

Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik, TU Dresden
Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Lippmann

Wasserstoff - Energieträger der Zukunft?

Seniorenakademie 10-2022

Kontakt:

Walther-Pauer-Bau / Zimmer 216

Tel.: +49 351 463-34793

E-Mail: wolfgang.lippmann@tu-dresden.de

Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik

TU Dresden

Gegründet: 1828
Studenten: 30.466
Mitarbeiter: 4.500 (480 Professuren)



Bereich Ingenieurwissenschaften



Fakultät Maschinenwesen



Institut für Energietechnik

Prof. Dr. rer. nat. habil. Cornelia Breitkopf
Mitarbeiter: 150 (7 Professuren)



Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik

Inhaber:
Prof. Dr.-Ing. habil. Antonio Hurtado

Text verstehen ...

D1353 M17731LUNG
D13N7 4L5 B3W315
D4FU3R, W45 FU3R
3R574UNL1CH3 D1NG3
UN53R V3R5T4ND
L315T3N K4NN.
B31NDRUCK3ND.
4M 4NF4G W4R'S
5CH0N 5CHW3R, 4B3R
J37Z7, 1N D1353R
Z31L3, L1357 35 D31N
G3H1RN 4U70M4715CH.
0HN3 D4RU3B3R N4CHZUD3NK3N.
531 570LZ DR4UF.
4L50 731L3 D13535 B1LD,
W3NN DU 35 L353N
K4NN57.

Diese Mitteilung
dient als Beweis
dafür, was für
erstaunliche Dinge
unser Verstand
leisten kann

...

Der Traum von einer autarken Wasserstoffwirtschaft

Energie aus regenerativen Energiequellen, zwischengespeichert im Wasserstoff

Wasserstoffwirtschaft:

- Energiewirtschaft, basierend auf frei handelbaren Wasserstoff als **Energieträger**
- Zur Zeit nicht existent, da H_2 vorwiegend dort hergestellt wird, wo er benötigt wird (**Rohstoff in der chemischen Industrie**)

Der Traum von einer autarken Wasserstoffwirtschaft



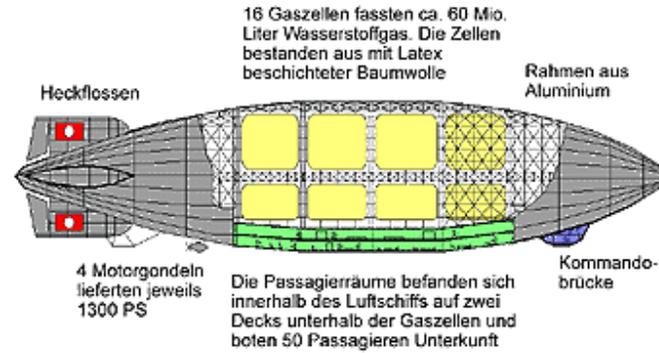
State of the Art

Wasserstoff als Energieträger

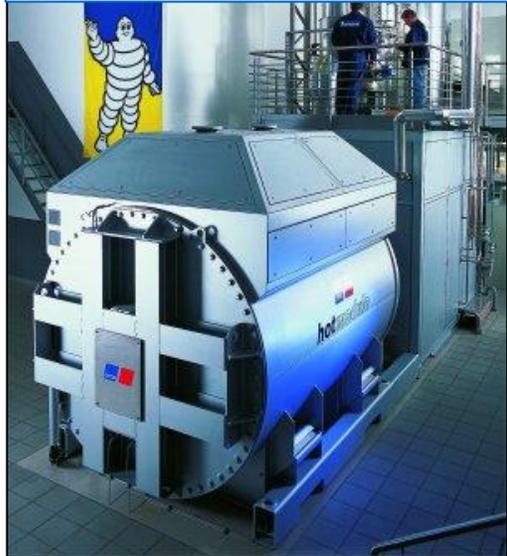
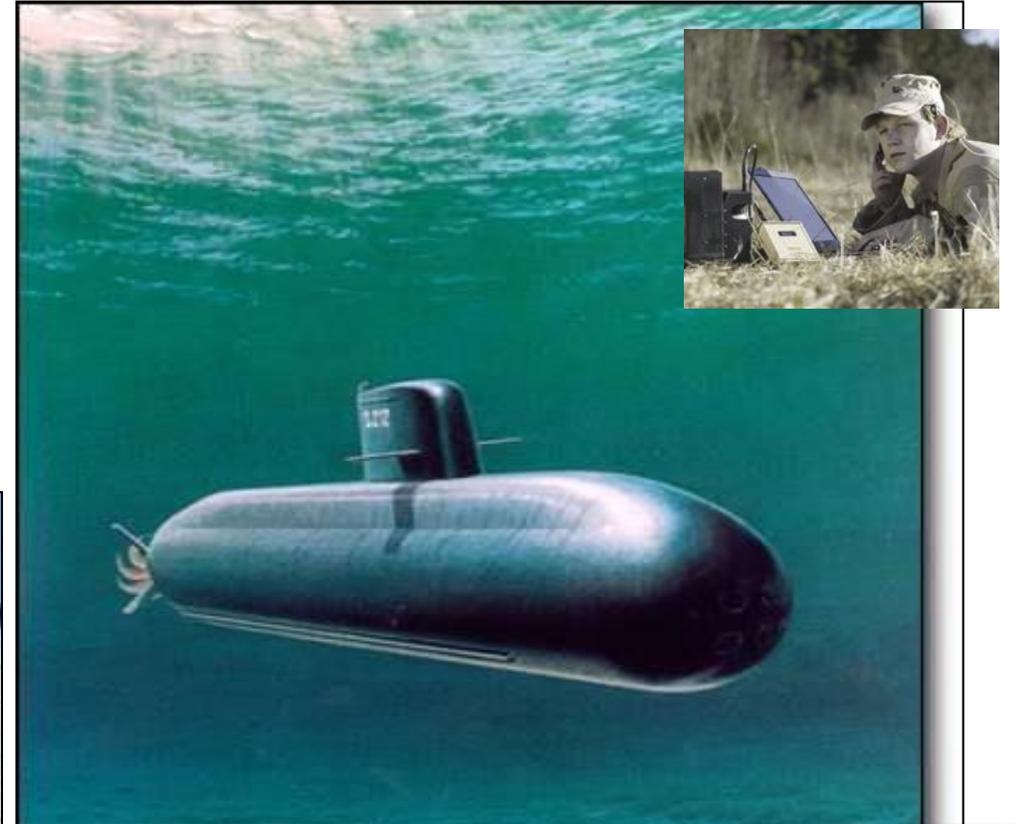
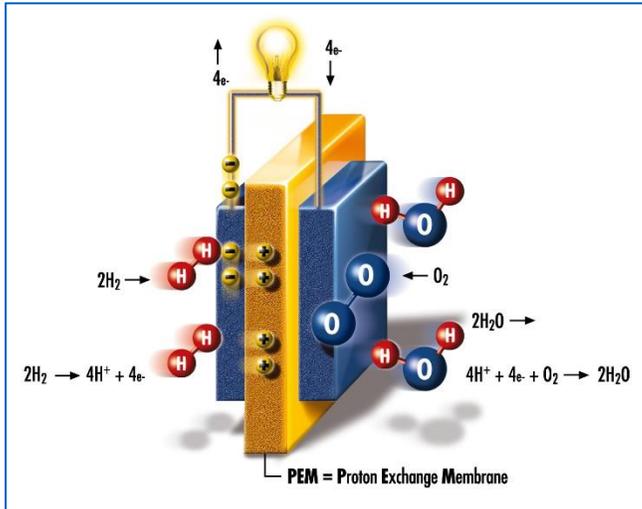


Aufbau des Luftschiffs Hindenburg

Länge: 245 Meter, Höchstgeschwindigkeit: 125 km/h



Wasserstoff als Energieträger



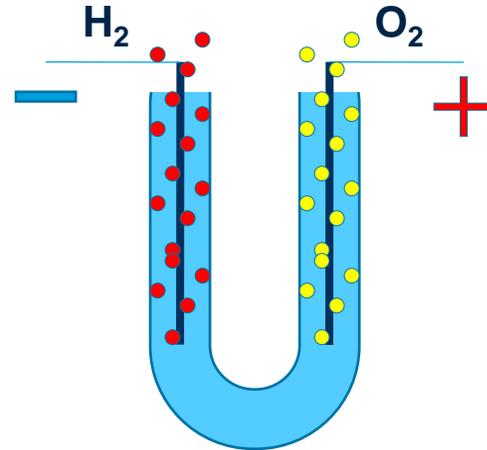
Benötigen wir Wasserstoff in einer künftigen Energiewirtschaft?

Energiewende und Wasserstoff



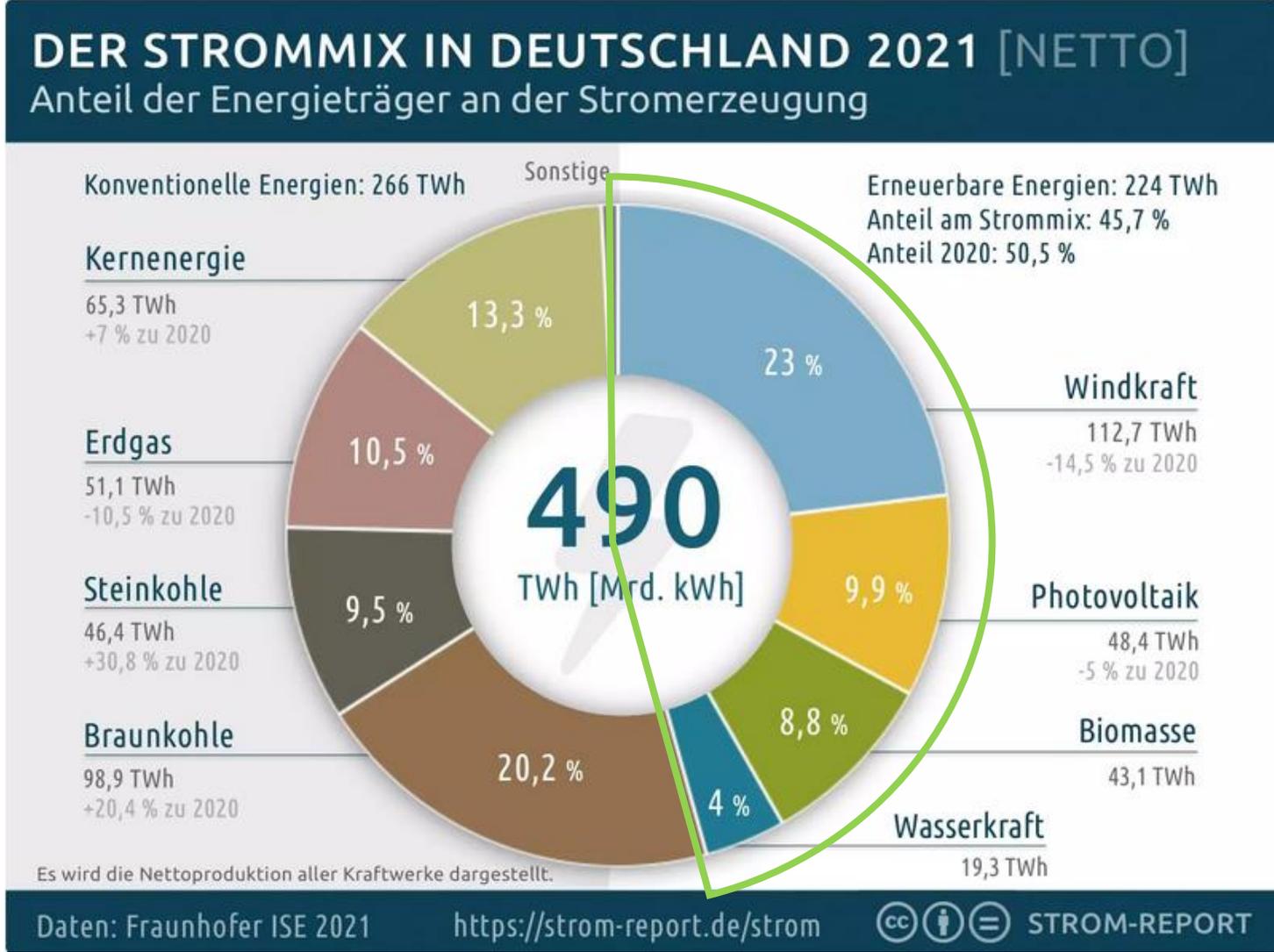
- Energiewende in Deutschland stützt sich vorrangig auf **Wind- und Solarenergie**
- Windkonverter und Solarzellen produzieren **Elektroenergie**
- Wind- und Solarenergie steht **NICHT kontinuierlich** zur Verfügung
- Elektroenergie muss gespeichert werden zum Ausgleich der Fluktuation
- Es stehen jedoch **KEINE Speicher für Elektroenergie** mit der erforderlichen Speicherkapazität zur Verfügung

