



# EMISSIONEN VON WASSERSTOFFFAHRZEUGEN

Abschätzung der Emissionen von wasserstoff- und  
brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen

Stefan Salchenegger



REPORT  
REP-0012

Wien, 2006



**Projektleitung**

DI Stefan Salchenegger

**Autor**

DI Stefan Salchenegger

**Gesamtkoordination**

Dr. Elisabeth Friedbacher

Diese Studie wurde im Auftrag des Ministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie erstellt.

Das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie ist vertreten durch:

Dr. Andreas Dorda

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Abt. Mobilität und Verkehrstechnologien

A - 1010 Wien, Renngasse 5

email: andreas.dorda@bmvit.gv.at

Weitere Informationen zu Publikationen des Umweltbundesamtes unter: <http://www.umweltbundesamt.at/>

**Impressum**

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH  
Spittelauer Lände 5, 1090 Wien/Österreich

*Eigenvervielfältigung*

*Gedruckt auf Recyclingpapier*

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2006

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 3-85457-811-3



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>WASSERSTOFF</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Definition Wasserstoff</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Herstellung von Wasserstoff</b> .....	<b>6</b>
2.2.1	Herstellung aus fossilen Quellen .....	6
2.2.2	Herstellung aus Biomasse.....	7
2.2.3	Herstellung mittels Elektrolyse .....	7
<b>2.3</b>	<b>Wasserstoff als Energieträger</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>DIE WASSERSTOFF-VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINE</b> .....	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>Technische Entwicklung</b> .....	<b>9</b>
<b>3.2</b>	<b>Der Wasserstoff-Hubkolbenmotor</b> .....	<b>9</b>
<b>3.3</b>	<b>Der Wasserstoff-Wankelmotor</b> .....	<b>10</b>
<b>3.4</b>	<b>Emissionen von H<sub>2</sub>-Verbrennungskraftmaschinen</b> .....	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>BRENNSTOFFZELLEN</b> .....	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>Arten von Brennstoffzellen</b> .....	<b>12</b>
<b>4.2</b>	<b>Die Proton-Exchange-Membran Brennstoffzelle (PEM)</b> .....	<b>12</b>
<b>4.3</b>	<b>Emissionen von Brennstoffzellenfahrzeugen</b> .....	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>DER EINFLUSS VON WASSERDAMPF AUF DAS KLIMA</b> .....	<b>14</b>
<b>5.1</b>	<b>Der Treibhausgaseneffekt</b> .....	<b>14</b>
<b>5.2</b>	<b>Der Einfluss von Wasserdampfemissionen</b> .....	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>ABSCHÄTZUNG DER EMISSIONEN AUS DEM VERKEHRSSSEKTOR</b> ....	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>18</b>



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Energiedichten konventioneller Treibstoffe und Wasserstoff im Vergleich .....	8
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Wankelmotors [Mazda] .....	10
Abbildung 3: Abhängigkeit der Stickoxid – Bildung in Wasserstoff Verbrennungsmotoren von Treibstoff/Luftgemisch und Temperatur [WALLNER 2003].....	11
Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer PEM Brennstoffzelle .....	13

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Eigenschaften von Wasserstoff [Wasserstoff und Brennstoffzellen Informationssystem].....	8
Tabelle 2: Arten von Brennstoffzellen [Salchenegger 2000].....	12
Tabelle 3: Atmosphärischer Anteil der wichtigsten Treibhausgase sowie absoluter und relativer Anteil an der Temperaturerhöhung [ZITTEL 1994].....	14
Tabelle 4: Prognose des Energieverbrauches im Verkehrssektor für das Jahr 2020 [OLI 2004] .....	16
Tabelle 5: Gesamte und spezifische Wasserdampfemissionen im Verkehrssektor für das Jahr 2020.....	16



# 1 AUFGABENSTELLUNG

Wasserstoff gilt sowohl in der Mineralöl- und Kraftfahrzeugindustrie als auch in der Verkehrs- und Umweltpolitik als zukünftiger Kraftstoff mit hohem Realisierungspotential. Grund hierfür ist im Wesentlichen die gute Verbrennungseigenschaft von Wasserstoff. Sämtliche Hersteller untersuchen seit Jahren intensiv den Einsatz von Wasserstoff als möglichen Kraftstoff. Dabei haben sich innerhalb der Industrie zwei verschiedene technische Herangehensweisen herausgebildet. Die Verbrennung von Wasserstoff in Motoren mit herkömmlicher Verbrennungstechnologie (Hubkolbenmotor, Wankelmotor) bzw. der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen.

Die Brennstoffzellentechnologie hat den Vorteil, keine direkten Luftschadstoffemissionen zu verursachen. Bei der Umwandlung von Wasserstoff in der Brennstoffzelle wird jedoch beim Betrieb des Fahrzeugs Wasserdampf freigesetzt.

Ziel der Studie ist es, die Wasserdampfemissionen hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz zu untersuchen. Hierbei stellt sich speziell die Frage, um wie viel mehr Wasserdampf durch den breiten Einsatz von wasserstoff- bzw. brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Antriebstechnologien zu erwarten ist und ob diese Emissionen die Umwelt negativ beeinflussen können.

## 2 WASSERSTOFF

### 2.1 Definition Wasserstoff

Wasserstoff ist das erste Element im Periodensystem. Es hat die Ordnungszahl 1 im Periodensystem und besteht aus einem Proton und einem Elektron. Unter Normalbedingungen ist Wasserstoff ein zweiatomiges und gasförmiges Molekül. Es ist ca. 14-mal leichter als Luft, zudem farb- und geruchlos. Unter Normaldruck wird es bei  $-253\text{ °C}$  (20 K) flüssig und erstarrt bei  $-259\text{ °C}$  (14 K) zum Feststoff. Bei Raumtemperatur ist es sehr beständig und reaktionsträge.

