor zeigt sich kein CO-, CO₂- bzw. CH- Gehalt und natürlich auch keine Bleiemission im Abgas. Aufgrund des weiten Zündbereichs von Wasserstoff-Luft-Gemischen sind im Magerbetrieb des Motors - aufgrund der hohen Luftüberschußzahl und der daraus resultierenden niederen Brennraumtemperatur - auch die NO_x-Werte praktisch Null. Die gleichzeitig auftretende Verringerung der Motorleistung kann - falls erforderlich - durch mechanische Aufladung kompensiert werden (Abb. 4).

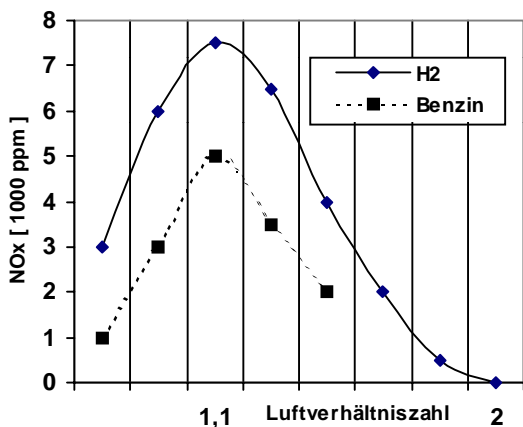


Abb. 4: Wasserstoffmotoren sind im Magerbetrieb mit Luftzahlen > 2 praktisch NO_x frei

Der gewichtsbezogene Heizwert des Wasserstoffs ist mit 33 kWh/kg etwa dreimal so hoch wie der von Benzin (10 kWh/kg). Hingegen ist die Energiedichte pro Liter Kraftstoff beim gasförmigen Wasserstoff mit <3 Wh/l etwa 3000 mal (!) kleiner als der von Benzin (9 kWh/l) und damit unpraktikabel gering. So würde der Energieinhalt eines 65 l-Benzintanks (50 kg) durch einen 20000 l-Wasserstoffballon (15 kg) ersetzt werden müssen. Die mobile Wasserstoffanwendung ist damit zunächst ein Volumenproblem. Jede Speichermethode mit einem auf eine anwendbare Größenordnung reduzierten Volumen zieht aber automatisch sowohl zusätzliches Gewicht als auch Mehrkosten nach sich. Ein schadstofffreier Antrieb ist damit gegenüber Benzin immer untrennbar mit reduzierten Reichweiten und zunehmenden Kosten verbunden. Ökonomisch und ökologisch betrachtet werden Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb daher ausschließlich für Ballungsgebiete sinnvolle Lösungen ergeben. Da jeder Benzinmotor entweder mit Wasserstoff oder mit Benzin angetrieben werden kann, bietet sich an, das Fahrzeug im Stadtgebiet mit Wasserstoff und außerhalb mit Benzin zu betreiben. Diese Variante erlaubt es, Speichergewicht und -kosten zu minimieren und gleichzeitig die von den Fahrzeugen verursachten Schadstoffemissionen im Stadtgebiet auf Null zu senken. Die Fahrten außerhalb der umweltsensiblen Regionen können dann durch einfaches Umschalten

des Motors wie bisher mit Benzin (bivalenter Motorbetrieb) und den gewohnten Reichweiten erfolgen.

Für die Speicherung des Wasserstoffs in Fahrzeugen kommen von den verschiedenen Methoden nur Metallhydride infrage:

Konventionelle *Druckgasbehälter* mit 200 - 300 bar Fülldruck sind zwar kostengünstig aber zu voluminös, zu schwer und aus Sicherheitsgründen äußerst fragwürdig; sie sind deshalb in manchen europäischen Ländern (z. B. Italien) für Fahrzeuganwendungen erst gar nicht zugelassen. Außerdem erfordert ihr Einsatz stationäre Verdichteranlagen, die mit zusätzlichen Kosten und Sicherheitsfragen verbunden sind.