Warum Wasserstoff?

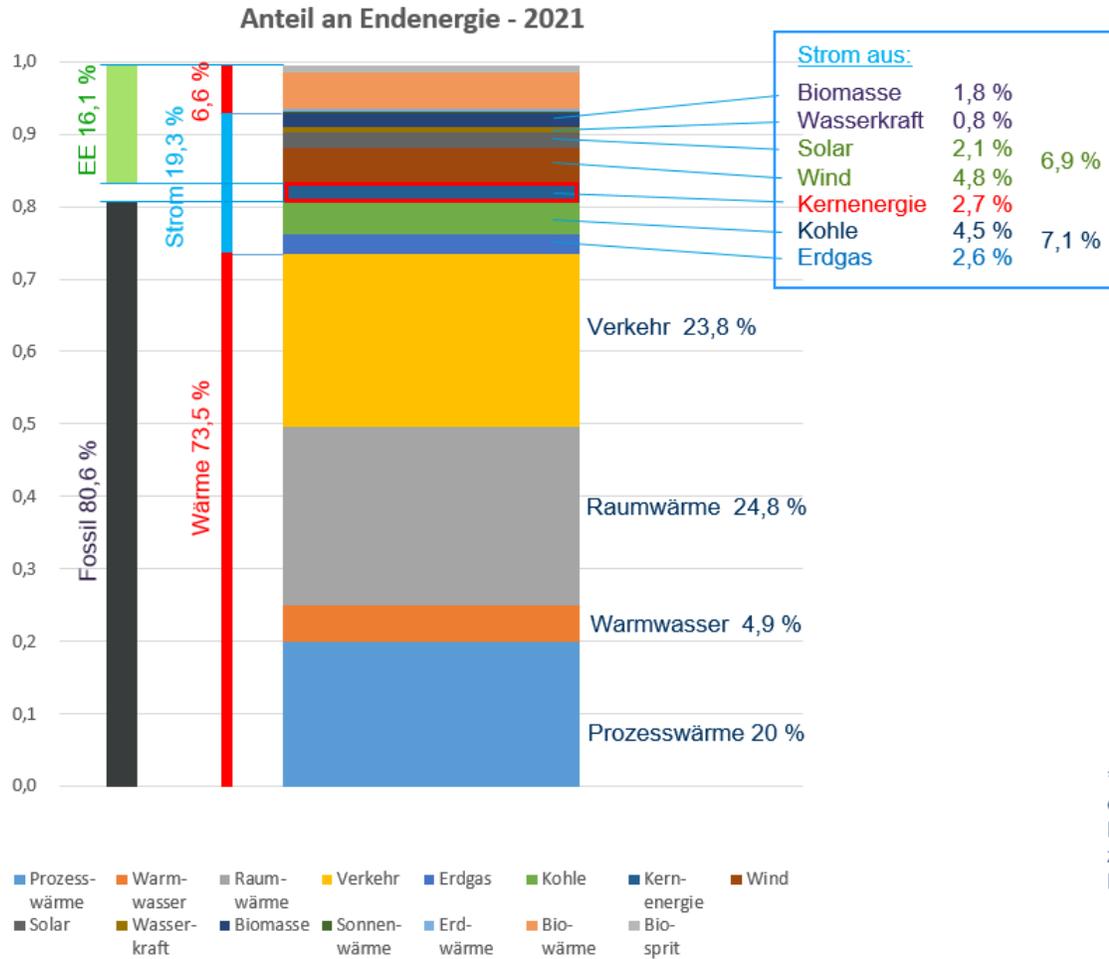


- Die **Konvertierung von elektrischen Strom in chemische Energie** gelingt am einfachsten durch die **Wasser-Elektrolyse**

Strommix in Deutschland 2021



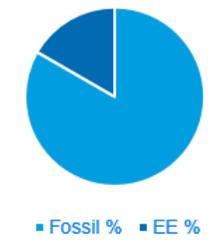
Endenergiemix - Deutschland 2021



2.317 TWh*

davon:
1.003 TWh Erdgas
(incl. als Rohstoff)

Endenergieverbrauch



*) Der **Bruttoendenergieverbrauch** ist der Energieverbrauch der Endverbraucher (Endenergieverbrauch) zuzüglich der Netzverluste und des Eigenverbrauchs der Kraftwerke.

Energiesystem Deutschland – aktueller Stand – 10-2022

Energiewende – Ziele:

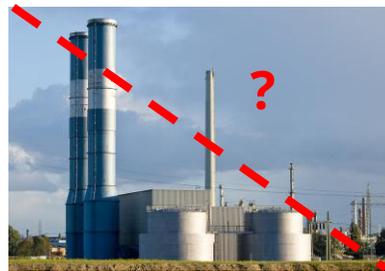
- Energiebereitstellung bis **2045**: klimaneutral
- Elektrischer Strom soll **sicher und bezahlbar** bleiben (für die Bevölkerung und die Industrie)



12-2022:
Abschaltung der
letzten 3 KKW mit
4.285 MWel



Bis **2035:**
Abschaltung
der letzten
Kohlekraftwerke



Bis ?:
Abschaltung der letzten
Gaskraftwerke

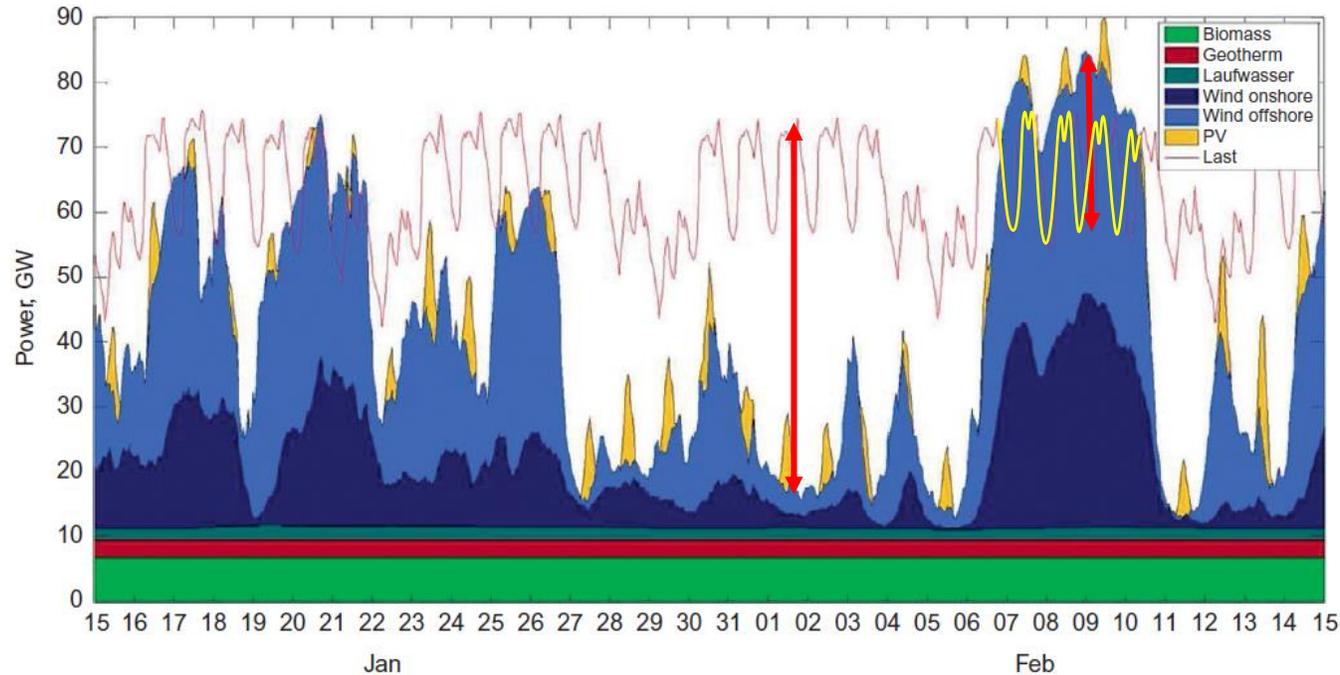


Bis **2035:**
Ersetzen aller bisherigen KKWs und Kohlekraftwerke durch
Wind- und Solarkraftwerke (in oder außerhalb Deutschlands)