### 2.2 Herstellung von Wasserstoff

Da Wasserstoff in der Natur nur in gebundener Form vorkommt (z. B. Wasser, Kohlenwasserstoffe), muss er erst durch den Einsatz von Energie gewonnen werden, um in elementarer Form ( $\text{H}_2$ ) verfügbar zu sein. Man unterscheidet die Verfahren zur Herstellung nach der Art des Energieträgers (Primär- oder Sekundär).

Die Erzeugung aus Primärenergieträgern beinhaltet heute die Herstellung aus fossilen Quellen über Erdgasreformierung sowie die partielle Oxidation von Schweröl (Diesel) und Vergasung von Kohle. Daneben sind weitere Verfahren im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Hier ist an erster Stelle die Vergasung von Biomasse zu nennen, aber auch die direkte Erzeugung von Wasserstoff durch Algen unter Sonneneinstrahlung.

Die Erzeugung von Wasserstoff mit Sekundärenergieträgern erfolgt über die Wasserelektrolyse und als Nebenprodukt bei der Chlorherstellung. Die Wasserelektrolyse ist dabei vom Primärenergieträgereinsatz unabhängig und wird somit langfristig als das wesentliche Standbein einer regenerativen Wasserstoffenergiewirtschaft gesehen. Als weitere sekundär-energetische Methode zur Wasserstoffherzeugung kann (vor allem in der mobilen Anwendung) künftig die Reformierung von Methanol eine Rolle spielen.

#### 2.2.1 Herstellung aus fossilen Quellen

##### 2.2.1.1 Dampfreformierung von leichten Kohlenwasserstoffen

Unter Dampfreformierung versteht man die endotherme katalytische Umsetzung von leichten Kohlenwasserstoffen mit Wasserdampf. Diese Prozesse finden bei Temperaturen von  $800\text{--}900\text{ °C}$  und Drücken von etwa 2,5 MPa statt.



Anschließend erfolgt die exotherme katalytische Umsetzung (Shiftreaktion) – das gebildete Kohlenmonoxid wird mit Wasserdampf zu  $\text{CO}_2$  und Wasserstoff umgesetzt:



Die bei dieser Reaktion freigesetzte Energie kann aufgrund des Temperaturniveaus ( $200\text{--}500\text{ °C}$ ) allerdings nicht direkt für die Reformierung genutzt werden.

Das Kohlendioxid wird anschließend aus dem Gasgemisch entfernt. Das Restgas mit ca. 60 % brennbaren Anteilen (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO) wird zusammen mit einer Teilmenge des Einsatzgases zur Befeuerung des Reformers verwendet.

### 2.2.1.2 Partielle Oxidation schwerer Kohlenwasserstoffe

Unter partieller Oxidation versteht man die exotherme Umsetzung schwerer Kohlenwasserstoffe (z. B. Rückstandsöle aus der Erdölverarbeitung, schweres Heizöl) mit Sauerstoff. Anschließend wird in einem nachgeschalteten Shift-Reaktor CO mit Wasserdampf zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> umgesetzt. Es gilt folgende Nettoreaktionsgleichung:



### 2.2.1.3 Partielle Oxidation von Kohle

Die Verfahrenselemente der Gesamtanlage sind identisch wie bei der Ölvergasung. Lediglich die vorgeschaltete notwendige Kohlebehandlung kommt hinzu. Die Kohle wird fein zermahlen und mit Wasser zu einer pumpfähigen Suspension mit 50–70 % Feststoffgehalt vermischt.

## 2.2.2 Herstellung aus Biomasse

Verfahren zur kommerziellen Wasserstofferzeugung aus Biomasse sind heute noch nicht erhältlich. Es werden Methoden zur Wasserstofferzeugung aus fester Biomasse (z. B. in Form von Pellets aus Anbau- oder Abfallbiomasse), der Vergärung von Biomasse und der biologischen Wasserstofferzeugung unterschieden. Der Vorteil der direkten H<sub>2</sub>-Erzeugung aus Biomasse mittels Bakterien besteht darin, dass hier die Wasserstofferzeugung direkt aus regenerativen Energiequellen erreicht wird und damit ein hoher Systemwirkungsgrad mit günstiger Gesamtbilanz möglich ist.

Über Pyrolyse und Vergasung kann Biomasse zur Wasserstoffgewinnung genutzt werden. In der ersten Stufe fallen Koks, Methanol und Primärgase an, in der zweiten entsteht durch die Reaktion mit Sauerstoff und/oder Wasserdampf zunächst ein Gasgemisch aus H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>. Dabei wird zwischen autothermer und allothermer Vergasung unterschieden.

Bei der allothermen Vergasung wird Wasserdampf als Vergasungsmittel eingesetzt, es überwiegen die endothermen Teilreaktionen. Daher muss hier Energie von außen zugeführt werden. Der Vorteil des Verfahrens liegt im höheren Anteil nutzbarer Gasbestandteile im Produktgas (allotherme Vergasung: H<sub>2</sub>: 47 %, CO: 15 %, CH<sub>4</sub>: 9 %; autotherme Vergasung mit Luft: H<sub>2</sub>: 10 %, CO: 12 %, CH<sub>4</sub>: 3 %).

### 2.2.3 Herstellung mittels Elektrolyse

Die Wasserzersetzung durch Elektrolyse geschieht über Reaktionen an zwei Elektroden, die durch einen ionenleitenden Elektrolyten getrennt sind. Wasserstoff entsteht an der negativen Elektrode (Kathode), Sauerstoff an der positiven Elektrode (Anode). Der notwendige Ladungsausgleich findet durch Ionenleitung statt. Um die Produktgase getrennt zu halten, müssen die beiden Reaktionsräume durch einen ionendurchlässigen Separator (Diaphragma) getrennt werden. Die Energie zur Wasserspaltung wird durch die Zuführung von elektrischem Strom bereitgestellt.

