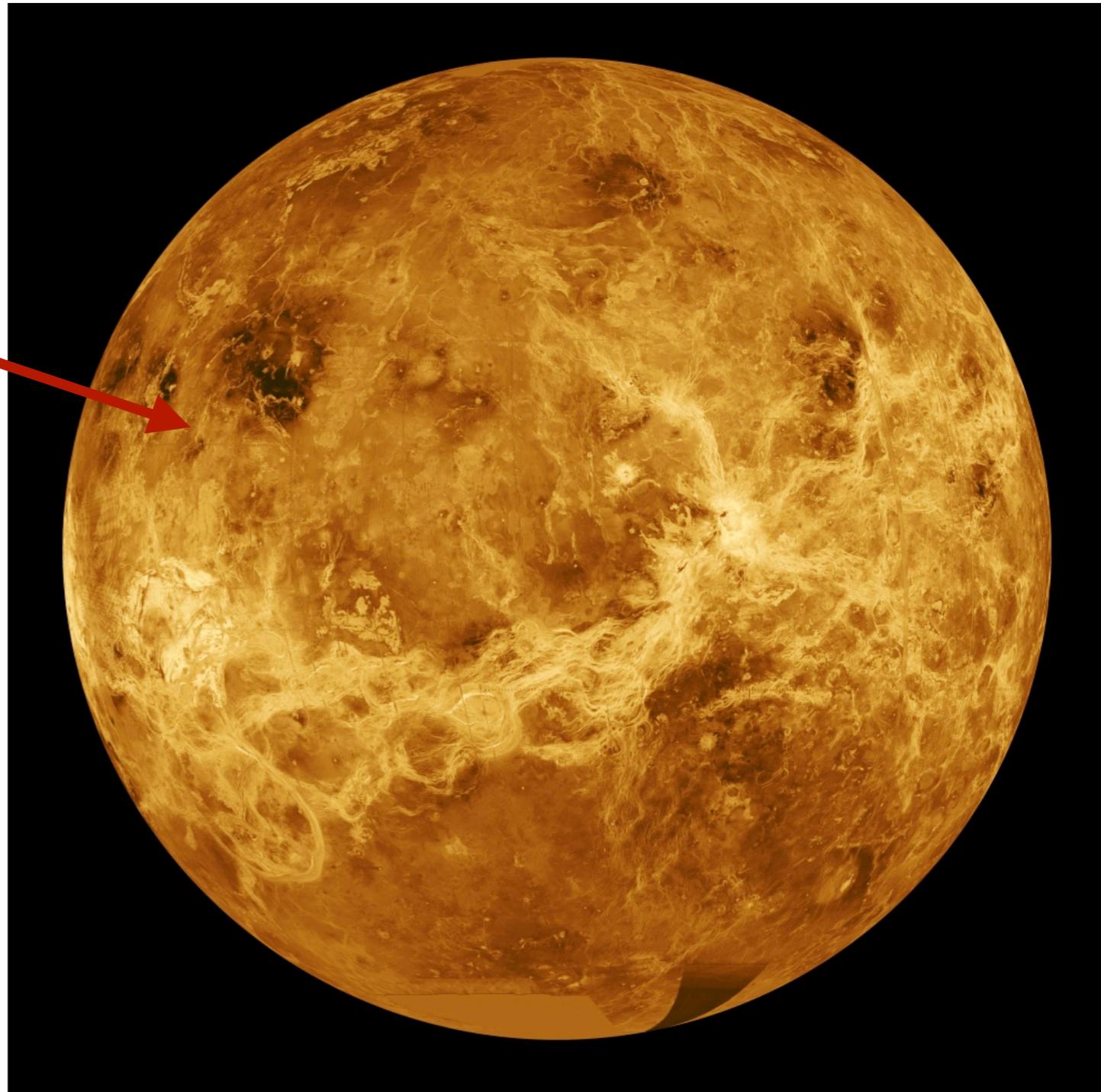
