

Wasserstoff, der Wunderstoff für die Energiewende?

Vortrag im Rahmen des
Kolloquiums „Optische Technologien“
an der FH Münster, Campus Steinfurt
am 10.11.2021 um 17:00

Prof. Dr.-Ing. Olaf Goebel
Hochschule Hamm-Lippstadt

Das Element Wasserstoff



- Symbol: H (lat. hydrogenum, engl. hydrogen)
- Ordnungszahl: 1
- Atomgewicht: 1 (ca. 14 mal leichter als Luft)
- Wasserstoff kommt kaum atomar (als H), sondern meist molekular als H_2 vor.
- Wasserstoff kommt auf der Erde so gut wie nie nicht frei vor, sondern **fast immer in gebundener Form**: z.B.
 - Wasser: H_2O
 - Methan: CH_4
 - In allen anderen fossilen Brennstoffen, wie Öl und Kohle
- D.h. Wasserstoff muss irgendwie erzeugt werden.

Noch eine ganz wichtige Zahl:

- **Heizwert von H_2 : 33,3 kWh/kg**
(ca. 3 mal höher als Öl)

Wasserstoff kann auf zwei verschiedenen Wegen gewonnen werden:

- 1) Aus fossilen Brennstoffen (Gas, Öl, Kohle)
- 2) Durch Elektrolyse

- Die fossilen Brennstoffe, Kohle, Öl und Gas sind **Kohlenwasserstoffe**. Wie der Name suggeriert, bestehen sie aus Kohlenstoff, C und Wasserstoff, H.
- Durch geeignete chemische Prozesse kann der Wasserstoff herausgelöst werden.
- Beispiel **Erdgas**, CH₄: Hier benutzt man die Dampfreformierung
$$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$$
 und dann: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- D.h. durch Zufuhr von Wasser (2 x H₂O) und Energie erhält man aus einem Molekül CH₄ vier Moleküle H₂
- Weltweit (und in Deutschland) wird **mehr als 95%** des Wasserstoffes heute **noch aus fossilen Brennstoffen** gewonnen.
- **Kosten: 1,50 € / kg** (@ Erdgaspreis von 2,5 cent/kWh = 7 €/GJ)
- Knapp 5% des deutschen Erdgasverbrauchs für H₂-Herstellung

- Durch Anlegen einer elektrischen Spannung in Wasser sammelt sich am Pluspol (Anode) Sauerstoff und am Minuspol (Kathode) Wasserstoff. (Der dazugehörige Apparat heißt **Elektrolyseur**.)
- Es gibt verschiedene Elektrolyseur-Typen, z.B.:
 - Alkalische Elektrolyse
 - PEM-Elektrolyse
- Wirkungsgrad ca. 70%*
- Strombedarf: 45* kWh/kg
- **Weniger als 5%** des Wasserstoffes wird heute **durch Elektrolyse** gewonnen

