

# 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

# 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) 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**, CH<sub>4</sub>: Hier benutzt man die Dampfreformierung  
$$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2 \quad \text{und dann: } \text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$$
- D.h. durch Zufuhr von Wasser (2 x H<sub>2</sub>O) und Energie erhält man aus einem Molekül CH<sub>4</sub> vier Moleküle H<sub>2</sub>
- 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 H<sub>2</sub>-Herstellung



- **Grün:** Elektrolyse mit **Strom** aus **Erneuerbaren Energien** (**das Ziel**)
- **Grau:** H<sub>2</sub> Produktion aus fossilen Brennstoffen, CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre (**heute**)
- **Blau:** H<sub>2</sub> Produktion aus fossilen Brennstoffen, CO<sub>2</sub> **abgeschieden und gespeichert oder genutzt**
- **Türkis:** H<sub>2</sub> 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:** H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub>-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:

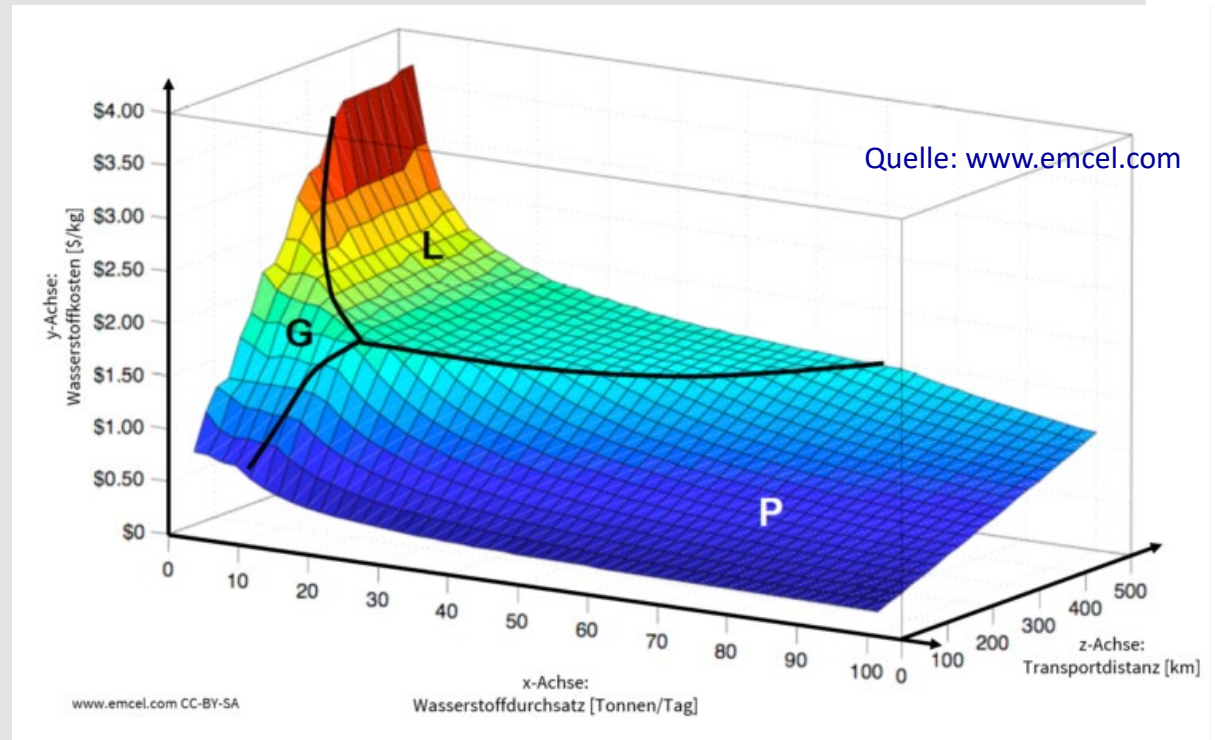
- Auf LKW's kann Wasserstoff als Druckgas (üblicherweise 200 bar) oder flüssig transportiert werden.
- Bei **Druckgas** transportiert der oben abgebildete **LKW 0,6 t Wasserstoff**, während die Stahltanks ca. 22t wiegen. Neuere Modelle transportieren auch bis zu einer t Wasserstoff.
- Bei **Flüssigwasserstoff** 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 (H<sub>2</sub>) 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 LH<sub>2</sub> mit Tank-schiffen ist pro kWh ca. 3 mal teurer als der von LNG
- Dichte LH<sub>2</sub> = 70 kg/m<sup>3</sup>, Dichte LNG = 450 kg/m<sup>3</sup>

