

Was bringt Wasserstoff fürs Klima?

Vortrag an der LVHS Freckenhorst
am 28.01.2022 um 19:00

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

Was bringt Wasserstoff fürs Klima?

Für die ganz Ungeduldigen, die kurze Antwort vorweg:

- Wasserstoff ist ein wichtiger Baustein in der Sektorenkopplung (Sektoren: Strom, Wärme, Verkehr)
- Wir werden ihn brauchen
- Er eröffnet wichtige Möglichkeiten



- 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:

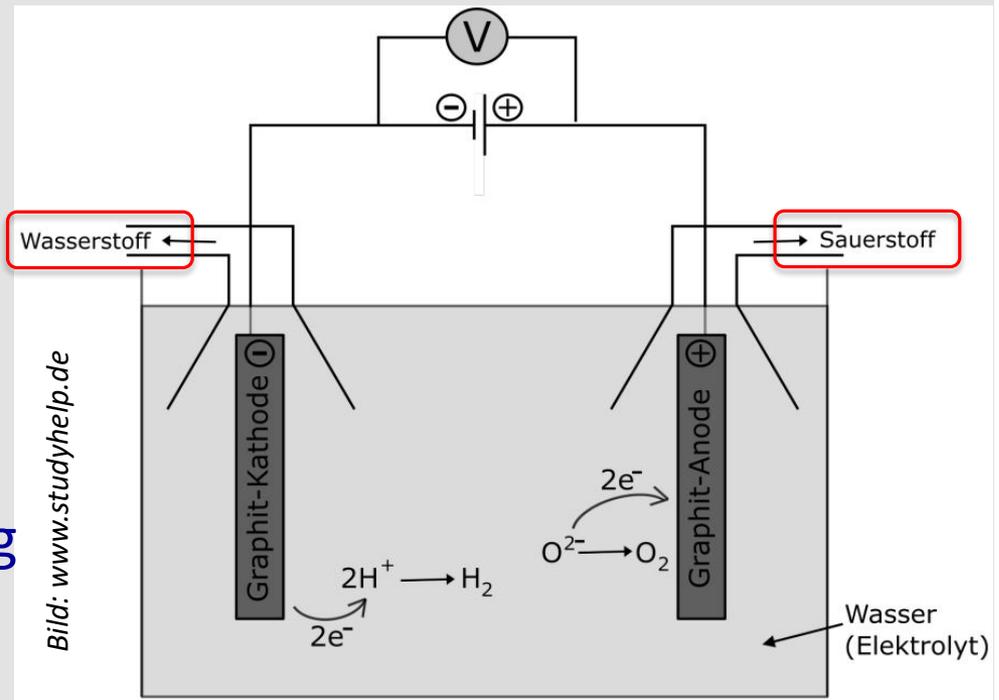
- **Heizwert von H_2 : 33,3 kWh/kg**
(ca. 3 mal höher als Öl)

Wasserstoff kann auf zwei verschiedenen Wegen gewonnen werden:

- 1) Aus (fossilen) Kohlenwasserstoffen (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



- **Kosten**, heute: 5 €/kg, zukünftig: **2,50 €/kg** möglich

* ohne Kompressionsenergie

- **Grün:** Elektrolyse mit **Strom** aus **Erneuerbaren Energien** (**das Ziel**)
- **Grau:** H₂ Produktion aus fossilen Brennstoffen, CO₂ in die Atmosphäre (**heute**)
- **Blau:** H₂ Produktion aus fossilen Brennstoffen, CO₂ **abgeschieden und gespeichert oder genutzt**
- **Türkis:** H₂ aus Methan, Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien, **Nebenprodukt: Kohle, fest** (*Dieser Prozess ist nicht der effizienteste, **aber er kann Kohlenstoff aus der Luft holen!***)
- **Rot:** Elektrolyse mit **Strom aus Atomkraft**
- **Weiß:** H₂ ist **Nebenprodukt** eines Prozesses, der anderen Zwecken dient, z.B. Verkokung von Steinkohle

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:

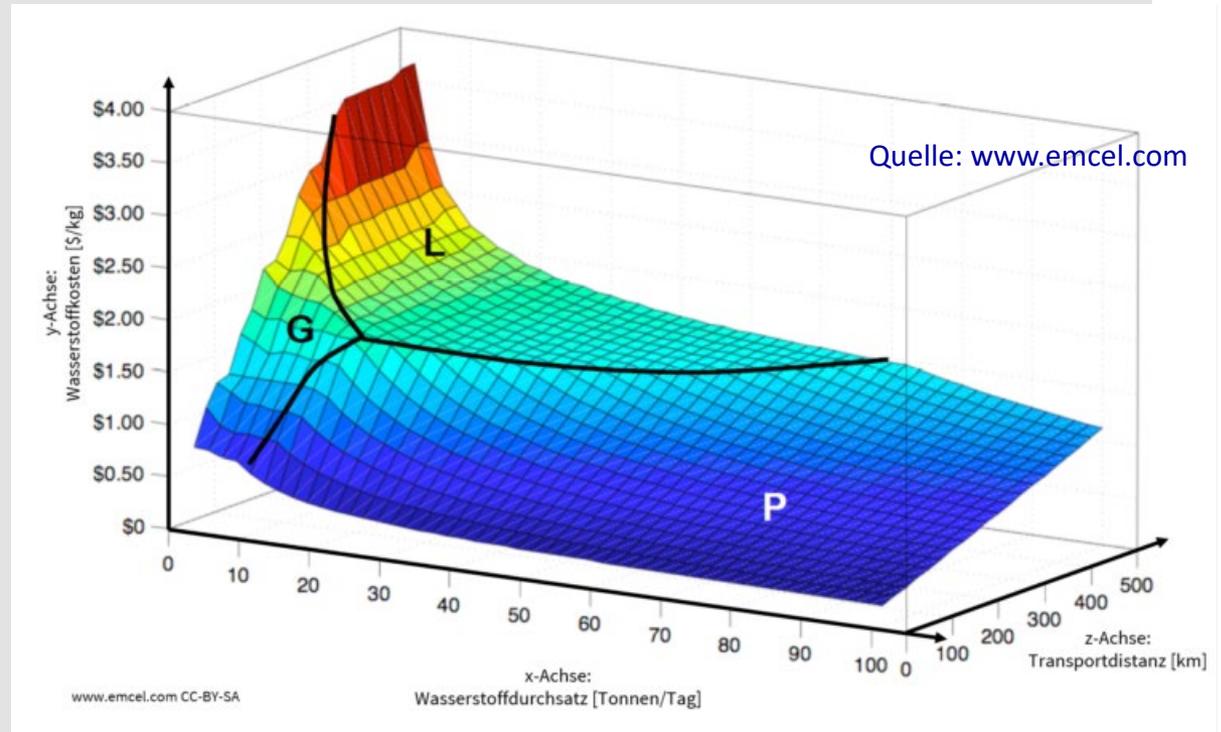
- Auf LKW's kann Wasserstoff als Druckgas (üblicherweise 200 bar) oder flüssig transportiert werden.
- Bei **Druckgas** transportiert der oben abgebildete **LKW 0,6 t Wasserstoff**, während die Stahltanks ca. 22t wiegen. Neuere Modelle transportieren auch bis zu einer t Wasserstoff.
- Bei **Flüssigwasserstoff** 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.



- Der Übersee-Transport von LH₂ mit Tank-schiffen ist pro kWh ca. 3 mal teurer als der von LNG
- Dichte LH₂ = 70 kg/m³, Dichte LNG = 450 kg/m³

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. (Normale Bedingungen)
- Das entspricht einem Energiegehalt von ca. 1,2 TWh.
- Um diese Menge Wasserstoff durch grüne Erzeugung zu decken, benötigt man **81 TWh Strom**. (bei $\eta_{\text{Elektrolyse}} = 70\%$)
- Das entspricht ca. 10% des **heutigen deutschen Stromerzeugungspotentials**.
- Bei 4000 Stunden pro Jahr 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}	

