

Wasserstoff/Hydrogen-Forum für Fortgeschrittene

Mit Interesse an der
Mobilität der Zukunft



AUTOVISION
Tradition & Forum

Einführung:

Der sogenannte Treibhauseffekt dürfte wohl mittlerweile jedem ein Begriff sein. Auch dürfte allgemein bekannt sein, dass die Vorräte unseres Planeten an fossilen Energieträgern (Öl, Kohle, Gas) begrenzt sind und früher oder später zur Neige gehen werden.

Der Straßenverkehr, der innerhalb der letzten 20 Jahre um ein Vielfaches anstieg, spielt bei diesen Phänomenen sicherlich eine wichtige Rolle. Daher wurde aufgrund des wachsenden Umweltbewusstseins der Bevölkerung und strengerer Umweltschutzrichtlinien seit Mitte der 80er Jahre verstärkt auf die Umweltverträglichkeit von Kraftfahrzeugen geachtet, beispielsweise mit der Einführung geregelter Katalysatoren.

Trotz all dieser Bemühungen und Fortschritte der Automobilindustrie - verbesserten Abgaswerte, geringerem Verbrauch und höherer Effizienz der Motoren - ist mittlerweile allgemein bekannt, dass die Umwelt durch die stark ansteigende Zahl von Fahrzeugen trotzdem immer stärker belastet wird.



Daher intensiviert man nun die Suche nach alternativen und sauberen Antriebskonzepten für die nahe Zukunft. Eine Schlüsselrolle für die Suche nach dem sogenannten Null-Emissions-Fahrzeug (*engl.* Zero Emission Vehicle, abgekürzt ZEV) spielt dabei **Wasserstoff**, weshalb seit Beginn der 90er Jahre massiv auf diesem Gebiet geforscht wird.

Mit einer Verordnung des Californian Air Resources Board wurde den Automobilherstellern mit dem Jahr 2003 ein zeitlicher Rahmen gesetzt, bis zu dem ZEVs marktreif sein müssen. Die Automobilhersteller verfolgen zur Erreichung dieses Zieles hauptsächlich zwei verschiedene Konzepte:

- Den Antrieb eines Fahrzeuges durch die direkte Verbrennung von Wasserstoff in einem **Verbrennungsmotor**
- Die Produktion von Strom aus Wasserstoff in **Brennstoffzellen**, die einen Elektromotor versorgen.

Welches dieser Konzepte sich letztendlich durchsetzt ist nicht das Entscheidende. Fest steht jedoch, dass das zukünftige ZEV nur durch erhebliche Maßnahmen in der Umweltpolitik und dem Aufbau einer geeigneten Infrastruktur eine Chance zur Großserienproduktion erhalten und eine echte Alternative zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen werden kann.



Wasserstoff:

"Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern."



Jules Verne, 1874

Wenn es darum geht, langfristig für eine umweltfreundliche Zukunft vorzuplanen, so gilt Wasserstoff als einer der aussichtsreichsten Energieträger.

Der Grund: Wasserstoff reagiert sowohl in Brennstoffzellen als auch bei direkter Verbrennung mit Sauerstoff zu reinem Wasser und setzt eine hohe nutzbare Energie frei, ohne dabei wie fossile Energieträger Kohlendioxid (CO_2) zu emittieren. Gebunden in Wasser ist Wasserstoff zudem durch den geschlossenen Wasserkreislauf auf unserem Planeten theoretisch in unbegrenzter Menge vorhanden. Dadurch kann es nicht wie bei fossilen Brennstoffen zu einer Ressourcenverknappung kommen.

Historisch

Anfang des 16. Jahrhunderts soll Paracelsus bei Versuchen mit Metallen und Säuren ein brennbares Gas gewonnen haben, das nach Lage der Dinge eigentlich nur Wasserstoff gewesen sein kann. Auch Robert Boyle berichtete im 17. Jahrhundert darüber. Als Element wurde er 1769 durch Cavendish erkannt. Der in vielen Sprachen so oder ähnlich übliche Name "Hydrogenium" (griechisch, wörtlich: "Wassermacher") stammt von Lavoisier.