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. Nm<sup>3</sup>. (Normalsiedend, 0°C, 1013 hPa)
- 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 Stromerzeugungsvermögens**.
- Bei 4000 Stunden benötigt man dafür eine **Elektrizitätskapazität 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 Zementerzeugung auf Wasserstoff umsteigt, erhöht sich der Bedarf weiter.

## Wasserstoff als Energiespeicher:

Wirkungsgradkette H<sub>2</sub> (*gasförmig*) bei der Stromspeicherung:

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

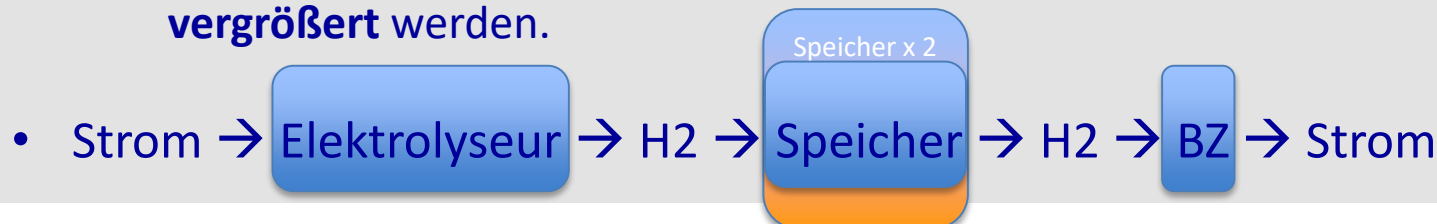
Der **Gesamtwirkungsgrad von Strom zu Strom** beträgt nun  $45/106,75 = 42,1 \%$ .

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 (**saisonalen 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 H<sub>2</sub> 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<sub>el</sub>
- Stromgestehungskosten, SGK = 2,08 + 4,17 = **6,25 cent / kWh<sub>el</sub>**
- H<sub>2</sub> Preis= 3,5 €/kg @ 33,33 kWh/kg => 10,5 cent/kWh => 17,5 cent/kWh<sub>el</sub>
- Stromgestehungskosten, SGK = 2,08 + 17,5 = **19,58 cent / kWh<sub>el</sub>**



## Vergleich mit Erdgas bei der Verstromung (2/2)

- Frage, bei welchem CO<sub>2</sub> Preis würde das Erdgas genauso teuer wie H<sub>2</sub>?
- Heizwert Erdgas = 13,3 kWh/kg
- Bei 10,5 cent/kWh (wie H<sub>2</sub>) => 1,40 €/kg<sub>Erdgas</sub>
- Heute: 25 cent / m<sup>3</sup><sub>Erdgas</sub> = 32 cent / kg<sub>Erdgas</sub>  
=> Aufpreis durch CO<sub>2</sub> Abgabe müsste 108 cent/kg<sub>Erdgas</sub> sein.

