

# **Wasserstoff verhindert die Energiewende**

## **Eine umfassende Energiebetrachtung**

**Ulf Bossel**

**PhD. (UC Berkeley), Dipl. Mach. Ing. (ETH Zürich)**

**Nachhaltige Energielösungen**

**Morgenacherstrasse 2F**

**CH-5452 Oberrohrdorf / Schweiz**

15. Juni 2021

Klima- und Umweltbündnis

Stuttgart

Das bin ich:

# Ulf Bossel

Dipl. Ing., ETH Zürich, Schweiz (1961)

Aerodynamik, Thermodynamik, Energietechnik

Ph.D., University of California, Berkeley (1968)

Raumfahrtaerodynamik, Molekularstrahlen

Assistant Professor, Syracuse University (1968-1970)

Mechanical and Aerospace Engineering

Gruppenleiter, DLR, Göttingen (1970-1979)

Freimolekulare Strömungen, Satellitenaerodynamik

Mitbegründer und Präsident der DGS (1975)

Gründer und Geschäftsführer der SOLENTEC GmbH (1978)

Erneuerbare Energie und rationelle Energienutzung

Projektleiter Brennstoffzelle, ABB Schweiz (1986-1990)

Leiter der weltweiten BZ-Aktivitäten des Konzerns

Berater für nachhaltige Energielösungen und Brennstoffzellen (1990 bis heute)

Gründer und Veranstalter des European Fuel Cell Forum (1994 bis 2010)

Inhaber und Geschäftsführer der ALMUS AG (Brennstoffzellen)



# Die Europäische Wasserstoff-Vision

European Commission High Level Group draft report (v4.8 1/04/03)  
HYDROGEN ENERGY AND FUEL CELLS – A VISION OF OUR FUTURE  
[http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/hlg\\_interim\\_report\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/hlg_interim_report_en.pdf)

## 1. Bestehende Strukturen:

Die Stromverteilung funktioniert bestens.  
Wasserstoffinfrastruktur muss geschaffen werden

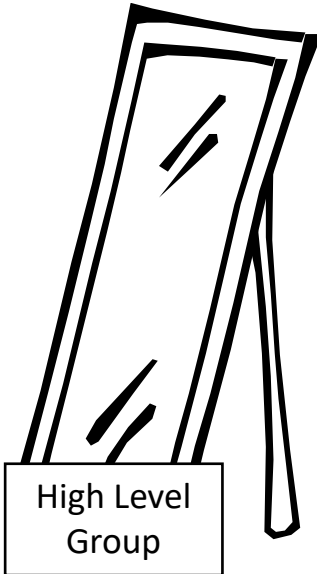
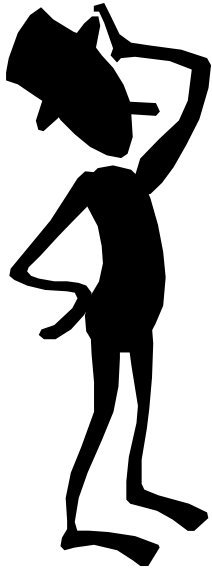


## 2. Energiequelle: Woher kommt der Strom? Erneuerbar oder Atom? Menge? Kosten?



3. Vergleichende Energiebilanz: Gleiche „grüne“ Strommenge für 3 Häuser mit Netzstrom und Wärmepumpe aber nur für 1 Haus mit Wasserstoff und Brennstoffzellen-Heizgerät

# Energiepolitik nach dem „Schneewittchen-Prinzip“



**Spieglein, Spieglein an der Wand:  
Welch' Energie für unser Land?**

**O Herr, ihr seid der König hier,  
nur Wasserstoff empfehlen wir!**

(Aber hinter den sieben Bergen bei den sieben Zwergen findet man vielleicht - hoffentlich bald und so Gott will - auch die benötigte Energie dafür.)



Die Antwort darf nicht verwundern, denn gefragt wurden:

**Hersteller** (Wasserstoff und die Technik dafür ist unser Geschäft)

**Wasserstoffverbände** (Wasserstoff ist unser satzungsgemässer Vereinszweck)

**Energieversorger** (Wasserstoff erhöht die Nachfrage nach Energie)

**Lehre und Forschung** (Wasserstoff bringt uns neue Forschungsaufträge)

**Energieberater** (Wasserstoff verschafft neuen Beratungsbedarf)

**Journalisten** (Wasserstoff ist für uns ein heisses Thema)

**Umweltverbände** (Wasserstoff + Luft = Energie + Trinkwasser, kein CO<sub>2</sub>, perfekt)

# Das grosse Ziel der Energiewende: Nachhaltige und saubere Energieversorgung

Zwei unabdingbare Voraussetzungen hierfür:

**1.**

**Nachhaltige Energiegewinnung  
aus erneuerbaren Quellen**

(Sonne, Wind, Wasserkraft, Geothermie, Biomasse usw.)

**2.**

**Rationellster Umgang mit Energie  
von der Quelle bis zur Nutzung**

# Nachhaltig gewonnene Energie

## Chemische Energie

Natürlich gewachsen	Biomasse
Landwirtschaftlicher Anbau	Biomasse
Organische Abfälle	Biomasse

**20% des Energiebedarfs**

## Physikalische Energie

Wind	Strom
Sonne (Photovoltaik , Solarthermik)	Strom und Wärme
Geothermie	Strom und Wärme
Wasserkraft, Wellen, Tidenhub	Strom

**80% des Energiebedarfs**

Physikalische Naturenergie wird fast ausschliesslich als Strom “geerntet”

**Elektrizität wird zur Basisenergie,  
die direkt verteilt und genutzt werden kann,  
oder in Wasserstoff verwandelt, so verteilt  
und in Strom zurückverwandelt werden muss.**

# „Erzeugung“ von „Wasserstoff - Energie“

Unsinn: Wasserstoff ist lediglich ein Energieträger

Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet, sondern nur umgewandelt werden!