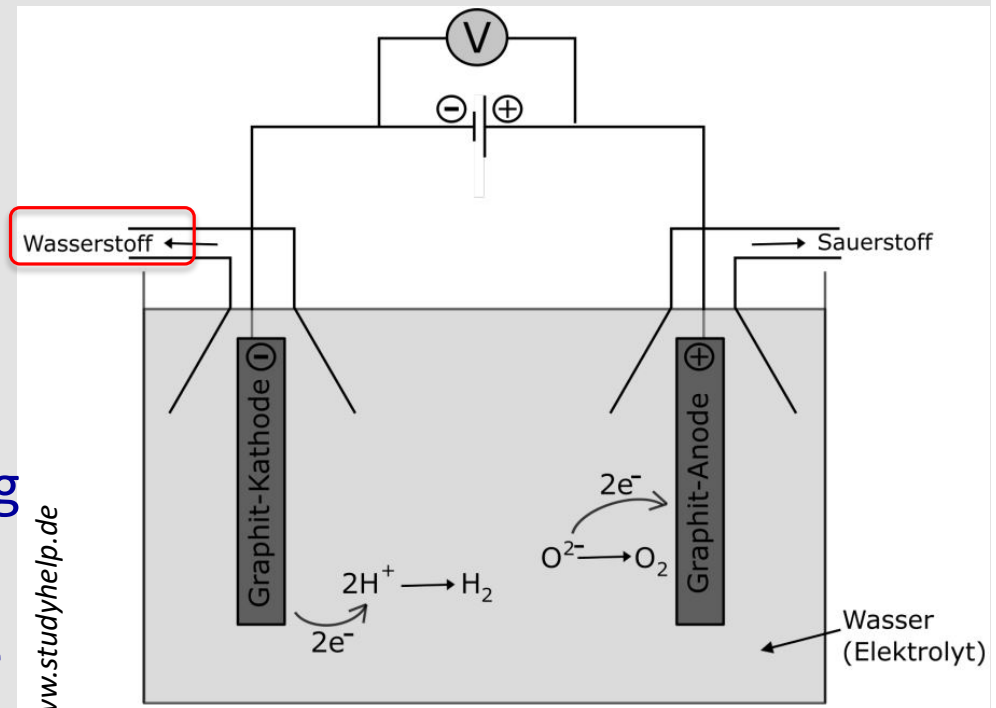


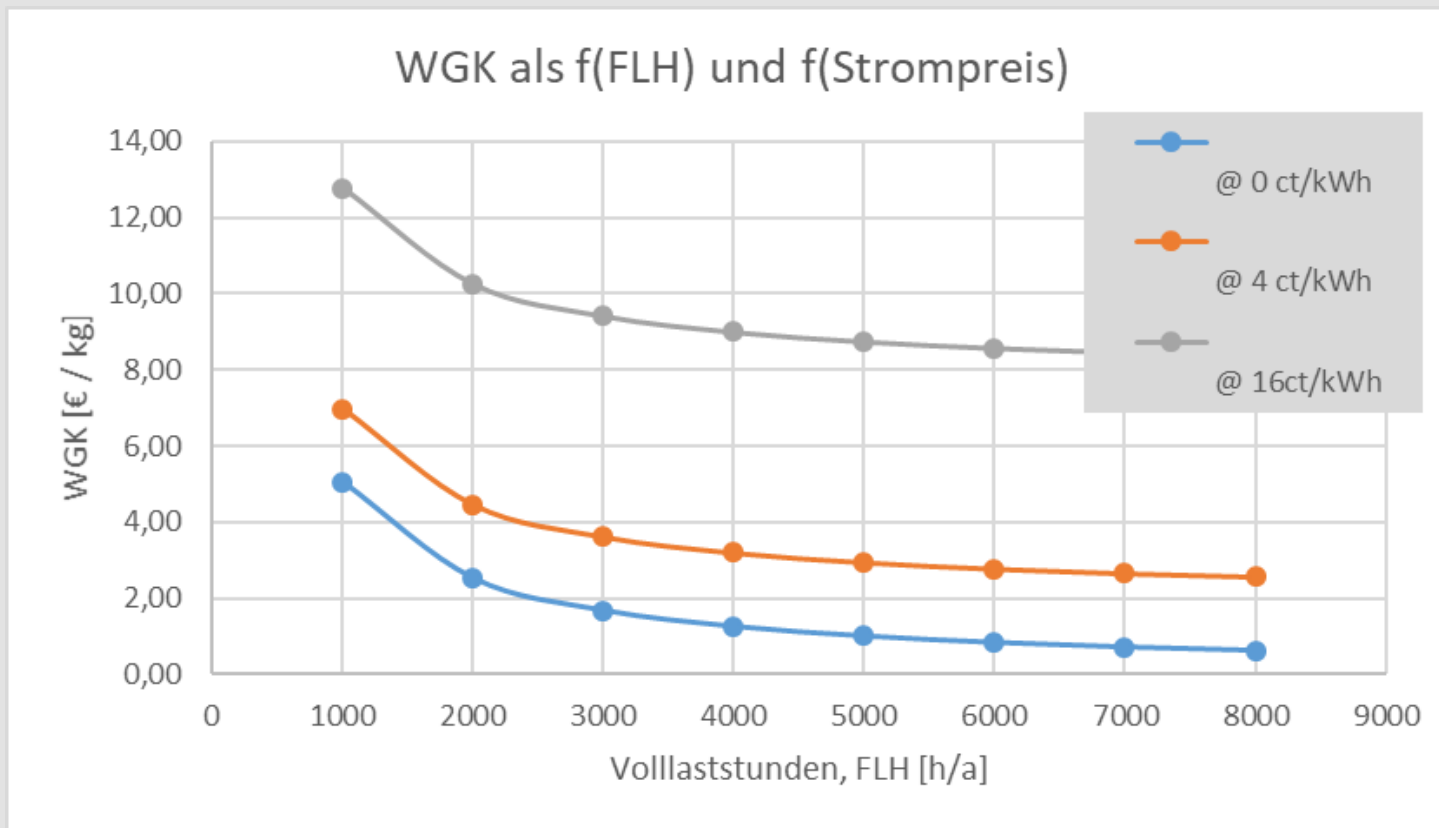
Bild: www.studyhelp.de

* ohne Kompressionsenergie

Wasserstoffgestehungskosten, WGK

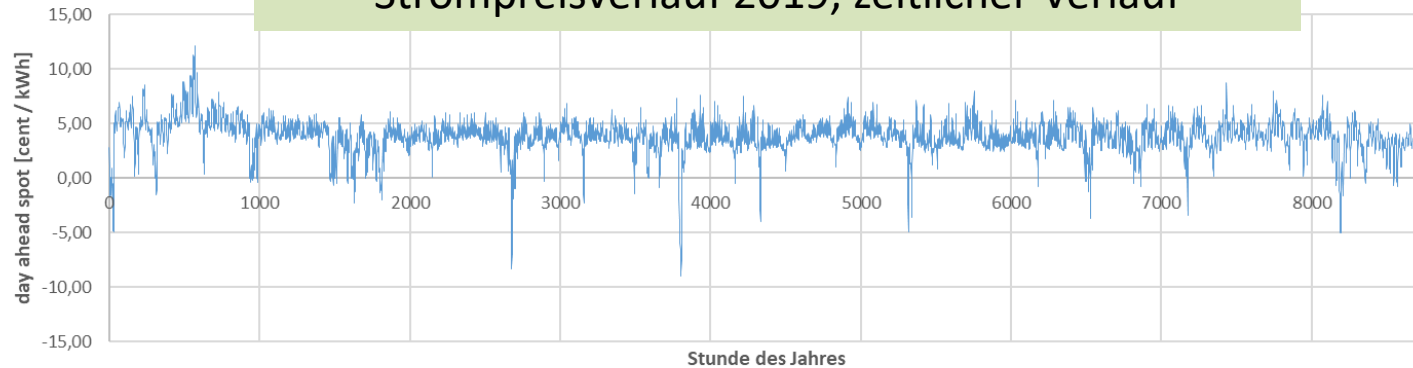
in Abhängigkeit der **Volllaststunden** und des **Strompreises**

Annahmen: *Elektrolyseur = 1000 €/kW, Annuität = 8,44 % p.a., O&M = 2% vom Capex*

