

# Erneuerbarer Wasserstoff in Österreich

**Technologien,  
Einsatzbereiche und  
energiewirtschaftliche Perspektiven**

# Inhalt

<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>1.1</b> Die Energie im Wasserstoff	3
<b>1.2</b> Energiesysteme und Wasserstoff	4
<b>2. Erzeugung von Öko-Wasserstoff</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b> Grundlagen	5
<b>2.2</b> Elektrolyse	6
<b>2.3</b> Umwandlung von Biomasse	7
<b>2.4</b> Thermolyse	8
<b>2.5</b> Photolyse	8
<b>3. Aufbereitung von Wasserstoff</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b> Verdichtung	9
<b>3.2</b> Verflüssigung	9
<b>4. Verteilung von Wasserstoff</b>	<b>10</b>
<b>4.1</b> Landtransport	10
<b>4.2</b> Pipeline-Transport	10
<b>5. Speicherung von Wasserstoff</b>	<b>11</b>
<b>5.1</b> Physikalische Grundlagen	11
<b>5.2</b> Druckspeicher	11
<b>5.3</b> Kryogene Speicher	12
<b>5.4</b> Feststoffspeicher	12
<b>6. Nutzung von Wasserstoff</b>	<b>13</b>
<b>6.1</b> Mobiler Einsatz in Fahrzeugen	13
<b>6.1.1</b> Verbrennungsmotor	13
<b>6.1.2</b> Brennstoffzelle	14
<b>6.1.3</b> Fahrzeug mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor	14
<b>6.1.4</b> Fahrzeug mit Wasserstoff-Brennstoffzelle	15
<b>6.2</b> Gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme	15
<b>6.3</b> Portable Stromerzeugung	15
<b>7. Umweltbewertung von Energie-systemen mit Öko-Wasserstoff</b>	<b>16</b>
<b>7.1</b> Methode der Umweltbewertung	16
<b>7.2</b> Vergleich von Transportdienstleistungen	18
<b>8. Österreichische Demonstrationsprojekte</b>	<b>20</b>
<b>8.1</b> Übersicht	20
<b>8.2</b> Hydrogen Center Austria	20
<b>8.3</b> Brennstoffzelle für Klein-Elektrofahrzeuge und Kühlaggregate	21
<b>8.4</b> Brennstoffzelle für Logistikfahrzeug	21
<b>8.5</b> Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft	22
<b>9. Energiewirtschaftliche Perspektiven in Österreich</b>	<b>23</b>
<b>9.1</b> Vision «Nachhaltiges Energiesystem Österreich 2050»	23
<b>9.2</b> Mögliche Bedeutung von Öko-Wasserstoff	25
<b>10. Datenblatt Wasserstoff</b>	<b>26</b>



# 1. EINLEITUNG

Die vorliegende Broschüre vermittelt Basiswissen über die vielfältigen Möglichkeiten, Wasserstoff aus erneuerbarer Energie («Öko-Wasserstoff») zu erzeugen und informiert darüber, welche Technologien bereits über den Labormaßstab hinaus verfügbar sind. Weiters werden die Speicherung und die Nutzung von Wasserstoff behandelt und die bereits im Einsatz befindlichen Anwendungen: vom Wasserstoffeinsatz in Brennstoffzellen bis zu Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen. Nicht zuletzt geht es auch darum, darzustellen welche Rolle Wasserstoff in unserem zukünftigen Energiesystem spielen könnte.

Die Broschüre ist modularartig aufgebaut. Wer sich mehr für die ökologische Erzeugung interessiert, liest den Anfang, wer die konkrete Anwendung kennen lernen möchte, blättert vor zu Kapitel 6.

## 1.1 Die Energie im Wasserstoff

Treffen Wasserstoff und Sauerstoff aufeinander, kommt es zu einer Reaktion, bei der nutzbare Energie freigesetzt wird. Aus dem Chemieunterricht ist diese Reaktion auch als «Knallgasreaktion» bekannt. Diese bei der Verbrennung von Wasserstoff frei werdende Energie kontrolliert zu nutzen, ist Ziel der Wasserstoff-Forschung. Zurzeit wird Wasserstoff nur als Rohstoff der chemischen Industrie eingesetzt, in der Energiewirtschaft spielt er noch keine Rolle. Mit Wasserstoff kann man aber auch Auto fahren, Wärme und Strom erzeugen und in Zukunft vielleicht Mobiltelefone oder Notebooks mit Energie versorgen.

Der große Vorteil von Wasserstoff als Energieträger liegt in seiner hohen gewichtsbezogenen Energiedichte, aber auch darin, dass er umweltfreundlich mittels erneuerbarer Energie erzeugt werden kann. Aufgrund der vielen verschiedenen Erzeugungsmöglichkeiten – von der Umwandlung von Biomasse bis zur Spaltung von Wasser mittels Sonnenlicht – und der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten kann Wasserstoff ähnlich vielfältig genutzt werden wie elektrischer Strom.

Außerdem emittiert er beispielsweise bei der Nutzung in einem mit einer Brennstoffzelle betriebenen Auto weder Stickoxide noch Kohlenwasserstoffe noch Feinstaub und könnte so einen wesentlichen Beitrag zur Luftverbesserung in Städten leisten.

In der Natur kommt Wasserstoff allerdings nur in Molekülen mit anderen Elementen gebunden vor, elementarer Wasserstoff würde sofort mit dem Sauerstoff der Luft reagieren. Er ist also keine Energiequelle wie Kohle, Erdgas oder Sonnenstrahlung und muss als Energieträger erst durch die Spaltung von Wasser – unter Energieeinsatz – hergestellt werden.



## 1.2 Energiesysteme und Wasserstoff

Energiesysteme mit erneuerbarem Wasserstoff umfassen alle technischen Komponenten, von der Nutzung der erneuerbaren Energiequellen für die Erzeugung bis zur Bereitstellung einer Energiedienstleistung.

In einem zukünftigen ökologisch ausgerichteten Verkehrskonzept schließt beispielsweise das Wasserstoff-Auto genau die Lücke zwischen dem kleinen, leichten Elektroauto für innerstädtische und kürzere Strecken und den mit Biotreibstoffen wie Biodiesel oder Bioethanol zu betreibenden Schwerfahrzeugen. Das typische Familienauto der Zukunft, der Minivan 2050 sozusagen, wird voraussichtlich mit Wasserstoff fahren – bis zu 500 km mit einer Tankfüllung in den Urlaub.

Wasserstoff muss aus anderen Energieträgern erzeugt und je nach Verwendung aufbereitet, verteilt und gespeichert werden. Die dafür notwendigen Technologien werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff aus erneuerbarer Energie kann, wie in Abbildung 1 dargestellt, folgendermaßen aussehen: Zunächst wird Wasserstoff über Strom-, Wärme- oder Lichtzufuhr (Elektrolyse, Thermolyse oder Photolyse) aus Wasser oder durch Umwandlung von Biomasse erzeugt. Danach wird er aufbereitet – verdichtet oder verflüssigt –, um per LKW, Bahn oder Pipeline transportiert werden zu können. Gelagert wird Wasserstoff in Druck-, Tieftemperatur- oder Feststoffspeichern. Anschließend kann er sowohl zum Antrieb von Fahrzeugen als auch zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden.

Um den Wasserstoff konkurrenzfähig zu machen und effizient nutzen zu können, ist allerdings noch viel Forschungsarbeit notwendig. Eine breite Verwendung im Alltag ist daher erst in rund 20 Jahren zu erwarten. Das größte Einsatzgebiet wird vermutlich der Transportsektor sein. Da ist es denkbar, dass im Jahr 2050 in Österreich vielleicht etwa die Hälfte des Treibstoffbedarfs mittels Wasserstoff gedeckt werden könnte, vorausgesetzt die Entwicklung der Brennstoffzelle verzögert sich nicht.

In den folgenden Kapiteln wird auf diese Prozesse von der Erzeugung bis zur Nutzung im Einzelnen eingegangen, wobei die Elemente Aufbereitung, Verteilung und Speicherung nicht bei jeder Anwendung von Wasserstoff erforderlich sind.

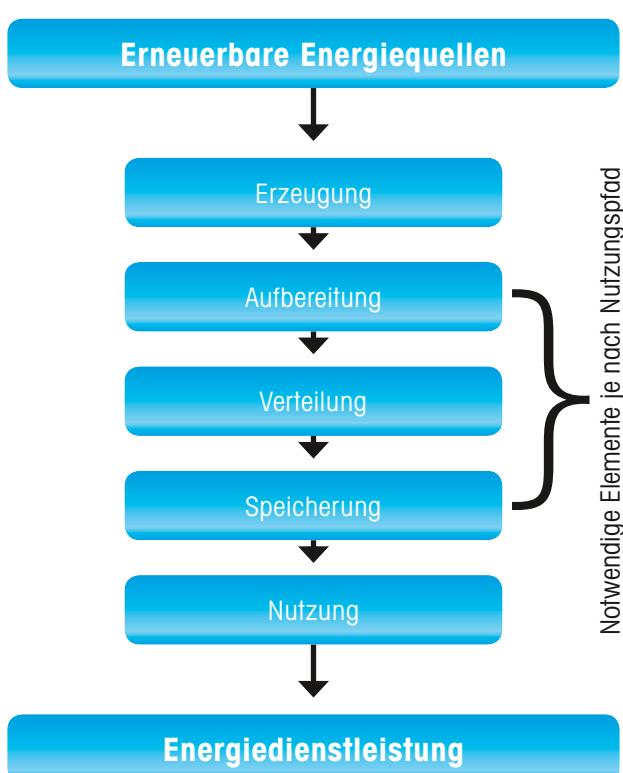


Abbildung 1: Elemente für Energiesysteme mit Öko-Wasserstoff



## 2. ERZEUGUNG VON ÖKO-WASSERSTOFF

Elementarer Wasserstoff ( $H_2$ ) kommt in der freien Natur nicht vor.

Er muss daher unter Energieeinsatz erzeugt werden.

Alle Verfahren der Wasserstoff-Erzeugung beruhen direkt oder indirekt auf der Spaltung von Wasser.

### 2.1 Grundlagen

Für die Erzeugung von 1 kg Wasserstoff benötigt man zur Spaltung der Wasser-Moleküle eine Energiemenge von 145 MJ (das entspricht dem Energieinhalt von 4,7 Litern Benzin), die als chemische oder elektrische Energie, Wärme oder Licht zugeführt werden kann. Wasserstoff hat einen unteren Heizwert (ohne Nutzung der Kondensationswärme<sup>1</sup>) von 120 MJ pro kg, der obere Heizwert (mit Nutzung der Kondensationswärme) liegt bei 142 MJ pro kg.

Wasser + erneuerbare Energie = Öko-Wasserstoff + Sauerstoff



$H_R$  ist die zur Spaltung des Moleküls benötigte Energie (145 MJ/kg)

Um in einem zukunftsorientierten Energiesystem eine Rolle spielen zu können, muss Wasserstoff aus erneuerbarer Energie erzeugt werden («Öko-Wasserstoff»).