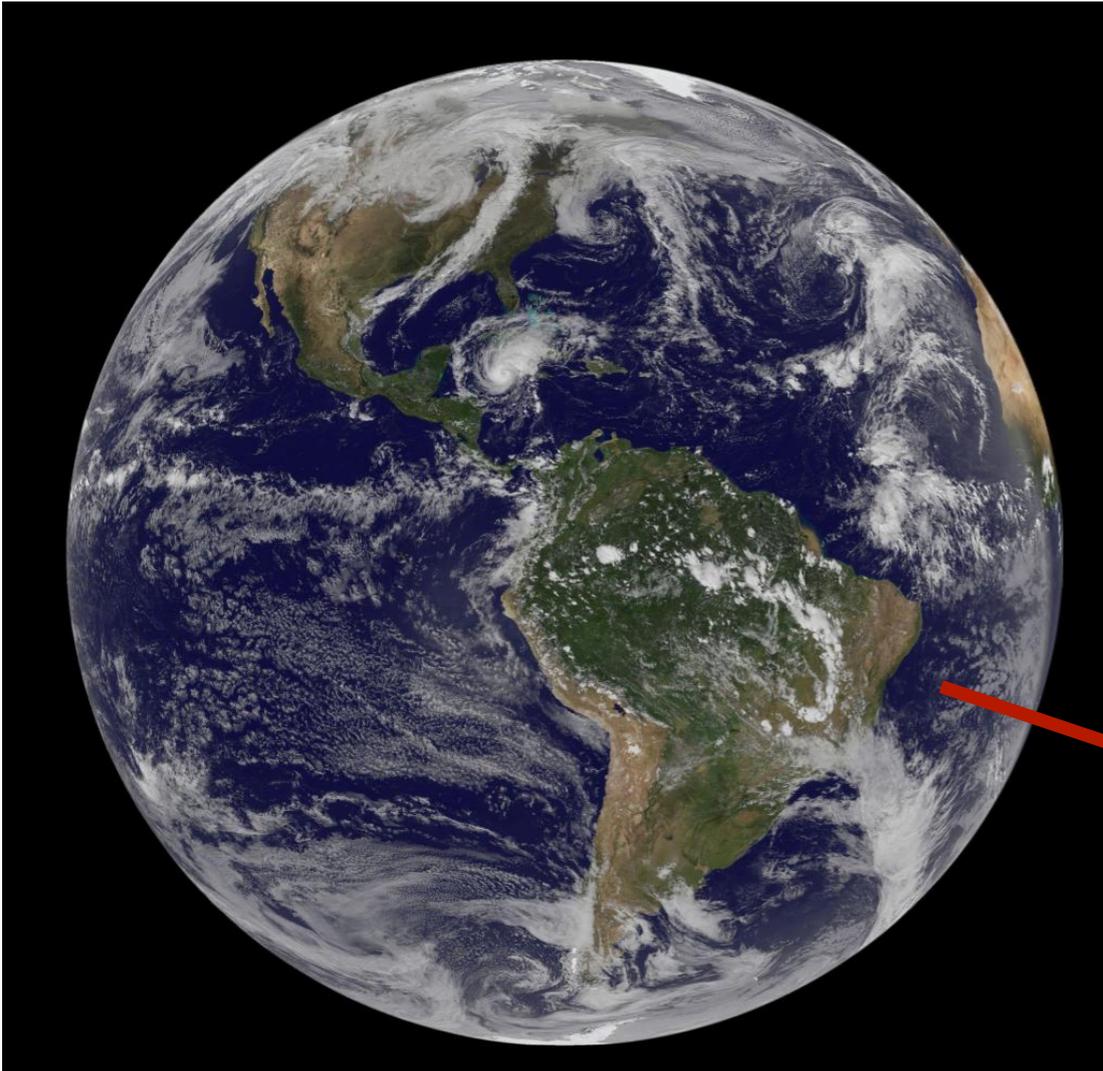