## 1. Wasserstoff aus Wasser durch Elektrolyse



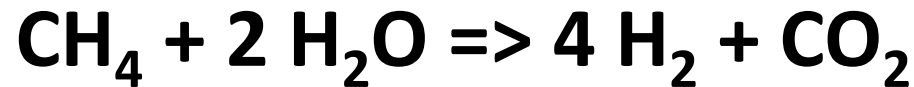
elektrische Energie + H<sub>2</sub>O  
286 kJ/mol  
100%

= Wasserstoff-Energie + ½ O<sub>2</sub>  
= 286 kJ/mol  
= 100%

**Realität: 130% Energiezufuhr**

**= 100% H<sub>2</sub>-Energie + 30% Verluste**

## 2. Wasserstoff aus Erdgas durch Reformierung



Methan-Energie + Wärme + H<sub>2</sub>O  
890 kJ/mol + 254 kJ/mol  
78% + 22%

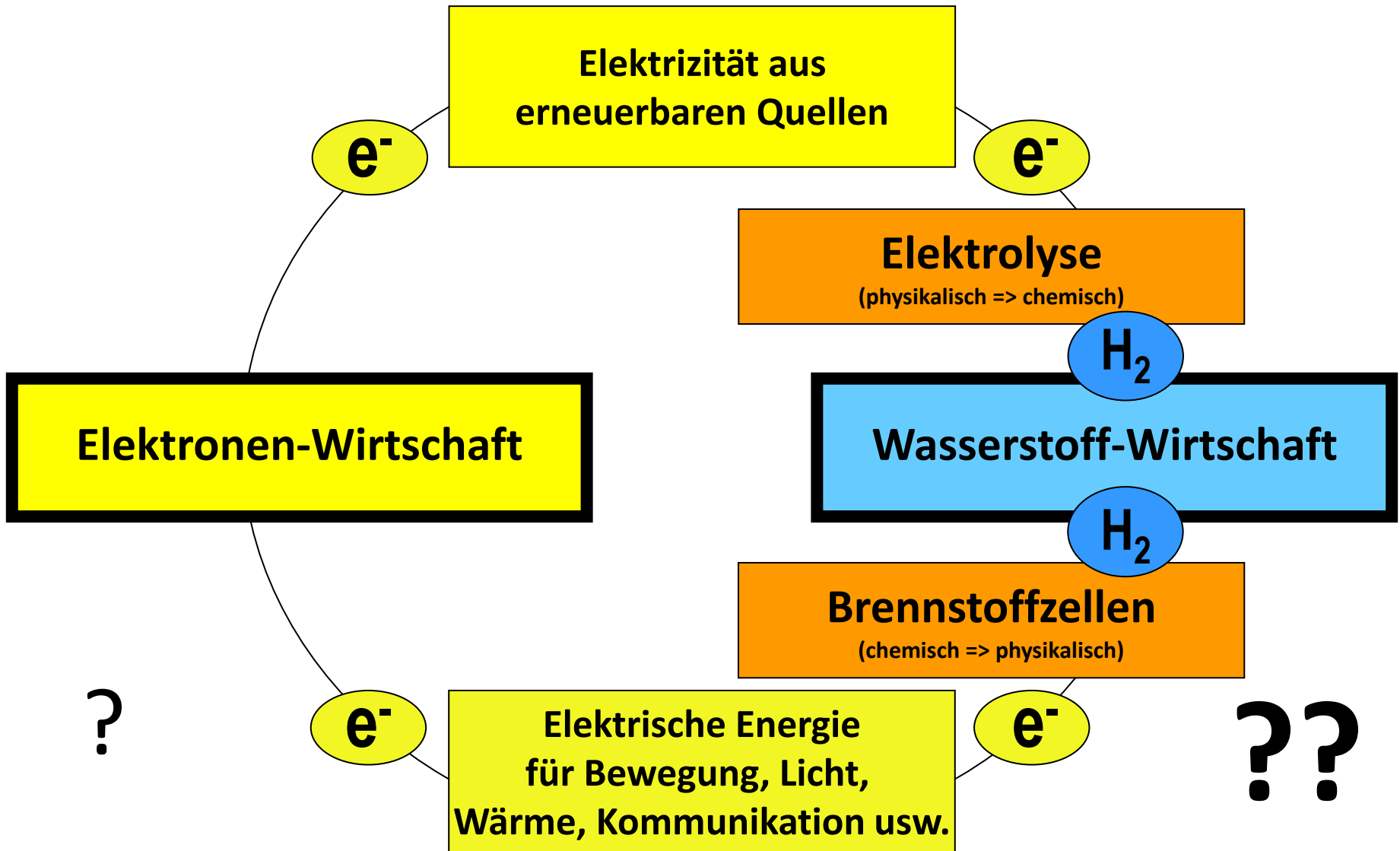
= Wasserstoff-Energie + CO<sub>2</sub>  
= (4 x 286 kJ/mol =) 1,144 kJ/mol  
= 100%