Die Möglichkeiten, Wasserstoff mit erneuerbarer Energie zu erzeugen, unterscheiden sich durch die Art der Energiezufuhr (Abbildung 2). Die hierfür einzusetzende Primärenergie kommt in allen Fällen aus der Sonnenenergie:

- **Thermolyse:** Spaltung von Wasser mit Wärme bei hoher Temperatur
- **Elektrolyse:** Spaltung von Wasser mit elektrischer Energie, z. B. aus Wasserkraft
- **Umwandlung** von Biomasse: Spaltung von Wasser durch die Zufuhr chemisch gebundener Energie aus der Biomasse
- **Photolyse:** Spaltung von Wasser mit Licht mittels Bakterien oder Halbleiter

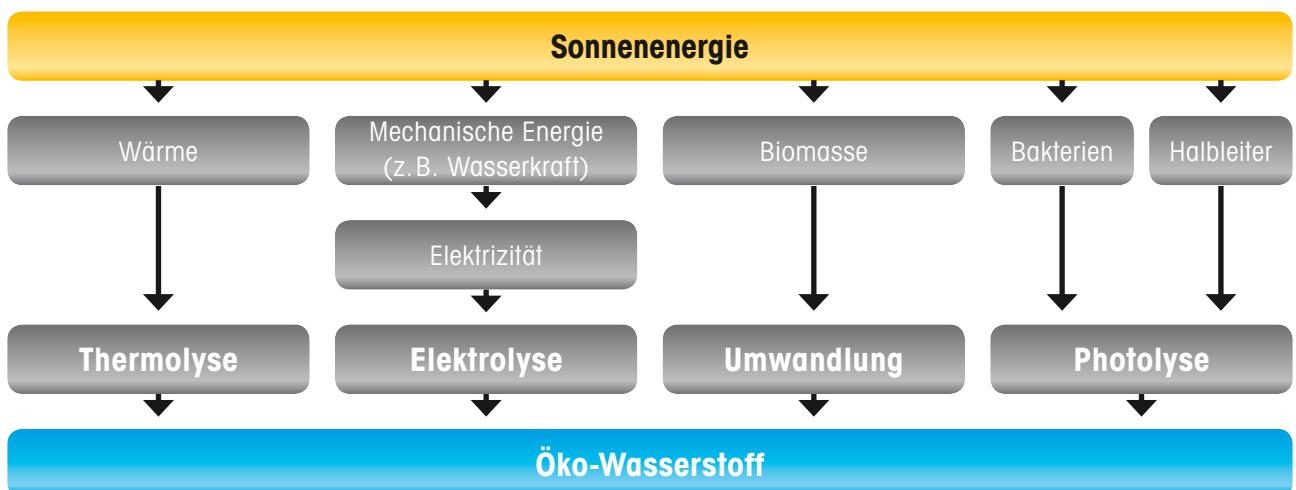
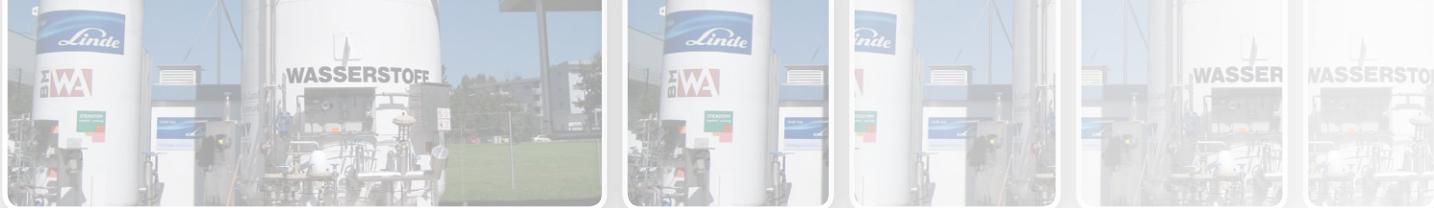


Abbildung 2: Übersicht über die Möglichkeiten zur Erzeugung von Wasserstoff mit erneuerbarer Energie («Öko-Wasserstoff»)

<sup>1</sup> Die Kondensationswärme ist jene Energie, die bei der Kondensation des bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehenden Wasserdampfs freigesetzt wird.



## 2.2 Elektrolyse

Die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff erfolgt durch die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels Zufuhr von elektrischer Energie. Die dabei verwendeten Geräte werden Elektrolyseure genannt. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch den verwendeten Elektrolyten, sowie durch Betriebstemperatur und -druck:

- Alkalische Elektrolyseure mit wässriger Kalilauge bei 80 °C
- Membranelektrolyseure mittels protonenleitender Membran bei 80 °C
- Hochtemperatorelektrolyseure mit Keramikmembran bei 650 – 1.200 °C

Elektrolyseure werden in Modulen unterschiedlicher Größe (Erzeugung von 0,01 bis 760 Nm<sup>3</sup>/h) gefertigt, die zu größeren Anlagen zusammengesetzt werden können. Die derzeit verwendeten Materialien erlauben Betriebsdrücke bis 30 bar, angestrebt werden 200 bar. Höhere Betriebsdrücke haben den Vorteil, dass bei der nachfolgenden Speicherung von gasförmigem Wasserstoff in Druckspeichern die erforderliche Kompressionsarbeit geringer ist. Allerdings sinkt bei höheren Drücken der Gesamtwirkungsgrad eines Elektrolyseurs.



Abbildung 3: PEM-Elektrolyseur von Proton Energy Systems

Alkalische Elektrolyseure werden heute vor allem zur Herstellung größerer Mengen an Wasserstoff für die chemische Grundstoffindustrie eingesetzt. Im wässrigen Elektrolyten läuft die Ionenleitung zwischen den Elektroden über Hydroxid-Ionen (OH<sup>-</sup>-Ionen) ab. Durch Weiterentwicklungen wird die Effizienz dieser Elektrolysesysteme ständig erhöht, beispielsweise durch neue Elektrodenmaterialien, optimierte Elektrolytkreisläufe und verbesserte Produktgasenabscheidungen.

Bei Membranelektrolyseuren (SPE – Solid Polymer Elektrolyzer und PEM – Proton Exchange Membrane Elektrolyzer) dient die Polymermembran selbst als Festelektrolyt (Abbildung 3). Die Ionenleitung zwischen den Elektroden wird in dieser Membran durch Protonen (H<sup>+</sup>-Ionen) bewerkstelligt. Für diesen Elektrolyttypen müssen Edelmetall-Katalysatoren verwendet werden, um eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit zu erreichen. Der Vorteil besteht darin, dass man sich bei einem festen Elektrolyten den internen Elektrolytkreislauf sowie die Reinigung des Wasserstoffes vom Elektrolyten erspart. PEM-Elektrolyseure werden derzeit nur zur Erzeugung geringer Wasserstoffmengen (bis max. 10 Nm<sup>3</sup>/h pro Modul) eingesetzt, da großflächigere Membran-Elektroden für höhere Modul-Leistungen technisch (noch) nicht herstellbar sind.

Der Vorteil der (Hochtemperatur-)Wasserdampf-Elektrolyse besteht darin, dass die Spaltung von Wasserdampf weniger elektrische Energie verbraucht als die Spaltung von Wasser, da ein Teil der notwendigen Spaltungsenergie bereits durch die Verdampfungsenergie eingebracht wird. Bei einer Temperatur von 1.200 °C sinkt der elektrische Energiebedarf gegenüber einer Niedertemperatorelektrolyse um etwa 35 %. Diese Technologie befindet sich derzeit noch in Laborentwicklung. Seit vielen Jahren werden Forschungen zur Wasserdampf-Elektrolyse (z. B. Forschungsprojekte HOTELLY oder H<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) durchgeführt, wobei die Entwicklung neuer Materialien sowie kompaktere Anlagenkomponenten die Voraussetzungen dafür geschaffen haben, die Wasserdampf-Elektrolyse erstmals zu demonstrieren.

Kurz- und mittelfristig werden vor Allem alkalische und PEM-Elektrolyseure, die mit Drücken bis zu 30 bar arbeiten, zum Einsatz kommen. Zur Realisierung hoher Energieeffizienzen sollten auch die bei der Elektrolyse entstehenden Nebenprodukte Sauerstoff und Wärme genutzt werden.



## 2.3 Umwandlung von Biomasse

Unter Biomasse versteht man Pflanzen, die durch Photosynthese Kohlenstoff aus der Luft gebunden haben und als land- und forstwirtschaftliche Produkte (z. B. Holz, Getreide, Stroh) oder als organische Abfälle (z. B. Gülle, Biomüll) zur Energienutzung verwendet werden.

Bei der Wasserstoff-Erzeugung wird durch Zufuhr der chemisch gebundenen Energie in der Biomasse die Spaltung von Wasser erreicht:

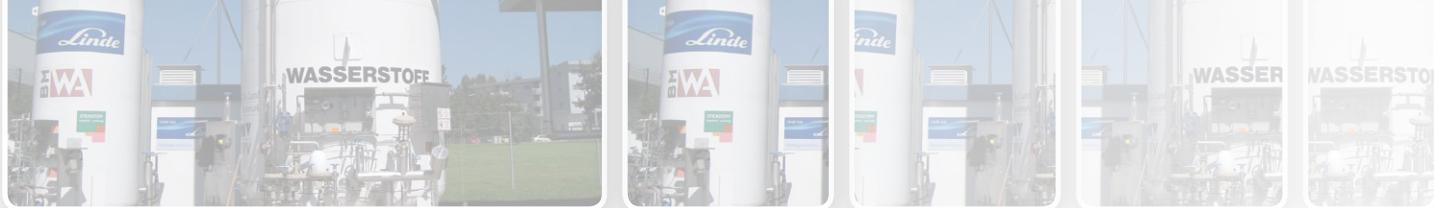
- Thermische Vergasung von Biomasse (z. B. Holz) mit anschließender Wasserstoff-Erzeugung
- Biogaserzeugung (Methanfermentation) aus Biomassen wie Gülle, Klärschlamm, Stärken und Öle mit anschließender Dampfreformierung
- Direkte Wasserstofferzeugung mittels Wasserstoff produzierender Bakterien (biologische Wasserstoff-Erzeugung)

Die Vergasung von Biomasse erfolgt unter Wärmezufuhr mit den Vergasungsmitteln Sauerstoff oder Wasserdampf. Aus den Komponenten Biomasse, Wasser und Sauerstoff wird ein Synthesegas, bestehend aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, erzeugt. Dieses Synthesegas wird anschließend in einer katalytischen Reaktion (Shiftreaktion) umgesetzt, in der das im Synthesegas enthaltene Kohlenmonoxid mit zugeführtem Wasser zu Kohlendioxid reagiert. Aus dem Wasser wird auf diese Weise unter Freisetzung von Wärme zusätzlicher Wasserstoff erzeugt. Einige Biomassevergasungsanlagen – vor allem zur Strom-, Wärme- und Biotreibstofferzeugung – befinden sich derzeit im Demonstrationsbetrieb, die Synthesegasaufbereitung ist bereits in industriellem Maßstab verfügbar.

Die Biogaserzeugung erfolgt unter anaeroben Bedingungen bei Temperaturen von 37 °C (mesophile Bakterien) oder 45 °C (thermophile Bakterien), indem Bakterienkulturen die aus großen Molekülen bestehende organische Verbindungen des Ausgangsmaterials (z. B. Gülle, organische Abfälle, Maisilage) in niedermolekulare Verbindungen und Biogas umsetzen. Biogas besteht zu etwa 60 – 70 % aus Methan und zu 30 – 40 % aus Kohlendioxid. Aus Biogas kann – ähnlich wie bei der Erzeugung von Wasserstoff aus Erdgas – durch eine Reaktion mit Wasserdampf oder durch partielle Oxidation Wasserstoff gewonnen werden. Die Biogaserzeugung ist ebenso wie die Dampfreformierung heute Stand der Technik.

Bei der biologischen Wasserstofferzeugung spalten Bakterien bei Temperaturen zwischen 35 °C und 55 °C im Dunkeln («Dunklerfermentation») oder bei Licht («Photofermentation») industrielle Abwässer, Zellulose- oder Zuckerlösungen fermentativ unter Wasserstofffreisetzung auf. Bei einer herkömmlichen Fermentation werden Methan und Kohlendioxid und nur in sehr geringen Mengen Wasserstoff produziert. Dies ergibt sich daraus, dass Methan produzierende Bakterien den Wasserstoff als ihren Energielieferanten zum Stoffwechsel brauchen. Entnimmt man dem System den Wasserstoff aber sofort, so können nur 10 – 15 % der Biomasse in Wasserstoff umgesetzt werden. Diese Verfahren sind derzeit nur im Labor durchführbar.





## 2.4 Thermolyse

Eine Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff ist generell ab Temperaturen von etwa 2.500 °C möglich. Hierbei liegen Wasserdampf und Wasserstoff nebeneinander im Gleichgewicht vor. Eine Abtrennung von Wasserstoff aus diesem Hochtemperatur-Gasmisch konnte technisch bisher allerdings noch nicht zufriedenstellend realisiert werden. Eine Senkung der Reaktionstemperatur unter 1.200 °C kann erreicht werden, indem man die Wasserspaltung durch sogenannte thermo-chemische Kreisprozesse in zwei oder mehrere getrennte Einzelreaktionen mit Zusatzstoffen aufteilt.

Das kann durch selektive Oxidation und Reduktion (etwa von Metalloxiden) erreicht werden. Hierzu werden Zusatzstoffe (z. B. Eisen, Zink) zur Senkung der Reaktionstemperatur auf 800 °C bis 1.200 °C eingesetzt. Öko-Wasserstoff kann durch Thermolyse erzeugt werden, indem von Spiegeln gebündelte Sonnenstrahlen auf Wasser geleitet werden, dieses aufgrund der hohen Temperatur explosionsartig verdampfen lassen und dabei die Moleküle spalten.

Ein weiteres Verfahren ist der Schwefel-Jod-Kreislauf (SI-Cycle), der nach den verwendeten Zusatzstoffen Jod und Schwefelsäure benannt ist. Hier laufen mehrere Teilreaktionen in Temperaturbereichen zwischen 120 °C und 850 °C ab.