### CO<sub>2</sub> Emission Erdgas (CH<sub>4</sub>):

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

# Nutzung von Wasserstoff

## Nutzung in PKW's:

- Ein PKW kann auf zwei Arten durch H<sub>2</sub> angetrieben werden:
  - 1) Elektromotor, mit Strom aus einer H<sub>2</sub>-betriebenen Brennstoffzelle (BZ)
  - 2) Verbrennungsmotor mit H<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> Verbrenner:
  - Höherer Wirkungsgrad (60% statt 30 bis 40% beim Verbrenner)
  - Rekuperation der Bremsenergie in Form von Strom
- **Typischer Verbrauch:**
  - **BZ PKW: 1 kg H<sub>2</sub> / 100 km**
  - H<sub>2</sub> Verbrenner: 1,5 bis 2 kg H<sub>2</sub> / 100 km

Faustformel Verbrauchsrechnung:

Energiebedarf PKW ca. 20 kWh/100 km

H<sub>U,H2</sub> = 33 kWh/kg, bei  $\eta_{BZ} = 60\%$  folgt: 20 kWh Strom aus 1 kg<sub>H2</sub>

=> 1kg<sub>H2</sub> je 100 km, **Primärstromverbrauch: 50 kWh/100km (bei  $\eta_{Elektrolyse} = 66\%$ )**



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

H<sub>2</sub>-Verbrenner, BMW 1990  
DLR Stuttgart



H<sub>2</sub>-BZ, Toyota Mirai 2020

## Nutzung in Nutzfahrzeugen:

- Linienbusse
- LKW
- Sonderfahrzeuge (Müllsammelfahrzeuge, Straßenkehrer)

## Vorteile H<sub>2</sub>-BZ gegenüber Batterieelektrisch:

- Größere Reichweite
- Schnellere Betankung
- H<sub>2</sub>-Tank leichter als Batterie

## Nachteile H<sub>2</sub>-BZ gegenüber Batterieelektrisch:

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

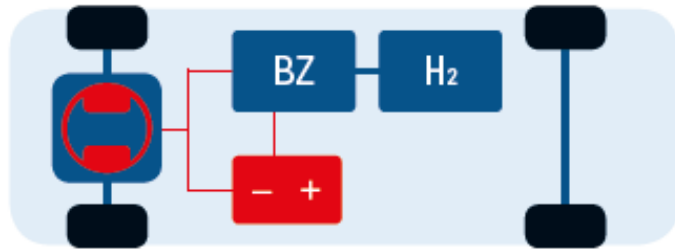
## Beispiel Linienbus:

- Elektrisch: 160 kWh / 100 km
- H<sub>2</sub>-BZ: 8 kg<sub>H<sub>2</sub></sub> / 100 km, Primärstrom: 400 kWh / 100 km (bei 50kWh/kg Elektrolyse)
- **Entwicklungstendenz: Hybrid mit Batterie und H<sub>2</sub>-BZ als Range Extender, REX (auch bei PKW möglich!)**

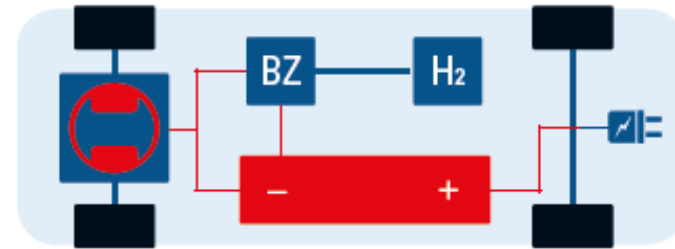


Entwicklungstendenz: Hybrid mit Batterie und H<sub>2</sub>-BZ als Range Extender, REX

BZ NOW GmbH, Leitfaden Wasserstoff-Busse



BZ-REX



		BZ	BZ-REX
Solobus 12 m	HV-Batterie	30 kWh	250 kWh
	H <sub>2</sub> -Tank	40 kg H <sub>2</sub>	15 kg H <sub>2</sub>
	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 H<sub>2</sub> gefahren werden (netzdienlich)

- Energieeffizienter als reiner H<sub>2</sub> Brennstoffzellenbus
- Kleinere BZ als reiner H<sub>2</sub>-Bus
- Kleinere Batterie als reiner E-Bus.
- => Batterie leichter, kleiner und billiger.
- Niedrigere Life Cycle Cost als reiner E- oder reiner H<sub>2</sub>-Bus.