Flüssiger Wasserstoff, der bei 20 K - einschließlich Kryogentank - nur noch 2 - 3 mal schwerer als ein Benzintank gleichen Energieinhalts ist, muß unter hohem elektrischen Energieaufwand aus gasförmigem Wasserstoff hergestellt werden. Für einen nennenswerten Einsatz von verflüssigtem Wasserstoff im Fahrzeugbereich außerhalb von Demovorhaben, müßte die Kernkraftwerkskapazität in Deutschland mehr als verdoppelt werden. Dies ist, wenn überhaupt, nur langfristig zu erwarten und vorraussichtlich an die Verfügbarkeit von Fusionsreaktoren gekoppelt. Darüberhinaus müßte europaweit eine eigene Infrastruktur für die tiefkalte Flüssigkeit erstellt werden. Eine äußerst kostenintensive und technisch extrem anspruchsvolle Aufgabe, die ins nächste Jahrhundert weist, aber sicher dann kommen wird, wenn die fossilen Energieträger zu Ende gehen.

Metallhydride, die den Wasserstoff chemisch gebunden, bei niedrigem Druck und damit sehr sicher speichern, sind vor allem bei Einsatz von Depot- bzw. Garagenelektrolyseuren (H₂-Druck: 30 bar) sowie bei stationären Erdgasspaltanlagen [1] zur dezentralen Wasserstoffversorgung für den mobilen Einsatz am besten geeignet. Metallhydride können gebildet werden, wenn gasförmiger Wasserstoff mit Metall- oder Legierungspulvern in Kontakt kommt und dort nach der Gleichung



eine exotherme Reaktion eingeht. Anschließend liegt der Wasserstoff als Metallhydridpulver in fester Form vor, vergleichbar mit den Wasserstoffbindungen an Sauerstoff OH₂ (Wasser) oder an Kohlenstoff CH₄ (Erdgas) oder anderen Kohlenwasserstoffen wie Benzin, Diesel u. a. Für den technischen Einsatz sind allerdings nur jene Metallhydride von Interesse, die den Wasserstoff instabil binden und damit schon bei Zufuhr relativ geringer Energiebeträge (Wärme) auf niedrigem Temperaturniveau (T < -20 °C) nach der Gleichung



wieder in die Bestandteile Metall und Wasserstoff zerfallen. Wird der freigesetzte Wasserstoff im Motor verbrannt, so muß ein Teil (ca. 30 %) der dabei entstehenden Abwärme dem Speichertank zugeführt werden, um eine kontinuierliche Wasserstoffabgabe zu gewährleisten. Somit wird während der Fahrt dieser Teil der Abwärme automatisch gespeichert und während der Betankung auf nutzbarem Temperaturniveau (Heißwasser bei 80 °C) wieder abgegeben.

Stand der Technik sind Hydridspeicher auf Basis von Titan-Chrom-Mangan-Legierungen mit Energiespeicherdichten von 350 - 450 Wh_{th}/kg. Diese Speicher geben den Wasserstoff schon bei -20°C verzögerungsfrei ab. Die Speicherkosten liegen bei 300 - 350 öS / kg Hydridtank das entspricht 700 - 1000 öS / kWh_{th} (Abb. 5).



Abb. 5: Weltweit erstes Fahrzeug mit Wasserstoff/ Benzin Betrieb und Hydridspeicher (Mercedes Benz PKW; 1975)