Alle genannten Thermolyse-Verfahren sind noch in Entwicklung, wobei die Effizienz der Umwandlung von Sonnenlicht zu Wasserstoff derzeit zwischen 6 und 7 % liegt (theoretisch sind bis zu 50 % möglich). Thermolytische Verfahren sind aufgrund der benötigten hohen Temperaturen nur in Regionen mit hoher direkter Sonneneinstrahlung anwendbar.

## 2.5 Photolyse

Bei der Photolyse – das ist die Wasserspaltung durch Licht – unterscheidet man die

- **biologische** Photofermentation von Biomasse durch Bakterien und die
- **photo-elektrochemische** Wasserstofferzeugung mittels Halbleitern.

Die Photofermentation nutzt die Reststoffe der Dunkelfermentation zur Wasserstoff-Erzeugung durch Mikroorganismen unter Lichteinfluss. Ein photo-elektrochemisches System hingegen besteht aus einem photoaktiven halbleitenden Material, wie es auch in Photovoltaik-Modulen eingesetzt wird, in Verbindung mit einem flüssigen Elektrolyten (Abbildung 4). Dieses System vereint die Funktionen der photovoltaischen Stromerzeugung und der Elektrolyse von Wasser in einem Prozess. Durch das einfallende Licht wird elektrische Energie erzeugt, die zur Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff führt. Die Entwicklung solcher Systeme wird derzeit im Labormaßstab durchgeführt, wobei im stabilen Zustand – also über einen längeren Zeitraum – Umwandlungseffizienzen von etwa 4,5 % erreicht werden können, in instabilen Zuständen konnten kurzfristig schon 12,4 % erreicht werden. Das Ziel liegt bei einer Effizienz von rund 10 %.

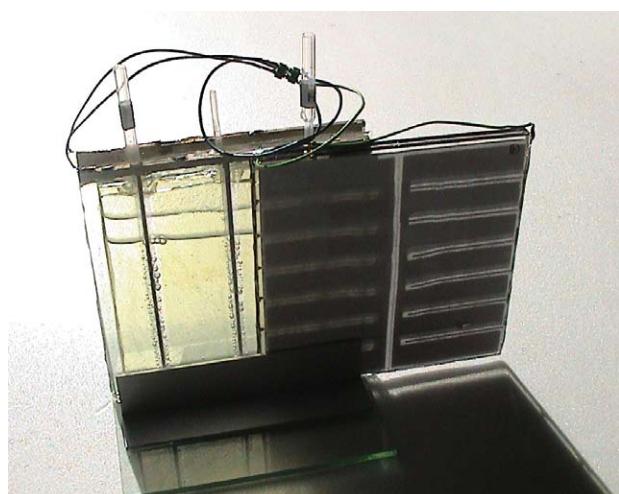


Abbildung 4: PEC -Wasserspaltungseinheit von Hydrogensolar.com



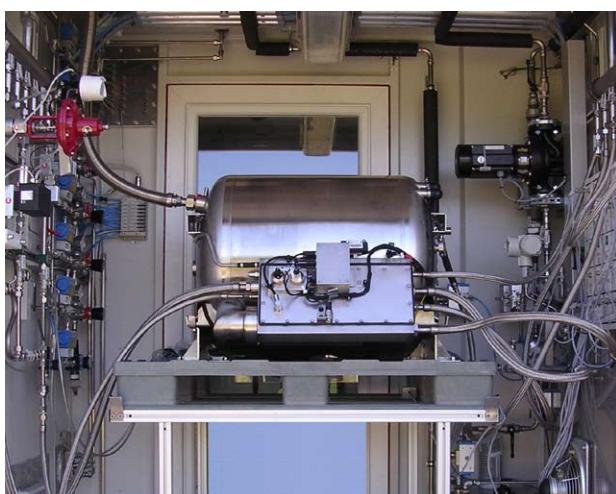
### 3. AUFBEREITUNG VON WASSERSTOFF

Wasserstoff aus erneuerbarer Energie wird bei allen Erzeugungsmethoden gasförmig erzeugt.

Je nach geplanter Nutzung muss er dann anschließend aufbereitet, also zur Druckspeicherung verdichtet oder zur Speicherung in Tieftemperaturtanks verflüssigt werden.

#### 3.1 Verdichtung

Um in einem bestimmten Volumen (z. B. einer Gasflasche mit 50 Liter Volumen) eine möglichst große Menge gasförmigen Wasserstoffs speichern zu können, wird dieser unter hohem Druck in den Speicher gepresst. Die Verdichtung von Wasserstoff erfolgt ähnlich der Erdgasverdichtung und ist bereits ausreichend erprobt und verfügbar. An den ersten bestehenden Wasserstoff-Tankstellen weltweit sind heute Verdichtungssysteme von 200 bar bis 900 bar zur Schnellbetankung von Fahrzeugen im Einsatz. Aufgrund des logarithmischen Zusammenhangs zwischen Druck und Verdichterarbeit erhöht sich der Energieaufwand bei erhöhtem Druck nur unwesentlich. So benötigt eine Verdichtung von 1 bar auf 300 bar nur etwa 10 % mehr Energie als die Verdichtung von 1 bar auf 200 bar. Der Strombedarf für die Verdichtung von 1 bar auf 450 bar beträgt etwa  $0,11 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kWh}_{\text{H}_2}$ , bzw. von 1 bar auf 880 bar rund  $0,13 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kWh}_{\text{H}_2}$ .



#### 3.2 Verflüssigung

Zur Verflüssigung von Wasserstoff muss dieser auf unter  $-253^{\circ}\text{C}$  abgekühlt werden. Hierbei wird der gasförmige Wasserstoff z. B. mit flüssigem Stickstoff unter  $-195^{\circ}\text{C}$  (Inversionstemperatur) vorgekühlt, bis der Joule-Thomson-Effekt zum Tragen kommt. Dieser Effekt besteht darin, dass sich ein reales Gas bei einer Volumausdehnung unter seine Inversionstemperatur abkühlt. Verflüssigungsanlagen sind Stand der Technik mit einem spezifischen Strombedarf von etwa  $0,42 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kWh}_{\text{H}_2}$ . In Europa gibt es 3 Verflüssigungsanlagen mit einer Gesamtproduktionsmenge von insgesamt 20 t flüssigem Wasserstoff pro Tag. Das entspricht dem Energieinhalt von 77.500 Litern Benzin. Die weltweit größte Anlage mit etwa 55 t Wasserstoff pro Tag steht in den USA. Ein spezifischer Strombedarf von etwa  $0,3 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kWh}_{\text{H}_2}$  wird zukünftig durch größere Anlagen und durch Optimierung der Kältekreisläufe angestrebt.





## 4. VERTEILUNG VON WASSERSTOFF

Verteilt wird Wasserstoff in Behältern auf Lastkraftwagen oder Eisenbahnwaggons und über Pipelines.

### 4.1 Landtransport

Heute ist es Stand der Technik, gasförmigen und flüssigen Wasserstoff mittels Lastkraftwagen oder Bahnwaggon zu transportieren. Gasförmiger Wasserstoff wird in Druckspeicher-Röhren bei einem Druck von 200 bar bzw. Flaschenbündeln (bei 200–350 bar) befördert, wobei pro LKW bzw. Bahnwaggon etwa 300 bis 500 kg Wasserstoff transportiert werden können. Flüssiger Wasserstoff wird in Tieftemperaturspeichern, so genannten kryogenen Flüssigwasserstoffspeichern, mit einem Volumen von 53.000 l (das entspricht 3.400 kg Wasserstoff) transportiert.

Zum Vergleich: In einem Diesel-Tankwagen mit demselben Transportvolumen kann aufgrund des höheren volumetrischen Energieinhaltes von Diesel im Vergleich zu flüssigem Wasserstoff pro LKW rund viermal soviel Energie transportiert werden.



### 4.2 Pipeline-Transport

Wasserstoff lässt sich ähnlich wie Erdgas in Pipelines mit Durchmessern von 0,1 bis 1 m bei Drücken zwischen 10 bar und 300 bar transportieren. Da die volumetrische Energie-dichte von Wasserstoff verglichen mit Erdgas nur ein Drittel beträgt, muss das dreifache Gasvolumen durch die Pipeline transportiert werden, damit dem Verbraucher dieselbe Energiemenge zur Verfügung steht. Das bedeutet, dass die benötigte Transportenergie aufgrund der Reibungsverluste um etwa 3,5 Mal höher ausfällt, als bei Erdgas. Der Transport über eine Pipeline bietet sich bei hohem Wasserstoffbedarf an. Industrielle Wasserstoff-Pipelines sind bereits langjährig über Entfernung bis zu 300 km in Betrieb. Sie werden bei Drücken von 30 bis 100 bar betrieben. Weltweit bestehen etwa 1.000 km industrielle Wasserstoff-Pipelines, meist an ausgedehnten Chemiestandorten z. B. in den USA, Frankreich oder Deutschland. Grundsätzlich ist auch der Transport von flüssigem Wasserstoff in vakuum-isolierten Pipelines möglich, eine solche 0,6 km lange Pipeline mit 15 cm Durchmesser gibt es am Kennedy Space Center in den USA.





## 5. SPEICHERUNG VON WASSERSTOFF

Die kostengünstige Speicherung von Wasserstoff ist Voraussetzung für fast alle Anwendungen. Für mobile und stationäre Anwendungen wird flüssiger und gasförmiger Wasserstoff in Druckspeichern, in kryogenen Speichern bei extrem niedrigen Temperaturen und in Feststoffspeichern als Metallhydrid gelagert.

### 5.1 Physikalische Grundlagen

In Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen gravimetrischer Energiedichte von Wasserstoff (Energieinhalt pro Kilogramm) und volumetrischer Energiedichte (Energieinhalt pro Liter) bei unterschiedlichen Drücken dargestellt.

Dabei zeigt sich deutlich, dass Wasserstoff zwar in Bezug auf sein Gewicht eine sehr hohe Energiedichte aufweist, mit der weder Erdgas, noch Benzin oder Diesel mithalten können. Bezogen auf sein Volumen rangiert er allerdings weit hinter den traditionellen Treibstoffen Benzin und Diesel. Die höchste gravimetrische Energiedichte erreicht Wasserstoff in gasförmiger oder flüssiger Form, die höchste volumetrische als Metallhydrid im Feststoffspeicher.

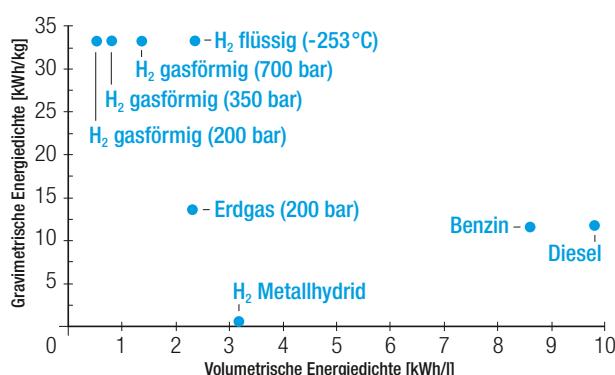


Abbildung 5: Gravimetrische und volumetrische Energiedichte bei unterschiedlichen Arten der Wasserstoffspeicherung im Vergleich zu Diesel, Benzin und Erdgas

### 5.2 Druckspeicher

Für stationäre Großspeicher für gasförmigen Wasserstoff ( $> 1$  Mio.  $\text{Nm}^3$ ) können ausgesolte Salzkavernen oder ausgeförderte Öl- und Gaslagerstätten verwendet werden. Diese finden heute bereits für die Erdgasspeicherung Verwendung. Aufgrund der geringeren volumetrischen Energiedichte wird für Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas bei gleichem Energieinhalt und gleichem Druck das etwa dreifache Speichervolumen benötigt.

Für kleine stationäre Speicher für gasförmigen Wasserstoff (5 bis 100  $\text{m}^3$  Speichervolumen) werden Druckbehälter verwendet, z. B. Druckröhrentanks, Zylindertanks oder Kugelbehälter. Der Druck dieses gespeicherten Wasserstoffs kann zwischen 1 bar und etwa 1.000 bar betragen.

Für den Einsatz in Fahrzeugen werden Druckspeicher, zu meist aus Aluminium-Kohlefaser-Verbundstoffen eingesetzt, die ein Volumen zwischen 50 und 400 Litern aufweisen. Je nach Anwendung werden entweder ein Einzeltank oder mehrere zu einer Speicherbatterie verbundene Einzelbehälter verwendet. Der Speicherdruck bei den zu Demonstrationszwecken eingesetzten Konzeptfahrzeugen beträgt 200 bis 350 bar, Drucktanks bis 750 bar werden derzeit von mehreren Herstellern entwickelt.