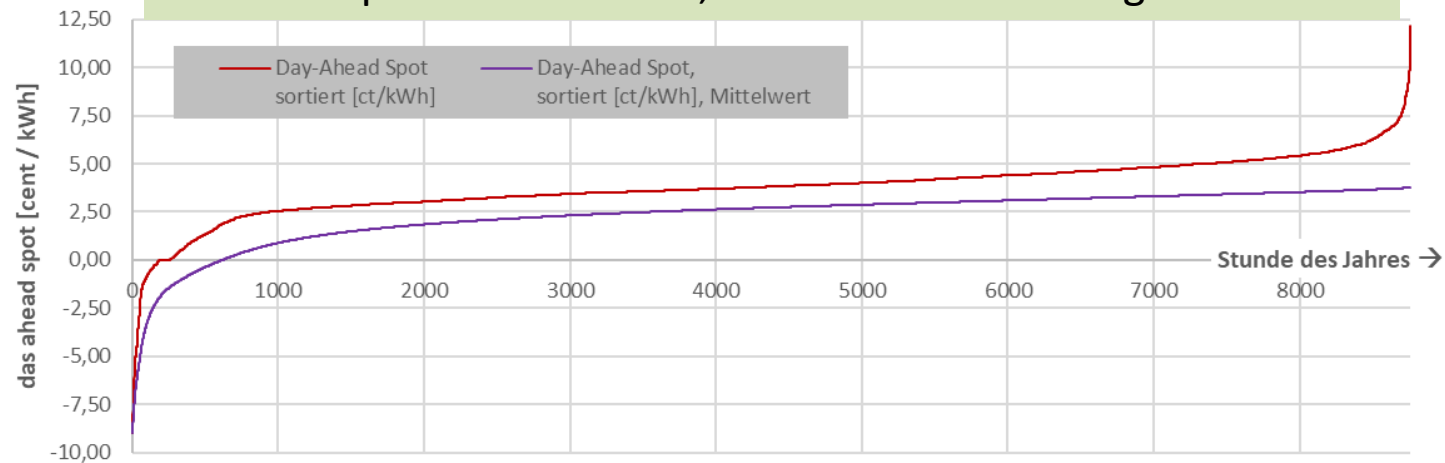


Wasserstoffgestehungskosten, WGK

Strompreisverlauf 2019, zeitlicher Verlauf



Strompreisverlauf 2019, sortiert und sortiert-gemittelt

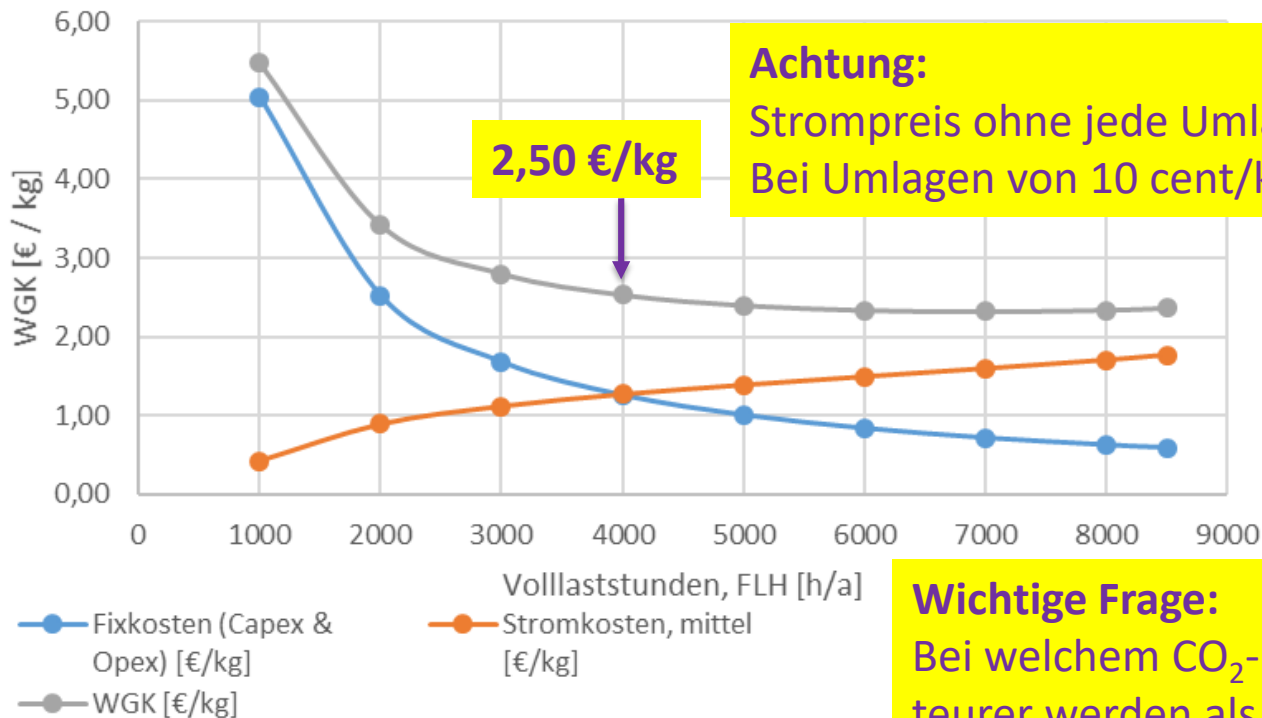


Wasserstoffgestehungskosten, WGK

WGK mit den Strompreisen von 2019 (day ahead spot),

Annahmen: Elektrolyseur = 1000 €/kW, Annuität = 8,44 % p.a., O&M = 2% vom Capex

WGK als f(FLH) bei (Börsen-)Strompreisen von 2019



Achtung:

Strompreis ohne jede Umlage!

Bei Umlagen von 10 cent/kWh => WGK + 5 €/kg

Wichtige Frage:

Bei welchem CO₂-Preis würde H₂ aus Erdgas teurer werden als 2,50 €/kg?

Antwort: bei 180 €/t (bei einem Gas-Grundpreis von 2,5 cent / kWh)

Wasserstoff kann auf zwei verschiedenen Wegen transportiert werden:

- 1) Mit Pipelines (gasförmig)
- 2) Mit Fahrzeugen (gasförmig oder flüssig)

Wegen seiner geringen Dichte muss der Wasserstoff vor dem Transport entweder

- verdichtet*
- oder verflüssigt** werden.

** verbraucht ca. 10% der enthaltenen Energie*

*** verbraucht ca. 30% der enthaltenen Energie*

Transport durch Pipelines:

- Eine Pipeline erfordert eine **hohe Anfangsinvestition**.
- Diese **lohnt sich** nur, wenn **große Mengen** transportiert werden (hohe Auslastung).
- Diese hohe Auslastung wird zu Anfang der Wasserstoffwirtschaft nur an wenigen Orten vorliegen.
- Sie ist aber **im Betrieb billiger** als der Transport per LKW.
- Es gibt ein H₂-Pipelinennetz, das das Ruhrgebiet mit Köln verbindet (**seit den 1930er Jahren**). (p = 25 bar, Druckgas)
- Bei Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff transportiert die Pipeline entweder **94%** der ursprünglichen Energiemenge (gleicher Druckverlust, aber 2,8-facher Energieverbrauch) oder **75%** (gleicher Energieverbrauch)

Transport durch LKW:

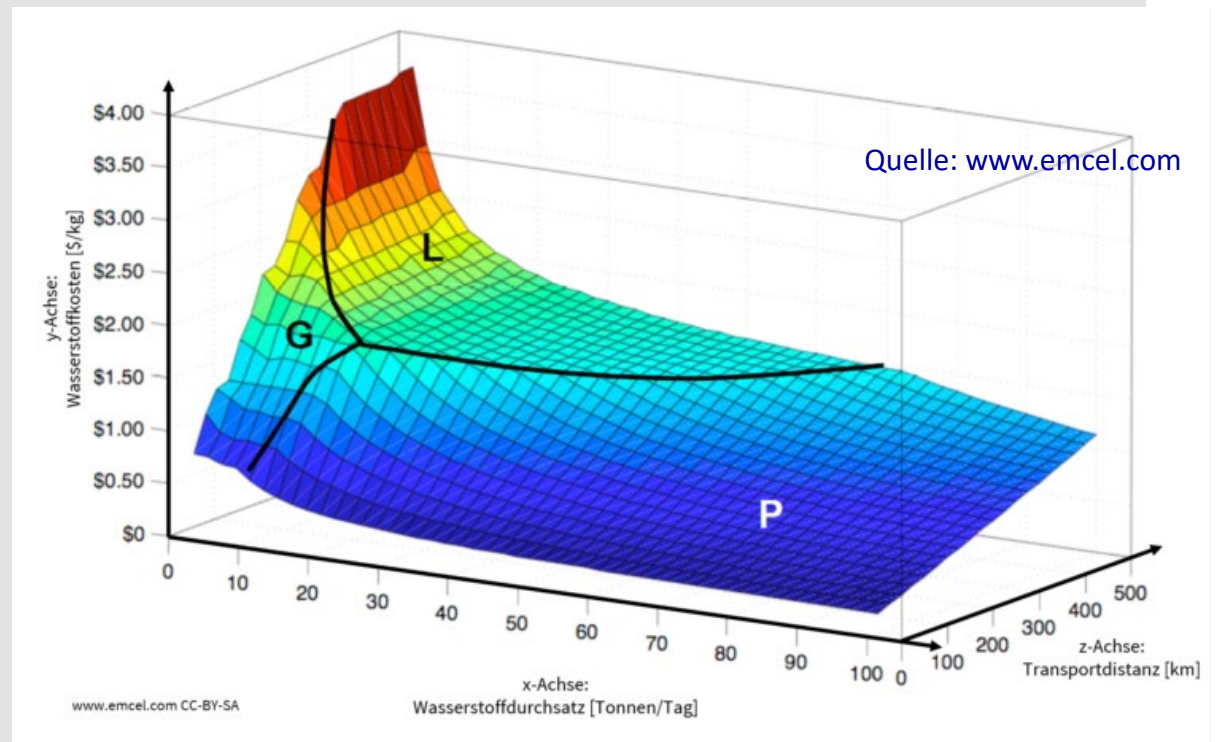
- Auf LKW's kann Wasserstoff als Druckgas (üblicherweise 200 bar) oder flüssig transportiert werden.
- Bei **Druckgas** transportiert der oben abgebildete **LKW 0,6 t Wasserstoff**, während die Stahltanks ca. 22t wiegen. Neuere Modelle transportieren auch bis zu einer t Wasserstoff.
- Bei **Flüssigwasserstoff** transportiert ein **LKW 2,5 t Wasserstoff** (unteres Bild)
- Ein Öltanklastwagen transportiert 25 t Öl, Diesel oder Benzin.
- Auch unter Berücksichtigung des höheren Heizwertes von Wasserstoff bringt ein Druckgas-LKW **10 mal weniger Energie als ein Öltanklastwagen**.



Graphische Darstellung Transportkosten:

- **P** = Pipeline
- **G** = Transport LKW, gasförmig
- **L** = Transport LKW, flüssig

Der Transport von Wasserstoff (H₂) per Wasserstoff**pipeline** ist im Vergleich zum Transport per Lkw dann besonders wirtschaftlich, wenn **große Mengen** Wasserstoff transportiert werden sollen. Bei kürzeren Transportdistanzen hat der Lkw Kostenvorteile.



Zur Einschätzung der Kosten können Diagramme genutzt werden, die der obigen Darstellung gleichen. Es werden drei Wasserstofftransport-varianten verglichen: der Wasserstofftransport per Lkw (flüssig und gasförmig) sowie dem Transport per Pipeline (gasförmig).

Die Nutzungsmöglichkeiten lassen sich in drei Gruppen einteilen:

1. Stoffliche Nutzung (z.B. chemische Prozesse, *in Zukunft auch:* Stahl- oder Zementherstellung)
2. Energiespeicher (also Strom → Wasserstoff → Strom)
3. Als Treibstoff für Fahrzeuge

Stoffliche Nutzung:

- Der **heutige Wasserstoffverbrauch** der Industrie in Deutschland beträgt ca. 19 Mrd. Nm³. (Normalsiedendruck, 0°C)
- Das entspricht einem Energiegehalt von ca. 1,2 TWh.
- Um diese Menge Wasserstoff zu erzeugen, benötigt man **81 TWh Strom**. (bei $\eta_{\text{Elektrolyse}} = 70\%$)
- Das entspricht ca. 10% des **heutigen deutschen Stromerzeugungsbedarfes**.
- Bei 4000 Stunden benötigt man dafür eine **Elektrizitätsgenerationskapazität von 20 GW**. ($80\,000\text{ GWh} / 4000\text{ h} = 20\text{ GW}$)
D.h. die stoffliche Nutzung wird die erste große Nutzung von grünem Wasserstoff sein. Bevor deren Bedarf nicht gedeckt ist, braucht man sich um andere Nutzer eigentlich nicht bemühen.
- Wenn auch die Stahl- und Zementherstellung auf Wasserstoff umsteigt, erhöht sich der Bedarf weiter.