Energiewende in Deutschland

Problem 1: Volatile Stromerzeugung durch Wind- und Solarenergie

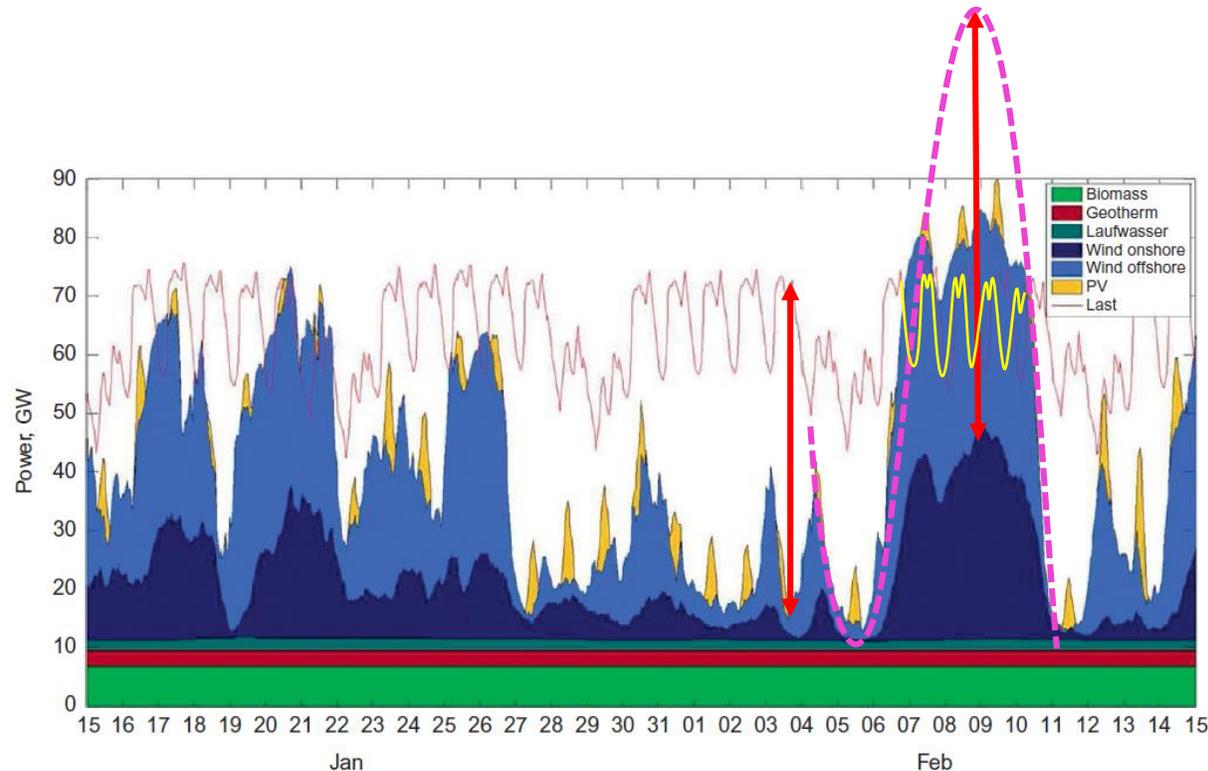


↑↓ Kompensation / Entsorgung erforderlich

Ist der Zubau von immer mehr Wind- und Solarkraftwerken die Lösung?

Energiewende in Deutschland

Problem 1: Volatile Stromerzeugung durch Wind- und Solarenergie



↕ Kompensation / Entsorgung erforderlich

Fazit:

Wir können soviel Wind- und Solarparks bauen, wie wir wollen:

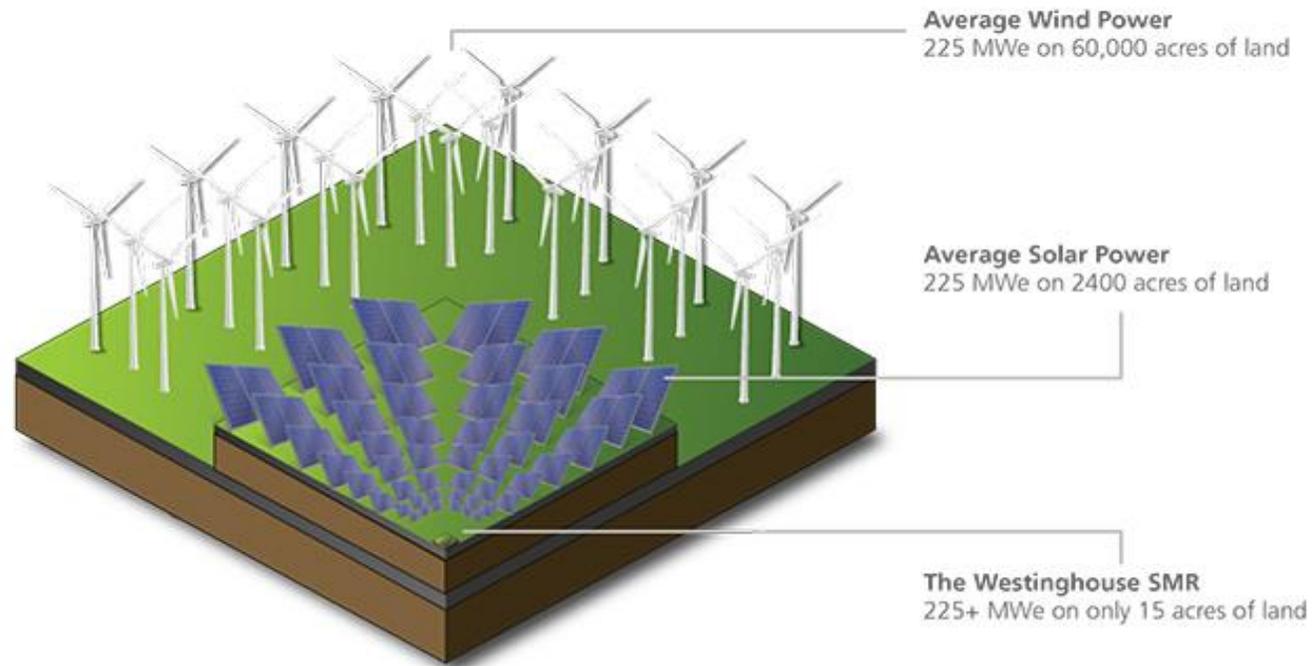
- Wir vergrößern nur die Überlast und reduzieren nicht die Unterlast

➡ Energiespeicher für die kurzzeitige Kompensation und für die Jahreskompensation erforderlich (> 10 TWh?)

Energiewende in Deutschland

Problem 2: Raumbedarf vs. Akzeptanz

Clean Energy Comparison

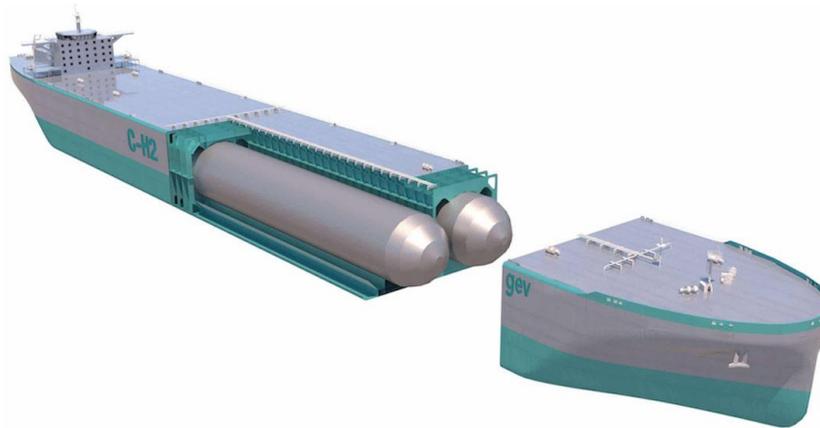


SMR = small modular reactor

1 acres = 4047 m² = 0,4 ha

Wasserstoff und Energiewende

- Alternative: **Import** von Wasserstoff, synthetischen Treibstoffen oder Ammoniak?
- ... eine Frage des **Preises**: Flüssiggas-Import über **Tanker 3..5... X Preis von Gasimport über Pipeline**



Stromversorgung in Deutschland

1. Strom kann nicht gespeichert werden
2. Der Energieertrag muss zu jedem Zeitpunkt gleich der Energieentnahme sein
3. Jedes EU-Land ist für die Stabilität seines Netzes eigenverantwortlich
4. **Installierte Leistung (IP):** (Peak) Leistung des Kraftwerkes (Fossil, Solar, Wind,)
5. **Gesicherte Leistung (SP):** Leistung, die zu jedem Zeitpunkt im Jahr abgerufen werden kann (% der installierten Leistung):

- | | | |
|----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| ▪ KKW: 90 % | ▪ Kohle-Kraftwerk: 90 % | ▪ Gas-Kraftwerk: 90 % |
| ▪ Photovoltaik: 0 % | ▪ Wind: 1..2 % | |

- **Deutschland bis 2019: >100%**
- 2020: 500 MW fehlende gesicherte Leistung (SP)
- 2023: 15.000 MW fehlende gesicherte Leistung (SP)
- 2030: 30.000 MW fehlende gesicherte Leistung (SP)
- 2038: 45.000 MW fehlende gesicherte Leistung (SP)
- **Speicherkapazität** in Deutschland reicht für ca. **30...60 min** zur Kompensation einer “Dunkel-Flaute”
- Eine “Dunkel-Flaute” kann > 14 Tage andauern → ... **riesige Speicher wären notwendig....**

Stromversorgung in Deutschland

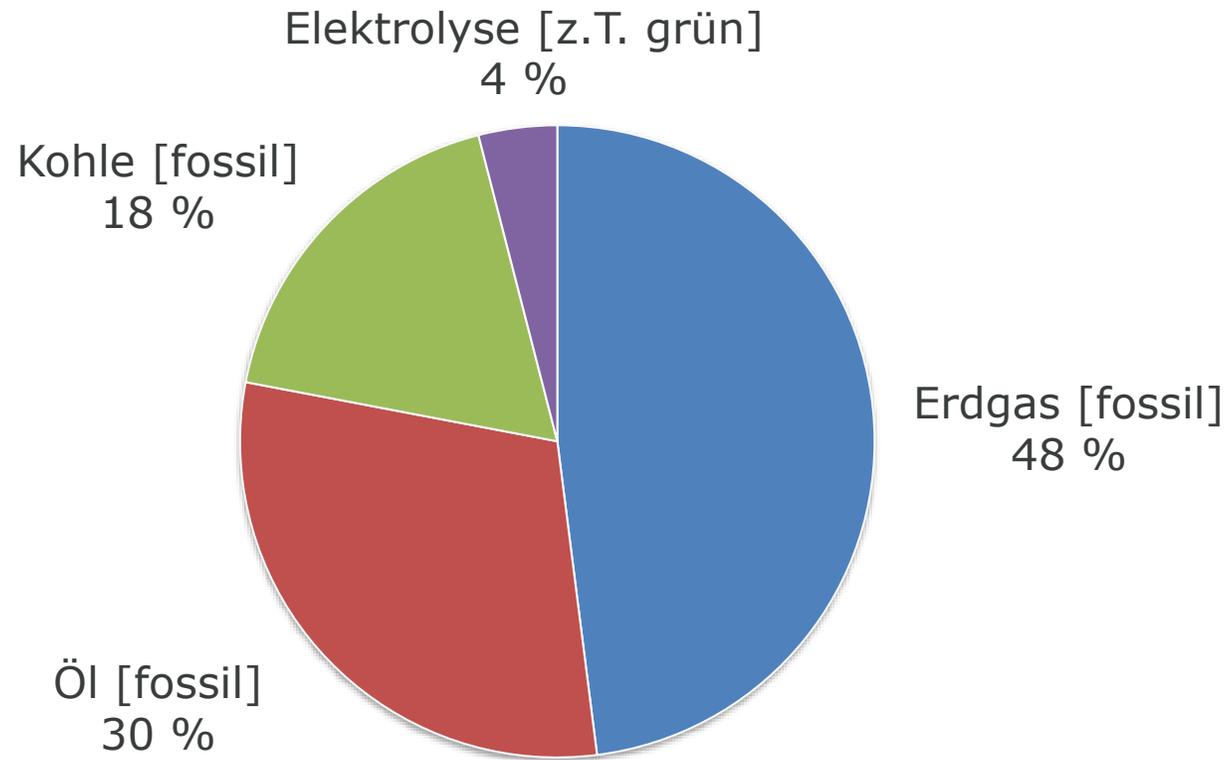
- Im Moment nutzt Deutschland den **komplette Kraftwerksflotte** als riesiges **Speichersystem**
- D. h. Deutschland leistet sich zwei Energiesysteme – Folge: Deutschland hat weltweit die **höchsten Strompreise...**