Wegen seiner geringen Dichte wurde das Gas bald als Auftriebsmittel benutzt. Am 1. Dezember 1783, nur 10 Tage nach dem Heißluftballon der Brüder Montgolfier, startete in Paris der erste bemannte Wasserstoffballon mit Jacques Alexander Charles. 1785 überquerte Jean-Pierre-François Blanchard mit einem solchen Gefährt erstmals den Ärmelkanal und führte dabei auch die erste Luftpost der Geschichte mit. Spätestens 1793 hatte das französische Revolutionsheer Batailloneinheiten zu Aufklärungszwecken; sie sollen entscheidend zu seinem Sieg bei Fleurus in jenem Jahr beigetragen haben. Die Geschichte vom Grafen Zeppelin dürfte bekannt sein. Die auf ihn zurückgehenden Luftschiffe sind bis heute die größten Objekte, die der Mensch je in die Luft gebracht hat. (Bis jetzt - demnächst sollen noch größere Luftschiffe gebaut werden. Sie werden unter anderem deshalb so groß sein, weil sie mit Helium fliegen, das einen geringeren Auftrieb hat.) Heute ist die Zahl der Gasballons gegenüber der der Heißluftballons vernachlässigbar.

Die erste Verflüssigung von Wasserstoff gelang 1898 James Dewar in London. Danach war Wasserstoff etwa ein halbes Jahrhundert lang das Arbeitspferd für die Erzeugung tiefer Temperaturen für Forschungszwecke.

Bis etwa 1980 verwendeten ihn Kern- und Elementarteilchenforscher als Füllung für Blasenammern (Detektoren). Geladene Teilchen hinterließen beim Durchgang eine Spur, die man fotografieren und auswerten konnte.

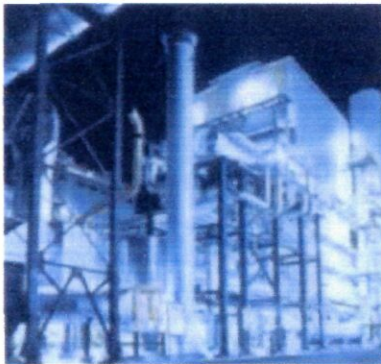
Und schließlich wäre die Raumfahrt ohne Wasserstoff nicht möglich.

Verfahren zur Wasserstoff - Gewinnung:

Das derzeit gängigste großtechnische Verfahren der Wasserstoffgewinnung ist die Elektrolyse von Wasser. Die **Wasserelektrolyse** wird in ihrer konventionellen Form, der alkalischen Elektrolyse, seit über 80 Jahren kommerziell eingesetzt.

Bei der konventionellen Wasserelektrolyse werden Kathoden- und Anodenraum durch ein ionendurchlässiges Diaphragma getrennt. In dem alkalisch, wässrigen Elektrolyten entsteht an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff. Das Diaphragma verhindert ein Vermischen.

Bei Optimierung in großtechnischen Elektrolyse-Anlagen kann ein Wirkungsgrad zwischen 60 % und 80 % erreicht werden. Aufgrund des hohen Energiebedarfs des Elektrolyseverfahrens wäre jedoch nur dann eine unter Umweltaspekten betrachtet nachhaltige Möglichkeit der Wasserstoffbereitstellung zu sehen, wenn die dafür benötigte Energie durch regenerativ erzeugten Strom aus Wasser-, Solar-, oder Windkraftwerken gedeckt würde.



Der Anteil des aus fossilen Quellen gewonnenen Wasserstoffs an der weltweiten Gesamtproduktion beläuft sich derzeit auf knapp 40 %. Hierbei ist Wasserstoff allerdings zumeist ein Nebenprodukt der chemischen Industrie bei der PVC-Herstellung und der Rohölraffinerie. Der Wasserstoff entsteht hierbei durch **Dampfreformierung von Erdgas**, durch **partielle Oxidation schwerer Kohlenwasserstoffe** oder durch **partielle Oxidation von Kohle**. Eine Wasserstofferzeugung mit diesen Verfahren für die Bereitstellung des Wasserstoffs als Energieträger für den mobilen Einsatz wäre jedoch aus umweltspezifischen Gesichtspunkten (CO_2 -Emissionen bei der Herstellung) längerfristig nicht vertretbar.

Das sich in der Pilotphase befindende **Kvaerner-Verfahren** im Plasmabogen bietet hier eine sauberere Lösung. Kohlenwasserstoffe werden bei 1600 °C unter Zugabe von Energie in Reinstkohle und Wasserstoff getrennt. Dieses Verfahren hat unter Berücksichtigung aller verwertbaren Produkte einen Wirkungsgrad von nahezu 100 % und es treten beim Prozess an sich keine nennenswerten Emissionen auf. Jedoch hätte auch dieses Verfahren einen sehr hohen Energiebedarf.