die **eWende**

Wie schaffen wir die Energiewende?

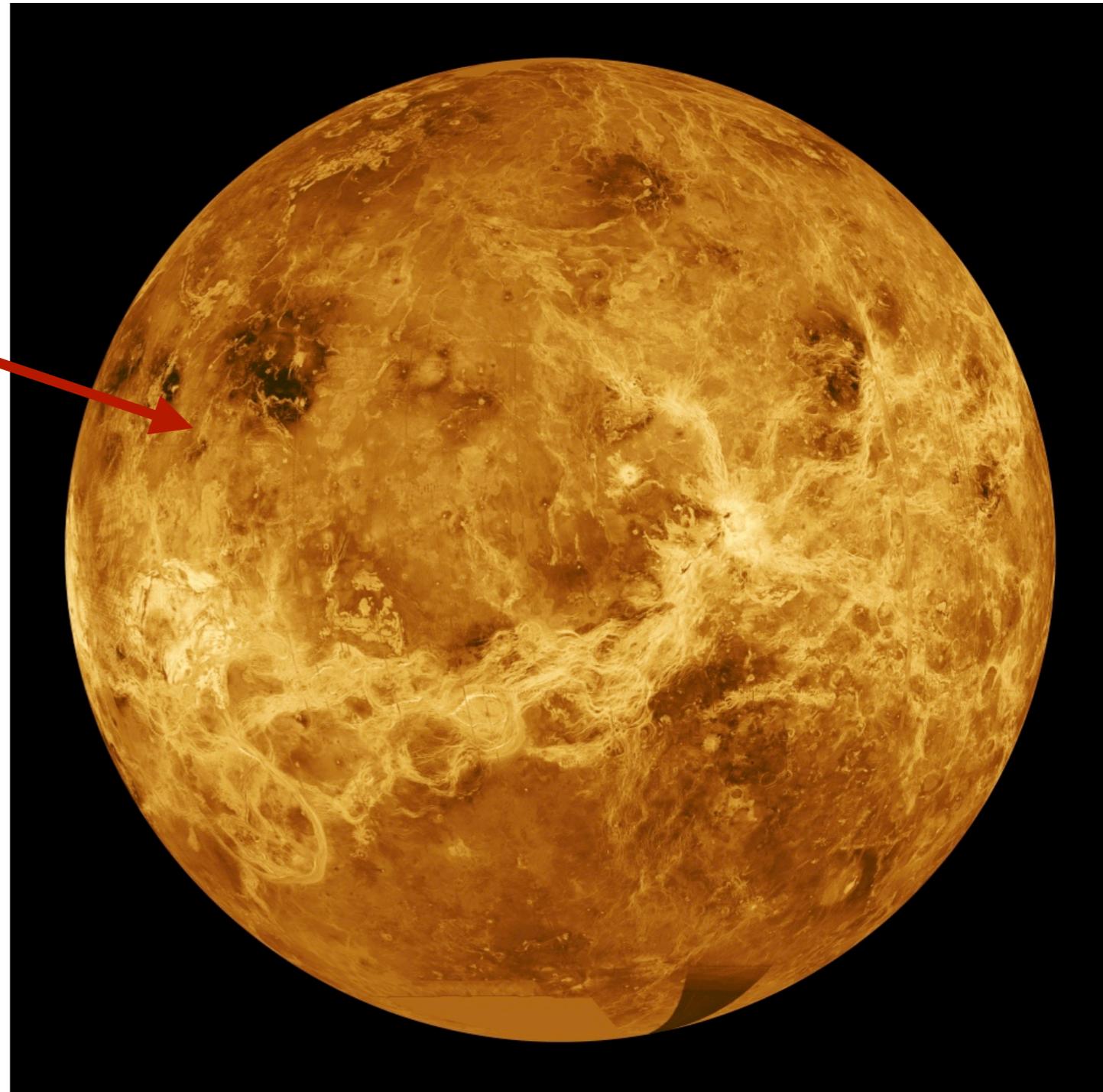