Wasserstoff als Energiespeicher:

Wirkungsgradkette H₂ (*gasförmig*) bei der Stromspeicherung:

Energieform	Prozessschritt
100 kWh _{el}	
	Elektrolyse mit $\eta = 75\%$
75 kWh in 2,25 kg H ₂	
	Verdichtung* mit Stromaufwand von 6,75 kWh _{el} * auf 200 bar (3 kWh / kg)
75 kWh in 2,25 kg H ₂	
	Verstromung in GuD oder BZ* mit $\eta = 60\%$ *BZ = Brennstoffzelle
45 kWh _{el}	

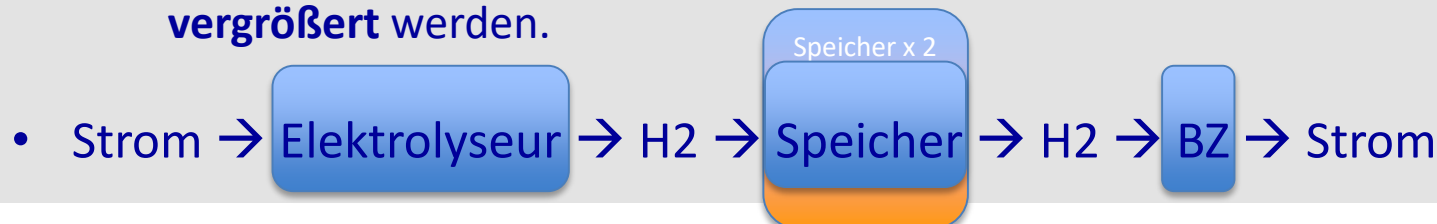
Der **Gesamtwirkungsgrad von Strom zu Strom** beträgt nun $45/106,75 = 42,1 \%$.

Damit ist der sogenannte Round Trip Wirkungsgrad schlechter als der von **Pumpspeicher (75%)** und **Li Ion Batterie (90 – 95 %)**

Wasserstoff als Energiespeicher:

Für die Speicherung großer Energiemengen (**saisonal Speicher**) ist Wasserstoff besser geeignet als Batterien. Grund:

- Soll die Speicherkapazität einer Batterie **verdoppelt** werden, so braucht man entweder **zwei Batterien** oder eine doppelt so große Batterie.
- Das ist dann auch ca. **doppelt so teuer**. D.h. ein Stromspeicher für einen Monat kostet ca. 30 mal mehr als ein Stromspeicher für einen Tag.
- Das ist **anders** bei der Stromspeicherung mit **Wasserstoff**.
- Hier muss der **Wandler nicht vergrößert** werden, sondern nur der Tank für das Medium, das die Energie speichert.
 - Bei Stromspeicherung mit Wasserstoff bleiben Elektrolyseur und Brennstoffzelle (oder Gaskraftwerk) gleich. Nur die **Speicherbehälter** müssen **vergrößert** werden.



Vergleich mit Erdgas bei der Verstromung (1/2)

- Mit den oben getroffenen (sehr optimistischen) Annahmen hätten wir WGK von 2,5 €/kg.
- Zuzüglich Transportkosten von mindestens 1€/kg kann H₂ für 3,50 €/kg für ein Gaskraftwerk zur Verfügung gestellt werden.
- Annahmen GuD Kraftwerk:
 - P = 1 GW, Capex = 800 Mio. €, Annuität = 8,44%/a, O&M = 2% von Capex p.a.
 - Damit ergeben sich Fixkosten von:
 - Kapital: 67,52 Mio. €/a, O&M: 16 Mio. €/a
 - Bei 4000 Volllaststunden p.a. => 1,68 cent/kWh + 0,4 cent/kWh = 2,08 cent/kWh
 - Erdgaspreis = 2,5 cent/kWh, Wirkungsgrad = 60% => 4,17 cent/kWh_{el}
 - Stromgestehungskosten, SGK = 2,08 + 4,17 = **6,25 cent / kWh_{el}**
 - H₂ Preis= 3,5 €/kg @ 33,33 kWh/kg => 10,5 cent/kWh => 17,5 cent/kWh_{el}
 - Stromgestehungskosten, SGK = 2,08 + 17,5 = **19,58 cent / kWh_{el}**

Vergleich mit Erdgas bei der Verstromung (2/2)

- Frage, bei welchem CO₂ Preis würde das Erdgas genauso teuer wie H₂?
- Heizwert Erdgas = 13,3 kWh/kg
- Bei 10,5 cent/kWh (wie H₂) => 1,40 €/kg_{Erdgas}
- Heute: 25 cent / m³_{Erdgas} = 32 cent / kg_{Erdgas}
=> Aufpreis durch CO₂ Abgabe müsste 108 cent/kg_{Erdgas} sein.

CO₂ Emission Erdgas (CH₄):

- C – Gehalt = 75% => 0,75 kg C je kg_{Erdgas}
- 1 kg C ergibt 3,67 kg CO₂ (wegen Atomgewicht 44 zu 12, 44/12 = 3,67)
- => 1 kg Erdgas ergibt 2,75 kg_{CO2}
- 108 cent / 2,75 kg_{CO2} = 39,3 cent/ kg_{CO2} = 393 €/t_{CO2}
- D.h. bei einem CO₂ Preis von 393 €/t wäre Erdgas so teuer wie grüner Wasserstoff. Heutiger CO₂ Preis = 25 €/t mit Steigerung 10€/a
- D.h. erst bei 393 €/t_{CO2} würde ein GuD Kraftwerk auf H₂ umsteigen!

Nutzung von Wasserstoff

Nutzung in PKW's:

- Ein PKW kann auf zwei Arten durch H_2 angetrieben werden:
 - 1) Elektromotor, mit Strom aus einer H_2 -betriebenen Brennstoffzelle (BZ)
 - 2) Verbrennungsmotor mit H_2 als Brennstoff
- Technik 2) wurde seit Ende der 1980er Jahre erfolgreich erprobt (u.a. DLR)
- Technik 1) wurde erst mit Fortschritten in der BZ-Entwicklung Ende der 1990er Jahre möglich.
- Vorteile der BZ gegenüber H_2 Verbrenner:
 - Höherer Wirkungsgrad (60% statt 30 bis 40% beim Verbrenner)
 - Rekuperation der Bremsenergie in Form von Strom
- **Typischer Verbrauch:**
 - **BZ PKW: 1 kg H_2 / 100 km**
 - H_2 Verbrenner: 1,5 bis 2 kg H_2 / 100 km

Faustformel Verbrauchsrechnung:

Energiebedarf PKW ca. 20 kWh/100 km

$H_{U,H_2} = 33 \text{ kWh/kg}$, bei $\eta_{BZ} = 60\%$ folgt: 20 kWh Strom aus 1 kg H_2

=> 1kg H_2 je 100 km, **Primärstromverbrauch: 50 kWh/100km (bei $\eta_{\text{Elektrolyse}} = 66\%$)**



A BMW 745i being tanked at a liquid hydrogen filling station

H_2 -Verbrenner, BMW 1990
DLR Stuttgart



H_2 -BZ, Toyota Mirai 2020

Nutzung in Nutzfahrzeugen:

- Linienbusse
- LKW
- Sonderfahrzeuge (Müllsammelfahrzeuge, Straßenkehrer)

Vorteile H₂-BZ gegenüber Batterieelektrisch:

- Größere Reichweite
- Schnellere Betankung
- H₂-Tank leichter als Batterie

Nachteile H₂-BZ gegenüber Batterieelektrisch:

- Größere Primärenergiebedarf (wegen Round Trip Wirkungsgrad)
- Teurer im Betrieb (Wasserstoff ist teurer als Strom pro kWh)

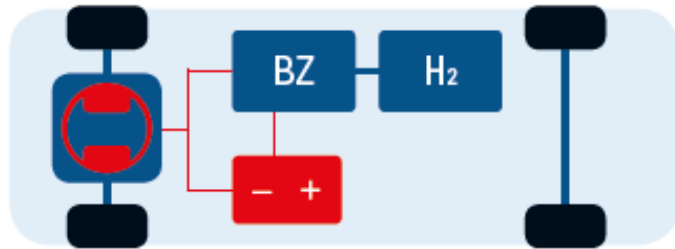
Beispiel Linienbus:

- Elektrisch: 160 kWh / 100 km
- H₂-BZ: 8 kg_{H₂} / 100 km, Primärstrom: 400 kWh / 100 km (bei 50kWh/kg Elektrolyse)
- **Entwicklungstendenz: Hybrid mit Batterie und H₂-BZ als Range Extender, REX (auch bei PKW möglich!)**

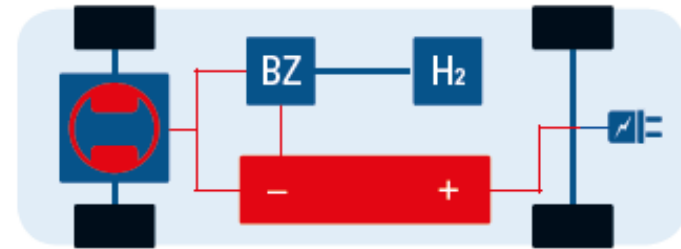


Entwicklungstendenz: Hybrid mit Batterie und H₂-BZ als Range Extender, REX

BZ NOW GmbH, Leitfaden Wasserstoff-Busse



BZ-REX



Solobus 12 m

	BZ	BZ-REX
HV-Batterie	30 kWh	250 kWh
H ₂ -Tank	40 kg H ₂	15 kg H ₂
Brennstoffzelle	100 kW	30 kW

Hecke, 2018, Van Hool, 2018, thinkstep & Prognos, 2017, Witkowski, 2017

- Energieeffizienter als reiner H₂ Brennstoffzellenbus
- Kleinere BZ als reiner H₂-Bus
- Kleinere Batterie als reiner E-Bus.
- => Batterie leichter, kleiner und billiger.
- Niedrigere Life Cycle Cost als reiner E- oder reiner H₂-Bus.

Nutzung in Fahrzeugen, CO₂ Emissionen 1) PKW:

Auto, Benziner (Golf-Klasse)	
Verbrauch:	6,5 L / 100 km
Dichte Benzin:	0,76 kg/l
Verbrauch:	4,94 kg / 100 km
c-Anteil:	84%
c-Verbrauch:	4,15 kg / 100 km
CO2 Emission:	152,2 g / km

Auto, Diesel (Golf-Klasse)	
Verbrauch:	5,5 L / 100 km
Dichte Benzin:	0,84 kg/l
Verbrauch:	4,62 kg / 100 km
c-Anteil:	85%
c-Verbrauch:	3,93 kg / 100 km
CO2 Emission:	144,0 g / km

Auto, Erdgas (Golf-Klasse)	
Verbrauch:	4,5 kg / 100 km
c-Anteil:	75%
c-Verbrauch:	3,38 kg / 100 km
CO2 Emission:	123,8 g / km

Auto, H ₂ , BZ (Golf-Klasse)	
Verbrauch:	1 kg H ₂ / 100 km
Emission Methanreformierung:	11 kg CO ₂ / kg H ₂
CO2 Emission H ₂ BZ:	110 g / km
Stromverbrauch, Elektrolyse:	50 kWh / kg H ₂
indirekter Stromverbrauch:	50 kWh / 100 km
CO2 Emission Strom:	400 g / kWh
CO2 Emission H ₂ BZ:	200 g / km

Auto, Batterieelektisch (BEV) (Golf-Klasse)	
Verbrauch:	18 kWh / 100 km
CO2 Emission Strom:	400 g / kWh
CO2 Emission BEV:	72 g / km

(Strommix Deutschland: 400 g/kWh, PV: 67 g/kWh, Wind: 11 g/kWh)

Rot = Input Daten

Grün = berechnete Werte

Nutzung in Fahrzeugen, CO₂ Emissionen 2) Busse:

Linienbus, Diesel	
Verbrauch:	50 L / 100 km
Dichte Benzin:	0,84 kg/l
Verbrauch:	42 kg / 100 km
c-Anteil:	85%
c-Verbrauch:	35,70 kg / 100 km
CO2 Emission:	1309,0 g / km

Linienbus, Erdgas	
Verbrauch:	42 kg / 100 km
c-Anteil:	75%
c-Verbrauch:	31,50 kg / 100 km
CO2 Emission:	1155,0 g / km

Linienbus, Batterieelektrisch	
Verbrauch:	160 kWh / 100 km
CO2 Emission Strom:	400 g / kWh
CO2 Emission BEV:	640 g / km