### 2.3 Wasserstoff als Energieträger

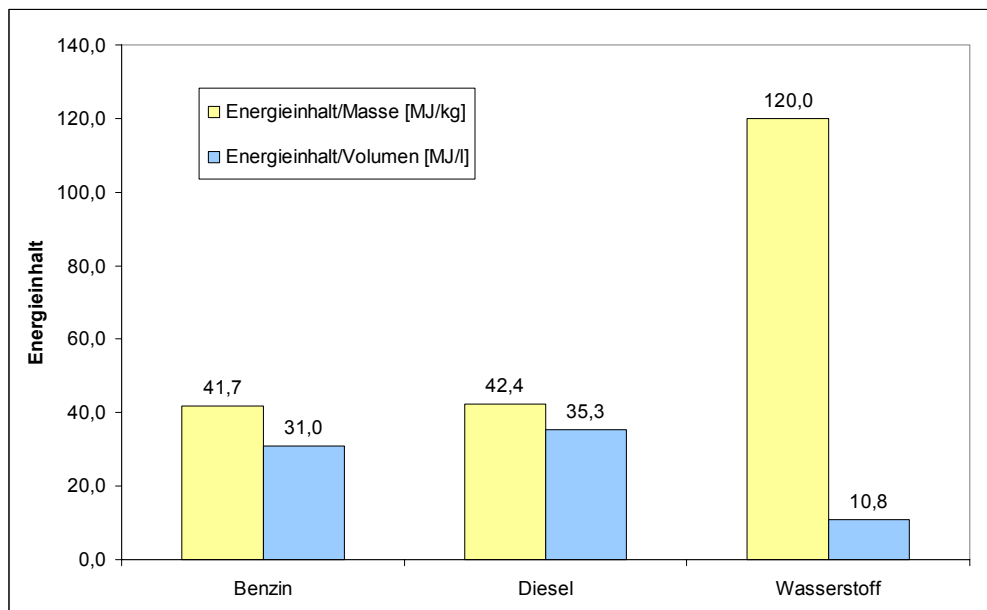
Wasserstoff hat von allen Brenn- und Treibstoffen die höchste massebezogene Energiedichte: 1 kg Wasserstoff enthält ebensoviel Energie wie 2,1 kg Erdgas oder 2,8 kg Benzin.

Die volumenbezogene Energiedichte beträgt jedoch nur etwa 1/4 von Benzin und etwa 1/3 von Erdgas. Nachfolgende Tabelle zeigt wesentliche brenntechnische Kenndaten von Wasserstoff.

*Tabelle 1:  
Eigenschaften von  
Wasserstoff  
[Wasserstoff und  
Brennstoffzellen  
Informationssystem]*

		Einheit	H <sub>2</sub>
Heizwert:		kJ/kg	119.972
		kWh/kg	33,33
		MJ/Nm <sup>3</sup>	10,783
		kWh/Nm <sup>3</sup>	2,995
Brennwert:		kJ/kg	141.890
		kWh/kg	39,41
		MJ/Nm <sup>3</sup>	12,745
		kWh/Nm <sup>3</sup>	3,509
Dichte	gasförmig	kg/m <sup>3</sup>	0,08988
	flüssig (bei -253 °C)	kg/m <sup>3</sup>	70,8
Gaskonstante		J/kgK	4.124
Zündtemperatur in Luft		°C	530
Zündgrenze in Luft		Vol-%	4,1-72,5
max. Flammengeschwindigkeit		cm/s	346

*Abbildung 1:  
Energiedichten  
konventioneller  
Treibstoffe und  
Wasserstoff im  
Vergleich*



Die geringe Dichte macht sich vor allem im Bereich der Kraftstoffspeicherung an Bord der Fahrzeuge bemerkbar. Entweder wird der Wasserstoff als stark komprimiertes Gas transportiert oder mit hohem Energieaufwand bei minus 253 °C verflüssigt. Beide Methoden sind derzeit noch in der Entwicklungsphase.





## **3 DIE WASSERSTOFF- VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINE**

### **3.1 Technische Entwicklung**

Grundsätzlich unterscheidet sich ein Wasserstoff-Verbrennungsmotor nur sehr gering von einem konventionellen Benzinmotor. Die Fahrzeuge werden in bivalenter Ausführung gefertigt, d. h. die Fahrzeuge können sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin betrieben werden. Ein Schalter ermöglicht das Wechseln zwischen den Treibstoffarten.

Bei der Verbrennung von Wasserstoff in konventionellen Motoren entstehen wegen der hohen Temperaturen auch Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ). Vor allem bei einem ausgewogenen Kraftstoff-Luft Verhältnis ( $\lambda=1$ ) treten verstärkt  $\text{NO}_x$ -Emissionen auf. Dieses Verhältnis wird allerdings nur bei hoher Leistung des Motors erreicht, im unteren Drehmomentbereich läuft der Motor im Magerbetrieb und die Stickoxidemissionen sind gering.