## Nutzung in Fahrzeugen, CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> , BZ (Golf-Klasse)	
Verbrauch:	1 kg H <sub>2</sub> / 100 km
Emission Methanreformierung:	10 kg CO <sub>2</sub> / kg H <sub>2</sub>
CO2 Emission H2 BZ:	100 g / km
Stromverbrauch, Elektrolyse:	50 kWh / kg H <sub>2</sub>
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, CO<sub>2</sub> 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

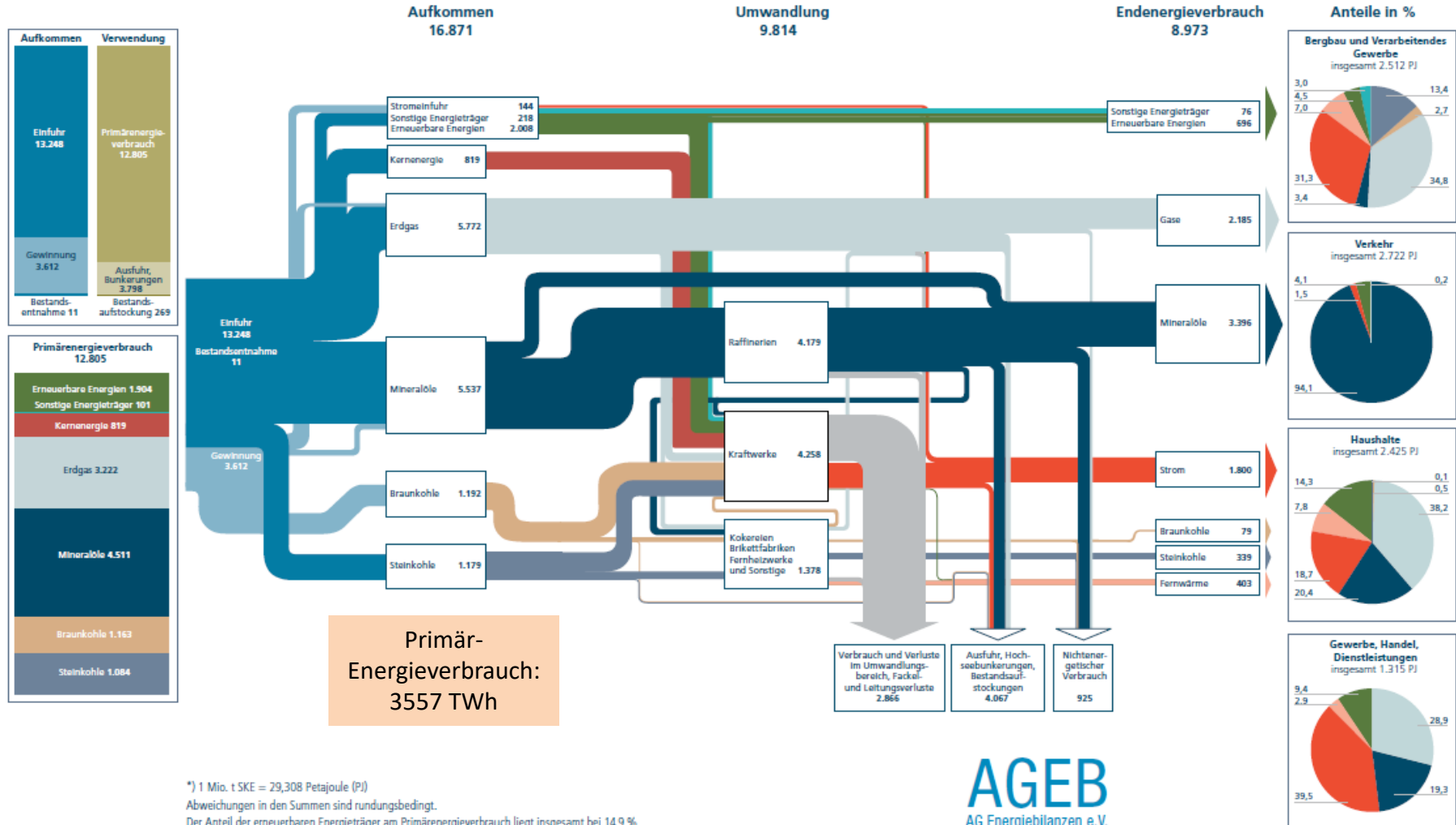
Linienbus, Batterieelektrisch	
Verbrauch:	160 kWh / 100 km
CO2 Emission Strom:	400 g / kWh
CO2 Emission BEV:	640 g / km