Wasserstoff

Herstellung – Speicherung – Transport – Nutzung

Wasserstoff

Quellen des Wasserstoffs, Welt – 2020



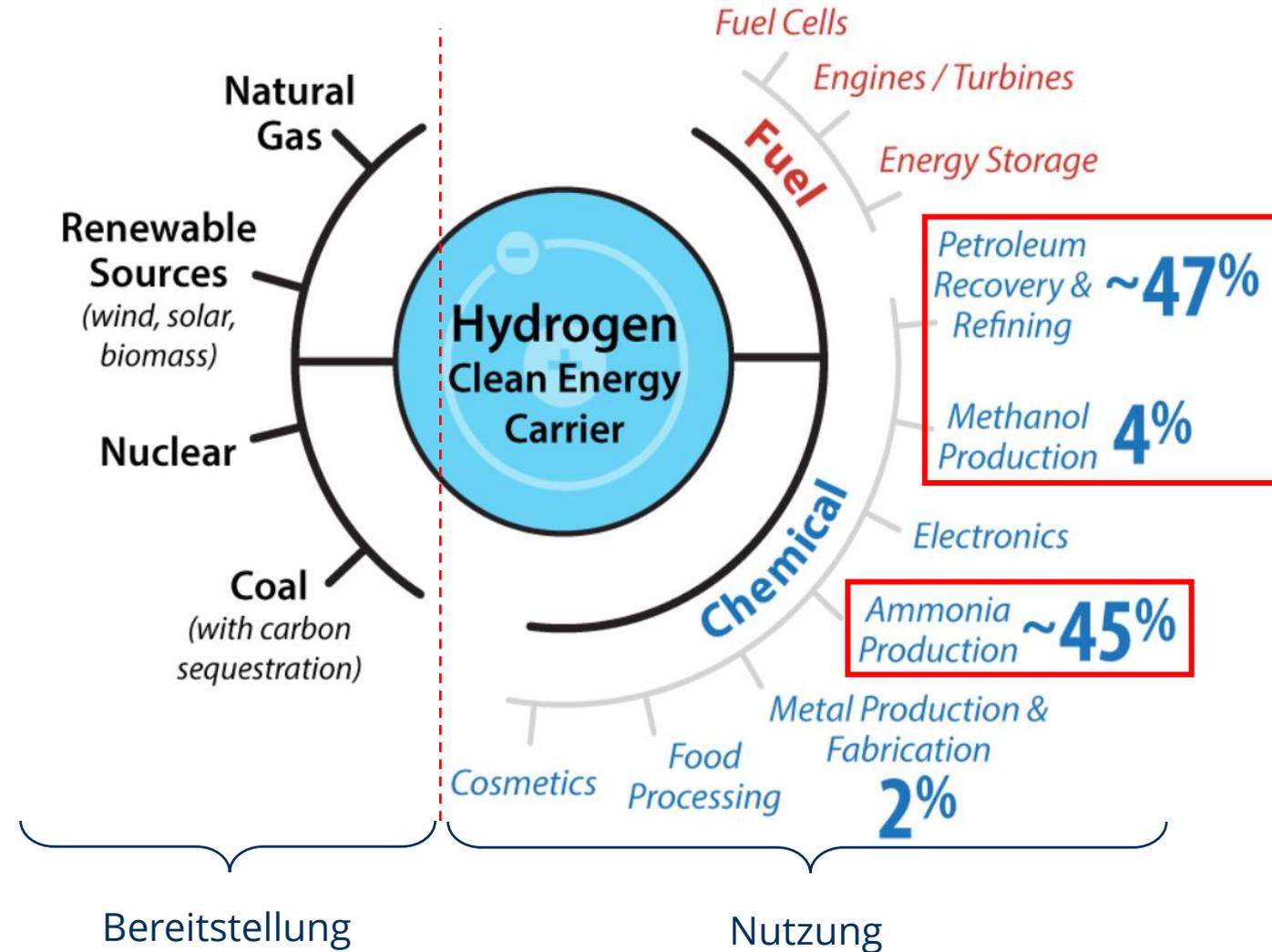
Q: International Energy Agency

Übersicht H₂-Nutzung

Jährlicher Wasserstoff-Verbrauch:

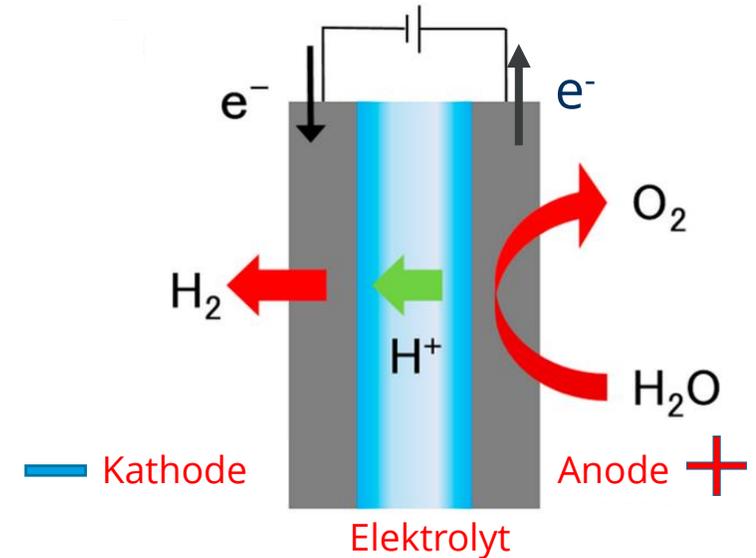
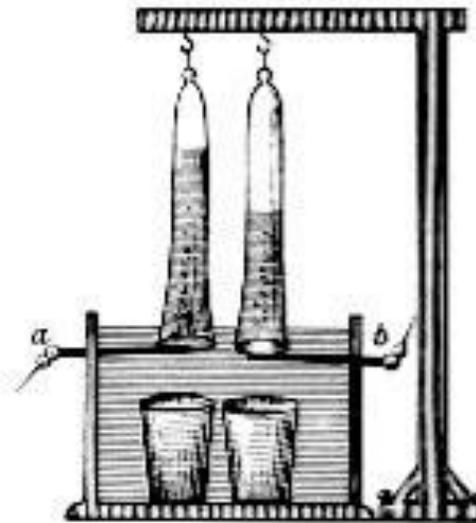
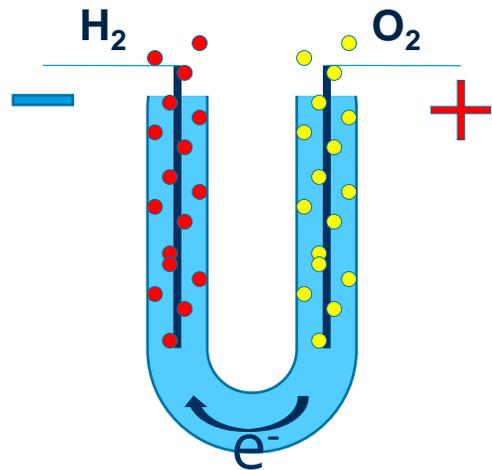
Welt	500 Mrd. Nm ³
Europa	47 Mrd. Nm ³
Deutschland	20 Mrd. Nm ³

Quelle: DOE HTAC 2016



Grüner Wasserstoff als Energiespeicher

Herstellung: über Elektrolyse aus grünem Strom

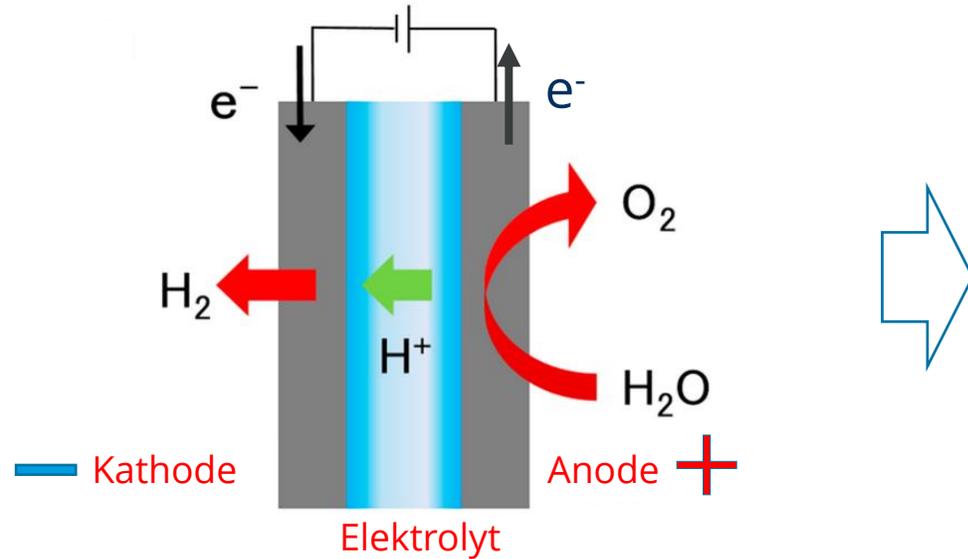


PEM-Elektrolyse schematisch

- Die Konvertierung von elektrischen Strom in chemische Energie gelingt am einfachsten durch die Wasser-Elektrolyse
- Um **1800**: deutscher Chemiker Johann Wilhelm **Ritter: Elektrolyse** von Wasser in einem U-Rohr