## 5.3 Kryogene Speicher

Auf Grund der langjährigen Anwendung in der Raumfahrt ist diese Speichertechnik für flüssigen Wasserstoff heute weit entwickelt. Stationäre Großspeicher sind mit Vakuumisolierungen ausgestattet, wie z. B. der Kugeltank in Cape Canaveral (20 m Durchmesser, Fassungsvermögen 270 t flüssiger Wasserstoff, Abdampfverluste 0,03 % pro Tag).

Die stationäre Speicherung von flüssigem Wasserstoff in mittelgroßen Behältern (1.500 bis 75.000 Liter Tankvolumen) ist heute ebenfalls erprobt (z. B. am HyCentA in Graz), wobei größere Behälter mit Perlit-Vakuumisolierung und kleinere Behälter mit Superisolierung und kontinuierlicher Abgas- kühlung ausgeführt werden. In Abhängigkeit von ihrer Form und Isolierung haben diese stationären Tanks Abdampfver- luste von 0,4 bis 2 % pro Tag. Kostengünstige Isolationsma- terialien und Produktionsmethoden für die Tanks sind in Entwicklung.

Auch für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen werden Tanks für flüssigen Wasserstoff entwickelt. Geometrische Anfor- derungen, die sich aus dem Verhältnis von Tankvolumen zu Oberfläche ergeben, bedingen eine Mindestgröße von mobilen Flüssigwasserstofftanks zwischen 150 und 200 Liter. Die Tanks sind mit einer Vakuumschicht und zahlreichen Lagen dünner Isolierfolien (Multi Layer Insulation) aus- geführt, wodurch die Abdampfverluste bei etwa 1 % pro Tag gehalten werden können. Der im Tank verdampfende Wasserstoff führt zu einem Druckanstieg, bis sich nach 3 bis 5 Tagen «Haltezeit» ein Sicherheitsventil öffnet und den Druck abbaut.

## 5.4 Feststoffspeicher

In Feststoffspeichern wird Wasserstoff in Metall-Legierungen, die ein Hydrid bilden, chemisch gespeichert oder in Nano- strukturen aus Grafit eingelagert. Um den in Metallhydrid- speichern gespeicherten Wasserstoff wieder freizusetzen, wird Wärme benötigt. Da die bisher erreichbaren gravimetrischen Speicherdichten mit etwa 0,7 kWh pro kg äußerst gering sind, sind derzeit nur stationäre Feststoffspeicher in Gebrauch. Portable Anwendungen in Mobiltelefonen oder Computern sind noch nicht ausreichend entwickelt, könnten aber auf- grund ihrer hohen Sicherheit in Zukunft interessant werden.





## 6. NUTZUNG VON WASSERSTOFF

Wasserstoff kann in stationären, mobilen und portablen Anwendungen genutzt werden: Die gekoppelte stationäre Erzeugung von Strom und Wärme (Brennstoffzelle oder ein Verbrennungskraftmotor mit Generator), die mobile Anwendung in Fahrzeugen (Verbrennungskraftmotor oder eine Brennstoffzelle mit Elektromotor), die portable Anwendungen zur Stromversorgung von z. B. in Mobiltelefonen oder Computern (Brennstoffzelle).

### 6.1 Mobiler Einsatz in Fahrzeugen

Wasserstoff kann als Treibstoff für Transportdienstleistungen auf der Straße in PKW, LKW und Bussen eingesetzt werden: In einem Verbrennungsmotor (Ottomotor) oder in einer Brennstoffzelle.

#### 6.1.1 Verbrennungsmotor

Wasserstoff-Verbrennungsmotoren können nach äußerer und innerer Gemischbildung unterschieden werden. Bei der äußeren Gemischbildung oder Saugrohreinspritzung wird die Gemischbildung von Wasserstoff und Luft vor dem Einlassventil in den Brennraum vorgenommen. Bei einer inneren Gemischbildung oder Direkteinspritzung, wie sie heute in vielen benzinbetriebenen Fahrzeugen Verwendung findet, wird der Wasserstoff direkt zur Luft in den Brennraum des Motors zur Gemischbildung eingespritzt.

In Abbildung 6 ist die Funktionsweise eines Wasserstoff-verbrennungsmotors mit äußerer Gemischbildung dargestellt. Im 1. Takt wird das Wasserstoff-/Luftgemisch in den Zylinder angesaugt (blau). Im nachfolgenden Takt 2 wird dieses Gemisch komprimiert. Am Beginn des 3. Taktes wird das Gemisch mittels Zündfunken gezündet und expandiert, während im Takt 4 der entstandene Wasserdampf als Abgas aus dem Zylinder transportiert wird (braun).

Wasserstoffmotoren haben verglichen mit Benzinmotoren eine ähnliche Leistungsdichte, wobei der Wirkungsgrad von Benzinmotoren derzeit noch nicht erreicht werden kann. In Zukunft kann die Entwicklung einer tiefkalten Gemischbildung mit flüssigem Wasserstoff oder eine Hochdruckeinspritzung bei etwa 200 bar zu einer weiteren Steigerung der Leistungsdichte führen, die dann an jene von Dieselmotoren heranreichen soll.

In Wasserstoffmotoren mit äußerer Gemischbildung bilden sich neben dem Endprodukt Wasserdampf aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen auch Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), welche durch eine Abgasnachbehandlung in Verbindung mit einer geeigneten Betriebstrategie des Motors (Dosierung der Luftzufuhr je nach Leistungsanforderung) minimiert werden können. Geringe Kohlenmonoxid (CO)- und Kohlenwasserstoff ( $\text{C}_x\text{H}_y$ )-Emissionen können in diesen Motoren durch Verbrennung von am Kolben haftendem Motorschmieröl entstehen.

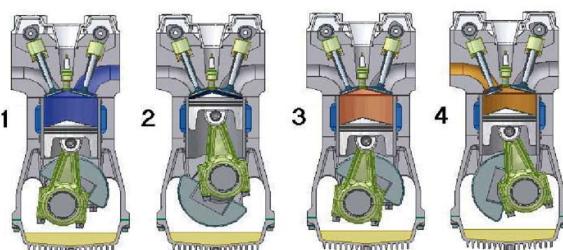


Abbildung 6: Kraftzeugung in einem Verbrennungskraftmotor



## 6.1.2 Brennstoffzelle

Brennstoffzellen liefern die elektrische Energie (Gleichstrom) für den Betrieb eines Elektromotors, wobei in den meisten Konzepten Batterien zur Zwischenspeicherung eingesetzt werden. Da in der Wasserstoff-Brennstoffzelle nur eine chemische Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff stattfindet, entsteht als Reaktionsprodukt ausschließlich Wasserdampf und es werden keine Schadstoffe emittiert. In der Brennstoffzelle geschieht sozusagen der umgekehrte Vorgang einer Elektrolyse. Verglichen mit Verbrennungskraftmotoren können Brennstoffzellen besonders im Teillastbereich hohe Wirkungsgrade erreichen.

Grundsätzlich kann man die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen je nach verwendetem Elektrolyten klassifizieren, wobei die Proton-Exchange-Membrane-(PEM)Brennstoffzelle mit reinem Wasserstoff bei Temperaturen um 80 °C betrieben wird. In Zukunft sind auch Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen bei 180 °C geplant. Verglichen mit Verbrennungskraftmotoren erreichen Brennstoffzellen derzeit noch etwas geringere Leistungsdichten.

In Abbildung 7 ist die Funktionsweise einer Wasserstoff-Brennstoffzelle dargestellt. Das Wasserstoffgas wird über Kanäle in der Bipolarplatte (rot) zu der Gasdiffusionsschicht der Anode geführt. Der Sauerstoff wird über die Kathode (blau) zugeführt. Für diese Reaktion benötigt man einen Katalysator, meistens Platin.

Am Katalysator der Anodenseite spaltet sich nun das Wasserstoffgas in Protonen und Elektronen auf. Die Protonen wandern weiter durch die Membran in der Mitte zur Kathodenseite. Da diese Membran keine Elektronen durchlässt, fließen diese über einen äußeren Stromkreis zur Kathodenseite. An der Katalysatorschicht der Kathode reagiert einerseits der Sauerstoff mit den über den äußeren Stromkreis geleiteten Elektronen zu negativ geladenen Sauerstoff-Ionen, andererseits regieren die durch die Membran geleiteten Protonen, und die Sauerstoff-Ionen unter Wärmeabgabe weiter zu Wasserdampf. Die Reaktionswärme und der Wasserdampf werden nach außen abgeführt. Der erzeugte Gleichstrom wird in einer Batterie gespeichert oder direkt in einem Elektromotor genutzt.

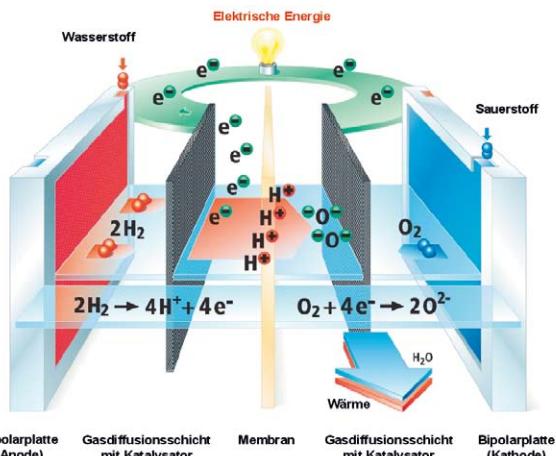


Abbildung 7: Stromerzeugung in einer Brennstoffzelle durch elektrochemische Umwandlung des Wasserstoffs (National Renewable Energy Laboratory, NREL)

## 6.1.3 Fahrzeug mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Einige Automobilhersteller haben derzeit Konzeptfahrzeuge mit Prototyp-Wasserstoff-Verbrennungsmotoren im Demonstrationsbetrieb (Abbildung 8). Zukünftig könnten Wasserstoff-Verbrennungsmotoren auch in Hybrid-Fahrzeugen in Kombination mit Elektromotoren zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz eingesetzt werden, wie dies derzeit schon bei Benzin- und Diesel-Hybrid-Fahrzeugen erfolgt.



Abbildung 8: Wasserstoff-Verbrennungsmotor (BMW AG)



Wasserstoff-Verbrennungsmotoren können auch wechselweise mit Benzin betrieben werden, was für die mögliche Markteinführung der ersten Fahrzeuge aufgrund der zu Beginn größeren Distanzen zwischen den Wasserstoff-Tankstellen wichtig sein kann. Erste Kleinserien von Wasserstoff/Benzin-Fahrzeugen (100–200 Stück) werden bereits hergestellt.

#### 6.1.4 Fahrzeug mit Wasserstoff-Brennstoffzelle

Neben der Reduktion der Fertigungskosten konzentrieren sich die Entwicklungen auf die Steigerung der Lebensdauer (für den automotiven Bereich ist eine Lebensdauer von mehr als 5.000 Stunden gefordert), den Betrieb bei Minusgraden, den «raschen» Kaltstart, sowie eine Reduktion des Katalysatorgehaltes von Platin an den Elektroden. Alle namhaften Automobilhersteller betreiben bereits Konzeptfahrzeuge mit PEM-Brennstoffzellensystemen (Abbildung 9). Zielwerte der Joint Technology Initiative der EU für das Jahr 2015 sind eine Effizienz im Europäischen Fahrzyklus von > 40 % und eine Lebensdauer von 5.000 Stunden im PKW und 10.000 Stunden im Bus.



Abbildung 9: Wasserstoff-Brennstoffzelle für den Fahrzeugantrieb (Honda Motor Co, Ltd.)

## 6.2 Gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme

Eine stationäre gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme kann unter Verwendung einer PEM-Brennstoffzelle oder eines Verbrennungskraftmotors realisiert werden. Technisch gesehen unterscheiden sich solche Systeme nicht wesentlich von den im vorhergegangenen Abschnitt beschriebenen Systemen in Fahrzeugen. Die angestrebte Lebensdauer für stationäre Anwendungen liegt mit über 40.000 Stunden und elektrischen Nutzungsgraden zwischen 45 und 55 % (Zielwerte 2015 der Joint Technology Initiative), im Vergleich zu mobilen Anwendungen (5.000 Stunden) deutlich höher.

Die reine Wärmeerzeugung aus Wasserstoff in Feuerungsanlagen wäre zwar technisch möglich, ist aber aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten nicht weiter verfolgenswert.

## 6.3 Portable Stromerzeugung

Ein typischer Anwendungsbereich für die portable Stromerzeugung aus Wasserstoff ist die Energieversorgung von tragbaren Elektrogeräten wie Mobiltelefonen und Computern über Brennstoffzellen. Der heutige Stand der Technik erlaubt allerdings noch keinen Einsatz im kommerziellen Maßstab.