### **3.2 Der Wasserstoff-Hubkolbenmotor**

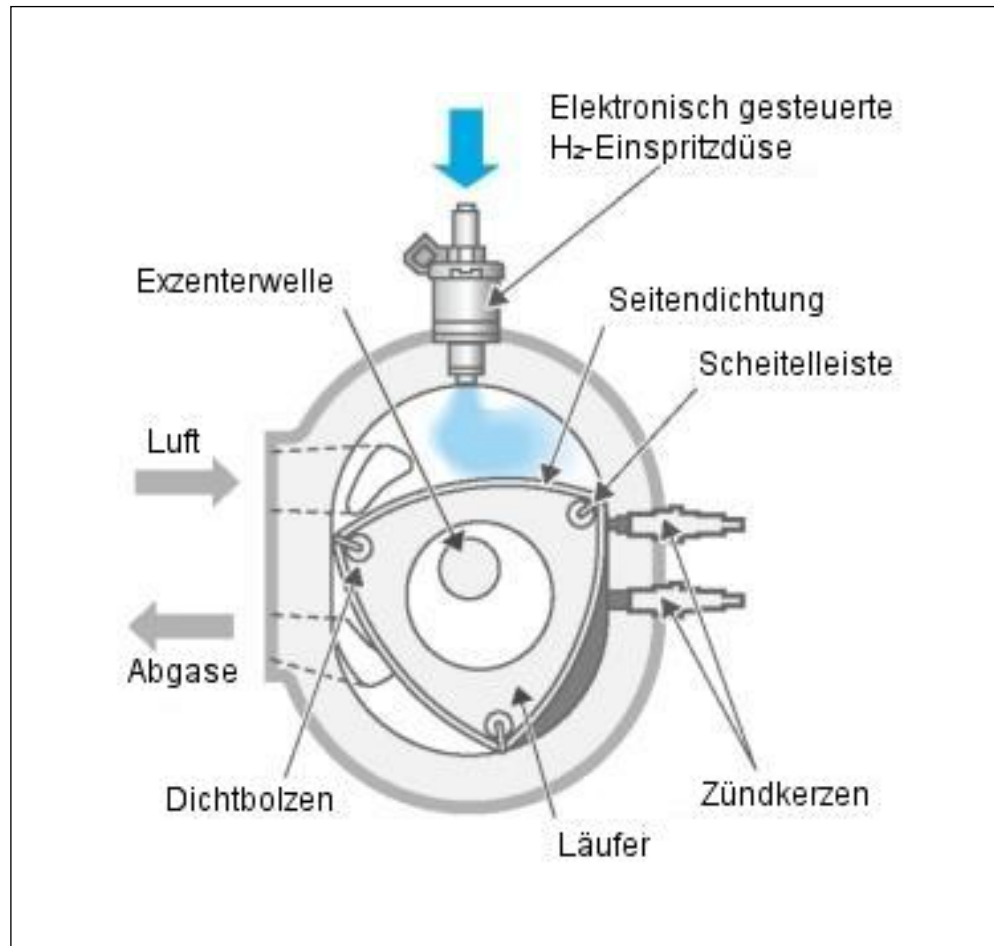
Der Hubkolbenmotor funktioniert genau gleich wie ein herkömmlicher Otto-Motor, mit dem Unterschied, dass statt Benzin Wasserstoff verbrannt wird.

Durch die stark exotherme Reaktion im Motor entstehen bei hohen Brennraumtemperaturen Stickstoffoxide. Darum erfolgt die Verbrennung meist mit hohem Luftüberschuss. Die überflüssige Luft führt die Wärme ab und verhindert einerseits die Bildung von Stickoxiden, andererseits wird die Flammentemperatur unter die Selbstentzündungsgrenze gebracht, um Fehlzündungen zu verhindern.

### 3.3 Der Wasserstoff-Wankelmotor

Ein Wankelmotor hat anstelle der Hubkolben beim konventionellen Hubmotor einen Kreiskolben. Durch die Kreiselbewegung des Läufers wird Luft angesaugt. Zusammen mit dem eingespritzten Wasserstoff wird die Luft durch den Läufer komprimiert und durch die Zündkerzen zum Explodieren gebracht. Die dadurch entstehende Druckwelle treibt den Läufer weiter und das Abgas kann entweichen.

Abbildung 2:  
Schematischer Aufbau  
eines Wankelmotors  
[Mazda]



Der Vorteil des Wankelmotors ist, dass keine Umwandlung einer Auf- und Abbewegung zu einer Kreisbewegung notwendig ist. Dadurch können diese Motoren bei gleicher Leistung kompakter und vor allem leichter gebaut werden.

Ein weiterer Vorteil, vor allem beim Betrieb mit Wasserstoff, sind die getrennten Kammern für Verdichtung und Verbrennung. Ein ungewolltes Entzünden des Wasserstoffes an heißen Teilen, wie es beim Hubkolbenmotor vorkommen könnte, ist daher ausgeschlossen.

Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass aufgrund der Drehbewegung des Läufers die Dichtheit zwischen den einzelnen Kammern sehr schwer zu gewährleisten ist. Dadurch kam es in der Vergangenheit bei Wankelmotoren zu erheblich höherem Verbrauch als bei einem Hubkolbenmotor.

### 3.4 Emissionen von H<sub>2</sub>-Verbrennungskraftmaschinen

Die Verbrennung von Wasserstoff in konventionellen Motoren verursacht außer Wasserdampf- auch Stickoxidemissionen. Die Produktion von NO<sub>x</sub>-Emissionen ist vom relativen Luft/Treibstoff Verhältnis ( $\lambda$ ) sowie von der Temperatur im Brennraum abhängig.