Als wichtiges regeneratives Verfahren der Wasserstoffherstellung wird derzeit die **Vergasung und Pyrolyse von Biomasse mit anschließender Shiftreaktion** (Konvertierung von Kohlenmonoxid und Wasserdampf in Kohlendioxid und Wasserstoff) angesehen. Zur Zeit ist jedoch noch kein Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse auf dem Markt erhältlich. Beim Verfahren der Wasserdampfvergasung von Biomasse fallen im ersten Schritt Koks, Methanol und Faulgase an, welche im zweiten Schritt mit Sauerstoff und Wasserdampf zu einem wasserstoffreichen Mischgas reagieren.

Sofern sich die Verfahren der Wasserstoffherstellung aus Biomasse als praxistauglich bewähren sollten und mit geringen Adaptionen auch die Vergasung von organischen Abfallstoffen bis hin zu Restmüll problemlos gelingen sollte, kann hier mittelfristig für die kommenden 5 bis 20 Jahre ein großes Erzeugungspotential gesehen werden, das prinzipiell zur Treibstoffversorgung eines wesentlichen Prozentsatzes von Straßenfahrzeugen ausreichend wäre.

Das Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe (SVZ) entwickelt beispielsweise momentan ein Verfahren, mit dem das aufgrund der aktuellen BSE-Krise quasi über Nacht zu Sondermüll gewordene Tierfett und Tiermehl zu Methanol verwertet werden könnte.

Die **photobiologische** Wasserstofferzeugung durch Photosynthese oder Fermentation steht noch am Beginn der Entwicklung, wobei viele chemische Grundfragen bisher ungeklärt sind. Momentan werden auch Versuche zur Artifizialen Bakterien-Algen-Symbiose von der Fachabteilung Bionik und Evolutionstechnik an der Technischen Universität Berlin mit der Blaualge *Nostoc muscorum* durchgeführt, deren vegetative Zellen und Heterozysten eine Art biologisches Haber-Bosch-Verfahren betreiben können. Fehlt es am Synthesepartner Stickstoff, wird Wasserstoff freigesetzt.

Möglichkeiten der Wasserstoff - Speicherung:

Ein großes Problem bei der Produktion von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen ist die Lagerung des Treibstoffes. Wasserstoff als Gas ist extrem flüchtig und hat nur eine sehr geringe Dichte. Um Wasserstoff an Bord eines Fahrzeugs speichern zu können ist es jedoch notwendig, eine hohe Energiedichte auf möglichst kleinem Raum zu erzielen um eine geeignete Reichweite des Fahrzeugs zu erreichen. Daher gibt es bisher folgende Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung:

Druckgaswasserstoff-Speicherung

Flüssigwasserstoff-Speicherung

Metallhydrid-Speicherung

Flüssige Hydride (bspw. Methanol)

Graphitnanofaser-Speicherung

Die Metallhydrid - Speicherung:

Eine weitere Möglichkeit der Speicherung von Wasserstoff ist die Metallhydridspeicherung. Die Speicherung erfolgt hier durch Anlagerung von gasförmigem Wasserstoff an bestimmten Metallen bzw. metallischen Legierungen, die große Mengen Wasserstoff sozusagen wie ein Schwamm speichern und wieder abgeben können.

Das Wasserstoffgas wird unter hohem Druck in einen Speichertank geleitet und bildet mit dem entsprechenden Metall chemische Verbindungen, die Metallhydride genannt werden, wobei Wärme entsteht. Diese Reaktion ist reversibel, was bedeutet, dass man dementsprechend durch Zugabe von Wärme die Reaktion wieder rückgängig machen kann und das Ausgangsmetall sowie Wasserstoffgas zurückerhält.

Das Speichern von Wasserstoff in Metallhydriden erlaubt eine weitestgehend verlustfreie Speicherung über einen längeren Zeitraum, da das Gas chemisch gebunden ist und nicht entweichen kann. Auch sicherheitstechnisch gesehen sind Metallhydrid-Speicher daher absolut unbedenklich.