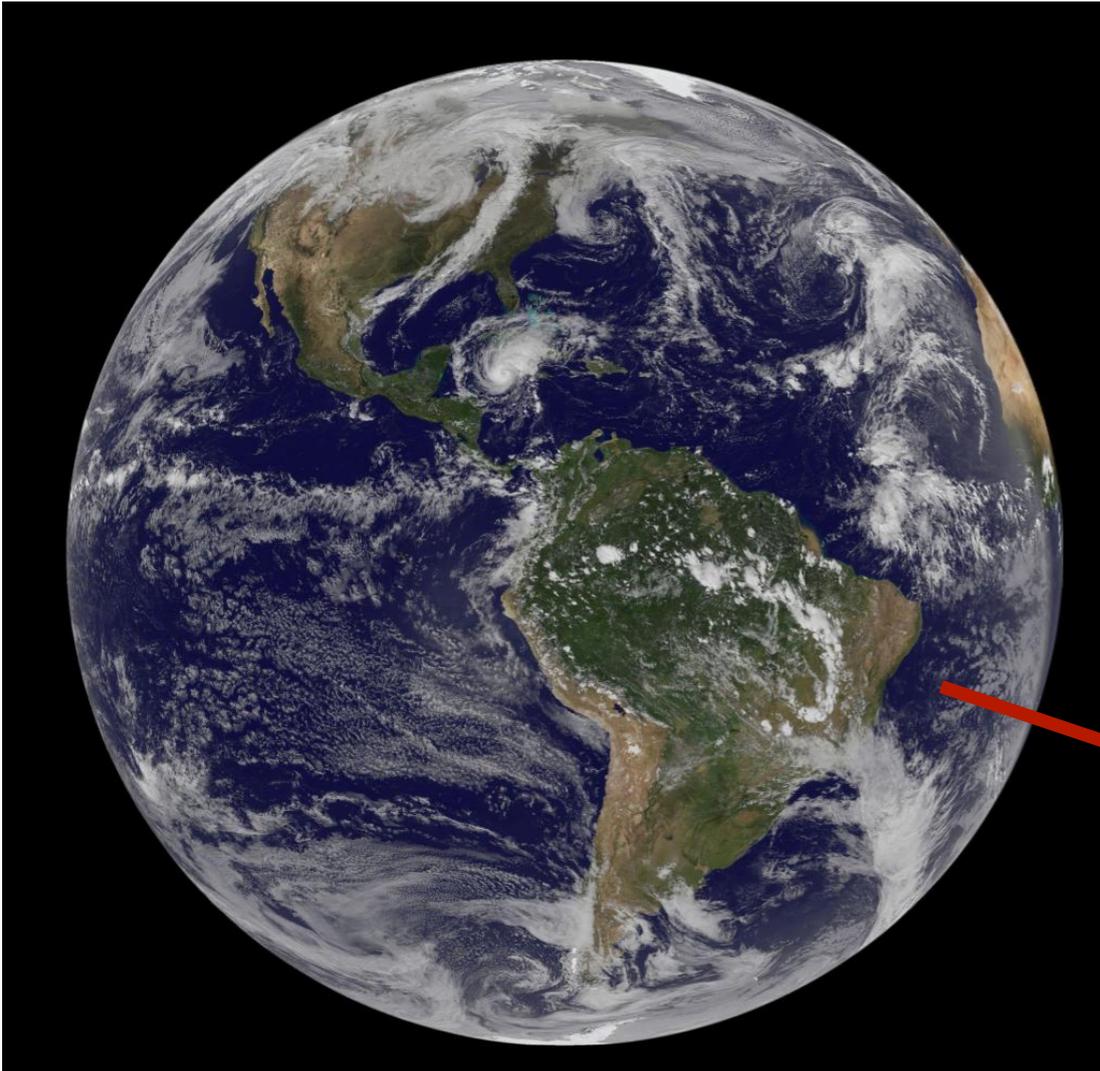
Prof. Dr. Robi Banerjee
Universität Hamburg / Hamburger Sternwarte