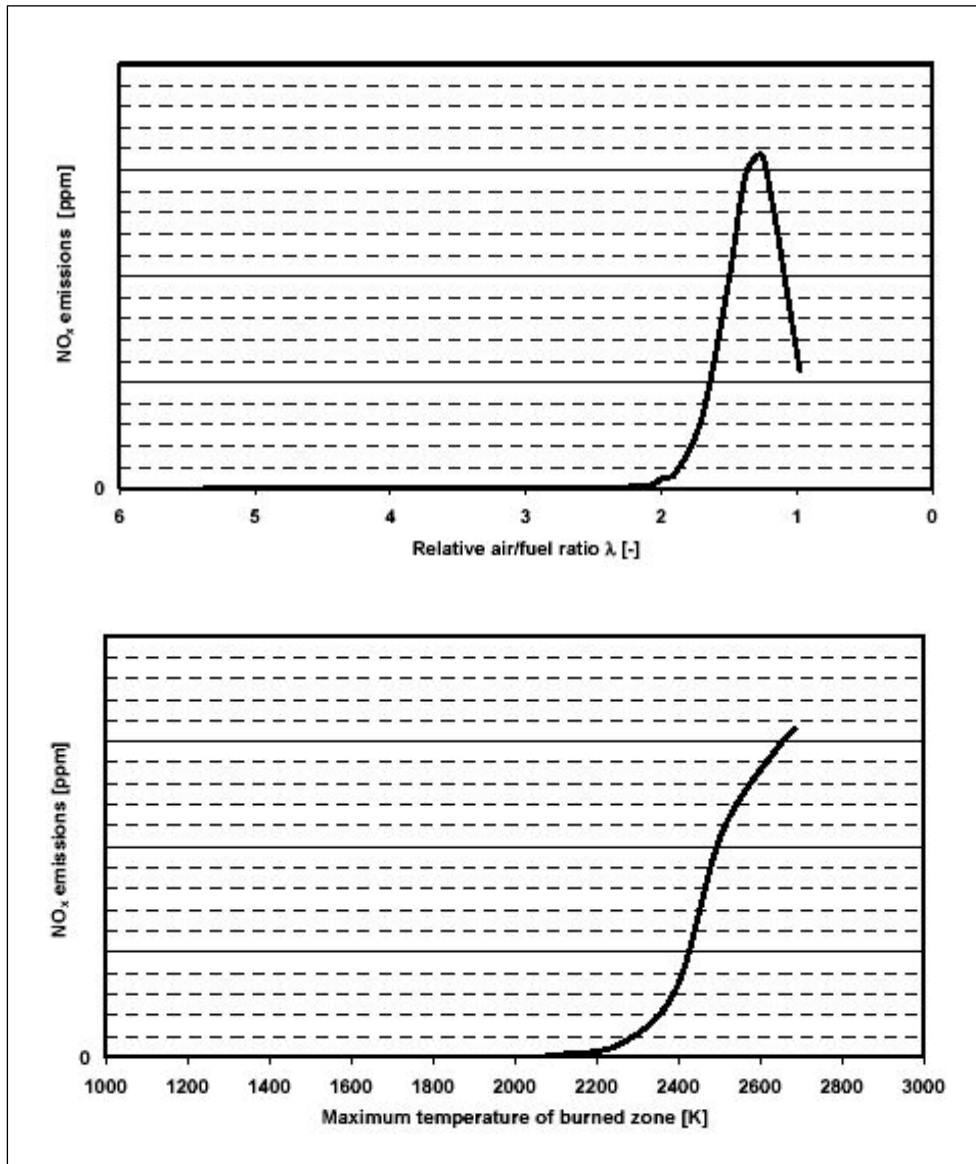


Abbildung 3:  
Abhängigkeit der  
Stickoxid – Bildung in  
Wasserstoff Verbren-  
nungsmotoren von  
Treibstoff/Luftgemisch  
und Temperatur  
[WALLNER 2003]

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, entstehen Stickoxide bei hohen Temperaturen und in einem Lambda Bereich zwischen 1 und 2. Bei einem hohen Luft-Treibstoff-Verhältnis ( $\lambda > 2$ ) verbrennt das Gemisch ohne NO<sub>x</sub>-Bildung, ein Maximum liegt etwa bei  $\lambda = 1,3$ , danach gehen die NO<sub>x</sub> Emissionen aufgrund von Sauerstoffmangel zurück.

Mit Hilfe eines nachgeschalteten Katalysators können diese Emissionen nahezu komplett reduziert werden.

## 4 BRENNSTOFFZELLEN

Brennstoffzellen erzeugen elektrischen Strom aus Wasserstoff und Sauerstoff indem eine umgekehrte Wasser-Elektrolyse abläuft. Die beiden Elektroden (Anode, Kathode) sind durch einen Elektrolyten getrennt, welcher für Ionen durchlässig ist, nicht jedoch für Elektronen. Dadurch entsteht eine Spannung zwischen den Elektroden. Verbindet man beide Elektroden über einen äußeren Stromkreis, an dem ein elektrischer Verbraucher angeschlossen ist, so fließen die Elektronen über diesen von der Anode zur Kathode und leisten dabei elektrische Arbeit

### 4.1 Arten von Brennstoffzellen

Folgende Arten von Brennstoffzellen werden derzeit in unterschiedlichen Gebieten als Energieumwandler benutzt.

Tabelle 2: Arten von Brennstoffzellen [Salchenegger 2000]

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Betriebstemperatur	Anwendungsgebiet
Alkaline Fuel Cell (AFC)	35-50 % KOH	60–90 °C	Weltraum, mobile Anwendung
Proton Exchange Membrane FC (PEMFC)	Polymer Membran (Nafion, R117, Dow)	50–80 °C	Weltraum, mobile Anwendung
Direct Methanol FC (DMFC)	Polymer Membran	90–120 °C	Weltraum, mobile Anwendung
Phosphoric Acid FC (PAFC)	Concentrated Phosphoric Acid (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	160–220 °C	Stromerzeugung
Molten Carbonate FC (MCFC)	Molten Carbonate Melts (Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	620–660 °C	Stromerzeugung
Solid Oxide FC (SOFC)	Yttrium stabilized Zirkondioxide (ZrO <sub>2</sub> /YO <sub>3</sub> )	800–1.000 °C	Stromerzeugung

Die PEM Brennstoffzelle wird derzeit bei allen Fahrzeugherstellern in Prototypen eingesetzt und bietet die größten Perspektiven als Antrieb für Fahrzeuge. Sie arbeitet bei einer konstanten Temperatur von ca. 80 °C. Das bedeutet, dass nur eine kurze Aufwärmzeit erforderlich ist, um sie auf Betriebstemperatur zu bringen.