**Realität: 110% Energiezufuhr**

**= 100% H<sub>2</sub>-Energie + 10% Verluste**

# Strom zum Verbraucher

Direkt oder mit Umweg über Wasserstoff



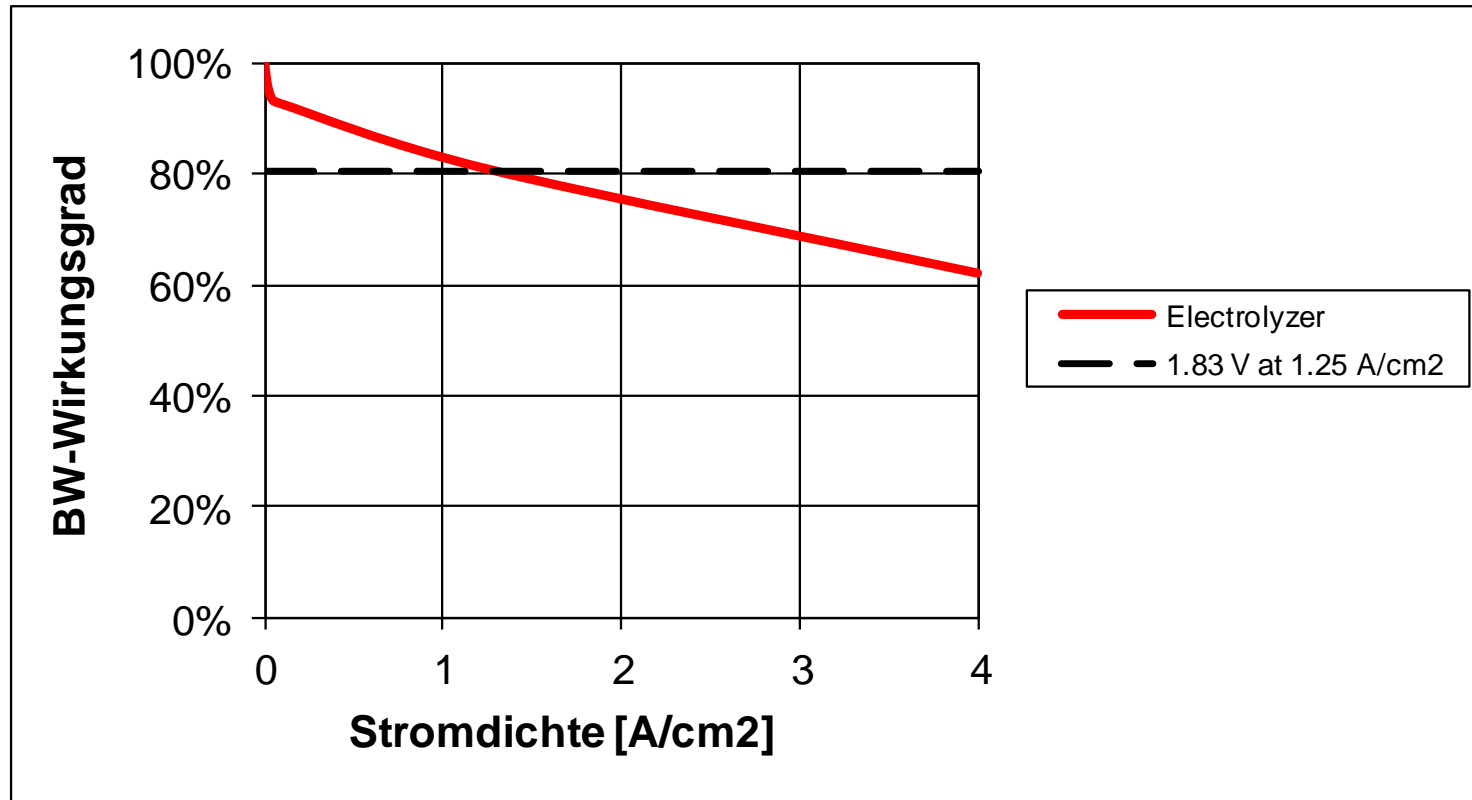


# Energieaufwand für den “Betrieb” einer Wasserstoffwirtschaft



**Wesentliche Verluste und Energiebedarf für alle notwendigen  
Stufen der Wasserstoffwirtschaft**

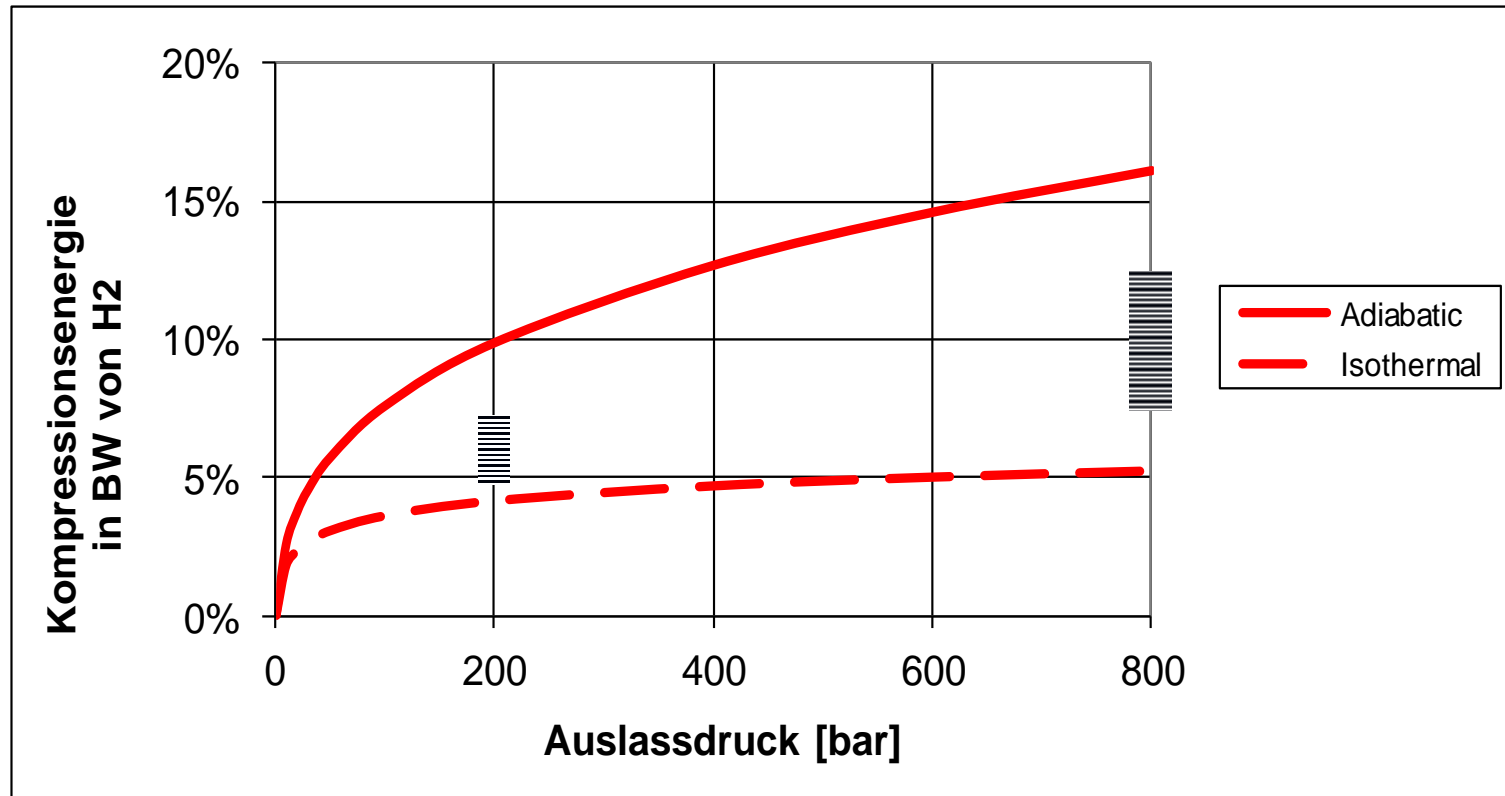
# Elektrolytische Gewinnung von Wasserstoff: Energieverluste in Brennwert-% von H<sub>2</sub>



Realistischer Wirkungsgrad der Elektrolyse 60%:

# Kompression von Wasserstoff

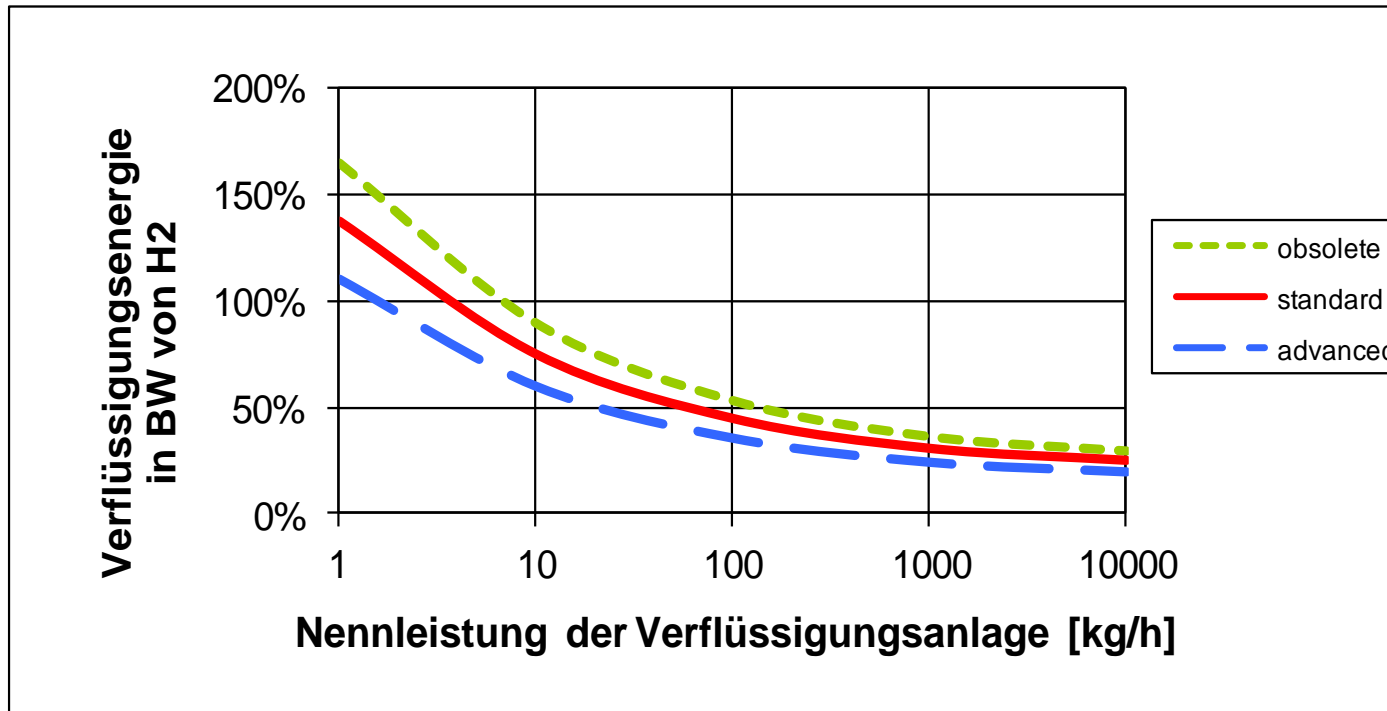
## Kompressionsenergie in Brennwert-% von H<sub>2</sub>



Kompressionsenergie für H<sub>2</sub> :  
8 mal mehr als für Erdgas, 15 mal mehr als für Luft

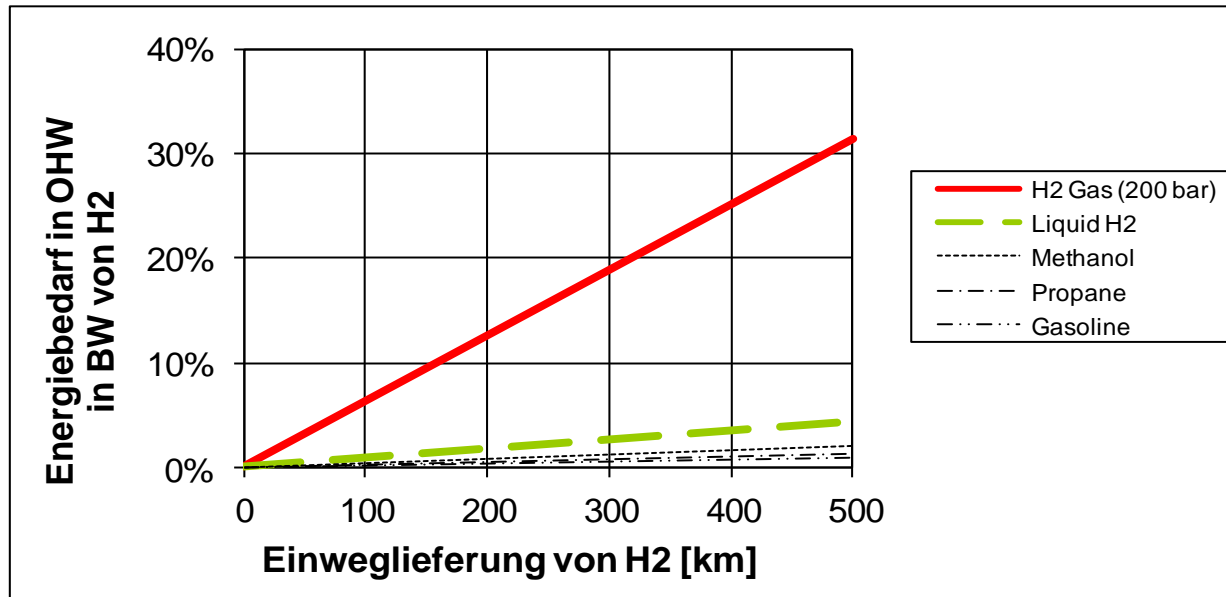
# Verflüssigung von Wasserstoff:

## Verflüssigungsenergie Brennwert-% von H<sub>2</sub>



Energiebedarf für Verflüssigung  
etwa 50% der mit Wasserstoff gelieferten

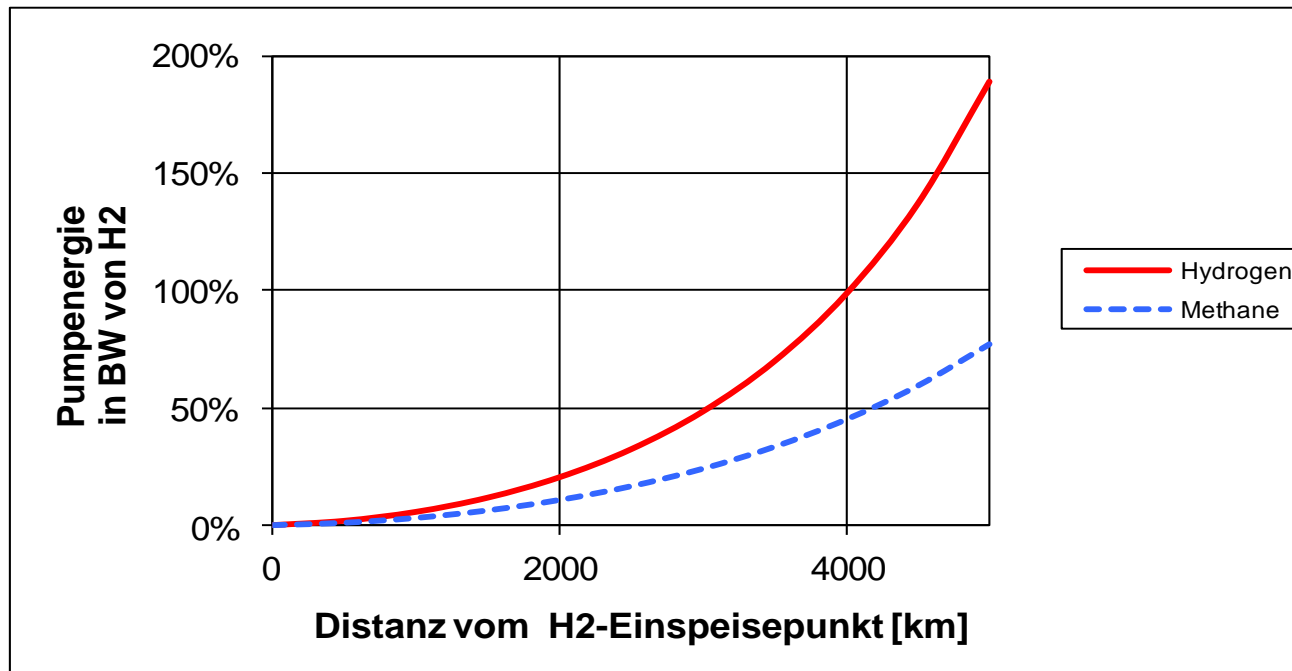
# Strassentransport von Wasserstoff: Energiebedarf in Brennwert-% von H<sub>2</sub>



16 Wasserstoffgas-(400 bar) oder 4,5 flüssig-H<sub>2</sub>-Tankwagen transportieren die gleiche Energiemenge wie ein einziger Benzin-Tankwagen

# Pipelinetransport von Wasserstoff:

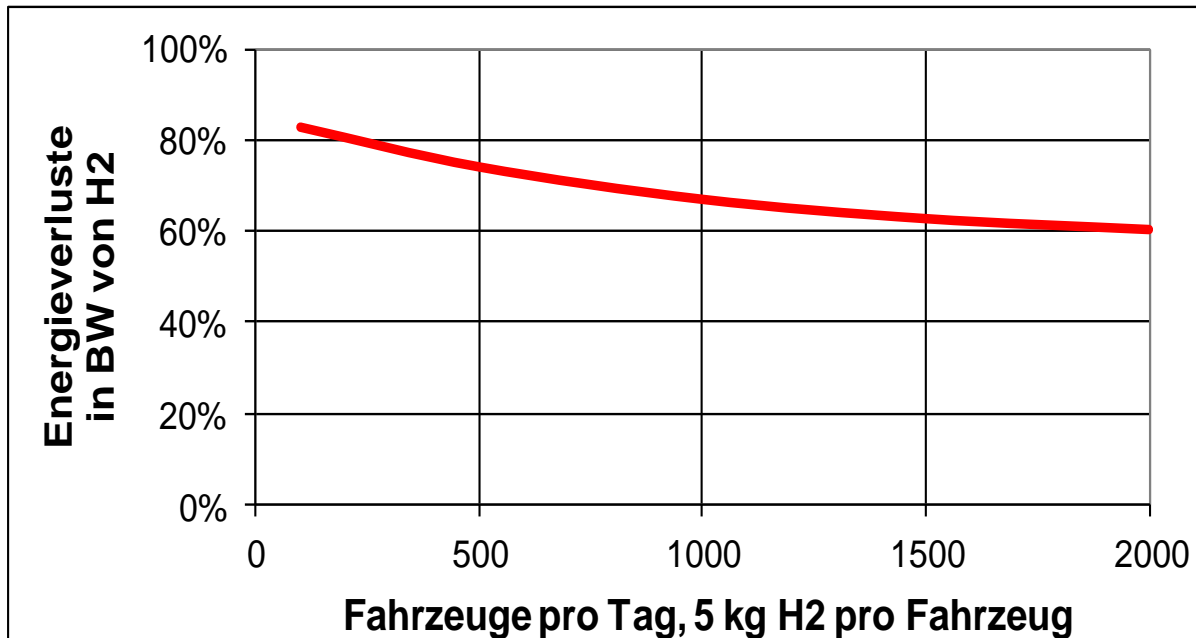
## Energiebedarf in Brennwert-% von H<sub>2</sub>



Pipelinetransport von Wasserstoff über längere Distanzen kostet viel Energie.

Erdgas-Pipelines können nicht für Wasserstoff genutzt werden

# Wasserstoff-Elektrolyse an Tankstellen : Energiebedarf in Brennwert-% von H<sub>2</sub>



Für nur 200 Fahrzeuge pro Tag:  
Anschlußleistung: 6 MW  
Wasserbedarf: 18 m<sup>3</sup> pro Tag

# Wasser- und Strombedarf für Elektrolyse



Aus 9 kg Wasser werden  
1kg Wasserstoff und 8 kg Sauerstoff

Für die elektrolytische Gewinnung von 1 kg Wasserstoff  
benötigt man 45 bis 55 kWh Strom

Energieinhalt von 1 kg H<sub>2</sub> etwa 33 kWh/kg  
Vergleich: 9.6 kWh in 1 kg Heizöl

Wirkungsgrad der Wasserelektrolyse: 60 bis 70%  
Wirkungsgrad einer guten Brennstoffzelle: 50%  
Aber erheblicher Energieaufwand oder Verluste für



# Energiebedarf für Wandlungsstufen einer Wasserstoffwirtschaft

## Energiebedarf in Brennwert-% des Wasserstoffs

### Repräsentative Werte:

Wasserstoff durch Wasserelektrolyse		50%
Verdichtung auf:	200 bar	8%
	800 bar	13%
Verflüssigung in:	kleinen Anlagen	50%
	grossen Anlagen	30%
Speicherung in Metallhydriden		60%
200 km Straßentransport	200 bar	13%
	Flüssig-H <sub>2</sub>	3%
2000 km Pipeline		20%
Elektrolyse vor Ort		50%
Umfüllen von 100 bar Tank in 700 bar Fahrzeugtank		8%
Rückwandlung in Strom mit Brennstoffzellen		50%