## 7. UMWELTBEWERTUNG VON ENERGIESYSTEMEN MIT ÖKO-WASSERSTOFF

Mit Öko-Wasserstoff als Energieträger können Energiedienstleistungen wie Transport, Strom oder Wärme bereitgestellt werden, die auch mit anderen, erneuerbarer Energie direkt bereitgestellt werden können. Anhand von Bewertungskriterien werden mögliche Vorteile des «Umweges» über Öko-Wasserstoff für die Transportdienstleistung dargestellt.

### 7.1 Methode der Umweltbewertung

Als Bewertungskriterien werden meist der kumulierte Primärenergieaufwand, der kumulierte Materialaufwand und die Treibhausgasemissionen herangezogen.

Zur Ermittlung der Zahlenwerte der Bewertungskriterien werden Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Dabei werden alle emissions- und energierelevanten Prozesse von der Rohstoffgewinnung, über Produktion und Anwendung bis zur Entsorgung berücksichtigt, die für den Betrieb von Fahrzeugen notwendig sind. Nach der internationalen Norm ISO 14.040 «Ökobilanz» ist die Lebenszyklusanalyse eine Methode zur Abschätzung der Umweltauswirkungen eines Produktes – im betrachteten Fall einer Transportdienstleistung.

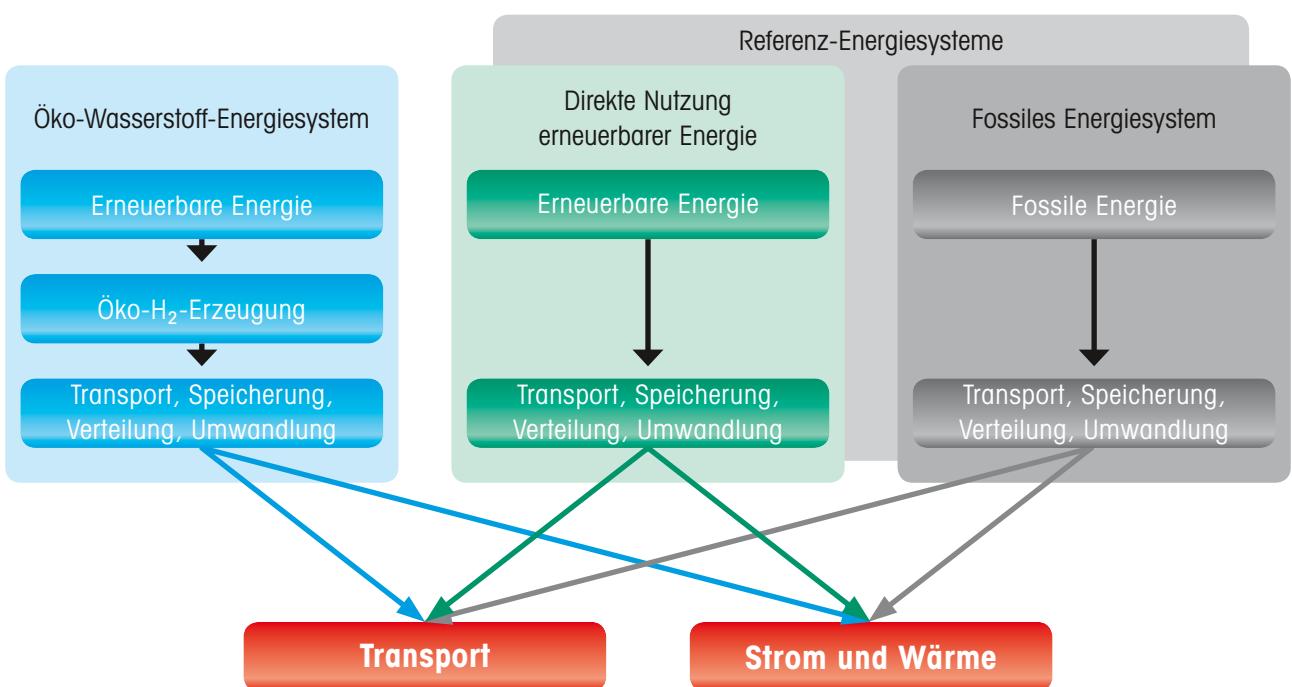
Für das Bewertungskriterium «Kumulierter Primärenergieaufwand» werden ausgehend von der Art und Menge der eingesetzten Endenergiträger (Öko-Wasserstoff, Öko-Strom, Biotreibstoffe, fossile Treibstoffe) jene Primärenergiemengen berechnet, die notwendig sind, um die Endenergiträger bereitzustellen. Bei den Primärenergieträgern wird zwischen

- erneuerbaren Energien  
(wie z. B. Wasserkraft, Biomasse),
- fossilen Energien  
(wie z. B. Erdöl, Erdgas, Kohle) und
- sonstigen Energieträgern  
(wie z. B. Kernenergie, Abfälle)

unterschieden. Analog dazu wird auch das Bewertungskriterium «kumulierte Materialaufwand» ermittelt, wobei berücksichtigt wird, dass bestimmte Materialien wieder verwendet werden können (z. B. Metalle).

Beim Bewertungskriterium «Treibhausgas-Emissionen» wird der Ausstoß von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) berechnet.

- **Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )**, eine geruch- und geschmacklose Kohlenstoff-Sauerstoff-Verbindung, entsteht als Hauptprodukt bei der Verbrennung von Kohlenstoff. Die pro Energieeinheit emittierte  $\text{CO}_2$ -Menge ist unter anderem vom Kohlenstoff-Gehalt des Brennstoffes abhängig. Weiters entsteht  $\text{CO}_2$  beim aeroben Abbau von Biomasse. Im Zuge der Photosynthese wird  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre in den Pflanzen gebunden.
- **Methan ( $\text{CH}_4$ )**, eine brennbare Kohlenwasserstoff-Verbindung, ist Hauptbestandteil von Erdgas und auch ein Produkt der unvollständigen Verbrennung. Weiters entsteht  $\text{CH}_4$  beim anaeroben Abbau von Biomasse. Methan wird auch beim Abbau von Kohle und bei der Förderung von Erdöl und Erdgas emittiert.
- **Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )** ist eine farblose und giftige Stickstoff-Sauerstoff-Verbindung, die unter bestimmten Bedingungen bei Verbrennungsprozessen entsteht. Die dabei emittierte Menge an  $\text{N}_2\text{O}$  ist vor allem vom Stickstoffgehalt des Brennstoffes und der Verbrennungstemperatur abhängig. Lachgas-Emissionen treten auch bei Stickstoffdüngung landwirtschaftlicher Flächen auf.

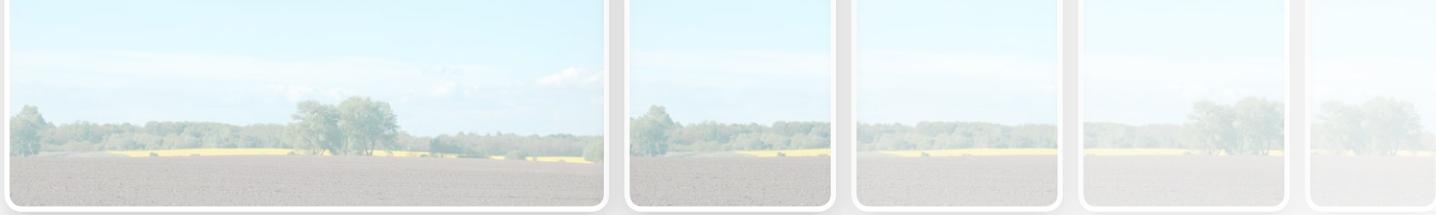


**Abbildung 10:** Öko-Wasserstoff-Energiesysteme im Vergleich zur direkten Nutzung erneuerbarer und fossiler Energieträger zur Bereitstellung der Energiedienstleistung Transport, Strom und Wärme.

Zur Vergleichbarkeit der Treibhauswirkung von Kohlendioxid, Methan und Lachgas wird das Konzept des Treibhausgaspotentials (GWP – Global Warming Potential) angewendet. Das GWP beziffert den Beitrag eines Gases zur Erderwärmung in Form einer äquivalenten Menge CO<sub>2</sub>. Die Treibhauswirkung eines Kilogramms des Gases wird als Vielfaches (Äquivalenzfaktor/CO<sub>2</sub>-Äq) der Treibhauswirkung von einem Kilogramm CO<sub>2</sub> angegeben. Der Äquivalenzfaktor von Methan beträgt 25 (1 kg CH<sub>4</sub> = 25 kg CO<sub>2</sub>-Äq), jener von Lachgas 298 (1 kg N<sub>2</sub>O = 298 kg CO<sub>2</sub>-Äq).

Diese Analysen ermöglichen u. a. den Vergleich zwischen der direkten Nutzung von erneuerbarer Energie und dem «Umweg» über den Öko-Wasserstoff (Abbildung 10).

Da Öko-Wasserstoff in Zukunft vermutlich vor allem als Treibstoff im Transportsektor eingesetzt werden wird, folgt nun der Vergleich eines Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugs mit anderen Energiesystemen.



## 7.2 Vergleich von Transportdienstleistungen

In Abbildung 11 sind drei Fahrzeugkonzepte und in Abbildung 12 die umweltrelevanten Prozesse und Komponenten zur Bereitstellung einer Transportdienstleistung dargestellt:

- Brennstoffzellen-Fahrzeug mit gasförmigem Öko-Wasserstoff (700 bar Druck im Tank) aus Wasserkraft («Öko-Wasserstoff Brennstoffzellen-Fahrzeug»)
- Elektro-Fahrzeug mit Batterie und Elektromotor, angetrieben mit Ökostrom aus Wasserkraft («Öko-Strom Batterie-Fahrzeug»)
- Diesel-Fahrzeug mit Verbrennungskraftmotor («Diesel Verbrennungsmotor-Fahrzeug»)

Die Umweltbewertung für diese Fahrzeugvarianten auf der Basis der in Abschnitt 7.1 beschriebenen Lebenszyklusanalyse betrifft die Bewertungskriterien Treibhausgas-Emissionen, kumulierter Materialaufwand und kumulierter Primärenergieaufwand jeweils für derzeitige und zukünftige Technologien. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

Insgesamt zeigt sich, dass beim Elektro-Fahrzeug alle Bewertungskriterien besser sind als beim Wasserstoff-Fahrzeug. Der große Vorteil des Wasserstoff-Fahrzeug besteht jedoch darin, dass wesentlich größere Reichweiten pro Tankfüllung als mit einem Elektrofahrzeug pro Ladevorgang möglich sind.

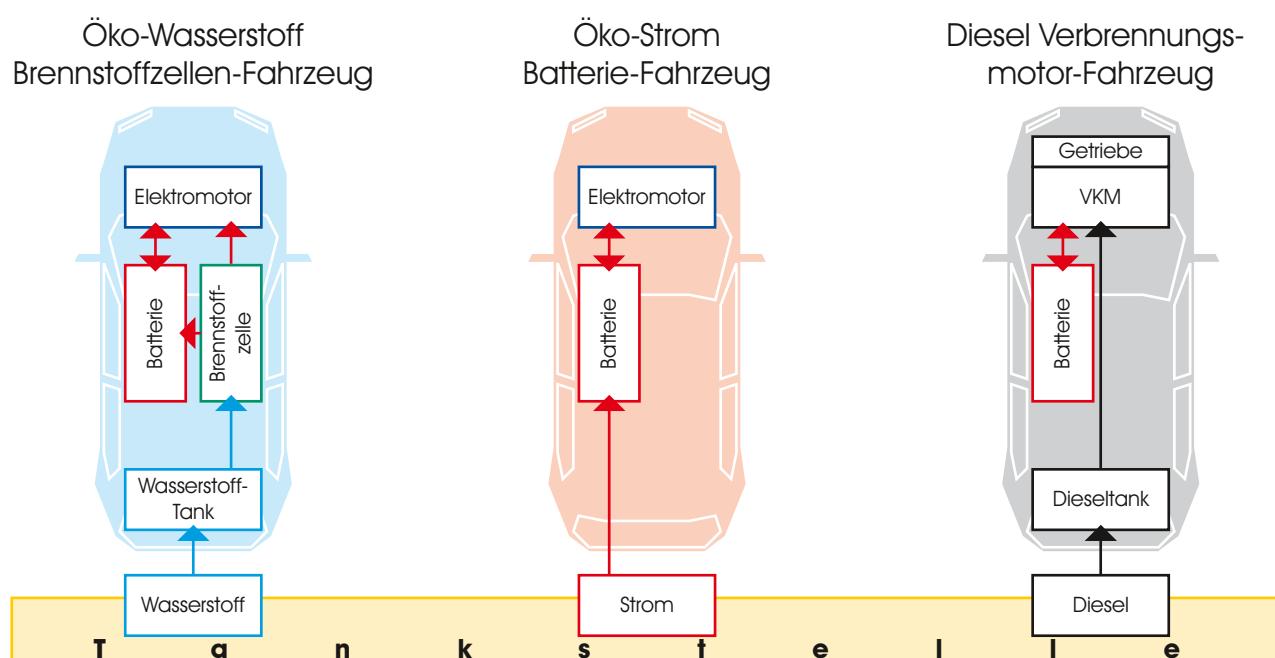


Abbildung 11: Fahrzeugkonzepte im Vergleich: Öko-Wasserstoff Brennstoffzellen-Fahrzeug, Öko-Strom Batterie-Fahrzeug und Diesel Verbrennungsmotor-Fahrzeug