PKWs mit Wasserstoffantrieb sind heute noch nicht am Markt. Es können aber in einschlägigen KFZ-Werkstätten Serienfahrzeuge mit Erdgas/Benzin-Betrieb verschiedener Hersteller auf den Betrieb mit Wasserstoff/Benzin umgerüstet werden. Geht man davon aus, daß jedes Fahrzeug im rein innerstädtischen Verkehr täglich nicht mehr als 50 km zurücklegt, so sind dafür je nach Größe des Fahrzeugs und des spezifischen Kraftstoffverbrauchs ca. 2,5 - 5 l Benzin entsprechend 0,65 - 1,3 kg H₂ nötig. Das Gewicht des erforderlichen Hydridtanks liegt zwischen 50 - 100 kg, mit Kosten von 20000 - 35000 öS. Die gesamten Umrüstkosten gegenüber dem Benzinmodell liegen unter 80000 öS. Im Falle größerer Kundennachfrage (500 - 1000 PKW p. a.) könnten Benzin-Modelle direkt auf den Wasserstoff/Benzin-Betrieb eingestellt werden, mit Mehrkosten, die einschließlich Speicher 30000 - 50000 öS betragen. Da die Lebensdauer der Speicher praktisch unbegrenzt ist, werden die Kosten für das schadstofffreie Fahren mit <10 öS je 100 km sehr niedrig. Durch Reduzierung der NOVA von 16% auf 8% (aufgrund des niedrigen Benzinverbrauchs und der niedrigen Schadstoffemissionen) könnte ein Großteil dieser Kosten aufgefangen und den Kunden ein besonders wirtschaftlicher, schadstofffreier Fahrzeugbetrieb ermöglicht werden.

Die mobile Wasserstofftechnik besitzt vor allem bei DaimlerChrysler und BMW eine längere Tradition. Bei DaimlerChrysler werden seit 1972 Arbeiten zum wasserstoff-betriebenen Fahrzeug mit Ottomotor und Hydridspeicher durchgeführt [2-6]. Nach einer umfangreichen Entwicklung von Metallhydridspeichern erfolgte zwischen 1984 und 1988 an einer öffentlichen Wasserstoff/Benzin Tankstelle in Berlin ein erfolgreicher Test (mehr als 750000 Fahr-km) einer kleinen Flotte (10 Stück) von Wasserstoff-Fahrzeugen (PKW, Transporter) in Kundenhand. Gegenwärtig konzentrieren sich die DaimlerChrysler Forschungsaktivitäten - in Zusammenarbeit mit anderen Firmen - auf die Darstellung von mobilen Brennstoffzellen zur Stromerzeugung für den elektromotorischen Antriebsstrang im PKW, Transporter und Bus [7]. Hier werden in etwa 10 Jahren serienreife und bezahlbare Produkte erwartet. Die Wasserstoff/Brennstoffzellentechnik mit Elektromotor ist aber nur ein anderer Weg einen schadstofffreien Fahrzeugantrieb darzustellen, ein Ziel, das von Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff im Magerbetrieb schon längst erreicht wurde. Die Umrüstkosten des Verbrennungsmotors von Benzin- auf Wasserstoffbetrieb betragen < 200 öS/kW - Werte, die für den Elektroantrieb mit Brennstoffzellen auch nicht annähernd erreichbar sind. Damit gibt es zum Verbrennungsmotor, selbst

im Falle des schadstofffreien Antriebs, auch in Zukunft keine technisch und wirtschaftlich bessere Alternative.

BMW entwickelt Wasserstoffautos, die flüssigen Wasserstoff tanken und in Verbrennungsmotoren umsetzen können, mit einer aufgrund des heute nicht verfügbaren flüssigen Wasserstoffs sehr langfristigen Perspektive. Gegenwärtig werden derartige Autos am Münchener Flughafen im praktischen Einsatz getestet [8].

4. Wasserstoff-Standheizung

Die am ISE-Institut in Freiburg entwickelten katalytischen Brenner setzen Wasserstoff auch mit Luft NO_x-frei in Wärme um [9]. Damit kann eine wesentliche Forderung an Fahrzeugstandheizungen in Ballungsgebieten erfüllt werden, nämlich den Fahrgastraum zu heizen ohne die Umwelt mit zusätzlichen Emissionen zu belasten. Besonders wirtschaftlich - Amortisationszeiten von ca. 5 Jahren - können Wasserstoffstandheizungen an Orten mit lokalem Wasserstoffüberschuß eingesetzt werden.