Linienbus, Wasserstoff-Brennstoffzelle	
Verbrauch:	8 kg H ₂ / 100 km
Emission Methanreformierung:	11 kg CO ₂ / kg H ₂
CO2 Emission H ₂ BZ:	880 g / km
Stromverbrauch, Elektrolyse:	50 kWh / kg H ₂
indirekter Stromverbrauch:	400 kWh / 100 km
CO2 Emission Strom:	400 g / kWh
CO2 Emission H ₂ BZ:	1600 g / km

(Strommix Deutschland: 400 g/kWh, PV: 67 g/kWh, Wind: 11 g/kWh)

Wenn eine Industrie ganz ohne fossile Energien auskommen soll, dann benötigt sie Wasserstoff aus diesen Gründen:

- Beim weiteren Ausbau von Wind und PV wird es zu Stromüberschüssen kommen. Diese müssen genutzt werden!
- Die Energie muss von Zeiten mit Überschussstrom (windig und sonnig) gespeichert werden, damit sie an Tagen mit Stromknappheit (Dunkelflaute) zur Verfügung steht.
- Das geht nur mit Wasserstoff.

Es ergibt sich die Frage, wie die im Wasserstoff gespeicherte Energie am besten genutzt wird.

1. Stoffliche Verwertung?

➤ Ja! Weil ohne Konkurrenz (Wenn ein Prozess Wasserstoff braucht, dann braucht er Wasserstoff.)

2. Stromspeicher für Dunkelflaute?

➤ Ja! Weil alle anderen Speicher für Langzeitspeicherung zu teuer sind.

3. Im Verkehr?

➤ Noch nicht klar! Warum? Weil es durch die batteriebetriebene E-Mobilität eine starke Alternative gibt.

Vielen Dank für Ihr Interesse.

Wasserstoff-Tanks

- Bei der Wahl des Tankwerkstoffes ist die hohe Permeabilität des H_2 zu beachten. Sie führt z.B. bei Stahl zur sog. Wasserstoffversprödung.
- GFK und CFK Tanks müssen von innen beschichtet sein, um dicht zu sein „Liner“.

- Tankklassifizierung:



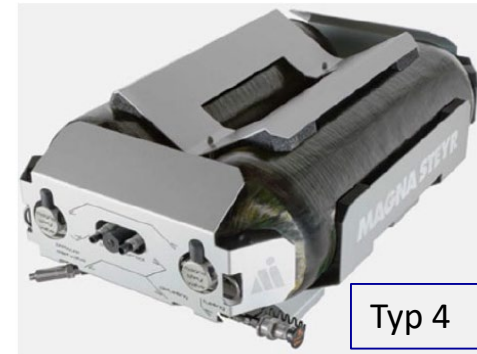
Typ 1

Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Stahlwand	<ul style="list-style-type: none"> • Liner: Stahl od. Alu • Festigkeit: CFK-Unterstützung 	<ul style="list-style-type: none"> • Liner: Stahl od. Alu • Festigkeit: CFK 	<ul style="list-style-type: none"> • Liner: Kunststoff • Festigkeit: CFK

Tab. 5.3 Handelsübliche Druckbehälter für den automotiven Einsatz

Nettovolumen [dm ³]	34	100	50	100	36	65	30	120
Typ	3	3	3	3	4	4	4	4
Nominaldruck [bar]	350	350	700	700	350	350	700	700
Testdruck [bar]	525	525	1050	1050	525	525	1050	1050
Tankgewicht [kg]	18	48	55	95	18	33	26	84
Tankvolumen [dm ³]	50	150	80	150	60	100	60	200
H ₂ Dichte [kg/m ³] at 25 °C	23,3	23,3	39,3	39,3	23,3	23,3	39,3	39,3
H ₂ Inhalt [Nm ³]	8,83	26	21,84	43,69	9,35	16,96	13,5	51,7
H ₂ Inhalt [kg]	0,79	2,33	1,96	3,83	0,84	1,52	1,21	4,65
Gravimetr. H ₂ Inhalt [kg H ₂ /kg]	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06
Volumetr. H ₂ Inhalt [kg H ₂ /dm ³]	0,016	0,016	0,025	0,026	0,014	0,015	0,021	0,023
Gravimetr. Energiedichte [kWh/kg]	1,46	1,62	1,19	1,38	1,55	1,55	1,59	1,84
Volumetr. Energiedichte [kWh/dm ³]	0,53	0,52	0,82	0,87	0,47	0,51	0,67	0,77

Abb. 5.6 Fahrzeugtank für 700 bar CGH2. (Quelle: MAGNA [236])