Grüner Wasserstoff als Energiespeicher

Herstellung: über Elektrolyse aus grünem Strom



PEM-Elektrolyse schematisch



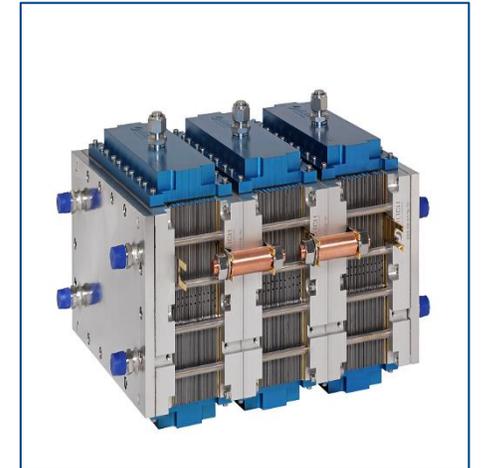
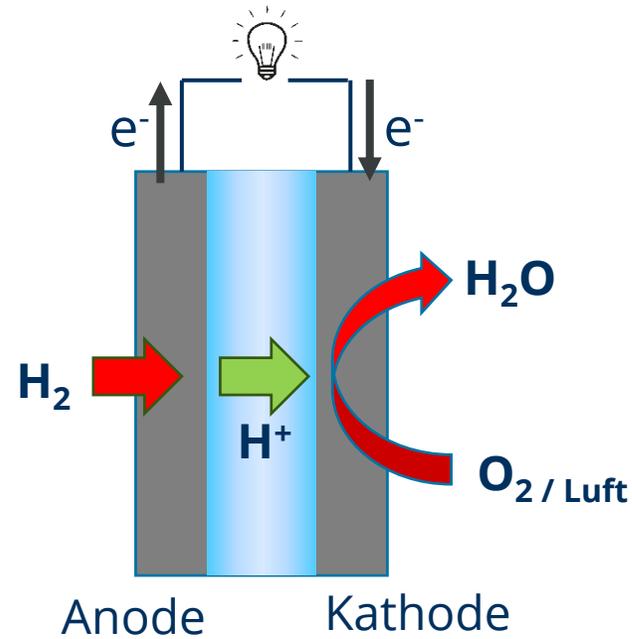
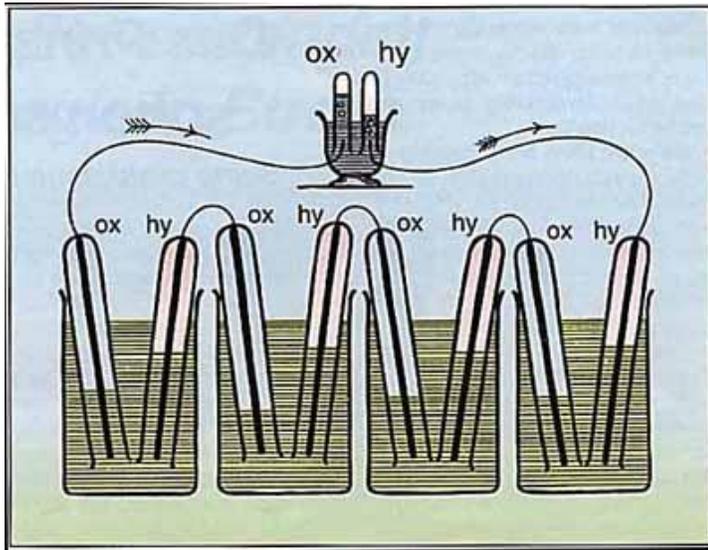
PEM-Elektrolyse Kapazität: 760 Nm³ H₂/h 40 bar

Quelle: Lurgi

- Die Konvertierung von elektrischen Strom in chemische Energie gelingt am einfachsten durch die Wasser-Elektrolyse

Grüner Wasserstoff als Energiespeicher

Rückverstromung: über Brennstoffzelle

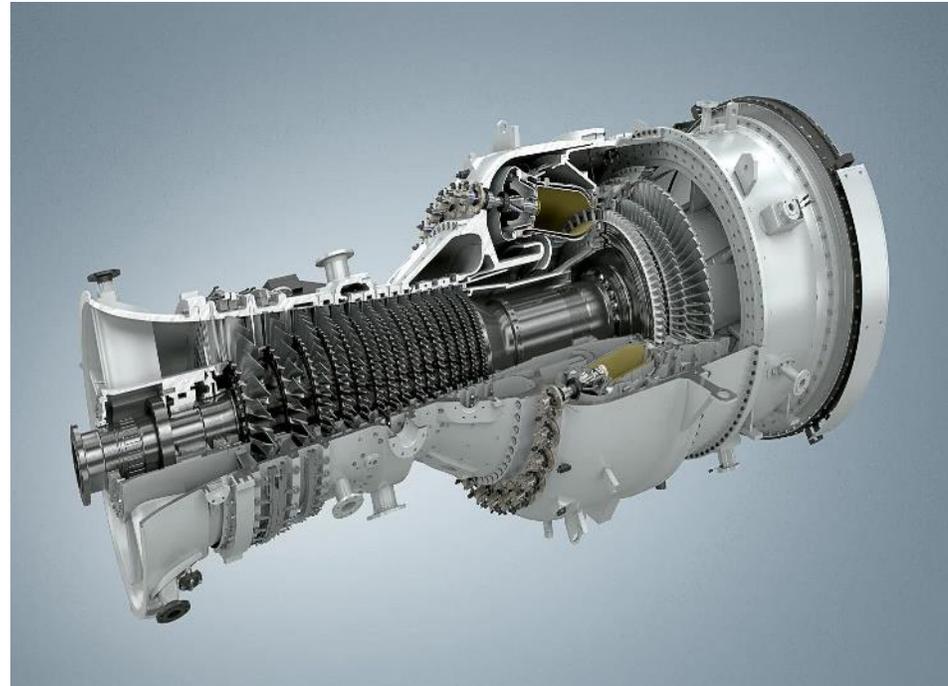
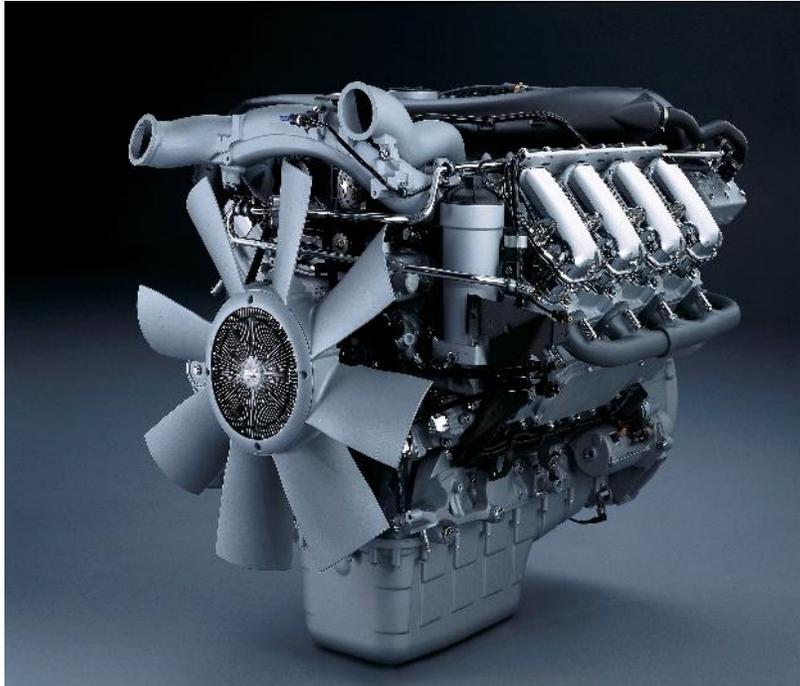


Sir William Robert **Grove** (1811 - 1896)
konstruierte schon **1839** die erste **Brennstoffzelle**.

Die Brennstoffzelle ist Umkehrung der Elektrolysezelle

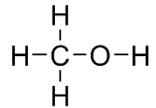
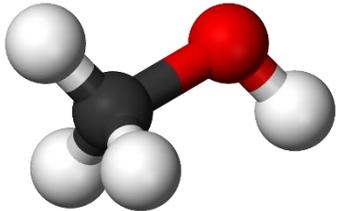
Grüner Wasserstoff als Energiespeicher

Rückverstromung: über Verbrennungsmotor und Gasturbine

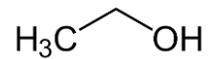
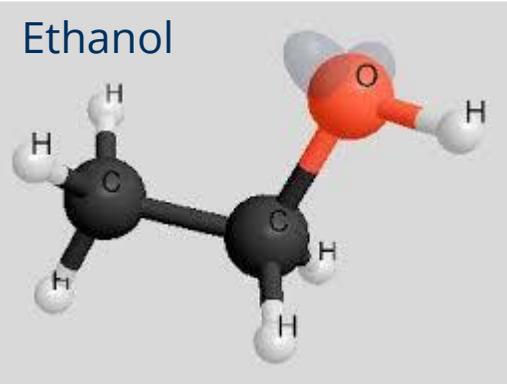


Grüner Wasserstoff als Rohstoff in der Chemischen Industrie

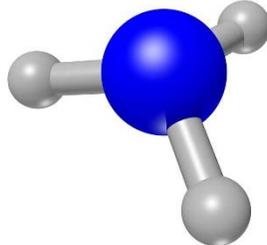
Methanol



Ethanol



Ammoniak

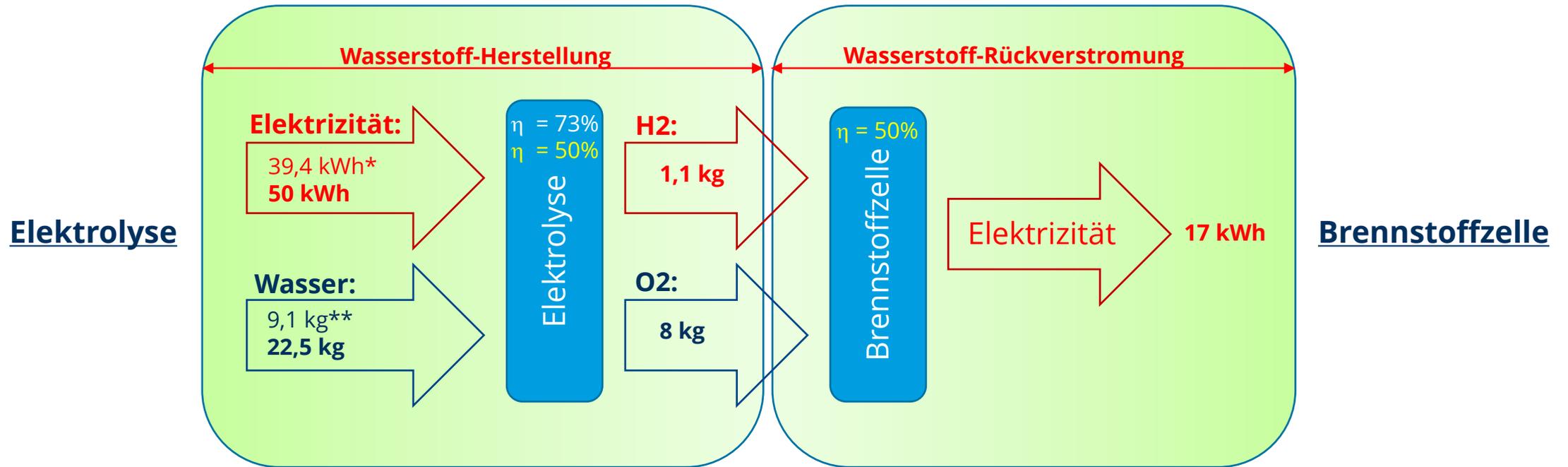


... und viele andere Wasserstoff-Verbindungen

Für das Jahr **2050** wird eine Wasserstoffmenge in Höhe von rund **20 TWh** Heizwert für die Herstellung von Ammoniak in Deutschland prognostiziert. (Statista.de)