Tabelle 1 zeigt dies beispielhaft an einer Standheizung mit 5 kW Heizleistung :

Leistung	5 kW
Betriebsdauer / Tag	2 h
Energieverbrauch / Tag	10 kWh \equiv 11 Benzin / 13 öS
Wasserstoffverbrauch / Tag	300 g H ₂
Speichergewicht	30 kg Hydridtank
Speicherkosten (Ziel)	< 10000 öS
Wasserstoffkosten / Tag	2 - 4 öS
Einsparung gegenüber Benzin / Tag	ca. 10 öS
Einsparung gegenüber Benzin / Jahr (150 Tage)	1500 öS
Amortisationszeit	ca. 5 Jahre

Tabelle 1 : Auslegungsbeispiel einer Standheizung mit Wasserstoff

5. Elektronische Energiewandler für Bordnetzversorgung

Der Strombedarf der Autos hat sich in den letzten Jahren vervielfacht. Für heizbare Heckscheiben, elektrische Fensterheber und Außenspiegel, Scheinwerfer, Zündung, Radio, Bordcomputer u. ä. benötigen Autos elektrischen Strom, der von der Batterie beziehungsweise - während der Fahrt - von einem Generator geliefert wird. Rechnet man die elektrische Leistung der Generatoren aller in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge zusammen, so ergibt das die stolze Summe von rund 70 Gigawatt. Das ist mehr als die halbe installierte Leistung aller deutschen Stromkraftwerke.

Da die konventionelle Lichtmaschine im Fahrzeug über den Motor angetrieben wird, erfolgt die elektrische Energieerzeugung aus dem Kraftstoff mit Hilfe der mechanischen Energie als Zwischenstufe und damit auch mit einem geringen Wirkungsgrad, der je nach Fahrbetrieb zwischen <5% und ca. 15% liegt. Das bedeutet, daß der Betrieb der Lichtmaschine mit einem spezifisch hohen Kraftstoffverbrauch verknüpft ist, der zu Stromkosten von > 15 öS/kWh_{el} führt (Netzstrompreise ca. 2 öS/kWh_{el}) und darüber hinaus auch zur Schadstoffemission

beiträgt. Tabelle 2 enthält Angaben zur Bandbreite der Benzin-kosten in 10 Jahren je kWh Stromverbrauch. Es ist zu erkennen, daß selbst bei relativ niedrigen jährlichen Betriebsstunden des Fahrzeugs erhebliche Stromkosten entstehen:

Leistung	1 kW _{el.}
Betriebsdauer	1 h
Energie	1 kWh _{el.}
Lichtmaschine	$\eta = 5 - 15 \%$
Benzinverbrauch / kWh _{el.}	2,0 - 0,7 l
Kosten / kWh _{el.}	25 öS - 10 öS
300 h Betrieb (15000 km) p. a.	600 - 200 l
Benzin-kosten in 10 Jahren	70000 öS - 25000 öS

Tabelle 2: Verbrauch einer konventionellen Lichtmaschine

Daraus folgt, daß ein Stromerzeugeraggregat mit hohem Wirkungsgrad auch noch mit Investitionskosten zwischen 20000 - 35000 öS/kW_{el.} wirtschaftlich interessant sein kann. Motorunabhängige Stromerzeugeraggregate im KFZ als Ergänzung der langjährig erprobten, zuverlässigen Lichtmaschine könnten über den hohen Wirkungsgrad hinaus (Absenkung der Kraftstoffkosten und der Emissionen) unter anderen noch folgende Vorteile bringen:

- Komforthöhung (elektr. Vorheizen, Lüfterbetrieb im Stand)
- elektrisch betriebene Klimaanlage (auch im Stand)
- Sicherheitserhöhung (z. B. Scheibenenteisung)
- Betriebsverbesserung (elektr. Vorwärmen von Ladeluft und Kraftstoff)
- Reduzierung von Batteriegewicht und -volumen (Nachladen und elektrisches Aufheizen der Batterie im Stand).

Brennstoffzellen sind als Umkehrprozeß der Wasserelektrolyse Anlagen, die Wasserstoff und Luftsauerstoff elektrochemisch in Strom und Wasser umwandeln. Die Wirkungsgrade dieser Energieumwandlung liegen zwischen ca. 30% bei Nennlast bis zu ca. 50% im unteren Teillastbereich. Aufgrund des relativ hohen elektrischen Wirkungsgrades und der technischen Verfügbarkeit stellt die PEM (Proton Exchange Membrane)-Brennstoffzelle gegenwärtig den interessantesten Lösungsweg zur Bordstromversorgung dar, vorausgesetzt, daß sich ihre technischen Probleme überwinden lassen.