Typ 4, 700 bar

Typ 4

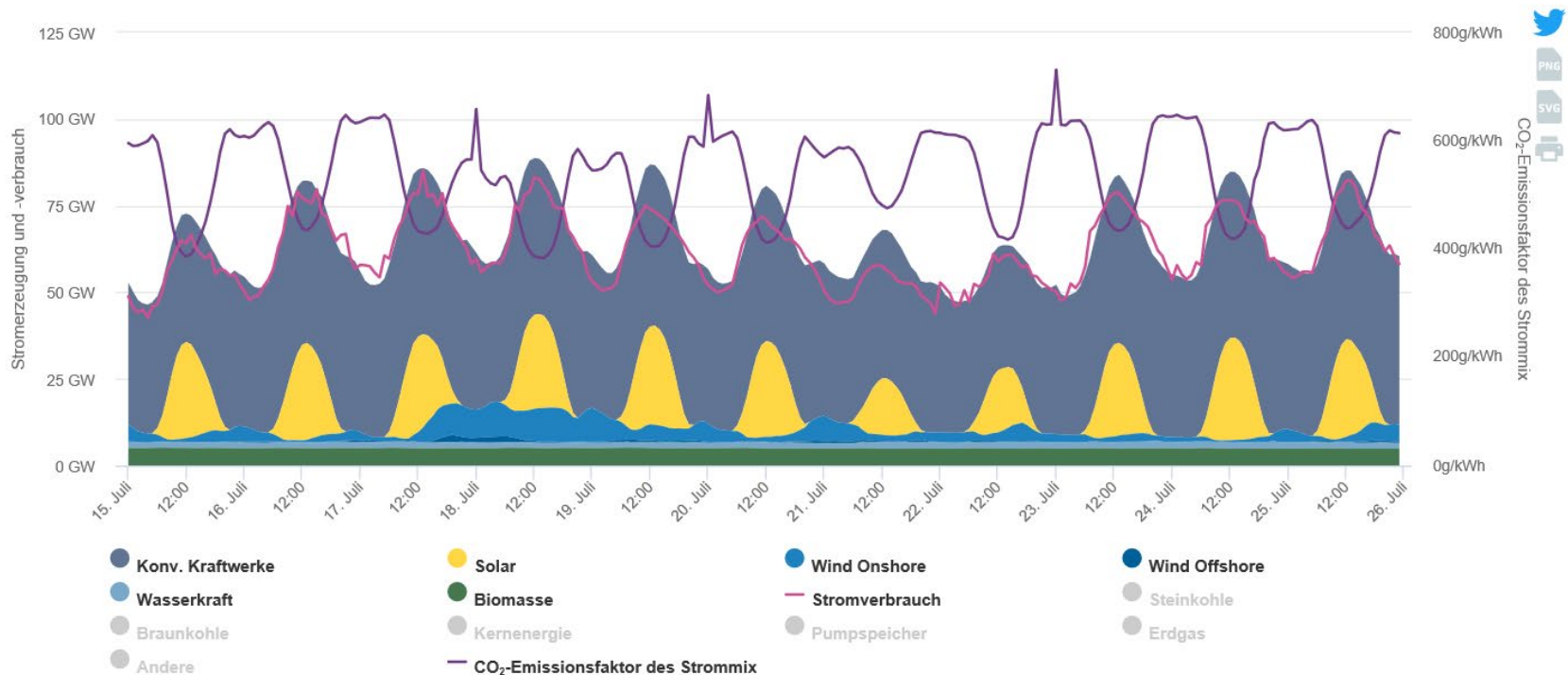
Diesel

Bei H₂-PKW's haben sich die **Typ 4 Tanks mit 700 bar** durchgesetzt.

Beispiel für sonnenreiche Tage in Deutschland

https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/power_generation

Stromerzeugung und Stromverbrauch



Agora Energiewende; Stand: 07.05.2019, 19:20

Letzten 7 Tage

Letzten 31 Tage

Letztes Jahr

15.07.2018

bis

25.07.2018

Zeitraum darstellen

Beispiel für windreiche Tage in Deutschland

https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/power_generation

Stromerzeugung und -verbrauch

Konventionelle Stromerzeugung

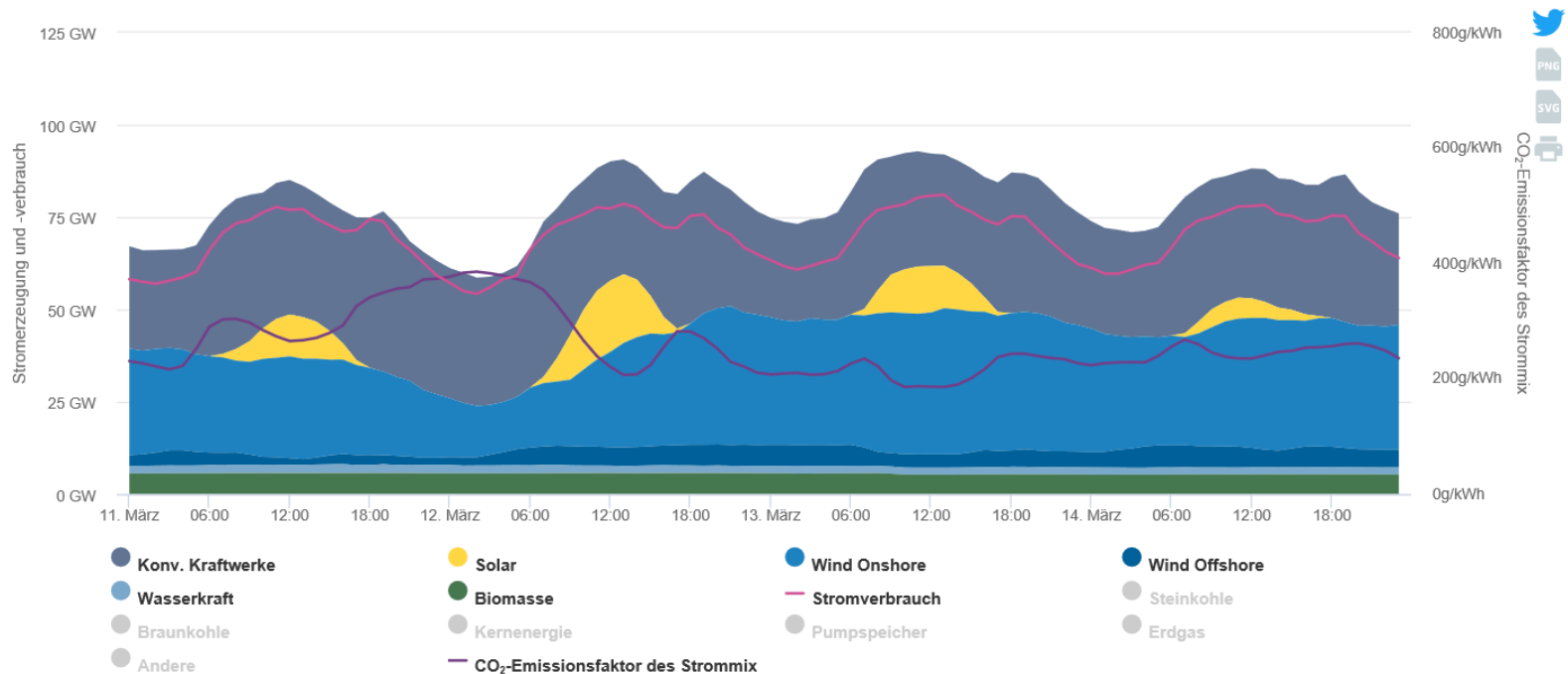
Strom-Import/Export

Strompreis, -erzeugung und -verbrauch

Strompreis und Emissionen

Auf einen Blick

Stromerzeugung und Stromverbrauch



Agora Energiewende; Stand: 07.05.2019, 19:20

Letzten 7 Tage

Letzten 31 Tage

Letztes Jahr

11.03.2019

bis

14.03.2019

Zeitraum darstellen