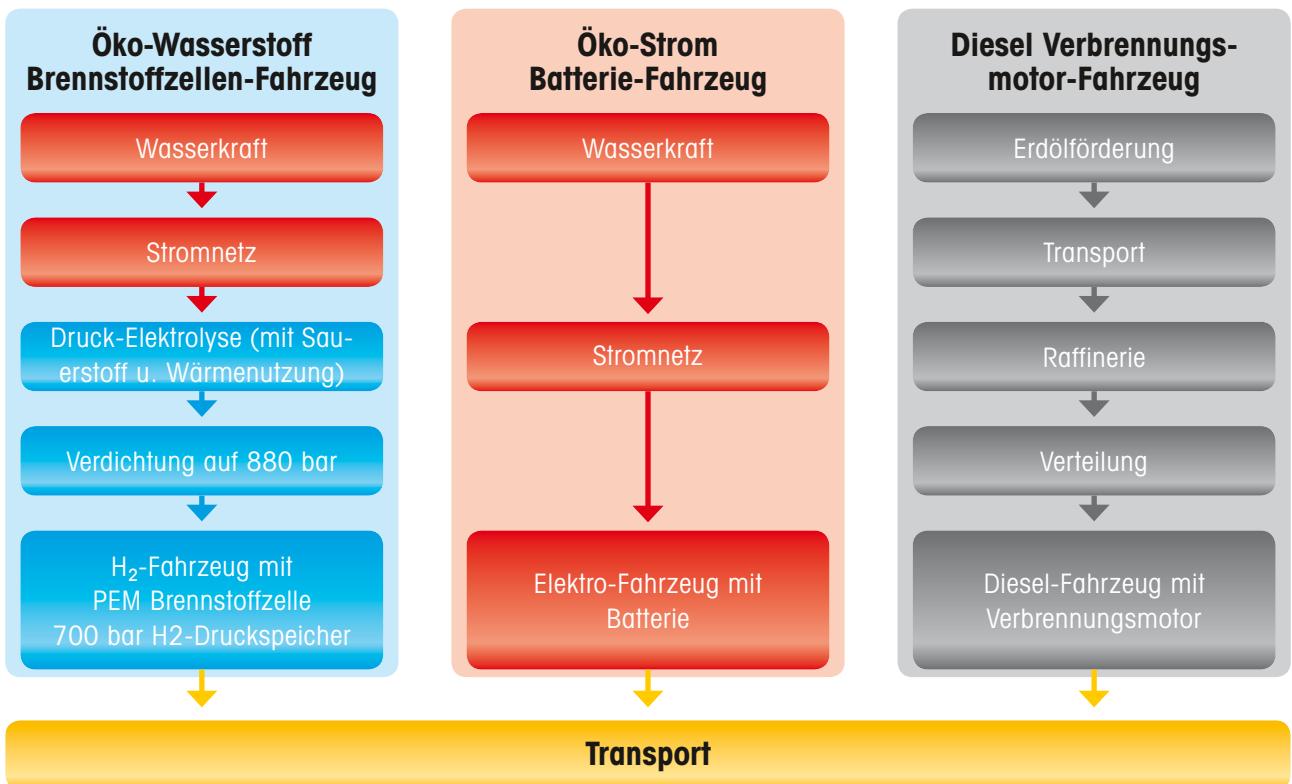
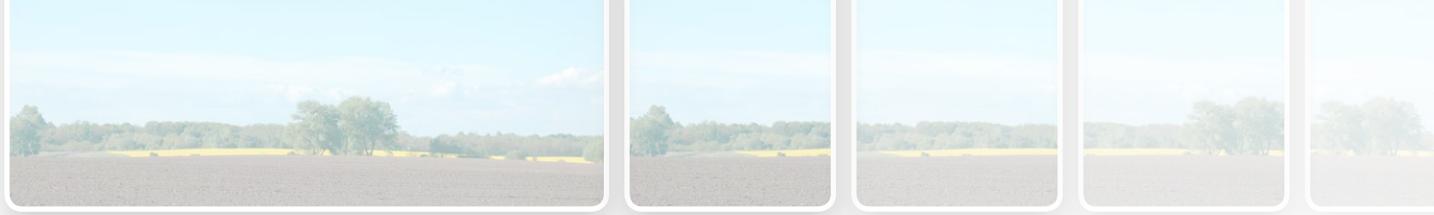


Abbildung 12: Umweltrelevante Prozesse und Komponenten im Vergleich: Öko-Wasserstoff Brennstoffzellen-Fahrzeug, Öko-Strom Batterie-Fahrzeug und Diesel Verbrennungsmotor-Fahrzeug

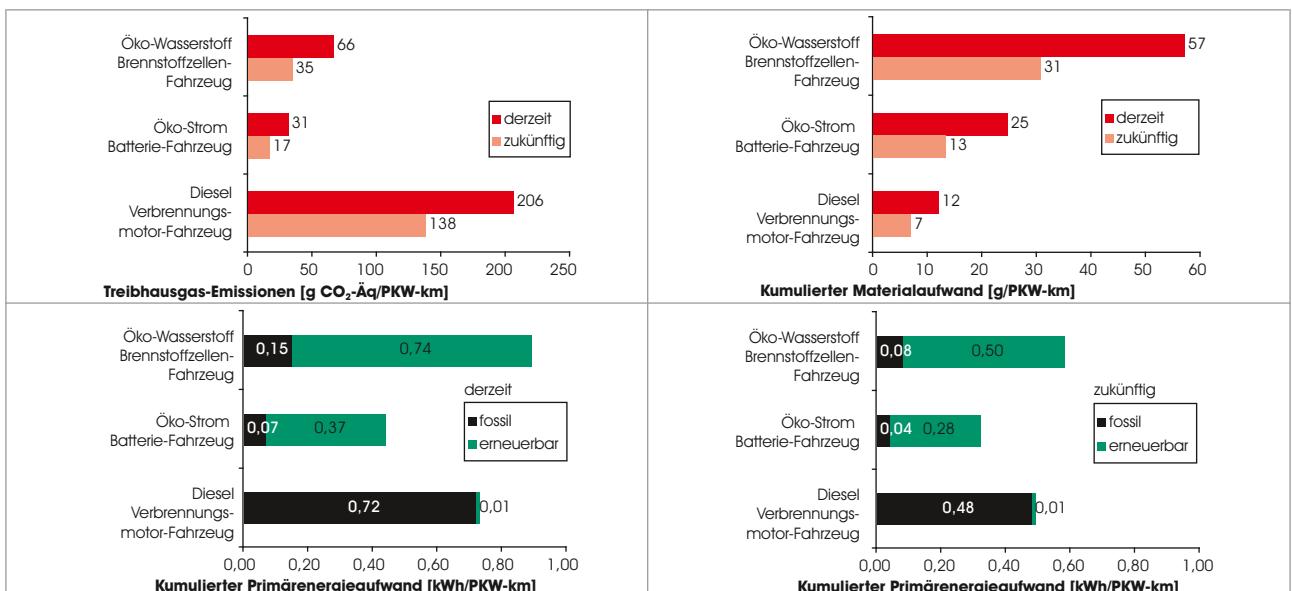


Abbildung 13: Umweltvergleich des Brennstoffzellen-Fahrzeugs mit Öko-Wasserstoff, des Batterie-Fahrzeugs mit Öko-Strom und des Diesel-Fahrzeugs mit Verbrennungskraftmotor.



## 8. ÖSTERREICHISCHE DEMONSTRATIONSPROJEKTE

In Österreich werden unter Beteiligung von Industrieunternehmen, Demonstrationsprojekte durchgeführt, die von der nationalen und europäischen Forschungsförderung unterstützt werden.

### 8.1 Übersicht

Die wichtigsten österreichischen Demonstrationsprojekte mit Wasserstoff befinden sich in Sattledt, Wiener Neustadt und Graz (Abbildung 14). Sie werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

- HyLOG – Hydrogen Logistik
- PEMFC – Kleintraktion
- Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft  
HyCentA – Hydrogen Centre Austria



Abbildung 14: Orte der österreichischen Wasserstoff-Demonstrationsprojekte



Abbildung 15: HyCentA – Hydrogen Centre Austria

2 Technische Universität Graz, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Austrian Research Centers GmbH – ARC, MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG, OMV Refining & Marketing GmbH, AVL List GmbH, Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH.

### 8.2 Hydrogen Center Austria

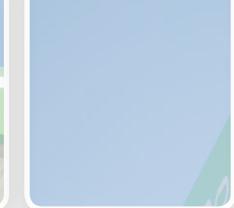
Um die Stellung der österreichischen Forschung und Entwicklung sowie den Anschluss an internationale Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Wasserstofftechnologie zu sichern, wurde im Jahr 2005 in einer Kooperation mit einer Reihe österreichischer Partner<sup>2</sup> auf dem Gelände der Technischen Universität Graz das HyCentA (Hydrogen Center Austria) errichtet.

Das HyCentA ist mit einem 17.600 l Wasserstofftank ausgerüstet, in dem verflüssigter Wasserstoff bei -250 °C gespeichert ist. Die technische Ausstattung des HyCentA ermöglicht das Betanken von Fahrzeugen sowohl mit flüssigem als auch mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff (bis zu 450 bar).

Die Prüfstände sind mit Anschlüssen für Stickstoff, Helium, flüssigen und gasförmigen Wasserstoff (bis ca. 16 bar), sowie modernster Messtechnik und Sensorik ausgestattet. Daneben gibt es vor Ort zur Betankung von Fahrzeugen auch Zapfsäulen für flüssigen und gasförmigen Wasserstoff bis zu 400 bar.

Neben zahlreichen Forschungsprojekten mit österreichischen Industriepartnern im Bereich der Wasserstofftechnologien ist das HyCentA auch in Aktivitäten der Forschung und Lehre an der TU Graz eingebunden. Gemeinsam mit dem Partner JOANNEUM RESEARCH wird auch die «HyCentA Informationsplattform Wasserstoff» betrieben, in deren Rahmen die vorliegende Broschüre entstanden ist.

Das HyCentA wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (bm.wa), das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bm.vit), den Zukunftsfonds des Landes Steiermark und die Steirische Wirtschaftsförderung (SFG).



## 8.3 Brennstoffzelle für Klein-Elektro-fahrzeuge und Kühlaggregate

Unter der Projektleitung des Kompetenzzentrums für Angewandte Elektrochemie GmbH (ECHEM) und mit nationalen und internationalen Partnern<sup>3</sup> werden im Projekt PEMFC-Kleintraktion in Wiener Neustadt drei Anwendungen im Leistungsbereich von 1 bis 3 kW<sub>el</sub> mit einem hybriden PEMFC-Energiebereitstellungssystem aufgebaut: das HyCart (ein Elektro-Wirtschaftsfahrzeug), ein Elektro-Scooter und ein Kühlaggregat. Das entwickelte PEM-Brennstoffzellensystem wird im HyCart und im Elektro-Scooter für den Antrieb eingesetzt, wobei der Elektromotor in beiden Fahrzeugen einerseits mit Strom aus der Batterie und andererseits mit Strom aus der Wasserstoff-betriebenen Brennstoffzelle versorgt wird. Durch Einsatz der Wasserstoff-Brennstoffzelle erhöht sich die Reichweite und verkürzt sich die Ladezeit.

Die abgas- und lärmarme Energieversorgung für das Kühlaggregat eines 3,5 t-Leichtbaukühlfahrzeugs wird mit einer PEM-Brennstoffzelle erreicht. Der Betrieb mit Wasserstoff hat den Vorteil, dass auch bei längeren Standzeiten die Kühlkette nicht unterbrochen wird. Fahrzeuge dieses Typs sollen vor allem im innerstädtischen Zulieferbetrieb für Gefriergut eingesetzt werden. Durch die Gewichtsreduktion bei Einsatz der PEM-Brennstoffzelle erhöht sich bei diesem Kühlfahrzeug die Nutzlast. Dieses Demonstrationsprojekt wird von bm.vit/FFG im A3 Programm und den Projektpartnern finanziert.