Problematisch für den Fahrzeugbau dagegen ist die Tatsache, dass Metallhydridspeicher nur über eine geringe massenspezifische Speicherdichte verfügen (zwischen 1,7 und 4,5 % H_2 -Masse bezogen auf Legierungsmasse) und somit sehr schwer sind. So würde ein Metallhydrid-Speichertank, der einem 40 Liter Benzin fassenden herkömmlichen Tank entsprechen soll, ganze 200 Kilogramm wiegen, was etwa dem 25fachen Gewicht entspricht. Ein zusätzliches Problem ist, dass je nach Legierung zur Freisetzung des Wasserstoffs sehr hohe Temperaturen erforderlich sind.

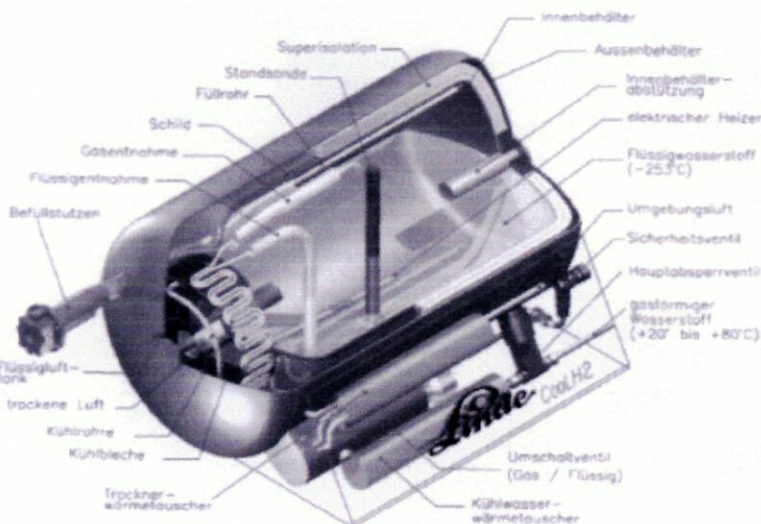
Die Flüssigwasserstoff-Speicherung:

Kühlt man Wasserstoffgas auf unvorstellbare minus 253° Celsius herunter, so geht es in den flüssigen Zustand über, man erhält das sogenannte LH₂ (*engl.* liquid hydrogen). Beim Wechsel vom gasförmigen in den flüssigen Zustand wird dabei das Volumen des Wasserstoffes um sagenhafte 99,9 % reduziert.

Deshalb stellt die Flüssigwasserstoff-Speicherung die massen- und volumenbezogen derzeit beste Speichermethode für den Einsatz von Wasserstoff in Fahrzeugen dar. Doch ein Herunterkühlen des Wasserstoffs auf diese Extremtemperaturen erfordert einiges an Aufwand und technischem Know-how:

Das komplette Treibstoffsystem - von der Betankungsanlage über Treibstoffleitungen bis zum Tank - muss zum Einen der eisigen Kälte standhalten können und zum Anderen äußerst gut isoliert sein, um die extrem tiefe Temperatur halten zu können.

Flüssigwasserstoff-Tanks:



Ein sogenannter Kryotank (*griech.* kryogen = tiefkalt) besteht aus einem mit flüssigem Wasserstoff gefüllten Innenbehälter, der sich speziell aufgehängt in einem Außenbehälter befindet. Im Zwischenraum sorgt ein künstliches Vakuum für die notwendige Isolierung des Innenbehälters.

Einzige Schwachstelle der Isolierung ist die Aufhängung des Tanks im Außenbehälter. Hier kann ein geringer Wärmetransport vom eiskalten Innenbehälter zum umgebungswarmen Außenbehälter stattfinden.

Übersteigt die Innentemperatur des Tanks die Siedetemperatur von Wasserstoff, so verdampft dieser, was Druck erzeugt. Bis etwa fünf Bar - etwa doppelt so viel wie der Luftdruck eines Autoreifens - hält ein Kryotank problemlos aus, doch dann wird der Gasdruck über Sicherheitsventile abgelassen.

Dieser Vorgang ist nicht viel anders oder gefährlicher als bei einem Auto, das in der prallen Sonne steht und bei dem Benzin verdunstet. Wird das Auto zwischendurch gefahren, wird wie beim Benzintank durch den Verbrauch automatisch der Druck abgebaut.