„The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?“ (2002)

„Wasserstoff löst keine Energieprobleme“ (2006)

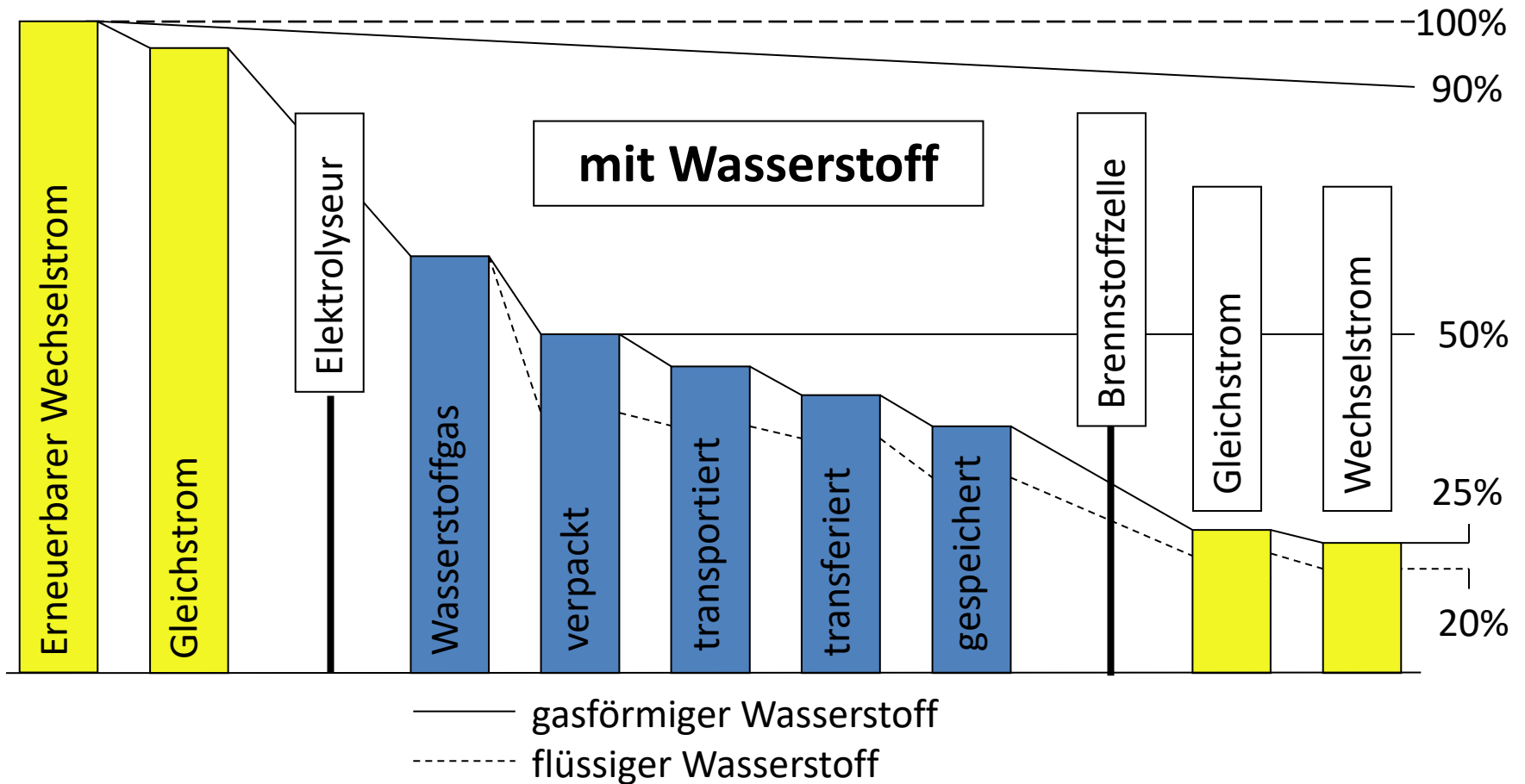
# Energieverlustkaskade

Strom von  
erneuerbaren  
Quellen