- Nach dem heutigen Stand der Technik ist der Betrieb einer PEM-Brennstoffzelle nur mit Wasserstoff - schon Spuren von CO schädigen die Zelle irreversibel - und darüber hinaus
- nur bei Temperaturen über 0°C möglich (die Zelle kann grundsätzlich nicht mit Frostschutzmittel ähnlich dem Verbrennungsmotor betrieben werden).

Beide Probleme schränken die Anwendung der PEM-Brennstoffzelle zunächst beträchtlich ein, sodaß sowohl die Wasserstoffversorgung als auch die Problematik des Winterbetriebs am ehesten bei garagengestützten Fuhrparks gelöst werden könnten.

Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, daß die Brennstoffzelle schon bei Kosten um 20000 öS / kW_{el.} eine wirtschaftliche Lösung darstellt, weil sie dann über die Einsparung an Kraftstoffkosten amortisiert werden kann.

Das Kostenproblem der Brennstoffzelle als Stromerzeugeraggregat für einen 50 - 100 kW Elektroantrieb in Fahrzeugen

Brennstoffzelle	$\eta = 40 - 50 \%$
Wasserstoffverbrauch	2,5 - 2 kWh _{th} \approx 0,25 - 0,2 l Benzinäquiv.
Wasserstoffkosten in 10 Jahren	3000 öS - 2000 öS bei 3,5 öS / l Benzinäquiv.
Kosten Brennstoffzelle	20000 öS / kW _{el.}
Kosten Hydridtank (5 - 10 kWh _{th.})	7000 öS
Gesamtgewicht Hydridtank	5 - 20 kg
Gesamtkosten:	< 30000 öS

Tabelle 3: Auslegungsbeispiel einer Brennstoffzellen/Hydrid-Bordstromanlage

existiert also bei der Anwendung als mobile Bordstromversorgung im kleinen Leistungsbereich nicht, da es bei der Bordstromversorgung keine entsprechenden kostengünstigeren Alternativen gibt.

6. Metallhydridklimaanlage

Werden mindestens zwei unterschiedliche Metallhydride mit verschiedenen Reaktionswärmen in einem geschlossenen System eingesetzt und läßt man darin als Arbeitsmedium Wasserstoff zirkulieren, so kann die Wärmeaufnahme zur Wasserstoffdesorption aus einem der Hydride zur Kühlung der Umgebungsluft genutzt werden. Am NET-Institut Kassel (Aisin Cosmos / Japan) wird gegenwärtig ein auf diesem Prinzip basierender Prototyp einer Hydridklimaanlage zur Kleinserienfertigung für den Fahrzeugeinsatz weiterentwickelt [10]. Den erforderlichen thermischen Antrieb einer Hydridklimaanlage liefert eine mit Wasserstoff oder mit konventionellen Kraftstoffen betriebene Standheizung. Die technischen Daten solch einer FCKW-freien Klimaanlage, die auch in geparkten Fahrzeugen geräuscharm, umweltschonend und mit geringem Verschleiß arbeitet, ist in Tabelle 4 enthalten:

Kälteleistung	3 kW
thermische Antriebsleistung	7 kW
Temperaturniveau Wärmezufuhr	200°C
Temperaturniveau Wärmeabfuhr	50°C
Temperaturniveau Kälteerzeugung	0°C
Gewicht Hydridreaktoren	~ 30 kg
Gewicht Wärmetauscher	~ 20 kg
Gewicht Pumpen, Ventile u. ä.	~ 10 kg
Gesamtgewicht	~ 60 kg

Tabelle 4: Technische Daten einer Hydridklimaanlage

Ausgehend vom heutigen Stand der Technik ist ein Metallhydrid-Kälteaggregat größer, schwerer und teurer - die Zielvorstellungen liegen bei ca. 35000 öS - als eine konventionelle Verdichter-Kältemaschine, aber allen anderen alternativen Kälteanlagen deutlich überlegen. Über das Einsparpotential an Kraftstoff von 1,5 l Benzin je Betriebsstunde entsprechend Kraftstoffkosten von 20 öS / Betriebsstunde ergeben sich an Orten mit kostengünstigem Wasserstoff für die erforderliche Beheizung der Klimaanlage gute Möglichkeiten für die Öffnung eines neuen Marktsegments, das durch den zunehmenden Kundenwunsch nach einer Standklimaanlage sicherlich noch ausbaufähig ist.