<sup>3</sup> Fotec Forschungs- und Technologietransfer GmbH, TMG Technologie- und Marketinggesellschaft mbH, Cardec Hydrogen Storage Austria GmbH, Fronius International GmbH, Banner GmbH, Bitter GmbH, IO Fahrzeuge Produktions- und Handels GmbH, S. Graf Carello Elektrofahrzeuge Erzeugungs- und Vertriebsgesellschaft mbH, Schuh Karosseriebau GmbH, ZSW, FuMA-Tech GmbH

<sup>4</sup> Bitter GmbH, Biovest Consulting GmbH, HyCentA Research GmbH, Clusterland Oberösterreich GmbH

## 8.4 Brennstoffzelle für Logistikfahrzeug

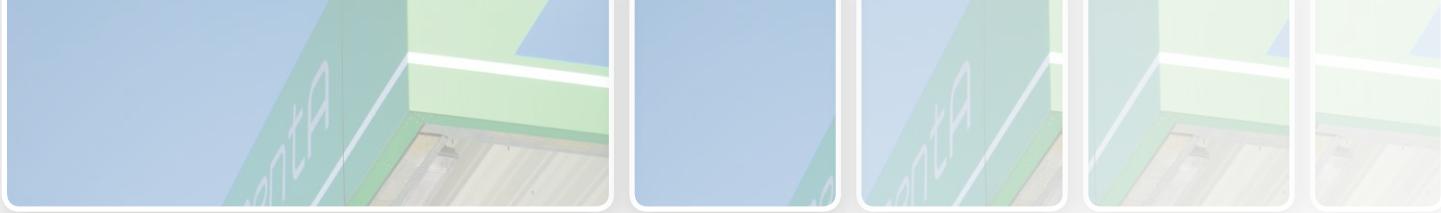
Am Standort der Firma Fronius International GmbH Sattledt wird unter der Projektleitung von Fronius mit Projekt-partnern aus dem Bereich der Wasserstofftechnologie<sup>4</sup> ein Fahrzeug zur innerbetrieblichen Logistikanwendung entwickelt (HyLOG). Dabei wird ein Brennstoffzellen-Range Extender-Antriebssystem mit 2,5 kW Leistung, sowie ein Druckwasserstofftank mit einem Volumen von 26 Litern für einen Betriebsdruck von 350 bar (0,7 kg H<sub>2</sub>) in das Fahrzeug integriert.

Mit dem Betrieb dieses Prototypen in einem realen, industriellen Umfeld sollen die Vorteile des Range-Extender-Konzeptes im Vergleich zu einer Standardausführung des Fahrzeugs mit Bleibatterie untersucht werden. Das HyLOG-Projekt zeigt, wie eine emissionsfreie industrielle Transportlogistiklösung aussehen kann und trägt somit zur Beschleunigung der Markteinführung dieser innovativen Technologie bei.

Die Treibstoffversorgung erfolgt durch eine am Betriebsgelände errichtete Wasserstoff-Betankungsanlage für Fahrzeuge mit 350 bar Druckwasserstofftanks. Der Wasserstoff wird dabei aus Elektrolyse mittels erneuerbarer Energie aus einer Photovoltaikanlage mit 650 kW<sub>P</sub> bereitgestellt. Hierbei soll die Effizienz einer Solarwasserstoffbetankungsanlage durch Kopplung des Elektrolyseurs an das Photovoltaiksystem und Optimierung der Betriebsstrategie weiter gesteigert werden.

Dieses Demonstrationsprojekt wird finanziert von bm.vit/FFG im A3 Programm, Fronius International GmbH, Bitter GmbH, Biovest GmbH, Clusterland OÖ GmbH.





## 8.5 Die Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft

Am HyCentA in Graz wird unter der Projektleitung der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft in Kooperation mit österreichischen Partnern<sup>5</sup> die «Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft» aufgebaut, mit der eine gekoppelte Erzeugung von Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme im praktischen Einsatz demonstriert wird.

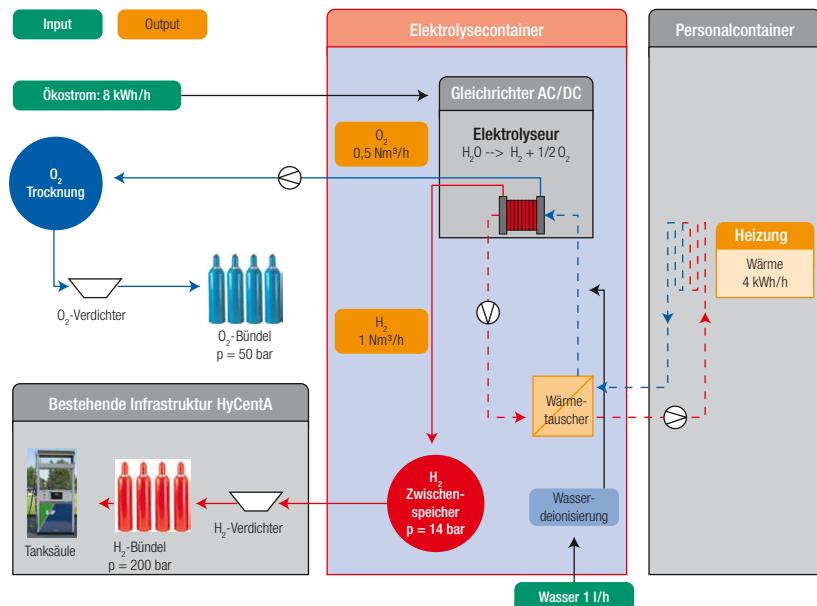
Der Fokus des Demonstrationsprojektes liegt in der mess-technischen Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Komponenten, der Einpassung in das Gesamtkonzept des HyCentA, sowie der Erprobung in einem realen Umfeld. Dieses Projekt erweitert die bestehende Wasserstoff-Tankstelle am HyCentA um die Komponente der Öko-Wasserstoff-Erzeugung. Während bis vor kurzem flüssiger Wasserstoff aus Erdgas zugekauft wurde, wird nun auch in einer Elektrolyseanlage vor Ort Wasserstoff aus erneuerbarer Energie (hauptsächlich Ökostrom aus Kleinwasserkraft) erzeugt. Die Produktionskapazität liegt bei 1 Nm<sup>3</sup> pro Stunde. Bei der Elektrolyse fallen auch Sauerstoff und Wärme an. Der Sauer-

stoff wird komprimiert und als technisches Gas beispielsweise in der Schweißtechnik genutzt. Mit der Wärme wird das HyCentA beheizt.

Für die Evaluierung der Energieeffizienz im praktischen Betrieb wird ein Messprogramm durchgeführt, wobei die Bereiche der elektrolytischen Nutzung von Öko-Strom, Öko-Wasserstoff, Sauerstoff und Wärme detailliert analysiert werden.

Um dieses zukunftsweisende Energiesystem im Verkehrssektor auch öffentlich zu präsentieren, werden im Rahmen eines «Driving Events» Wasserstoff-Fahrzeuge mit Öko-Wasserstoff aus der «Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft» betankt und betrieben.

Dieses Demonstrationsprojekt wird finanziert von bm.vit/FFG im A3 Programm, Land Steiermark – Abteilung 3 Wissenschaft und Forschung, OMV Refining & Marketing GmbH, Linde AG, Biovest Consulting GmbH und Weizer Naturenergie GmbH.



<sup>5</sup> Linde Gas GmbH, Biovest Consulting GmbH, OMV Refining & Marketing GmbH, HyCentA Research GmbH, Weizer Naturenergie GmbH



## 9. ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE PERSPEKTIVEN IN ÖSTERREICH

Das folgende Kapitel widmet sich der Frage, welche Rolle Öko-Wasserstoff zukünftig in einer nachhaltigen österreichischen Energiewirtschaft spielen könnte.

### 9.1 Vision «Nachhaltiges Energiesystem Österreich 2050»

Der Vision «Nachhaltiges Energiesystem Österreich 2050» wird als Forderung zugrunde gelegt, dass – unter maximaler Ausschöpfung der heimischen erneuerbaren Energiepotentiale und Realisierung aller Energieeffizienzpotentiale – im Jahr 2050 Energiedienstleistungen wie Raumwärme, Kälte, Mobilität, Produktion und Beleuchtung im selben Umfang wie heute verfügbar sind. Für dieses zukünftige nachhaltige Energiesystem wird Folgendes angenommen:

- Einsatz heimischer erneuerbarer Primärenergie wie Wasserkraft, Biomasse, Windkraft, Photovoltaik und Solarwärme
- Höchste Energieeffizienz bei der Umwandlung von Primärenergie in Energiedienstleistung
- Umfang und Qualität der Energiedienstleistungen bleiben auf dem heutigen Stand
- Einsatz von Öko-Wasserstoff nur im Transportsektor, da für die Strom- und Wärmeerzeugung die direkte Nutzung erneuerbarer Energie effizienter ist

Ein derartiges Energiesystem hätte im Vergleich zum heutigen Energiesystem folgende Merkmale

- Reduktion der Nutzenergie<sup>6</sup> um 40 % (650 PJ/a auf 390 PJ/a)
- Reduktion der Endenergie um 55 % (1.100 PJ/a auf 500 PJ/a) und
- Reduktion der Primärenergie um 60 % (1.400 PJ/a auf 570 PJ/a).

Insgesamt könnten in einem «Nachhaltigen Energiesystem Österreich 2050» etwa 64 PJ Öko-Wasserstoff pro Jahr als Treibstoff für Fahrzeuge eingesetzt werden. Dieser Wasserstoff würde durch Elektrolyse aus (zusätzlichem) Öko-Strom aus Wind- und Wasserkraft erzeugt. Der Anteil von Öko-Wasserstoff am gesamten Endenergiebedarf würde etwa 13 % betragen. Im zukünftigen nachhaltigen Transportsektor könnten etwa 54 % des Treibstoffbedarfes mit Öko-Wasserstoff gedeckt werden (Abbildung 16 und Abbildung 17).

Wie in Abbildung 17 dargestellt, bestimmen die Reichweite und Größe des Straßenfahrzeuges, ob es optimal mit Öko-Strom, Öko-Wasserstoff oder Biotreibstoffen betrieben werden kann. Öko-Wasserstoff ist besonders für Fahrzeuge optimal, die größere Reichweiten pro Tankinhalt als Elektrofahrzeuge erreichen sollen, aber keine schweren Fahrzeuge sind. Die Schwerfahrzeuge (z. B. LKW) der Zukunft sollen besser mit Biotreibstoffen z. B. Biodiesel betrieben werden.

<sup>6</sup> Unter Primärenergie werden Energieträger wie Rohöl, Roherdgas, Wind oder Biomasse verstanden, die direkt aus der Natur entnommen werden. Durch Umwandlung der Primärenergieträger werden Endenergiträger erzeugt, diese sind z. B. Benzin, Diesel, Strom, Fernwärme, Wasserstoff, Biobrennstoffe. Diese Endenergiträger werden durch Umwandlung zu Nutzenergiearten Licht, Wärme, mechanischer Antriebe und Mobilität gewandelt (Nutzenergie).