Im abgebildeten Kryotank der Linde Gas AG, der erstmals auf der IAA 2001 in Frankfurt präsentiert wurde und im BMW 745h seinen Platz findet, wird die Erwärmung der Innentemperatur durch ein aktives Kühlsystem ausgeglichen, das keine zusätzliche Energie verbraucht. Somit ist es laut Herstellerangaben möglich, den flüssigen Wasserstoff 12 Tage lang ohne jegliche Verluste zu speichern. Damit wäre solch ein Kryotank dichter als heutige Benzintanks.

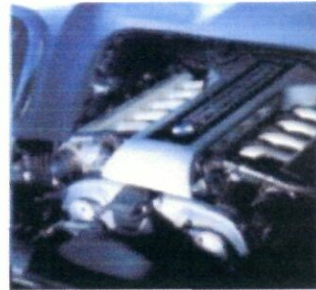
Der Trick: Auf dem Weg zum Motor tauscht der Wasserstoff einen Teil seiner Kälte - die dann ohnehin nicht mehr gebraucht wird - mit angesaugter Außenluft. Diese kühlt so stark ab, dass sie flüssig wird. Die minus 191° Celsius kalte Flüssigluft durchströmt in dem "CoolH2" genannten System dann einen Kühlmantel, der den Innentank umgibt und wie ein Kühlschrankschrank wirkt. Eine kurze Fahrt - bspw. von der Tankstelle zur Garage - genügt, um den "Kühlschrankschrank" aufzuladen.



Der Wasserstoff - Verbrennungsmotor:

Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor basiert grundsätzlich auf der Technik eines konventionellen 4-Takt-Ottomotors, nur mit dem generellen Unterschied, dass an Stelle von Benzin Wasserstoff verbrannt wird.

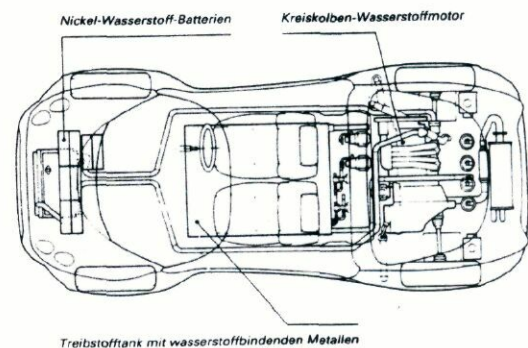
Dies funktioniert nach dem Prinzip der sogenannten Knallgasreaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser. Dabei wird Wasserstoff mit Sauerstoff zu einem hochexplosiven Gasgemisch vermischt, mit Hochdruck in den Zylinderraum eingespritzt und nach einem Verdichtungsvorgang durch Zugabe von Aktivierungsenergie in Form einer Zündung zur Reaktion gebracht.



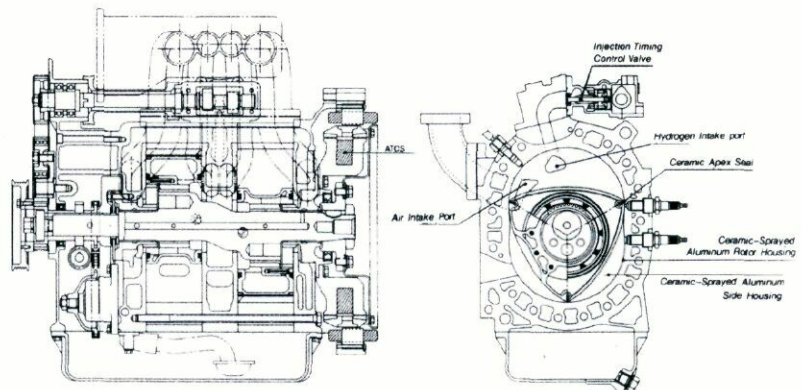
Die durch die Explosion verursachte Druckwelle drückt einen Kolben nach unten. Durch ein Schwungrad wird der Kolben wieder nach oben gehoben und verdichtet erneut das in der Zwischenzeit über die Ventile ausgetauschte Gasgemisch.

Der gesamte Vorgang wird ab diesem Punkt wiederholt. Der Kolben und das Schwungrad sind mit einer Kurbelwelle verbunden, die durch die Bewegung des Kolbens in Rotation gebracht wird. Diese Kurbelwelle treibt dann über ein Getriebe die Antriebsräder des entsprechenden Fahrzeuges an. Somit wird die chemisch gespeicherte Energie des Wasserstoffs wie beim mit Benzin betriebenen Ottomotor durch Verbrennung und mechanische Übersetzungen in kinetische Energie des Fahrzeuges umgewandelt.