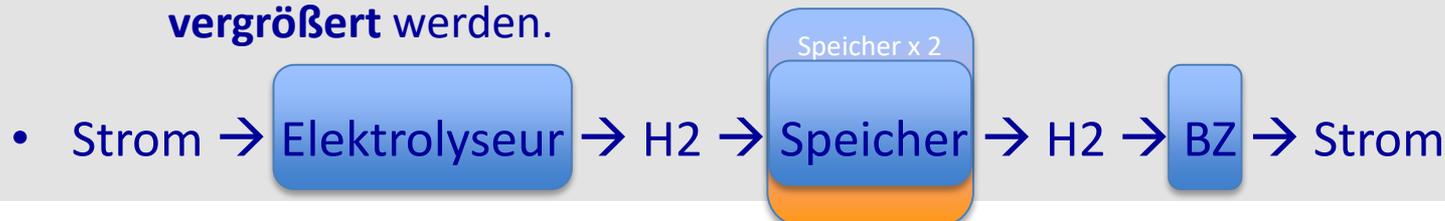
Der **Gesamtwirkungsgrad von Strom zu Strom** beträgt nun $45/106,75 = 42,1\%$.

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)

- Wir rechnen mit den o.g. Wasserstoffgestehungskosten (WGK) von **2,50 €/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)

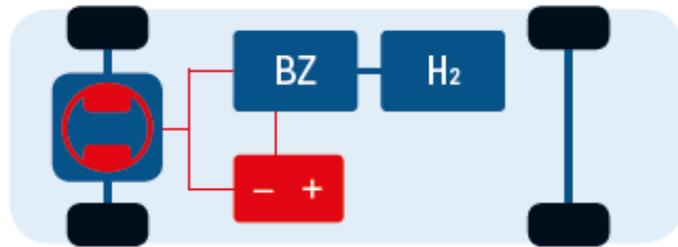
Beispiel Linienbus:

- 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!)**

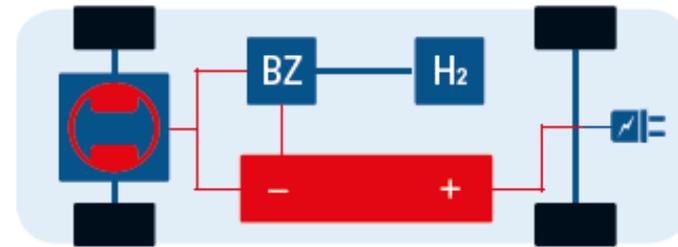


Entwicklungstendenz: Hybrid mit Batterie und H₂-BZ als Range Extender, REX

BZ NOW GmbH, Leitfaden Wasserstoff-Busse



BZ-REX



		BZ	BZ-REX
Solobus 12 m	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

- Der vielleicht wichtigste Vorteil des BZ-REX gegenüber reinen E-Bus: Bei Stromknappheit kann auf H₂ gefahren werden (netzdienlich)

- 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:	10 kg CO ₂ / kg H ₂
CO2 Emission H2 BZ:	100 g / km
Stromverbrauch, Elektrolyse:	50 kWh / kg H ₂
indirekter Stromverbrauch:	50 kWh / 100 km
CO2 Emission Strom:	400 g / kWh
CO2 Emission H2 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