### 4.2 Die Proton-Exchange-Membran Brennstoffzelle (PEM)

Brennstoffzellen basieren auf dem umgekehrten Weg der H<sub>2</sub>O-Elektrolyse, durch die Reaktion von Wasser- und Sauerstoff (ohne direkte Verbrennung) wird Energie gewonnen, mit dem „Abfallprodukt“ Wasser. Hierzu wird die Zelle auf der Anodenseite mit Wasserstoff und auf Kathodenseite mit Luft gespeist. H<sub>2</sub> wird in zwei H<sup>+</sup> Ionen und zwei Elektronen aufgeteilt, wobei die Ionen durch die semipermeable Membran wandern und die Elektronen elektrische Arbeit verrichten. Auf der Kathodenseite bildet sich aus dem Sauerstoff der Luft und den Ionen Wasser.

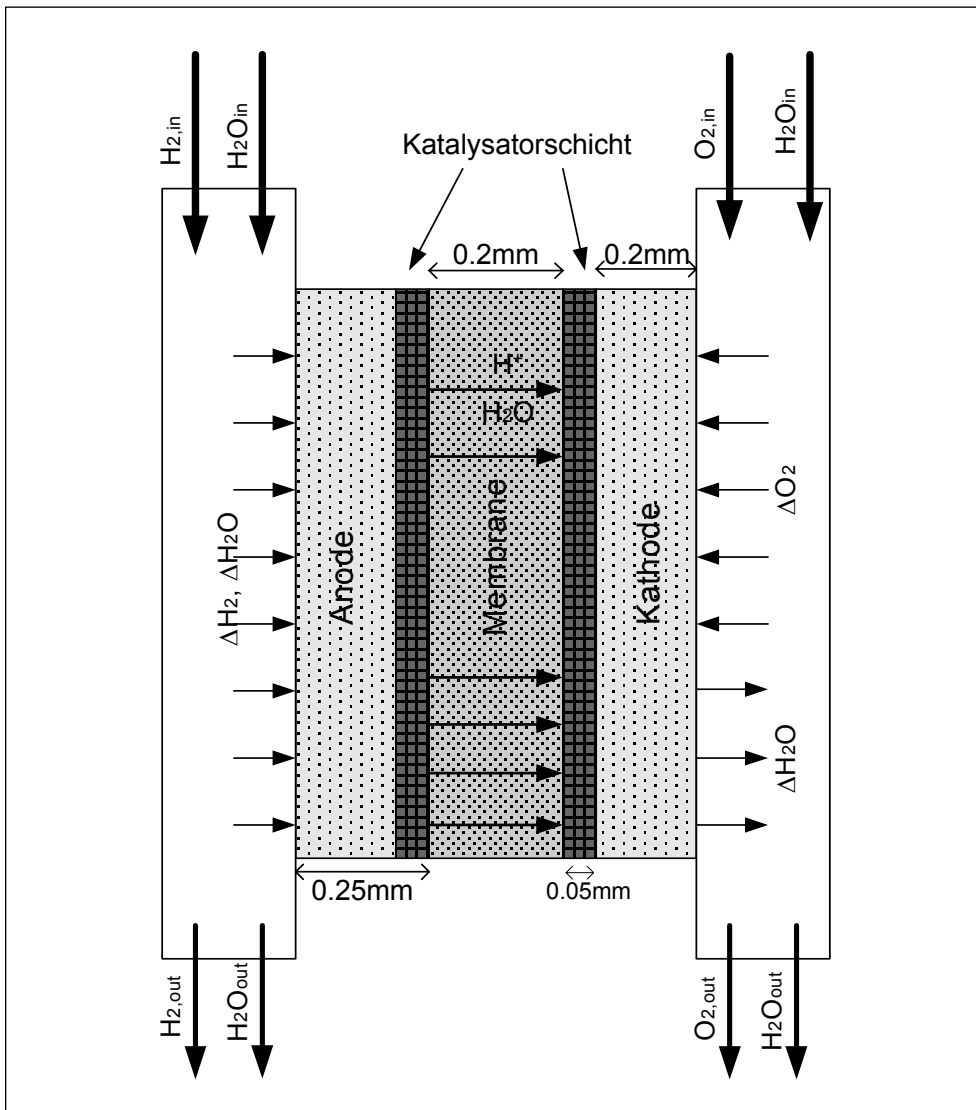


Abbildung 4:  
Schematischer Aufbau  
einer PEM  
Brennstoffzelle

Als Elektroden werden kohlenstoffbasierende Gas – Diffusions - Elektroden verwendet. Auf beiden Grenzflächen Elektrode/Polymer muss die Reaktion mittels Katalysatoren beschleunigt werden wozu beiderseits Platin verwendet wird.

### 4.3 Emissionen von Brennstoffzellenfahrzeugen

Brennstoffzellen haben den Vorteil, bei einem Einsatz von Wasserstoff als einziges „Abgas“ reines Wasser zu erzeugen.

Sollte der Wasserstoff on - board, etwa mit Hilfe eines Dampfreformers, erzeugt werden, fallen jedoch Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidemissionen an. Das ebenfalls bei der Reaktion entstehende Kohlenmonoxid wird in einem nachgeschalteten Shift-Reaktor zu  $CO_2$  umgewandelt.