Wasserstoff als Energieträger

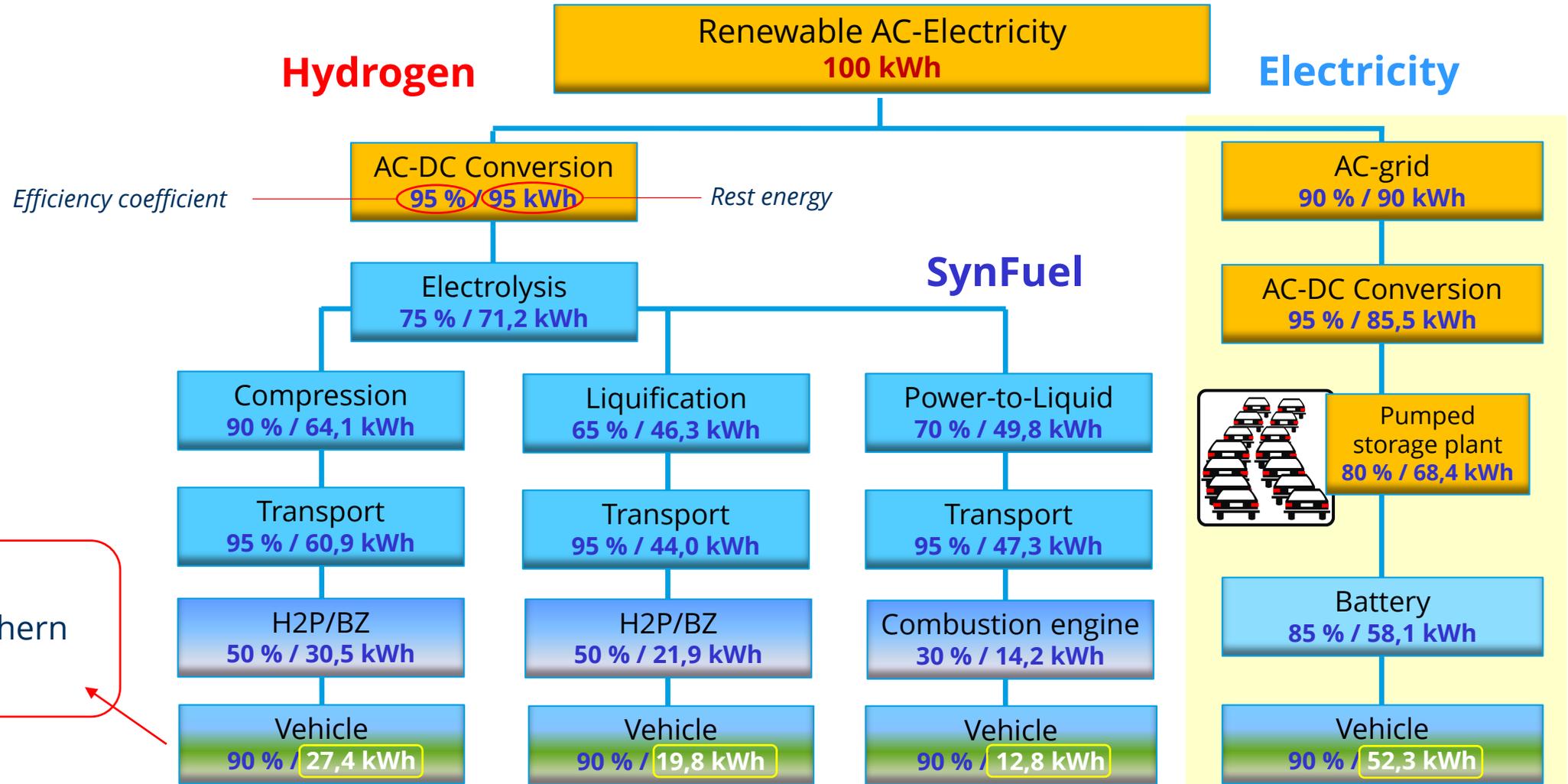
Das Problem der Wirkungsgrade



*) theoretically: 39,4 MWh for 1,1 t H₂, practical: 50 kWh for 1 kg H₂
**) theoretically: 9 kg fresh water, actually: 22,5 kg raw water for 1 kg H₂
1 kg H₂ = 33,33 kWh