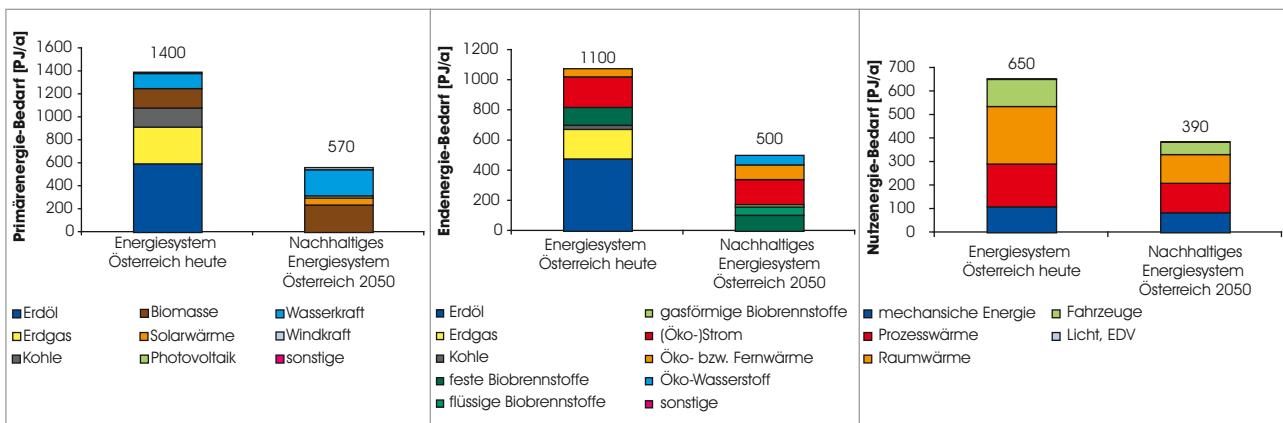


Abbildung 16: „Nachhaltiges Energiesystem Österreich 2050“ im Vergleich zum heutigen Energiesystem: Primärenergie-Bedarf (links), Endenergie-Bedarf (Mitte), Nutzenergie-Bedarf (rechts)

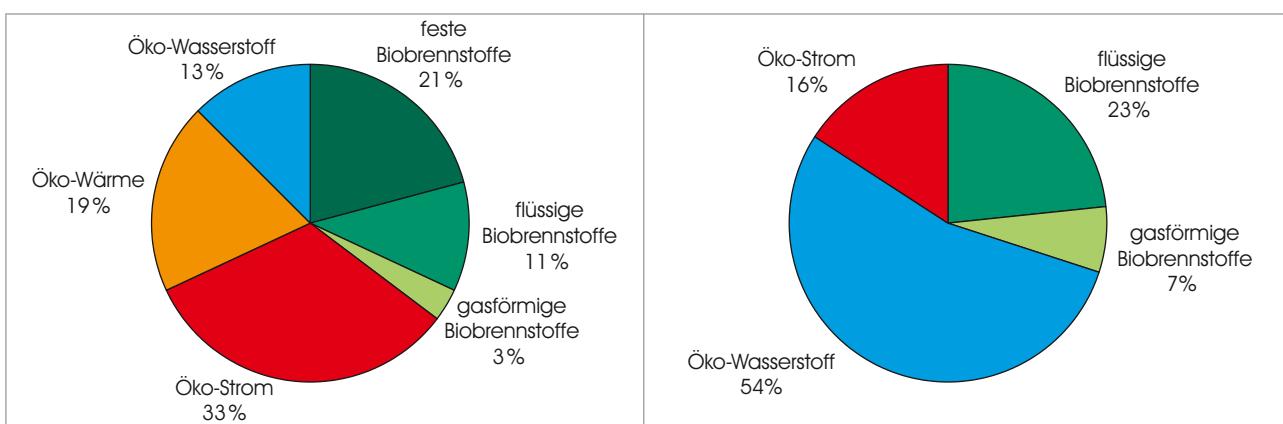


Abbildung 17: „Nachhaltigen Energiesystem Österreich 2050“: Mögliche Anteile von Öko-Wasserstoff an der gesamten Endenergie (links) und im Transportsektor (rechts)

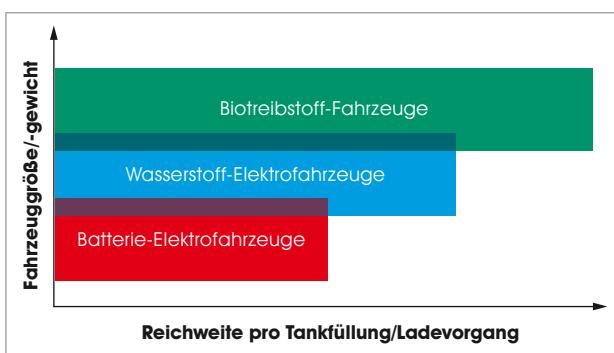


Abbildung 18: Optimale Einsatzbereiche von Öko-Strom, Biotreibstoffen und Öko-Wasserstoff in unterschiedlichen Straßenfahrzeugen

## 9.2 Mögliche Bedeutung von Öko-Wasserstoff

Die mögliche zukünftige Bedeutung von Wasserstoff aus erneuerbarer Energie in Österreich lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser mit Öko-Strom (wenn möglich unter gleichzeitiger Nutzung von Sauerstoff und Wärme) kann mittelfristig Bedeutung erlangen. In einem nachhaltigen österreichischen Energieszenario, das ausschließlich auf heimische erneuerbare Energie setzt, und das bei gleichem Energiedienstleistungsumfang einen deutlich reduzierten Endenergiebedarf aufweist, könnte der Energiebedarf des Transportsektors mit etwa 65 PJ pro Jahr zu 54 % aus Wasserstoff gedeckt werden.
- Der Einsatz von Wasserstoff im Transportsektor wird davon abhängen, ob Elektro-Fahrzeuge aufgrund erfolgreicher Batterie-Entwicklung (Lithium Ionen Batterien) den Markt erobern. Beide Technologien – die Nutzung von Wasserstoff als Treibstoff und die Li-Ionen-Batterien – sind schon lange in Entwicklung. Welche der beiden früher ausgereift sein wird, kann heute nicht abgeschätzt werden. Gewinnen Wasserstoff-Fahrzeuge nennenswerte Marktanteile, so wäre es am einfachsten, Wasserstoff durch Elektrolyse direkt an der Tankstelle zu erzeugen und die Fahrzeuge damit zu betanken. Mittelfristig könnten Wasserstoff-Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmotoren, die sowohl mit Wasserstoff als auch Benzin fahren, am Markt verfügbar sein. Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden erst nach deutlicher technologischer Weiterentwicklung und Kostenreduktion eingesetzt werden können.
- Da mittelfristig sowohl ökonomische als auch ökologische Argumente dafür sprechen, aus Biomasse flüssige und gasförmige Biotreibstoffe zu machen, hat die Wasserstoff-Erzeugung aus Biomasse erst dann eine Chance, wenn eine entsprechende Wasserstoff-Infrastruktur

bereits aufgebaut ist, und LKW und Busse zur vollständigen Feinstaub- und NO<sub>x</sub>-Reduktion in Ballungszentren emissionsfrei angetrieben werden müssen.

- Kurz- bis mittelfristig scheint eher die gasförmige Wasserstoff-Speicherung bei 350–700 bar Bedeutung zu erlangen, während erst bei der Nutzung großer Wasserstoff-Mengen eine Speicherung von flüssigem Wasserstoff bei -253 °C mit großen Verflüssigungsanlagen und einer entsprechenden Verteilinfrastruktur interessant werden könnte.
- Ergänzend könnte Wasserstoff mittelfristig als Speicher zur Verbesserung der Netzintegration von Öko-Strom und zum Lastmanagement Bedeutung erlangen. Die Rückverstromung sollte dabei mit der Nutzung von Öko-Wasserstoff als Fahrzeug-Treibstoff kombiniert werden.
- Die stationäre gekoppelte Strom- und Wärme-Erzeugung aus Öko-Wasserstoff könnte in Nischenanwendungen wie in Berghütten Verwendungsbereiche finden.
- Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ist die Einführung einer umfassenden Wasserstoff-Wirtschaft in den nächsten Jahren nicht zu erwarten, da die direkte Nutzung erneuerbarer Energie derzeit technisch, ökonomisch und ökologisch günstiger ist.
- Um die mittel- bis langfristig gegebenen Potenziale nutzen zu können, sind Aufwendungen für Forschung, Weiterentwicklung und Demonstration von Öko-Wasserstoff-Technologien notwendig, die in das internationale Umfeld eingebunden sind. Beispiele dafür sind die European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP) und Joint Technology Initiative (JTI), Hydrogen Implementing Agreement (HIA) der internationalen Energieagentur (IEA), European Hydrogen Association (EHA) und International Partnership on Hydrogen Economy (IPHE)



## 10. DATENBLATT WASSERSTOFF

### Kennwerte Wasserstoff

<b>Dichte:</b>	0,0899 kg/Nm <sup>3</sup> 0,07079 kg/l	(gasförmig) (flüssig)
<b>Verdampfungstemperatur:</b>	20,390 K (-253 °C)	(bei 1,01325 bar)
<b>Unterer Heizwert:</b> (ohne Nutzung der Kondensationswärme)	3,00 kWh/Nm <sup>3</sup> 2,36 kWh/l 33,33 kWh/kg	10,80 MJ/Nm <sup>3</sup> 8,49 MJ/l 119,99 MJ/kg
<b>Oberer Heizwert:</b> (mit Nutzung der Kondensationswärme)	3,54 kWh/Nm <sup>3</sup> 2,79 kWh/l 39,41 kWh/kg	12,75 MJ/Nm <sup>3</sup> 10,04 MJ/l 141,86 MJ/kg

1 Nm<sup>3</sup> entspricht jener Menge eines Gases, das bei 1 atm (1,01325 bar) Druck, einer Temperatur von 0 °C und einer Gasfeuchte von 0 % in einem Würfel von 1 m Kantenlänge enthalten ist.

### Energiedichten verschiedener Energieträger

Basierend auf unterem Heizwert

<b>Erdgas (gasförmig)</b>	0,099 kWh/l	13,62 kWh/kg
<b>Wasserstoff (gasförmig)</b>	0,030 kWh/l	33,33 kWh/kg
<b>Wasserstoff (flüssig)</b>	2,36 kWh/l	33,33 kWh/kg
<b>Diesel</b>	9,8 kWh/l	11,78 kWh/kg
<b>Benzin</b>	8,6 kWh/l	11,59 kWh/kg

Der Energieinhalt von:

- 1 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff entspricht 0,35 l Benzin bzw. 0,31 Nm<sup>3</sup> Erdgas
- 1 l flüssige Wasserstoff entspricht 0,27 l Benzin
- 1 kg Wasserstoff entspricht 2,88 kg Benzin

# ERNEUERBARER WASSERSTOFF IN ÖSTERREICH

## Technologien, Einsatzbereiche und energiewirtschaftliche Perspektiven

März 2009

### Kontakt

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH  
Institut für Energieforschung

Elisabethstraße 5, 8010 Graz, Austria

Tel. +43 316 876-13 38  
Fax +43 316 876-13 20

[ief@joanneum.at](mailto:ief@joanneum.at)  
[www.joanneum.at/ief](http://www.joanneum.at/ief)

### Bildquellen

- › BMW AG
- › Honda Motor Co., Ltd.
- › HyCentA GmbH
- › JOANNEUM RESEARCH  
Forschungsgesellschaft mbH
- › National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- › Proton Energy Systems
- › Hydrogensolar.com
- › Treibacher Industrie AG

### Mitarbeit

G. Jungmeier, J. Spitzer, T. Schaffer, U. Jungmeier-Scholz,  
K. Könighofer, A. Wenzel, A. Baumgartner †, E. Wahlmüller,  
M. Klell, J. Schodl, M. Beermann

*In Erinnerung an unseren Freund, Kollegen und  
Mitstreiter für eine bessere Energiezukunft  
Armin Baumgartner (1961–2009)*

### Literatur

- › Studie Wasserstoff aus erneuerbarer Energie in Österreich  
[http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw\\_pdf/0640\\_oeko-wasserstoff.pdf](http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/0640_oeko-wasserstoff.pdf)
- › Proceedings zu den österreichischen  
Wasserstoff-Konferenzen  
<http://www.joanneum.at/ief/wasserstoff>
- › Proceeding zum «1st International Symposium on  
Hydrogen Combustion Engines»  
<http://vkm-thd.tugraz.at>

### Weblinks zum Thema

- › [www.energiesystemederzukunft.at](http://www.energiesystemederzukunft.at)
- › [www.ffg.at](http://www.ffg.at)
- › [www.hfpeurope.org](http://www.hfpeurope.org)
- › [www.ieahia.org](http://www.ieahia.org)
- › [www.hycenta.at](http://www.hycenta.at)
- › [www.iphe.org](http://www.iphe.org)
- › [www.joanneum.at](http://www.joanneum.at)
- › [www.A3PS.at](http://www.A3PS.at)

Diese Broschüre wurde im Rahmen der  
«HyCentA Informationsplattform Wasserstoff» von der  
JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH  
erstellt.

### Kooperationspartner

Bei der Erstellung dieser Broschüre haben folgende Organisationen mitgewirkt:



Netzwerk Öko-Energie Steiermark  
[www.noest.or.at](http://www.noest.or.at)



HyCentA Research GmbH  
[www.hycenta.tugraz.at](http://www.hycenta.tugraz.at)



LandesEnergieVerein Steiermark  
[www.lev.at](http://www.lev.at)



**JOANNEUM RESEARCH**  
**Forschungsgesellschaft mbh**  
**Institut für Energieforschung**

Elisabethstraße 5/1  
8010 Graz

Tel. +43 316 876-13 38  
Fax +43 316 876-13 20  
[ief@joanneum.at](mailto:ief@joanneum.at)  
[www.joanneum.at/ief](http://www.joanneum.at/ief)