7. Wasserstoff zur NO_x-Absenkung im Dieselabgas

Zur deutlichen Absenkung der NO_x-Werte bei niedrigen Abgastemperaturen (Stadtbetrieb) ist bei PKW-Dieselmotoren eine Zugabe von < 10 g H₂ / h ausreichend, im Falle von NFZ-Dieselmotoren entsprechend mehr. Das bedeutet, daß im Diesel-PKW für ein Reichweite von ca. 600 km (eine Tankfüllung) nur < 60 g H₂ erforderlich sind. Diese Wasserstoffmenge kann in einem ca. 5 kg schweren Hydridtank gespeichert werden. Die tägliche Versorgung eines Diesel-PKW mit Wasserstoff erfolgt über einen 200 W_{el}-Elektrolyseur (12 h Betrieb, Nachtstromtarif für ca. 2,5 kWh_{el}) mit Investitionskosten für Hydridspeicher und Elektrolyseur in Höhe von ca. 20000 öS (Einzelfertigung) und ca. 5000 öS bei Serienfertigung. Die Wasserstoffkosten zur NO_x-Absenkung liegen dann bezogen auf eine Dieseltankfüllung von ca. 350 öS zwischen 15 öS und 4 öS (Serie). Da durch die Wasserstoffzugabe die NO_x-Werte im Dieselabgas niedriger als bei einem Erdgasantrieb sind, könnten Dieselfahrzeuge auch bei Smogalarm betrieben werden - mit wesentlich geringeren technischem Aufwand und Gesamtkosten als dies bei einer mobilen Anwendung von Erdgas der Fall wäre.

8. Ausblick

Nach mehr als 25 Jahren intensiver internationaler F & E Aktivitäten auf dem Gebiet der Wasserstofftechnik stehen alle Komponenten für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen vermarktungsfähig zur Verfügung.

Tabelle 5 enthält Richtwerte für den mittleren Tagesbedarf an Wasserstoff bei seinen Anwendungen im PKW. Daraus folgt, daß "Garagen"-Elektrolyseure kleiner Leistung (2 - 4 kW_{el}) im Nachtbetrieb (12 h entsprechend 5 - 10 m³ H₂ / Tag) ausreichen, um PKWs flächendeckend und wirtschaftlich mit Wasserstoff zu versorgen.

Wasserstoffstandheizung	1 - 2 m ³ H ₂ / Tag
Wasserstoffklimaanlage	2 m ³ H ₂ / Tag
Wasserstoff-Bordstrom-Brennstoffzelle	2 m ³ H ₂ / Tag
Wasserstoff / Benzin Betrieb PKW	< 5 m ³ H ₂ / Tag (~ 550 l Benzinäquivalent / Jahr)

Tabelle 5: Wasserstoffverbrauch bei PKW-Anwendungen

Somit kann die existierende Infrastruktur für Strom und Wasser als Basis einer weitverzweigten Wasserstoffversorgung dienen, ohne diesen über ein neu zu installierendes Pipelinesystem verteilen zu müssen (Abb. 6).

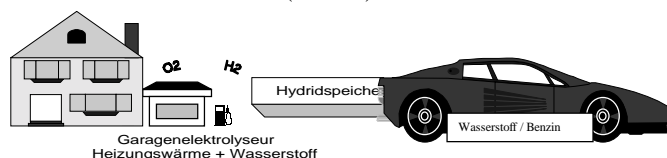


Abb. 6: Wasserstoff Haus / Auto Verbundsystem

Die im Hydridtank gespeicherte Motorabwärme kann bei der Betankung des Fahrzeugs mit Wasserstoff in der Garage gemeinsam mit der Elektrolyse-abwärme für Heizzwecke (Warmwasser) im Haus genutzt werden.