Wasserstoff als Energieträger

Das Problem der Wirkungsgrade

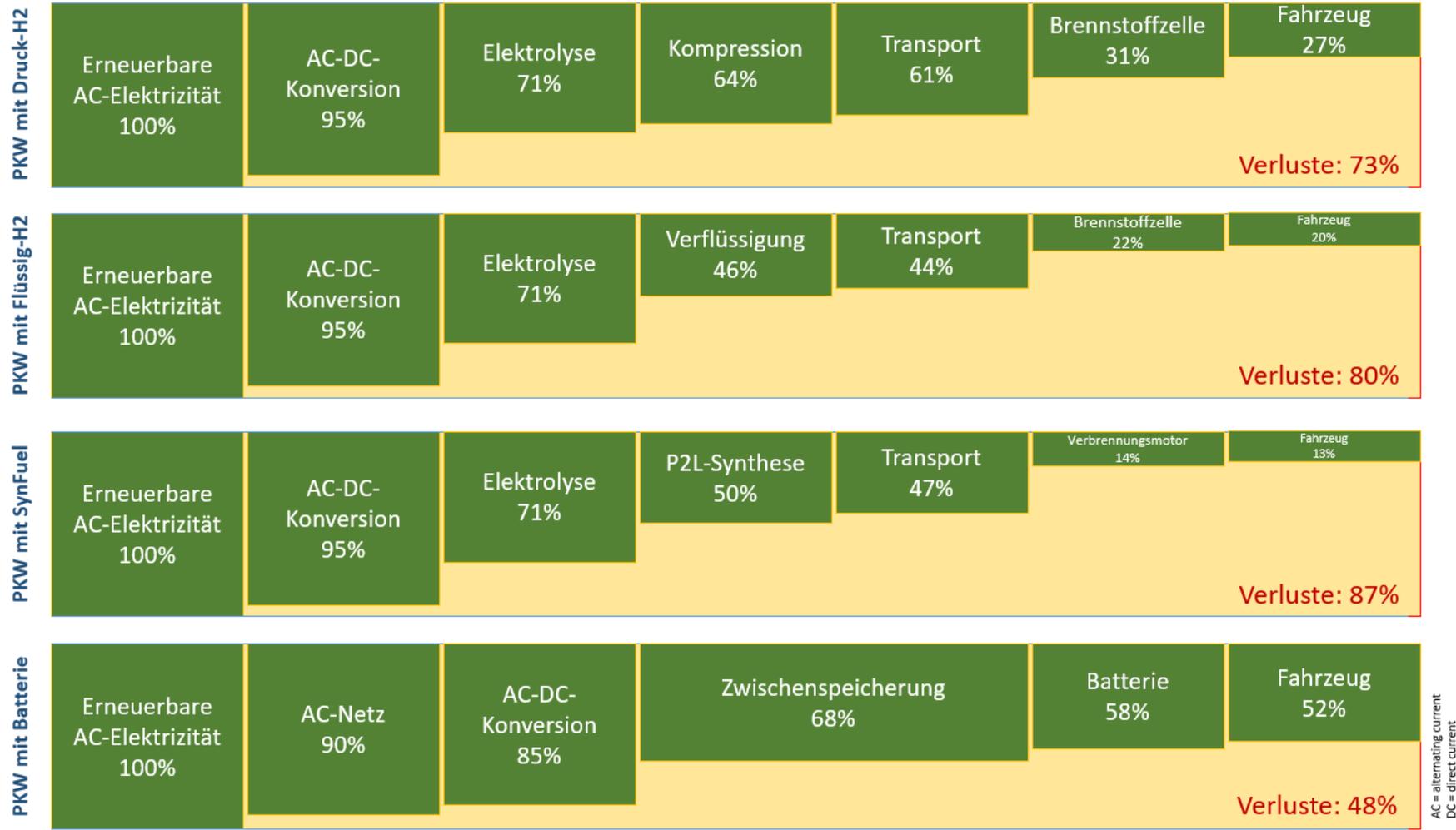


Fazit:
Strom zu speichern ist sehr teuer

AC = alternating current
DC = direct current

Wasserstoff als Energieträger

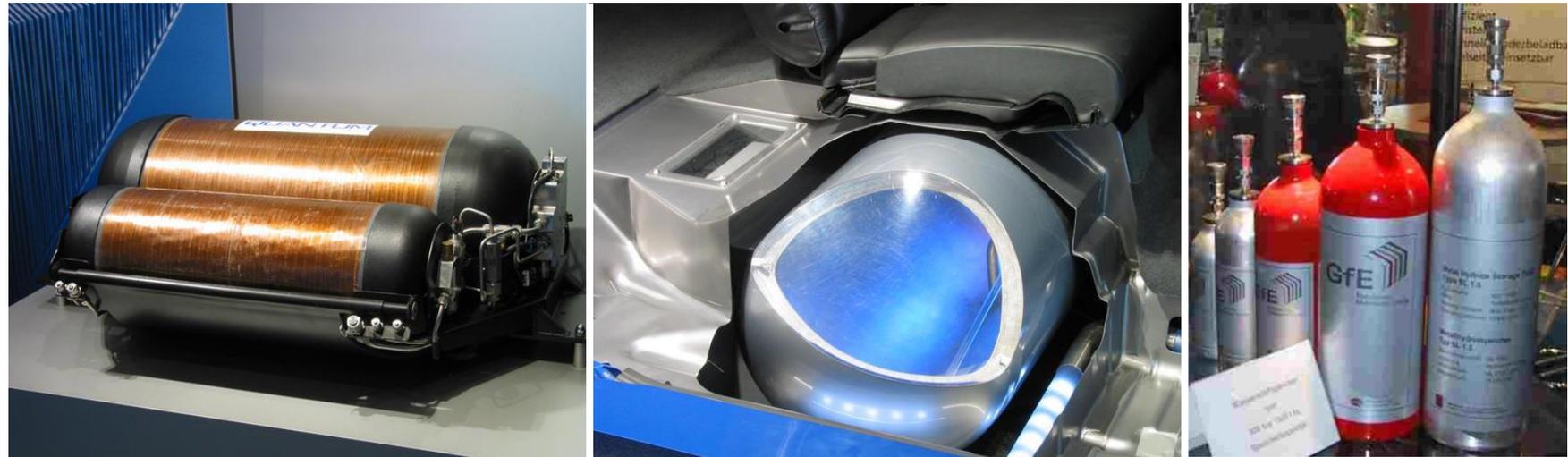
Das Problem der Wirkungsgrade



Wasserstoffspeicherung

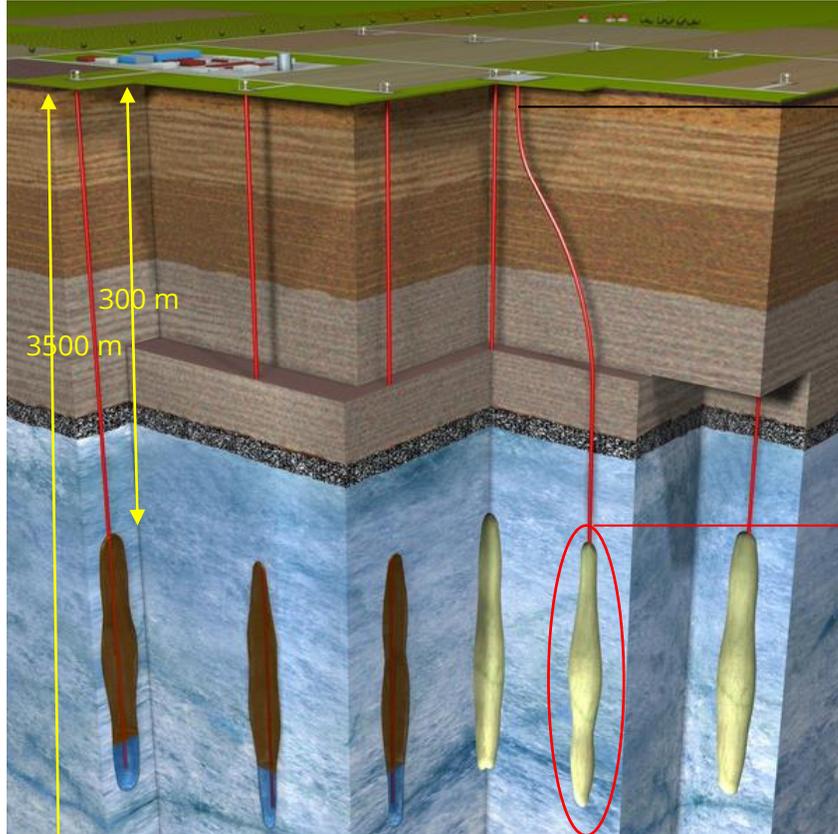
Zur Zeit gibt es nur drei wirklich einsatzbereite Speichermethoden:

- die Speicherung von **gasförmigem Wasserstoff** in Druckbehältern,
- die Speicherung von **flüssigem Wasserstoff** in vakuumisolierten Behältern
Abkühlung auf -253 °C , dazu wird ca. $\frac{1}{3}$ der im H_2 gespeicherten Energie benötigt
- die Einlagerung von Wasserstoff in **Metallhydriden**.

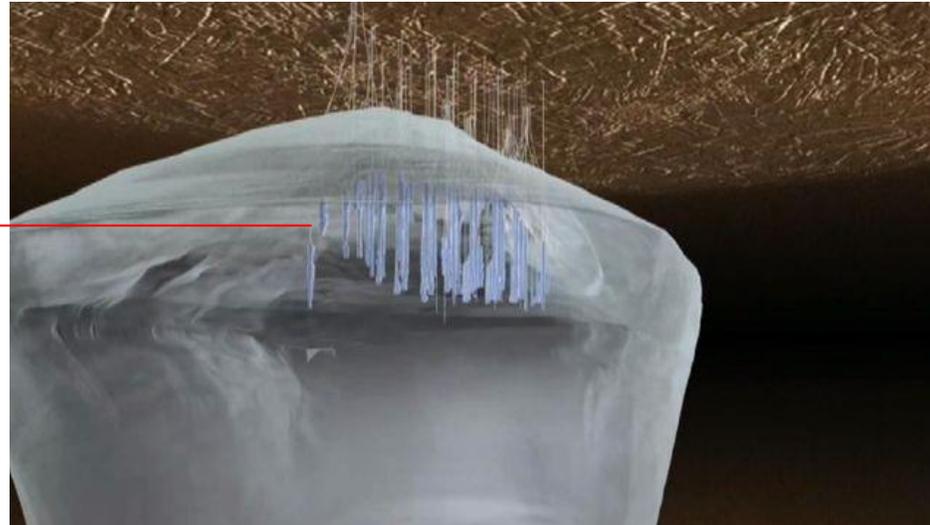


Wasserstoffspeicherung

Untertage Gasspeicher

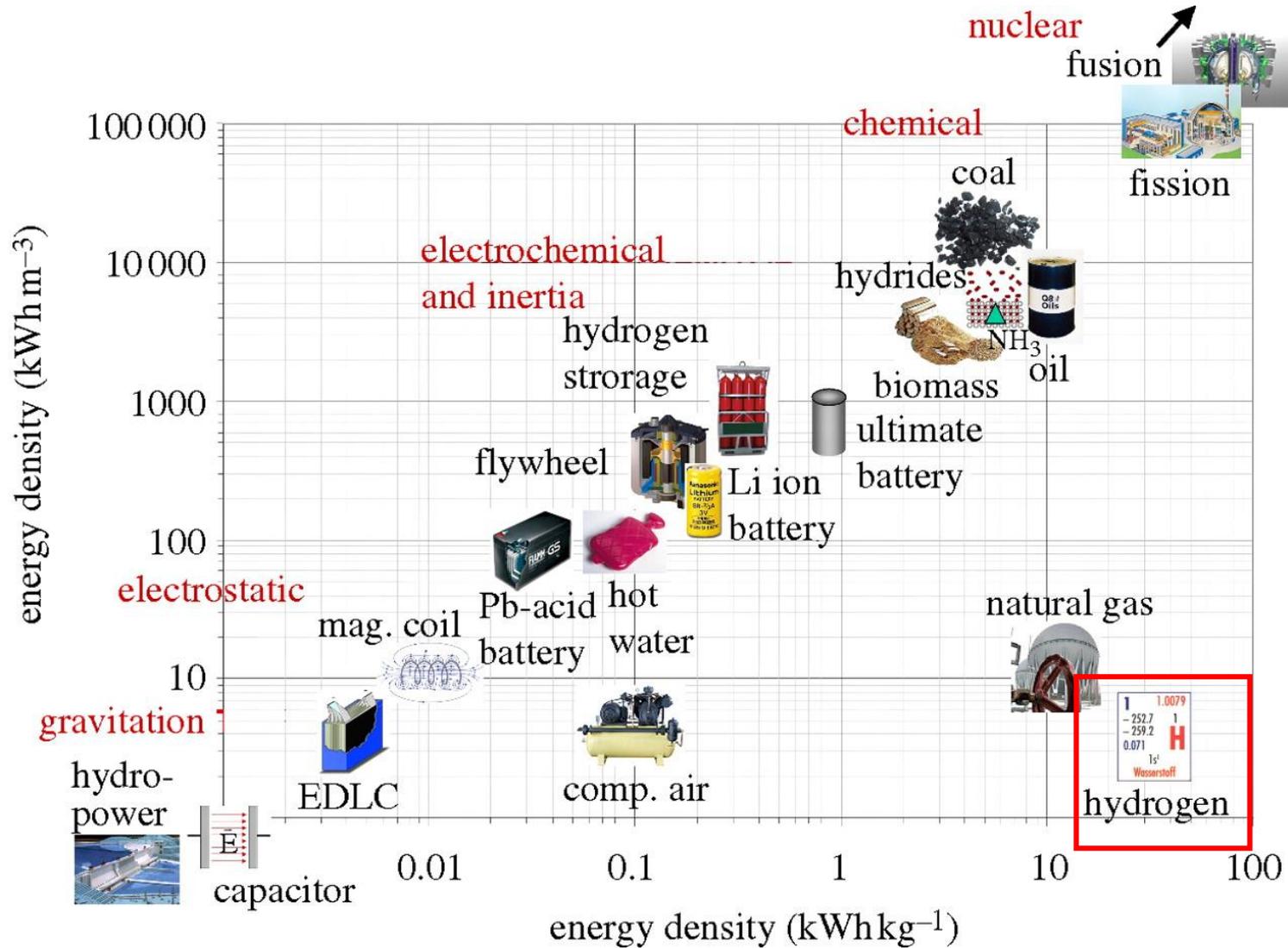


Kavernen-Speicher
($V < 400.000 \text{ m}^3$)



- Größter Poren-Speicher in Deutschland: 17 Mrd. m^3

Wo liegt das Problem?



Wasserstofftransport

- Pipeline
- Trailer
- Tanker



<https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/oslo-und-berlin-pruefen-bau-einer-wasserstoff-pipeline/>



https://www.eniwa.ch/upload/rm/5-broschuere-wasserstoff-a4-web.pdf?_=1522830937000

NH4: Bei einem gleichgroßen Schiffstank können 596,8 GWh Energie (87,87 \$/MWh)
H2: 404,8 GWh (200,94 \$/MWh) geliefert werden.



Die Suiso Frontier, hier noch auf der Werft von Kawasaki Heavy Industries in Kōbe, ist weltweit das erste Schiff, das Flüssigwasserstoff über See transportieren kann.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstofftanker>

Wo liegt das Problem?



- LH2 Produktion in Europa: ca. 19 t/d (USA: 170 t/d)
- Umstellung des EU-weiten Luftverkehrs auf H₂: 30.000 t/d
- Erforderliche Erhöhung der Stromproduktion: ca. +130% der deutschen Stromproduktion

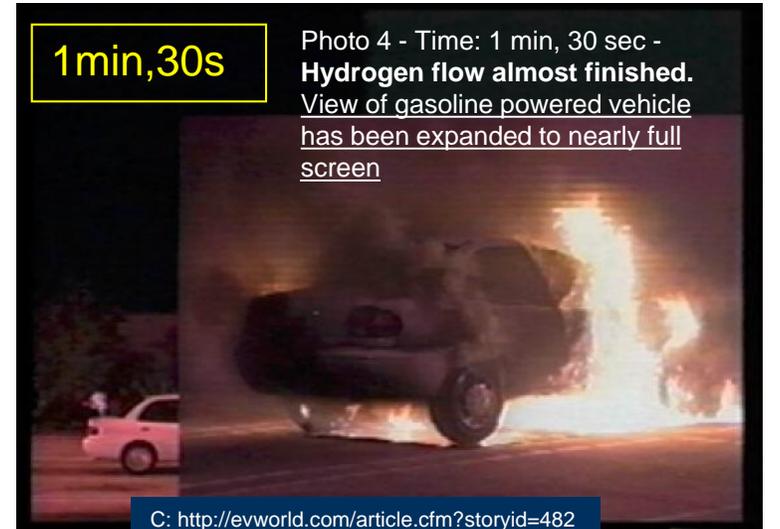


Die erste A380 wird zum Wasserstoff-Testflugzeug

Airbus baut einen A380-Prototypen zur fliegenden Testplattform für künftige Wasserstoffantriebe um. Dazu werden im Hauptdeck vier Tanks für flüssigen Wasserstoff und im Oberdeck, an der linken Rumpfmittseite, ein Testtriebwerk montiert. Ab Ende 2026 beginnen die Flugtests mit dem Fünfstrahler.