Warum?



Venus Atmosphäre:
96% CO₂

Warum?

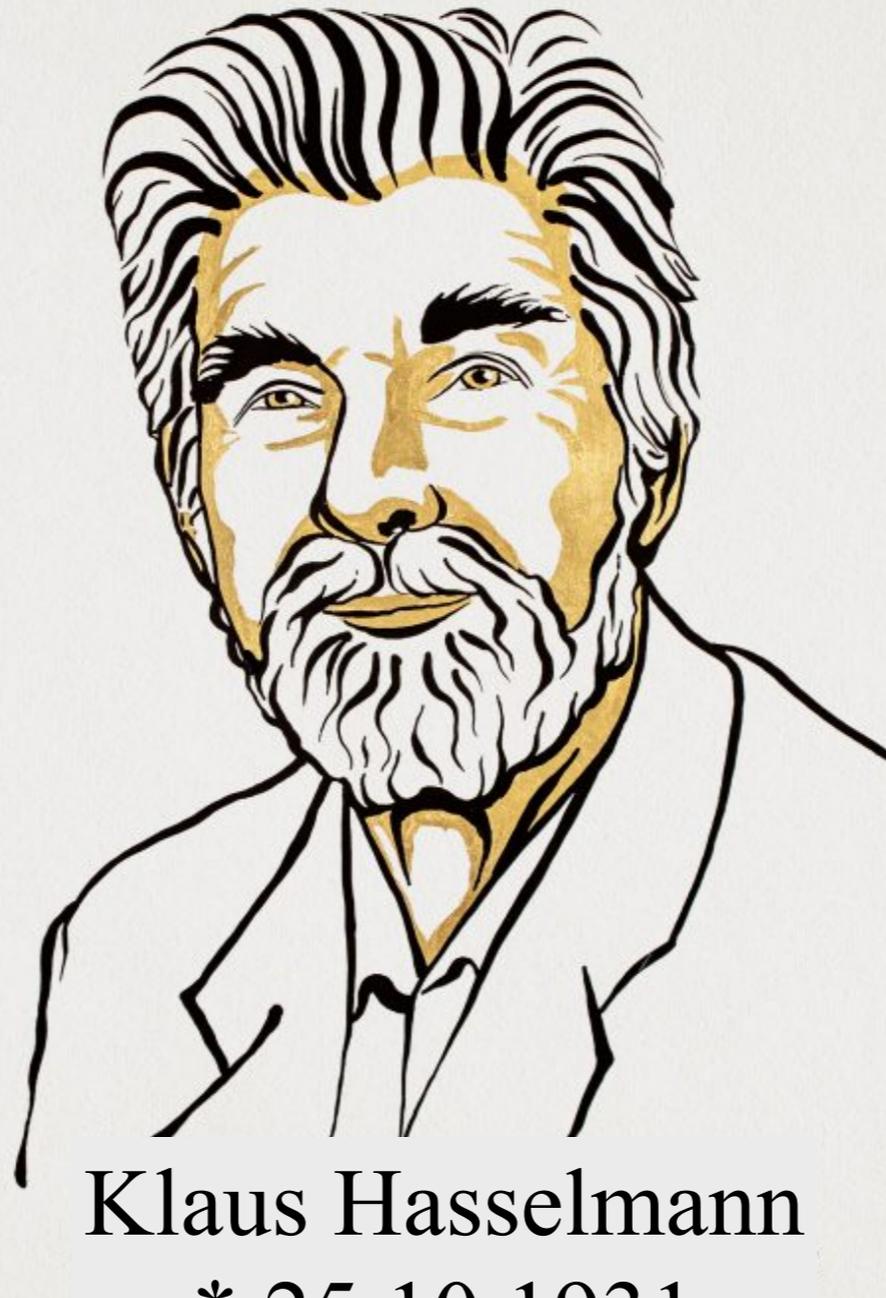


- Anthropogener Klimawandel
- Endliche Ressourcen
- Verantwortungsvoller Umgang
- soziale Gerechtigkeit

Nobelpreis Physik 2021



Syukuro Manabe
* 21.9.1931



Klaus Hasselmann
* 25.10.1931



Giorgio Parisi
* 4.8.1948

für die physikalische Modellierung und
quantitative Vorhersage der Klimaerwärmung

Klimaforschung

1896: erste Vorhersage der globalen Klimaerwärmung aufgrund anthropogener CO₂-Emission