Auf diesem Weg kann die Wasserstofftechnik, integriert in der existierenden Energieinfrastruktur, sogar dem Einzelkunden zur Verfügung gestellt und damit der Markt deutlich erweitert werden. Für einen Markteinstieg der mobilen Wasserstofftechnik erweisen sich vor allem auch Industriestandorte mit Was-

serstoffverbrauch bzw. -produktion (wie z. B. die Raffinerie in Wien-Schwechat) als besonders geeignet. Insgesamt stehen in Deutschland jährlich ca. 700 Mio Liter Benzinäquivalent als Überschußwasserstoff mit Kosten zwischen 3 - 4 öS / l Benzinäquivalent zur Verfügung. Wird dieser Wasserstoff vor Ort genutzt, um Fahrzeuge zu betanken, und nicht mit hohen Kosten zum Verbraucher transportiert, lassen sich günstige wirtschaftliche Rahmenbedingungen für die Wasserstoffversorgung von Fahrzeugen erzielen.

Entscheidend für den Markterfolg der mobilen Wasserstofftechnik ist heute der Wille des Kunden, für die Schonung der Umwelt - und hier vor allem unserer Atemluft in den Ballungsräumen - mehr Geld als bisher auszugeben. Somit entscheiden wir alle über den schon kurzfristig erreichbaren Einsatz des Wasserstoffs in unseren Fahrzeugen und damit über die technisch mögliche Schadstoffentlastung unserer Wohngebiete.

Literaturverzeichnis

- [1] Ledjeff-Hey, K., Gieshoff, J., Formanski, V., Vogel, B.: *7.5 kW Solid Polymer Fuel Cell with Natural Gas Processor - A Component of an Energy Project in Saxony*, Proc. 11th World Hydrogen Energy Conference, Veziroglu, T. N. et al. (ed.), Schön & Wetzel, Frankfurt/Main, (1996), 1685 - 1693.
- [2] Buchner, H.: *The Hydrogen/Hydride Energy Concept*, Proc. 2nd World Hydrogen Energy Conference Veziroglu, T. N., Seifritz, W. (ed.), Pergamon Press, Oxford, (1978), 1749 - 1792.
- [3] Buchner, H., Povel, R.: *The Daimler-Benz Hydride Vehicle Project*, Int. J. Hydrogen Energy 7(1982), 259 - 266.
- [4] Buchner, H.: *The Question of the Hydrogen Infrastructure for Motor Vehicles*, Int. J. Hydrogen Energy 8(1983), 373 - 380.
- [5] Buchner, H.: *Energiespeicherung in Metallhydriden*, Springer Verlag, Wien, 1982.
- [6] Author's Collective: *Hydrogen Drive Test, Alternative Energy Sources for Road Transportation*, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1990.
- [7] Friedrich, J., Noreikat, K. E.: *State of the Art and Development Trends for Fuel Cell Vehicles*, Proc. 11th World Hydrogen Energy Conference, Veziroglu, T. N. et al. (ed.) Schön & Wetzel, Frankfurt/Main, (1996), 1757 - 1766.
- [8] BMW Pressemitteilung 1999
- [9] Gieshoff, J., Ledjeff-Hey, K.: *Hydrogen Burner with very low NO_x-Emissions-Appliances for Space Heating and Cooling*, Proc. 11th Hydrogen Energy Conference, Veziroglu, T. N. et al. (ed.) Schön & Wetzel, Frankfurt/Main, (1996), 1579 - 1586.
- [10] Yildirim, K. -E., Zinn, Th., Kappes, A., Maurer, Th., Sakashita, H., Klose, W.: *New Generation of Metal Hydride Tube Bundle Reactors with improved Heat Transport and Examples of Applications*, Proc. 11th World Hydrogen Energy Conference, Veziroglu, T. N. et al. (ed.) Schön & Wetzel, Frankfurt/Main, (1996), 1265 - 1273.