Wasserstoff-Sicherheit

Wasserstoff-Sicherheit

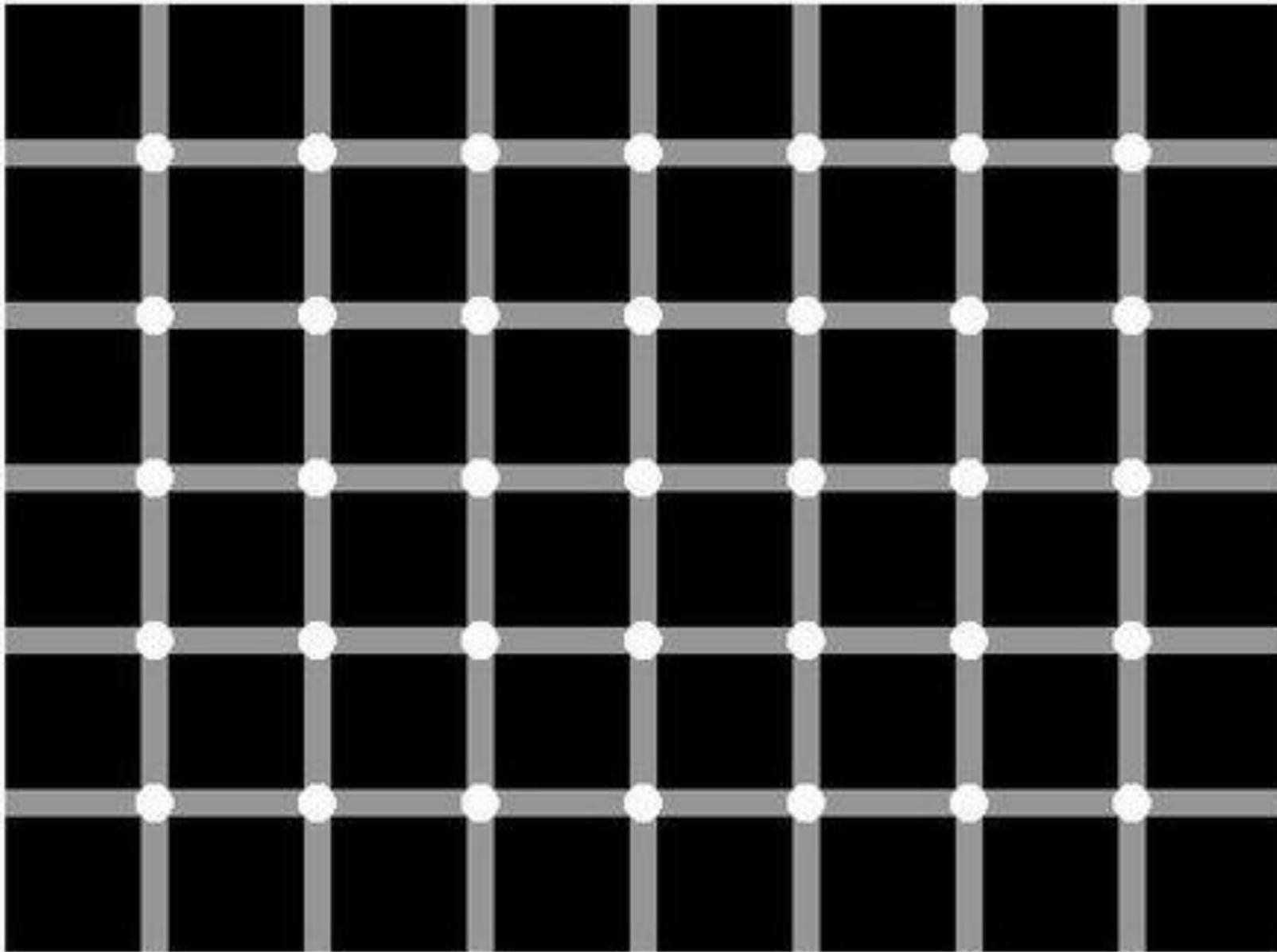


C: <http://evworld.com/article.cfm?storyid=482>

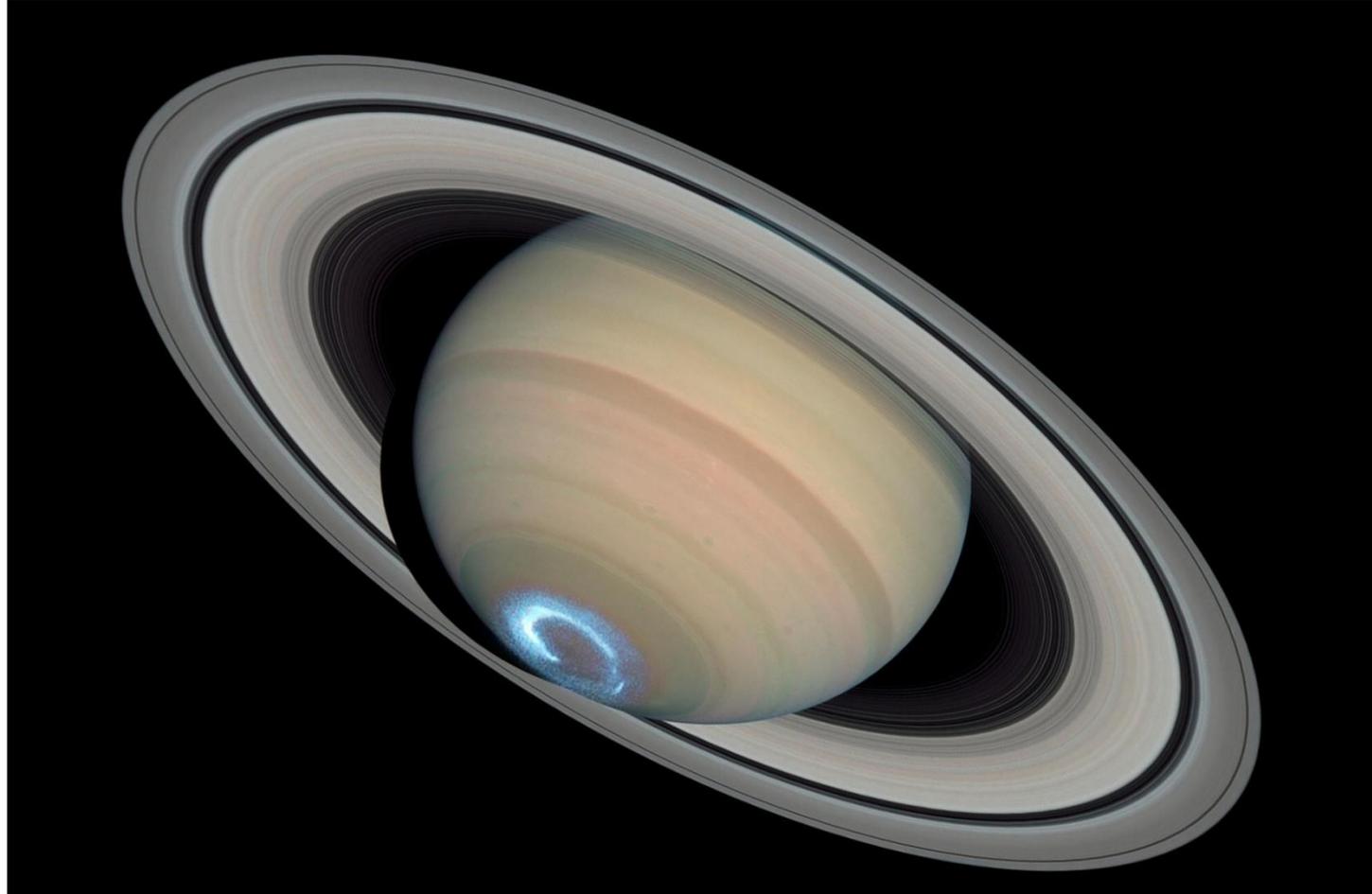
Wasserstoff-Sicherheit



Bei einem Crash entweicht der Wasserstoff schnell nach oben.
Das Gefährdungspotenzial ist somit geringer als bei Kerosin-getriebenen Flugzeugen.



Der Saturn mit seinen Ringen aus Eis und Staub. Der Planet selbst besteht größtenteils aus Wasserstoff und Helium.



Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Kann man die Erdgaslieferungen durch grünen Wasserstoff ersetzen?

Wie viel Wasserstoff würde man benötigen, um alles Erdgas zu ersetzen?

- Deutschland hat im Jahr 2021 insgesamt **1.003 TWh Erdgas** verbraucht ([Statista.com](https://www.statista.com)).
- 1 kg H₂ Energieinhalt: 33,33 kWh
- D. h. man benötigt 30.000.000.000 kg pro Jahr Wasserstoff, entspricht **30 X10⁶ t H₂** als Ersatz

Wie viel Strom würde man benötigen, um den benötigten Wasserstoff zu erzeugen?

- 1 kg Wasserstoff erfordert ca. 40 bis 80 kWh Strom. GASAG gibt dazu einen realistischen Wert von 53 kWh pro 1 kg H₂ an ([gasag: 13.05.22](https://www.gasag.com)).
- 53 kWh/kg H₂ entspricht Wirkungsgrad von 63 % (sehr guter Wirkungsgrad!)
- Um die 30 X 10⁶ t H₂ herstellen zu können wären damit also 1.590.000.000.000 kWh beziehungsweise **1.590 TWh grüner Strom** erforderlich.

Woher soll der Strom kommen?

- Deutschland 2021 Stromverbrauch: **518 TWh**, davon 234 TWh (45%) aus EE, davon 48 TWh aus Solar (9% des Gesamtstromes)
- Um 30 X 10⁶ t H₂ zu erzeugen wäre **dreimal soviel Strom** erforderlich, wie 2021 erzeugt wurde
- Um H₂ aus grünem Strom zu erzeugen, müsste man fast **siebenmal so viel Strom aus EE einsetzen** als in 2021 insgesamt erzeugt wurde.

Wie realistisch ist es, genug Wasserstoff zu erzeugen, um alles Erdgas zu ersetzen?

- Strombedarf wird durch immer mehr Elektroautos und Wärmepumpen weiter steigen
- Für den zusätzlichen Strombedarf zur Wasserstoffgewinnung wären siebenmal so viele Anlagen erforderlich, wie bereits in Deutschland stehen.
- Dazu kämen noch einmal mindestens eine Verdoppelung der bereits bestehenden Anlagen, um den ganz normalen Strombedarf zu decken.
- In Deutschland gab es Ende 2021 1.501 Offshore-Windenergieanlagen ([Windguard.de](https://www.windguard.de)), 28.230 Windkraftanlagen an Land ([Statista.com](https://www.statista.com)) und 2,2 Millionen Solaranlagen. Dabei werden jährlich circa 6.000 Windkraftanlagen zurückgebaut, da deren Förderung ausläuft
- **FAZIT: unrealistisch**



<https://imhamsterrad.de/wann-platzt-die-wasserstoff-blase/>