## 5 DER EINFLUSS VON WASSERDAMPF AUF DAS KLIMA

### 5.1 Der Treibhausgaseffekt

Global tragen Wasserdampf und Spurengase in der Atmosphäre durch die Zurückhaltung von Strahlungsenergie zu einer Anhebung der globalen Durchschnittstemperatur um etwa 33 °C. Der Großteil dieses Temperaturanstiegs entfällt (aufgrund des relativ hohen atmosphärischen Volumenanteils und des hohen Treibhauspotentials) auf Wasserdampf [Tabelle 3].

*Tabelle 3:  
Atmosphärischer Anteil  
der wichtigsten Treib-  
hausgase sowie absoluter  
und relativer Anteil an  
der Temperaturer-  
höhung [ZITTEL 1994]*

Substanz	atmosphärischer Volumenanteil [%]	Temperaturerhöhung [°C]	Temperaturerhöhung pro Mol relativ zu CO <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O	2,6	20,6	0,04
CO <sub>2</sub>	0,035	7,2	1
O <sub>3</sub>	0,000003	2,4	3880
N <sub>2</sub> O	0,00003	1,4	310*
CH <sub>4</sub>	0,00017	0,8	21*
sonstige	< 0,0000001	0,8	

\* Quelle: UNFCCC 2002

Der Beitrag einer zusätzlichen Emissionseinheit zur Strahlungsabsorption ist davon abhängig, wie stark die Substanz in der Atmosphäre schon angereichert ist. Daher sind z. B. Spurengasemissionen, die in einem bisher noch wenig absorbierten Wellenlängenbereich aktiv sind, besonders relevant. Dies trifft allen voran auf Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), daneben aber auch auf die anderen bekannten Treibhausgase zu.

### 5.2 Der Einfluss von Wasserdampfemissionen

Der Treibhausgaseffekt von Wasserstoff hängt vor allem von der Konzentration in den verschiedenen Atmosphärenschichten ab: Je weiter von der Erdoberfläche entfernt, desto stärker ist der induzierte Treibhausgaseffekt. Wasserdampf in der Stratosphäre, wo er zum Beispiel von Flugzeugen emittiert wird, stellt ein weitaus größeres Treibhausgaspotential dar als der in Bodennähe emittierte.

Die Treibhausgaswirksamkeit einer zusätzlich emittierten Menge ist durch das Produkt aus Strahlungsabsorption und Lebensdauer gegeben. In der Stratosphäre beträgt diese Lebensdauer je nach Höhe 1–100 Jahre, in Bodennähe ist diese sehr kurz (etwa 1 Woche). Das Treibhauspotential von Wasserdampf in Bodennähe ist daher als vernachlässigbar zu betrachten.



### 5.3 Der Einfluss von Wasserstoffemissionen

Neben Wasserdampf- haben auch Wasserstoffemissionen einen potentiellen Einfluss als indirektes Treibhausgas auf das Klima. Mögliche Konsequenzen eines Anstieges der  $H_2$ -Emissionen wären eine Reduktion der globalen OH-Konzentration, was zu einer längeren Lebensdauer (und daher zu einer höheren Konzentration) des Treibhausgases Methan führen würde [SCHULTZ 2003]. Eine weitere Folge könnte eine erhöhte Wasserdampfbildung in der Stratosphäre sein, die diese abkühlt und dadurch eine Regeneration der Ozonschicht verzögert [TROMP 2003].

Modellrechnungen, basierend auf diesen Annahmen, kommen zu dem Ergebnis, dass die Auswirkungen auf die globale OH-Konzentration sowie auf die stratosphärischen Temperaturen und Ozonkonzentration auch bei einer Verdoppelung der derzeitigen Wasserstoffemissionen gering sein werden [SCHULTZ 2003, WARWICK 2003].

Die Studien gehen jedoch von sehr optimistischen Szenarien aus, indem ein hohes Reduktionspotential von  $NO_x$ -,  $CH_4$ -,  $CO_2$ - und CO-Emissionen als Berechnungsgrundlage dient. Da jedoch eine Übergangsperiode, in der die Produktion von Wasserstoff größtenteils aus fossilen Quellen stammen wird, realistisch erscheint, sind modifizierte Modellrechnungen für dieses Szenario notwendig.

In den Studien wird weiters darauf hingewiesen, dass eine Wasserstoffgesellschaft erhebliche Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Troposphäre bewirken würde. Über diese Auswirkungen ist bisher noch wenig bekannt und bedarf daher zukünftig intensiver Forschungsarbeit.

Eine Gemeinsamkeit aller Arbeiten ist, dass die direkten Wasserstoffverluste sehr gering prognostiziert werden ( $\sim 1\%$ – $5\%$ ), da es zu erheblichen Unkosten führen würde, den Energieträger ohne Nutzen verdampfen zu lassen. Aber auch die Berechnungen mit einer Verdampfungsrate von  $12\%$  führen zu keinen gravierenden Änderungen im Ergebnis.

## 6 ABSCHÄTZUNG DER EMISSIONEN AUS DEM VERKEHRSEKTOR

Bei der Nutzung von Wasserstoff als Treibstoff in Verbrennungskraftmaschinen entsteht abgesehen von geringen Mengen von Stickstoffoxiden (siehe Kapitel 3.4) als einziges Abgas Wasser. Bei Brennstoffzellen fällt in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur und vom Auslastungsgrad der Brennstoffzelle neben Wasserdampf auch ein gewisser Teil flüssiges „Abwasser“ an, das meist im Fahrzeug gesammelt wird.

Der Anteil des anfallenden flüssigen Wassers ist unter anderem von der Umgebungstemperatur und der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle abhängig. Es ist derzeit nicht möglich den genauen flüssigen Anteil zu bestimmen, daher wird in diese Studie von einem „Worst Case“ Szenario, also einer vollständigen gasförmigen Wasseremission ausgegangen.