Dieses kleine Zukunftsauto beweist einmal mehr, wieviel Potential noch im Wankelmotor steckt. Es bestehen wohl kaum Zweifel daran, dass es den Japanern eines Tages auch gelingen wird - die kommenden rigorosen Abgasvorschriften in Kalifornien weisen den Weg - ein solches Auto zur Serienreife und damit auf den Markt zu bringen.



Die Vorteile des Kreiskolbenmotors liegen in der Kehrseite des Wasserstoffes: Wasserstoff ist ein in hohem Masse entzündbarer und explosiver Stoff. Dies bringt heikle Probleme in bezug auf die Sicherheit, Produktion und Lagerung und namentlich der Verteilung mit sich. Mit der herkömmlichen Hin- und Herbewegung eignet sich der Hubkolbenmotor nicht gut für den Betrieb mit Wasserstoff. Seine Bauart macht ihn anfällig auf Flammrückschläge, und die Zündung muss von höchster Präzision sein. Demgegenüber hat der Wankelmotor den Vorteil, getrennte Kammern für Einlass und Verbrennung aufzuweisen. Die erwähnten Probleme sind dadurch leichter zu meistern.



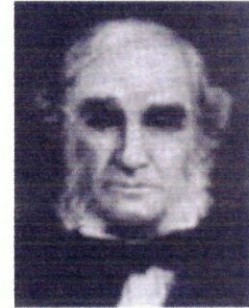
**Schnitt durch den Wasserstoff-Kreiskolbenmotor
2 x 449 ccm, wassergekühlt; Max. Leistung 100 PS;
Max. Drehmoment 13 kg-m**

Die Brennstoffzelle:

Das Prinzip der Brennstoffzelle ist schon länger bekannt als man aufgrund der derzeit intensiv betriebenen Forschung vermuten könnte.

Sir William Robert Grove (1811-1896) entwickelte bei Forschungsarbeiten zu Batterien 1839 die erste Brennstoffzelle der Welt. Mit dieser Technik wurde es erstmals möglich, die Energie einer chemischen Reaktion direkt ohne Umwege in elektrische Energie umzuwandeln.

Dabei ist die Grundreaktion in allen Brennstoffzellentypen immer die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, also quasi die Umkehrreaktion der Wasserelektrolyse.



Brennstoffzellen haben im Vergleich zu Verbrennungsmotoren und anderen Kraftwandlern einen überdurchschnittlich hohen Wirkungsgrad. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die chemische Energie des Brennstoffes direkt in elektrische Energie umgewandelt wird.

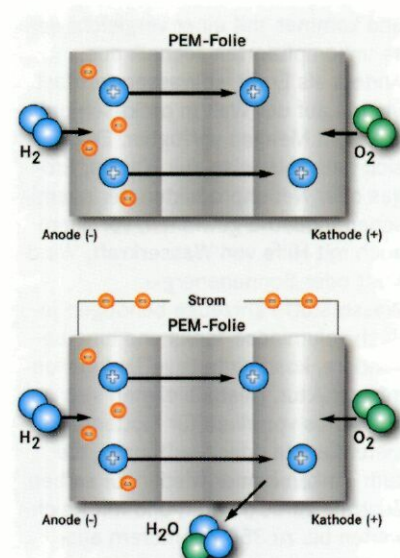
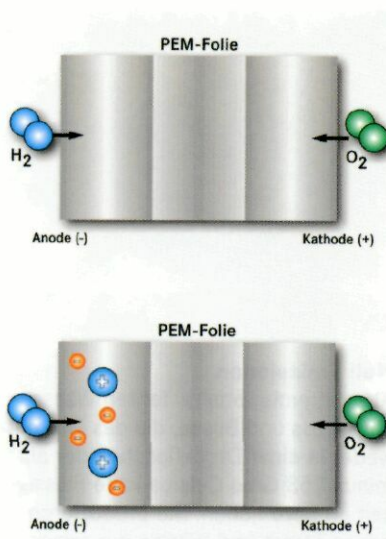
Aufgrund der relativ aufwendigen und damit teuren Herstellung von Brennstoffzellensystemen (es wird u.A. Platin als Katalysator benötigt) ruhte diese Technologie bis etwa Mitte der Fünfziger Jahre. Erst durch Anwendungen in der Raumfahrttechnik und in Unterseebooten wurde wieder an der Brennstoffzellentechnologie geforscht. Doch erst durch die Entwicklung beispielsweise leistungsfähiger Membranen und korrosionsbeständiger Werkstoffe und der verstärkten Suche nach einer zukünftigen umweltfreundlichen Energieversorgung wurde Anfang der Neunziger Jahre die Brennstoffzellentechnologie intensiv weiterentwickelt.