Verbraucher

mit Elektronen

mit Wasserstoff

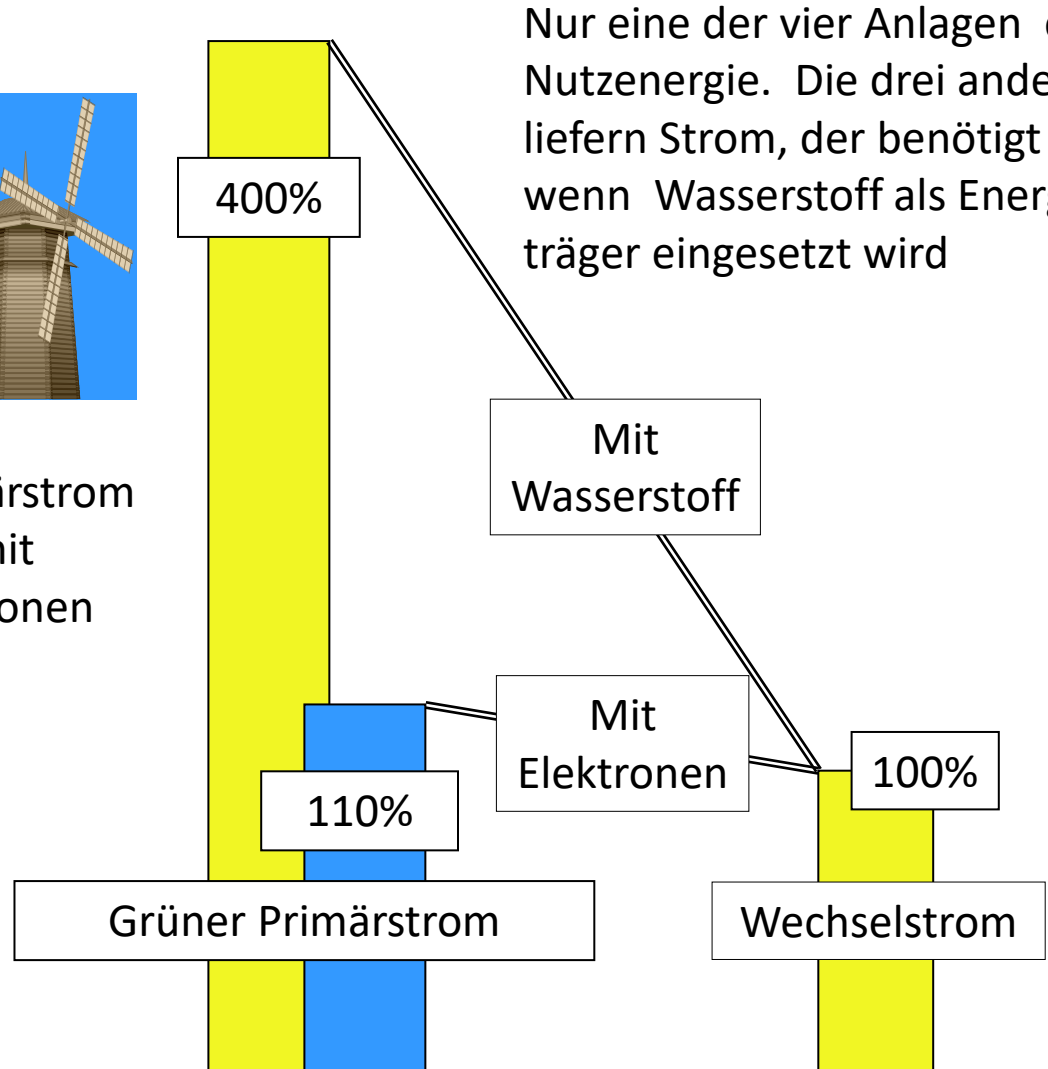


# Stromübertragung

mit Elektronen oder Wasserstoff?

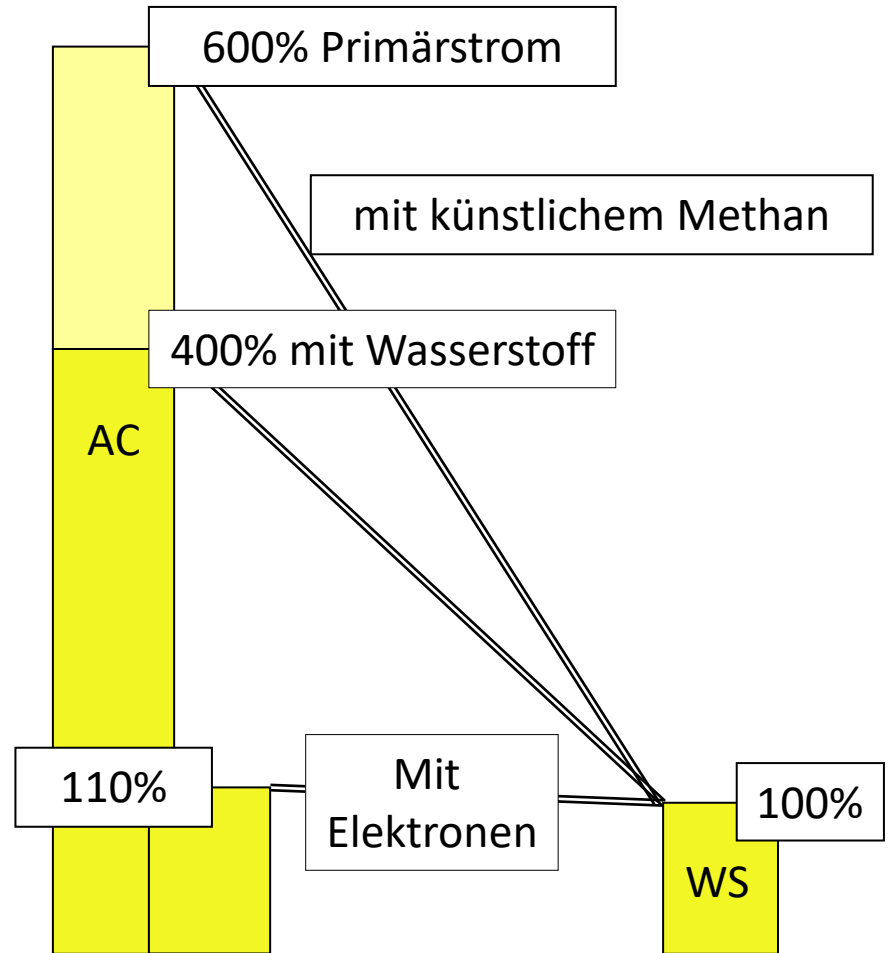
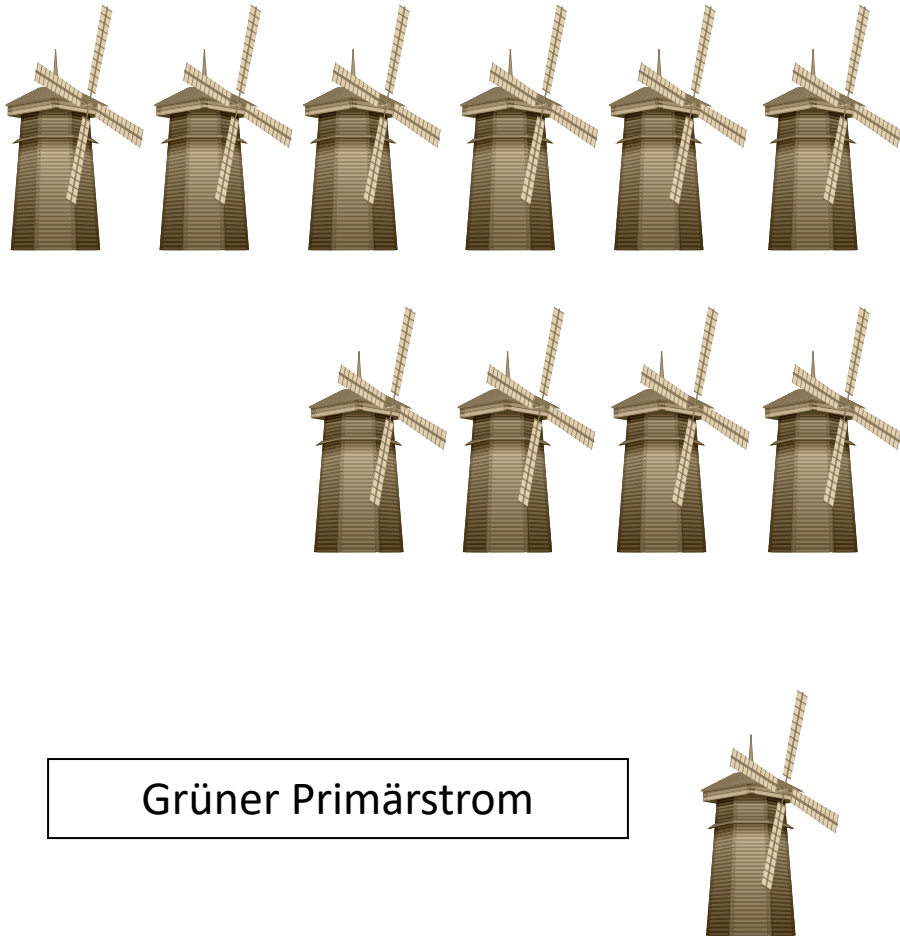