Svante Arrhenius
1859 – 1927



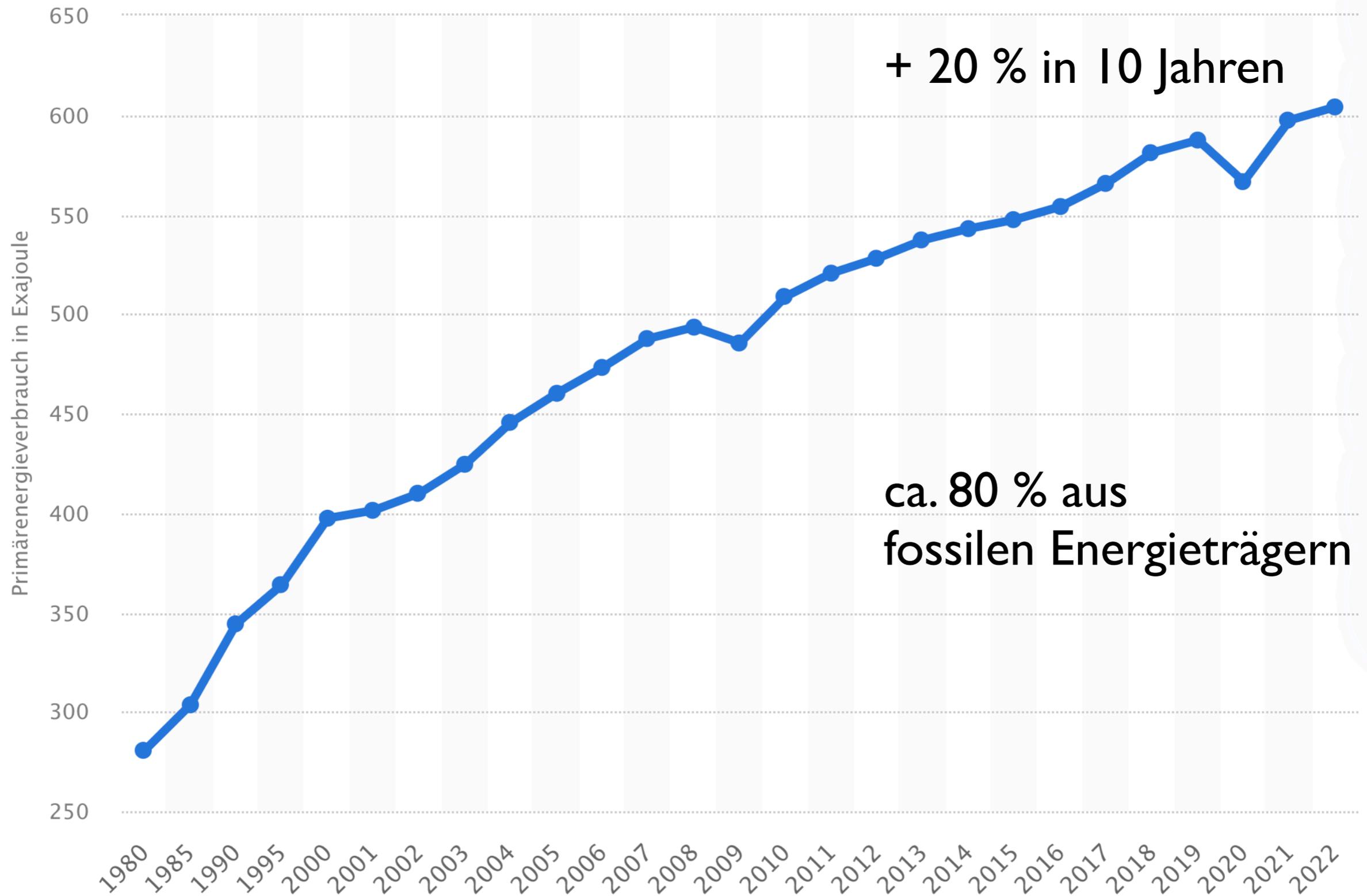
Welt-Energiebedarf

ca. 600 Exa Joule pro Jahr*
≈ 170.000 Milliarden kWh / Jahr

durchschnittlicher Leistungsbedarf
≈ 19 TW