Die PEM - Brennstoffzelle:

Die PEMFC (*engl.* polymer electrolyte membran fuel cell) ist der geeignetste Brennstoffzellentyp für mobile Anwendungen. Daher entwickeln die Automobilhersteller zusammen mit Brennstoffzellenspezialisten hauptsächlich Fahrzeuge mit PEM-Brennstoffzellen als Stromlieferant für den antreibenden Elektromotor.

Die für den mobilen Einsatz entscheidenden Vorteile der PEM-Brennstoffzelle gegenüber anderen Brennstoffzellentypen sind die niedrige Arbeitstemperatur (80 °C) und der feste Elektrolyt. Um eine für Brennstoffzellenfahrzeuge ausreichende Leistung zu erreichen, werden viele einzelne Brennstoffzellen hintereinander zu sogenannten Stacks geschaltet.

In der Brennstoffzelle reagieren Wasserstoff und Sauerstoff in einer kontrollierten Reaktion zu Wasser, wobei die chemische Energie in Form von elektrischer Energie und Wärme umgewandelt wird.



Die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC):

Die DMFC ist im Prinzip eine modifizierte PEM-Brennstoffzelle, die jedoch als Brennstoff anstelle von Wasserstoffgas ein Methanol-Wassergemisch verwendet. Das heißt, die DMFC wandelt direkt ohne den Umweg über einen Reformier - der Methanol in Wasserstoff konvertiert - die chemische Energie des Methanols in elektrische Energie um.

Auch bei der DMFC besteht der Elektrolyt aus einer protonendurchlässigen Membran, auf die beidseitig ein Katalysatormetall (meist ein Platin-Ruthenium-Gemisch) aufgetragen ist. Und auch die DMFC arbeitet bei niedrigen Temperaturen unter 100°C.

Was die DMFC für den automobilen Sektor darüber hinaus so attraktiv macht, ist die Tatsache, dass sie viel weniger Platz benötigt und viel billiger und weniger komplex ist als ein Antriebssystem, das aus PEM-Brennstoffzellen und einem Methanolreformer besteht. Der Wegfall eines Reformers im Fahrzeug bringt ein geringeres Gesamtgewicht, ein geringeres Systemvolumen, eine einfachere Betriebsweise mit schnellerem Ansprechverhalten, bessere Dynamik und geringere Investitions- und Betriebskosten mit sich. Also im Prinzip alles, was die Ingenieure erreichen wollen.

Jedoch ist die DMFC bisher noch im Entwicklungsstadium, da gewisse Probleme noch nicht gelöst sind. So wandern bisher immer noch Methanol-Moleküle direkt durch die PEM hindurch (Permeation genannt), was zu Brennstoffverlust, einer Verunreinigung an der Kathode und damit resultierend einer reduzierten Spannung führt. Man sucht daher verstärkt nach neuen Kunststoffen für die PEM, die eine geringere Permeabilität aufweisen. Ein weiteres Problem ist die Bildung von giftigem Kohlenmonoxid (CO) an der Anode, das die Katalysatoren angreift und die Geschwindigkeit (Kinematik) der Methanoxidation herabsetzt.