Als Basis für die Abschätzung der Wasserdampfemissionen wurden die Prognosen für den Energieeinsatz im Verkehrssektor der österreichischen Luftschadstoffinventur [OLI 2004] für das Jahr 2020 herangezogen.

*Tabelle 4:  
Prognose des  
Energieverbrauches im  
Verkehrssektor für das  
Jahr 2020 [OLI 2004]*

	PKW	PKW Diesel	PKW Benzin	Leichte Nutzfahrzeuge	Schwere Nutzfahrzeuge	Gesamt
Energieein- satz [GWh]	36.699	29.049	7.619	6.428	17.122	96.887

Davon ausgehend, dass pro eingesetzter Kilowattstunde Wasserstoff Wasserdampfemissionen von etwa 0,27 kg [ZITTEL 1994] entstehen<sup>1</sup>, lassen sich bei einer angenommenen vollständigen Umstellung der Fahrzeugflotte auf Wasserstoff die in Tabelle 5 dargestellten Wasserdampfemissionen berechnen. Aufgeteilt auf die Fläche Österreichs (84.000 km<sup>2</sup>) ergeben sich daraus etwa 0,43 kg/m<sup>2</sup> spezifische Wasserdampfemissionen pro Jahr aus dem Straßenverkehr.

*Tabelle 5:  
Gesamte und spezifische  
Wasserdampfemissionen  
im Verkehrssektor für  
das Jahr 2020*

	PKW	PKW Diesel	PKW Benzin	Leichte Nutzfahrzeuge	Schwere Nutzfahrzeuge	Gesamt
Gesamte Wasser- dampfemissionen [1.000 t/Jahr]	9.900	7.843	2.057	1.736	4.632	16.259
Spezifische Was- serdampfemissio- nen [kg/m <sup>2</sup> Jahr]	0,118	0,093	0,024	0,021	0,055	0,048

Die jährliche Niederschlagsmenge beträgt in Österreich durchschnittlich etwa 1.170 mm/Jahr [BMLFUW 2005]. Von der gesamten Niederschlagsmenge verdunsten etwa 44 %. Daraus ergeben sich natürliche „Wasserdampfemissionen“ in Höhe von 516 kg/m<sup>2</sup> Jahr. Bei einer vollständigen Umstellung der österreichischen Kraftfahrzeuge auf Wasserstoff würden etwa 0,03 % des natürlich verdampfenden Wassers zusätzlich emittiert werden.

<sup>1</sup> Beim Betrieb eines derzeitigen Diesel- und Benzinfahrzeug entstehen etwa 0,11 kg Wasser pro eingesetzter Kilowattstunde.





## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Wasserstoff wird sowohl von der Mineralöl- und Kraftfahrzeugindustrie als auch von der Verkehrs- und Umweltpolitik als zukünftiger Kraftstoff mit hohem Realisierungspotential gesehen. Diese Studie gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Wasserstoffproduktion sowie die mögliche Nutzung als Treibstoff im Verkehrssektor. Die Ergebnisse der Recherchen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Wasserstoff wird derzeit fast ausschließlich mittels Dampfreformation aus Erdgas hergestellt, Verfahren aus regenerativen Rohstoffen sind derzeit im Forschungsstadium.
- Als Anwendung im Fahrzeugbetrieb kommen Brennstoffzellen oder modifizierte Verbrennungskraftmaschinen in Frage, wobei von den meisten Fahrzeugherstellern das Prinzip der PEM-Brennstoffzelle favorisiert wird.
- Wasserdampfemissionen aus dem Verkehrssektor stellen auch bei einem vollständigen Umstieg auf wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge nur einen sehr geringen Teil der witterungsbedingten Verdampfungen dar.
- Die direkten Wasserstoffemissionen werden in der Literatur als sehr gering prognostiziert. Die Ergebnisse dieser Studien zeigen keine nennenswerten Auswirkungen auf das Klima.
- Selbst in dicht besiedelten Gebieten und städtischen Agglomeration ist durch den Einsatz von Wasserstofffahrzeugen nicht von relevanten Auswirkungen auf die klimatischen Verhältnisse auszugehen.

## 8 LITERATUR

BMLFUW (2005): Wasser im Kreislauf:

<http://wasser.lebensministerium.at/article/articleview/19825/1/565>

OLI (2004): Österreichische Luftschadstoffinventur, Umweltbundesamt GmbH, 2004

SALCHENEGGER (2000): Salchenegger S., „Simulation of Fuel Cells in Mobile Applications with a Detailed View on Diffusion and Reaction in the Fuel Cell“, Diplomarbeit Montanuniversität Leoben, 2000

SCHULTZ (2003): Schultz, M., et.al., “Air Pollution and Climate-Forcing Impacts of a Global Hydrogen Economy”, Science 302, 624-627, 2003

TROMP (2003): Tromp, T.K., et.al., “ Potential environmental impact of a hydrogen economy on the stratosphere”, Science 300, 1740-1742, 2003

WALLNER (2003): Wallner T. et.al., “The Potential of Hydrogen Internal Combustion Engines in a Future Mobility Scenario”, Society of Automotive Engineers, 2003

WARWICK (2003): Warwick, N.J., “Impact of a hydrogen economy on the stratosphere and troposphere studied in a 2D model”, American Geophysical Union, 0094-8276/03, 2003

Wasserstoff und Brennstoffzellen Informationssystem

<http://www.hyweb.de>

UNFCCC (2002): Review of the implementation of commitments and of other provisions of the convention, UNFCCC, 2002

ZITTEL (1994): Zittel E., Altmann M., “Der Einfluß von Wasserdampf auf das Klima”, Ludwig-Bölköw-Systemtechnik GmbH, ENERGIE, Jahrg. 45, Nr. 4, 1994