Linienbus, Wasserstoff-Brennstoffzelle		(Strommix Deutschland: 400 g/kWh, PV: 67 g/kWh, Wind: 11 g/kWh)
Verbrauch:	8 kg H <sub>2</sub> / 100 km	
Emission Methanreformierung:	10 kg CO <sub>2</sub> / kg H <sub>2</sub>	
CO2 Emission H <sub>2</sub> BZ:	800 g / km	
Stromverbrauch, Elektrolyse:	50 kWh / kg H <sub>2</sub>	
indirekter Stromverbrauch:	400 kWh / 100 km	
CO2 Emission Strom:	400 g / kWh	
CO2 Emission H <sub>2</sub> 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

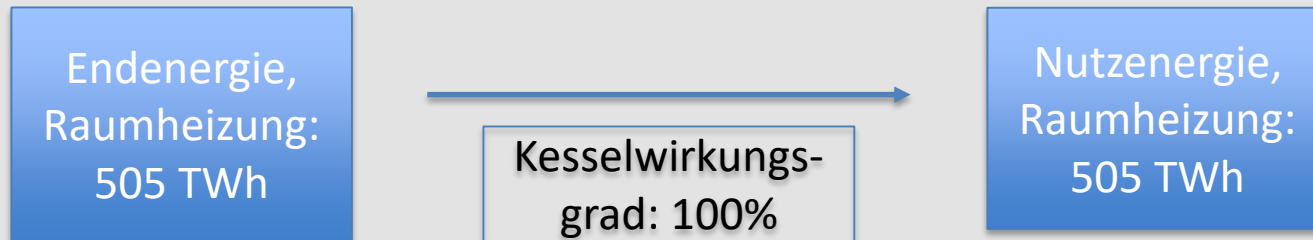
Eingespart: 494 TWh Endenergie (20% der heutigen Endenergie)

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

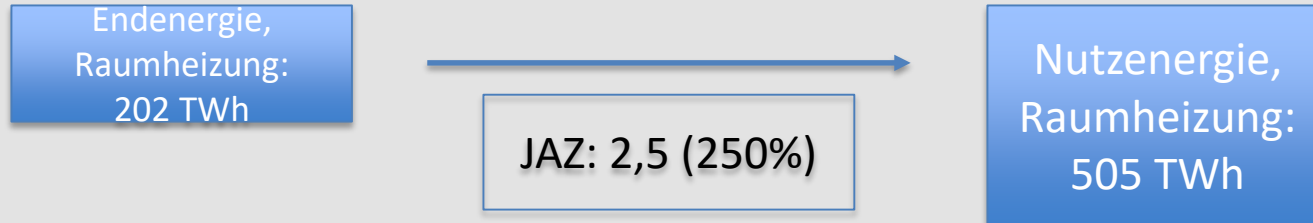


# Endenergie => Nutzenergie

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 H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> 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](https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/Wasserstoff_kompendium.pdf)