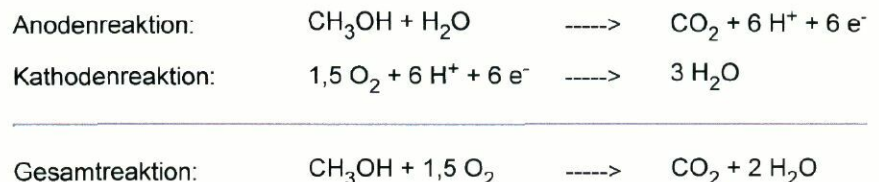
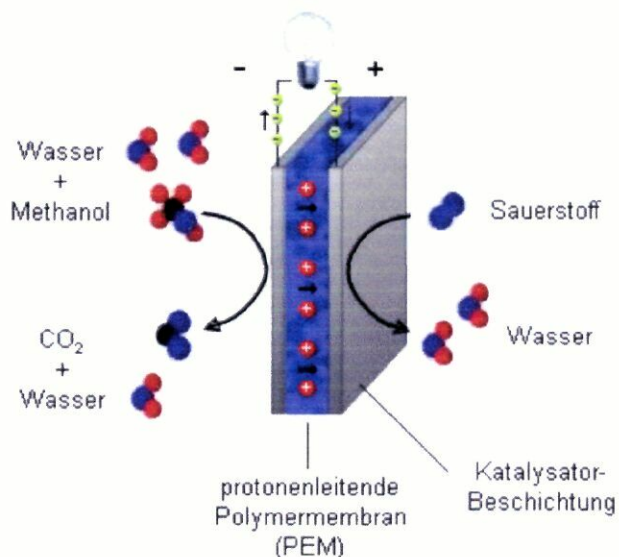
Funktionsweise einer DMFC:

Auf der Anodenseite strömt ein Gemisch aus Methanol und Wasser an die PEM. An der Katalysatorschicht wird der im Methanol (CH₃OH) bzw. im Wasser (H₂O) gebundene Wasserstoff abgetrennt und in Protonen und Elektronen zerlegt. Wie auch bei der PEM-Brennstoffzelle können die Wasserstoff-Protonen durch die PEM hindurchwandern, während die Elektronen auf der Anodenseite bleiben.

Es kommt also zu einem Elektronenmangel (+) auf der Kathodenseite und einem Elektronenüberschuss (-) an der Anodenseite. Um einen Ladungsausgleich zu erreichen, wandern die Elektronen daher ebenso wie bei der PEM-Brennstoffzelle über einen äußeren Stromkreis zur Kathode und erzeugen somit einen elektrischen Strom, der von einem Verbraucher genutzt werden kann.

Auf der Anodenseite reagieren die verbleibenden Sauerstoff-Atome des Wassers mit den Sauerstoff- und Kohlenstoff-Atomen des Methanols zu Kohlendioxid (CO₂). Die

Wasserstoff-Protonen, die durch die PEM gewandert sind, reagieren auf der Kathodenseite mit den Elektronen und dem Sauerstoff zu Wasser. Damit laufen also folgende chemischen Reaktionen in der DMFC ab:





Faszinierende Perspektiven bieten Brennstoffzellen als Antriebe der Zukunft. Die Erzeugung der notwendigen Energie erfolgt, je nachdem, ob das System Wasserstoff oder Methanol nutzt, ganz emissionsfrei oder äußerst emissionsarm. Gleichzeitig erreichen die alternativen Antriebe bei niedrigem Kraftstoffverbrauch einen hohen Wirkungsgrad. Dabei sind die Fahrzeuge extrem leise und bieten sogar mehr als den gewohnten Komfort.

leise
effizient
umweltfreundlich
ressourcenschonend
komfortabel

Fortschritt auf der ganzen Linie

Der große Vorteil von Brennstoffzellen ist, dass sie den Strom aus einem elektrochemischen Prozess gewinnen. Im Gegensatz dazu ist die Verbrennung im Ottomotor ein thermodynamischer Vorgang und ihr Wirkungsgrad durch das physikalische Gesetz des „Carnot-Prozesses“ begrenzt. Brennstoffzellen wandeln bereits heute die Energie aus dem Kraftstoff fast doppelt so effizient um wie Ottomotoren. Für den Komfort und das besondere Fahrgefühl in einem Brennstoffzellen-Fahrzeug sorgt der Elektromotor. Es gibt keine Gangschaltung, sondern nur eine einstufige Übersetzung und den Park-Modus, und das Auto fährt ohne viele Nebengeräusche. Die wenigen beweglichen Teile des Elektromotors können das Fahrzeug zuverlässiger und weniger verschleißanfällig machen. Gleichzeitig hat die Brennstoffzelle als Stromquelle im Fahrzeug einen komfortablen Nebeneffekt: Mit ihr lassen sich zusätzlich Standklimatisierung und Standheizung oder ein rollendes Büro betreiben - auch bei ausgeschaltetem Motor.