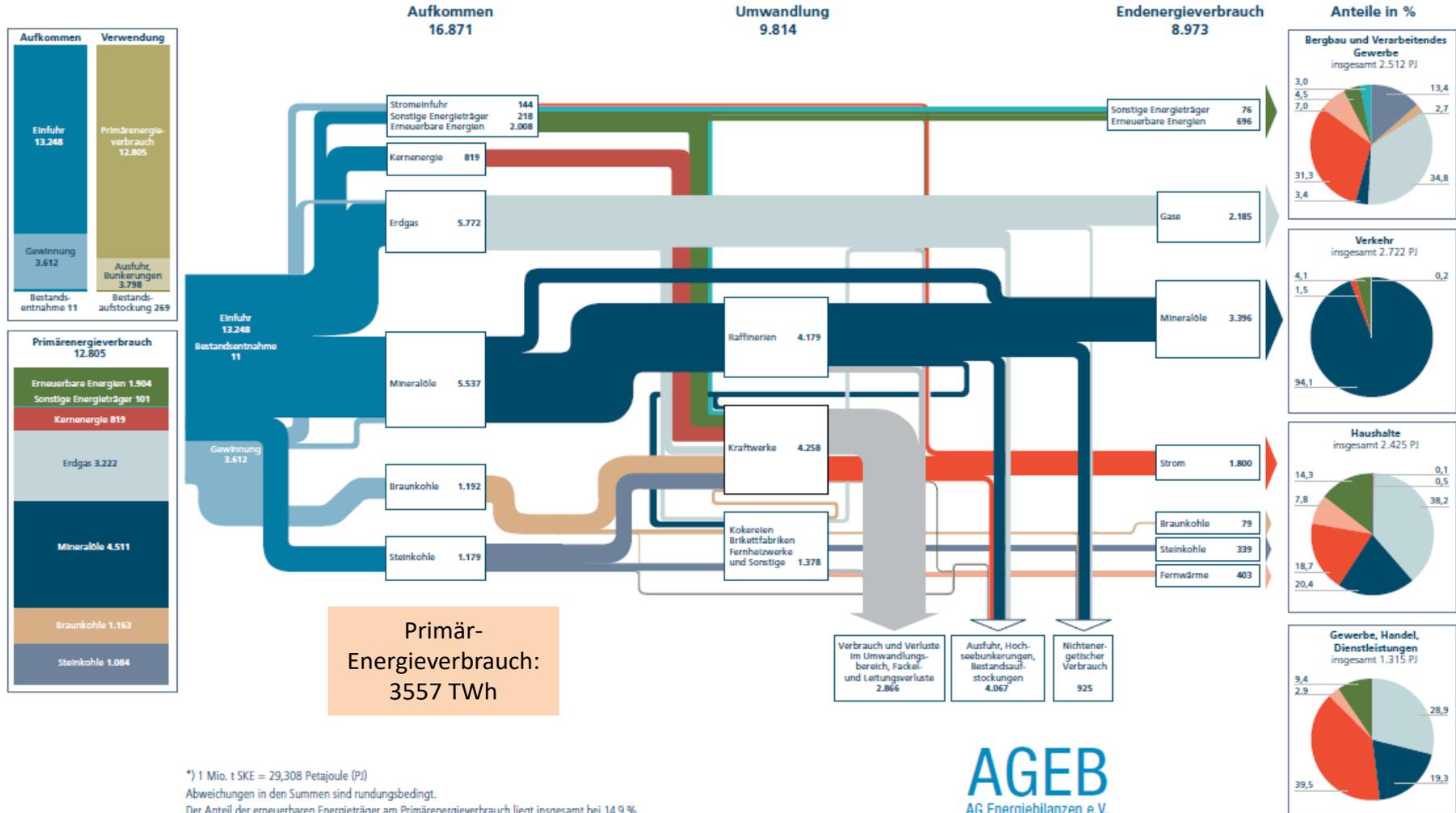
Linienbus, Batterieelektrisch	
Verbrauch:	160 kWh / 100 km
CO2 Emission Strom:	400 g / kWh
CO2 Emission BEV:	640 g / km

Linienbus, Wasserstoff-Brennstoffzelle		(Strommix Deutschland: 400 g/kWh, PV: 67 g/kWh, Wind: 11 g/kWh)
Verbrauch:	8 kg H ₂ / 100 km	
Emission Methanreformierung:	10 kg CO ₂ / kg H ₂	
CO2 Emission H ₂ BZ:	800 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	

Blick aufs gesamte Energiesystem

Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland 2019
Energieeinheit Petajoule (PJ)*