Etwa viermal mehr Primärstrom für Energieübertragung mit Wasserstoff als mit Elektronen



# Energiebedarf

## für Power-to-Gas oder Power-to-Liquid



# Straßentransportbilanz



**Ein 40 t Benzin-Tankwagen transportiert ebenso viel Energie wie 12 Wasserstoff Druckgas-Tankwagen, ebenfalls 40 Tonnen Gesamtgewicht, aber nur 700 kg Nutzlast**



# Wasserstoff-PKW: Gesamtenergiebilanz

Ein Fahrzeug mit Wasserstoff



Mit der gleichen Menge Primärstrom können vier batterie-elektrische Fahrzeuge , aber nur ein mit Wasserstoff und Brennstoffzelle betriebenes Fahrzeug gleicher Größe betrieben werden.



Vier  
Fahrzeuge  
mit  
Batterie



# Wasserbedarf



1 kg Wasserstoff trägt gleichviel Energie wie 3,5 kg Benzin

1 Tanklastwagen transportiert 30 Tonnen Benzin.

Das entspricht etwa 8,6 Tonnen Wasserstoff, für dessen Herstellung 77 Tonnen Wasser benötigt werden.

**Woher kommt das Wasser für die Wasserstoffproduktion in Wüstenregionen?**

**Transportenergiebedarf grösser als gelieferte H<sub>2</sub>-Energie**

**Bitte Spekulationen über Wasserstoffimporte beenden!**

# Dimension des Energieproblems

## Rhein-Main Flughafen Frankfurt (2004)

Ein Jumbo Jet tankt 130 t Kerosin = 50 t flüssiger Wasserstoff

**50 Jumbo Jets pro Tag**

Dafür werden benötigt:

**2,500 t = 36,000 m<sup>3</sup> flüssiger H<sub>2</sub>, hergestellt aus 22,500 m<sup>3</sup> Wasser plus gesamte Stromproduktion von etwa acht 1 GW Kraftwerken für Elektrolyse, Verflüssigung, Transport, Umfüllen usw.**

**Wenn alle 520 Flugzeuge/Tag mit Wasserstoff betankt würden:  
Wasserverbrauch der Stadt Frankfurt und Strom von 25 Kernkraftwerken**

**Energieprobleme können nicht durch Substitution fossiler Kraftstoffe durch Wasserstoff gelöst werden!**



# Schwachstellen der Wasserstoffwirtschaft

Für Versorgungskette von Primär- zu Nutzstrom

## **PHYSIKALISCH BEDINGT:**

Miserabler Gesamtwirkungsgrad

Hoher Energieaufwand

Primärenergiebedarf wird weltweit erheblich gesteigert

Energiebedarf kann nicht aus grünen Quellen gedeckt werden

Enorme Kosten für neue Infrastruktur

Es bleibt bei fossil und nuklear

Klimakatastrophe ist unvermeidbar

## **PRO GENUTZTER ENERGIEEINHEIT:**

„Grüner“ Wasserstoff-Strom immer wesentlich teurer als „grüner“ Strom

„Grüner“ Wasserstoff immer teurer als Erdgas oder Erdöl

„Grüner“ Wasserstoff-Strom teurer als Atomstrom

**Wasserstoff wird zum teuersten Energieträger**

# Kauf von Energie:

## Der Verbraucher hat die Wahl!

€1 für erneuerbare Elektrizität vom Netz

€3 für Wasserstoff aus der Leitung oder an der Tankstelle

€5 für Strom von der Wasserstoff-Brennstoffzelle

## Wie würden Sie handeln?

### Mit hoher Wahrscheinlichkeit:

Das Haus isolieren, Heizenergiebedarf minimieren  
und auf elektrische Heizung (Wärmepumpe) umrüsten

Mit einem Elektromobil, zur Arbeit fahren  
oder öffentliche Verkehrsmittel benutzen

Für lange Distanzen Autos mit effizientem Verbrenner fahren  
und bio-synthetische Flüssigkraftstoffe tanken

**aber aus Kostengründen Wasserstoff meiden!**

# Energiewende führt zur Elektronenwirtschaft

Grüner Strom in Zukunft günstigste CO<sub>2</sub>-freie Energie  
Elektrolytische Wasserstoffherzeugung mit grünem Strom

Keine wirtschaftlichen Anreize für  
Umstellung von fossilen Energieträgern und Uran auf Wasserstoff  
Wasserstoff (alle Farben) immer teurer als grüner Strom

Deshalb:

**Aufbau einer Elektronenwirtschaft sofort beginnen.**

**Wasserstoffweg = Sackgasse**

Vergeudung von Geld, Zeit, Entwicklungspotential, Ressourcen vermeiden

**Eine Wasserstoffwirtschaft wird scheitern !**

# Wasserstoffwirtschaft in Kürze

Technisch: **Alles machbar, bekannt, entwickelt**

Energetisch: **Unsinn** (als Gesamtsystem betrachtet)

Kommerziell: **Pleite** (Wasserstoff immer teurer als Erdgas.  
Fossile Energie kann nicht durch  
Wasserstoff verdrängt werden)

Ökologisch: **Katastrophe** (CO<sub>2</sub>-Problem bleibt ungelöst)

**Wasserstoff verhindert die Energiewende**

**Die Energiezukunft ist ELEKTRISCH**

# Elektronenwirtschaft: ... danach lasst uns alle streben , brüderlich ...

Dank für Ihre Aufmerksamkeit  
Fragen?

A photograph of a wind turbine in a landscape. The turbine is the central focus, with its three blades extending outwards. The background shows a range of mountains under a clear sky. The foreground is a dark, silhouetted line of trees.

Wasserstoff löst keine Energieprobleme, Ulf Bossel, 2006  
Leibnitz Institut für Technologiefolgeabschätzungen