Endenergieverbrauch:
2493 TWh



Endenergie => Nutzenergie

Heute, Verbrenner

Endenergie,
Bewegung,
Verkehr:
718 TWh



Systemwirkungs-
grad: 25%

Nutzenergie,
Bewegung,
Verkehr:
180 TWh

E-Mobilität

Endenergie,
Bewegung,
Verkehr:
224 TWh



Systemwirkungs-
grad: 80%

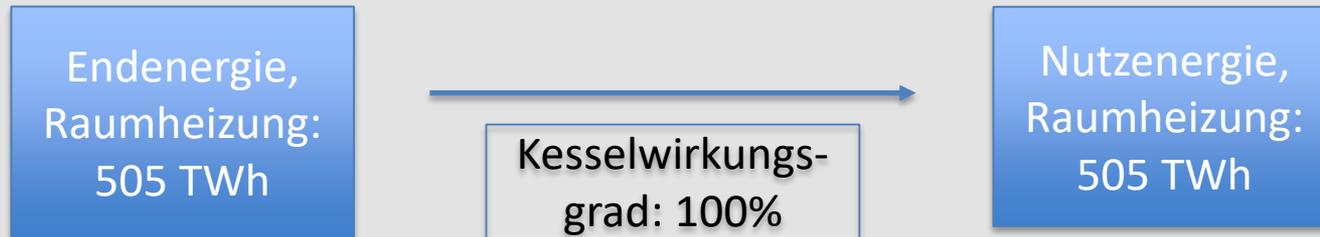
Nutzenergie,
Bewegung,
Verkehr:
180 TWh

Eingespart: 494 TWh Endenergie (*20% der heutigen Endenergie*)

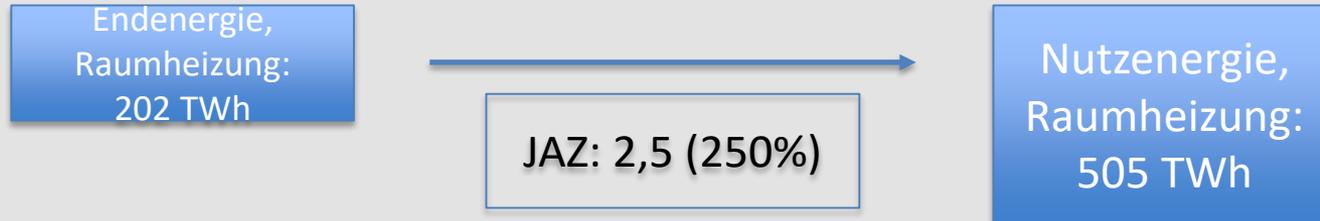
Quelle AGEB, Deutschland 2019, Annahme Verkehr (95% des EE-Bedarfs für Bewegungsenergie)

Endenergie => Nutzenergie

Heute, Gas- und Ölheizungen, private Haushalte



Wärmepumpen-Heizungen, private Haushalte



- *Eingespart: 303 TWh Endenergie (12% der heutigen Endenergie)*
- *Ziel für 2045: Primärenergie = 1800 TWh, 52% des heutigen Bedarfs*
- *Oft nicht berücksichtigt: Der Nutzenergiebedarf kann auch sinken!*

Quelle AGEB, Deutschland 2019, Annahme Haushalte (75% des EE-Bedarfs für Raumwärme)

Wenn eine Industrie ganz ohne fossile Energien auskommen soll, dann benötigt sie Wasserstoff aus diesen Gründen:
(es ist eine „**push – pull** – Situation“)

- Beim weiteren Ausbau von Wind und PV wird es zu Stromüberschüssen kommen. Diese müssen genutzt werden!
(das ist der **push**)
- Die Energie muss von Zeiten mit Überschussstrom (windig und sonnig) gespeichert werden, damit sie an Tagen mit Stromknappheit (**Dunkelflaute**) zur Verfügung steht.
(das ist der **pull**)
- 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.
- Aber erst, wenn H₂ nur noch grün hergestellt wird.

3. Im Verkehr?

- Noch nicht klar! Warum? Weil es durch die batterie-betriebene E-Mobilität eine starke Alternative gibt.
- Nur bei Flugzeugen und Hochseeschiffen ist Batteriebetrieb keine Alternative.
- Bei Schwerlast LKW konkurriert H₂ mit einem Oberleitungsnetz.

- Jetzt brauchen wir „nur noch“ Die Handwerker*innen und Ingenieur*innen, die das alles umsetzen!
- Daher: Werben Sie für die Berufe in der Energietechnik (handwerklich und akademisch).
- **Alles Reden bringt nichts, wenn wir es nicht umsetzen!**
- An der HSHL kann man Energietechnik studieren:
<https://www.hshl.de/studieren/studiengaenge/bachelorstudiengaenge/energietechnik-und-ressourcenoptimierung/>
- In Ihrem Bekanntenkreis gibt es sicherlich Handwerksbetriebe, die Nachwuchs suchen.

Vielen Dank für Ihr Interesse

Link zum Thema Wasserstoff-Sicherheit: https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/Wasserstoff_kompendium.pdf