Welt-Energiebedarf



Primärenergiebedarf Bundesrepublik

2022

Steinkohle

Braunkohle

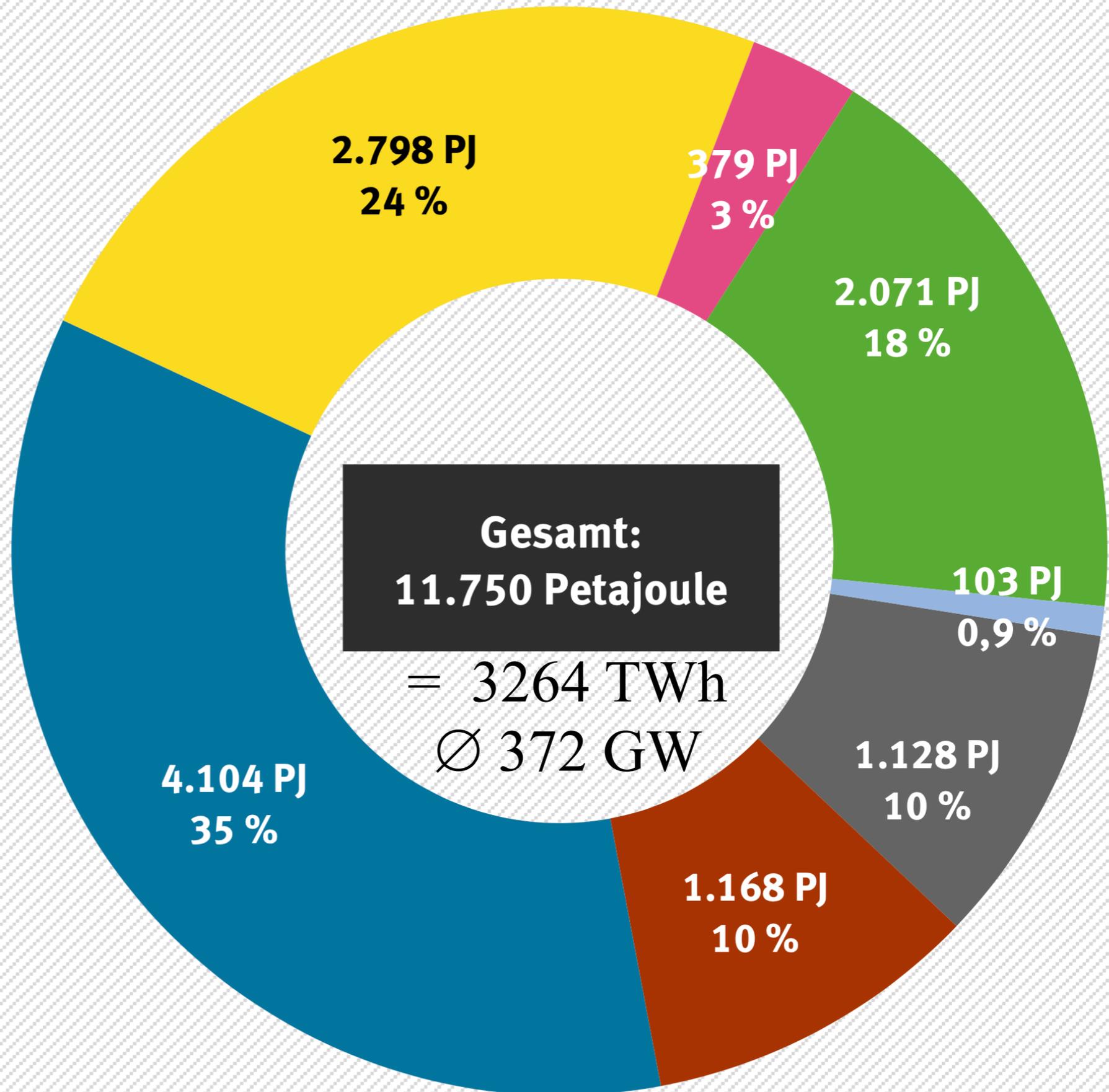
Mineralöl

Gase

Kernenergie

Erneuerbare Energien

Sonstige Energieträger

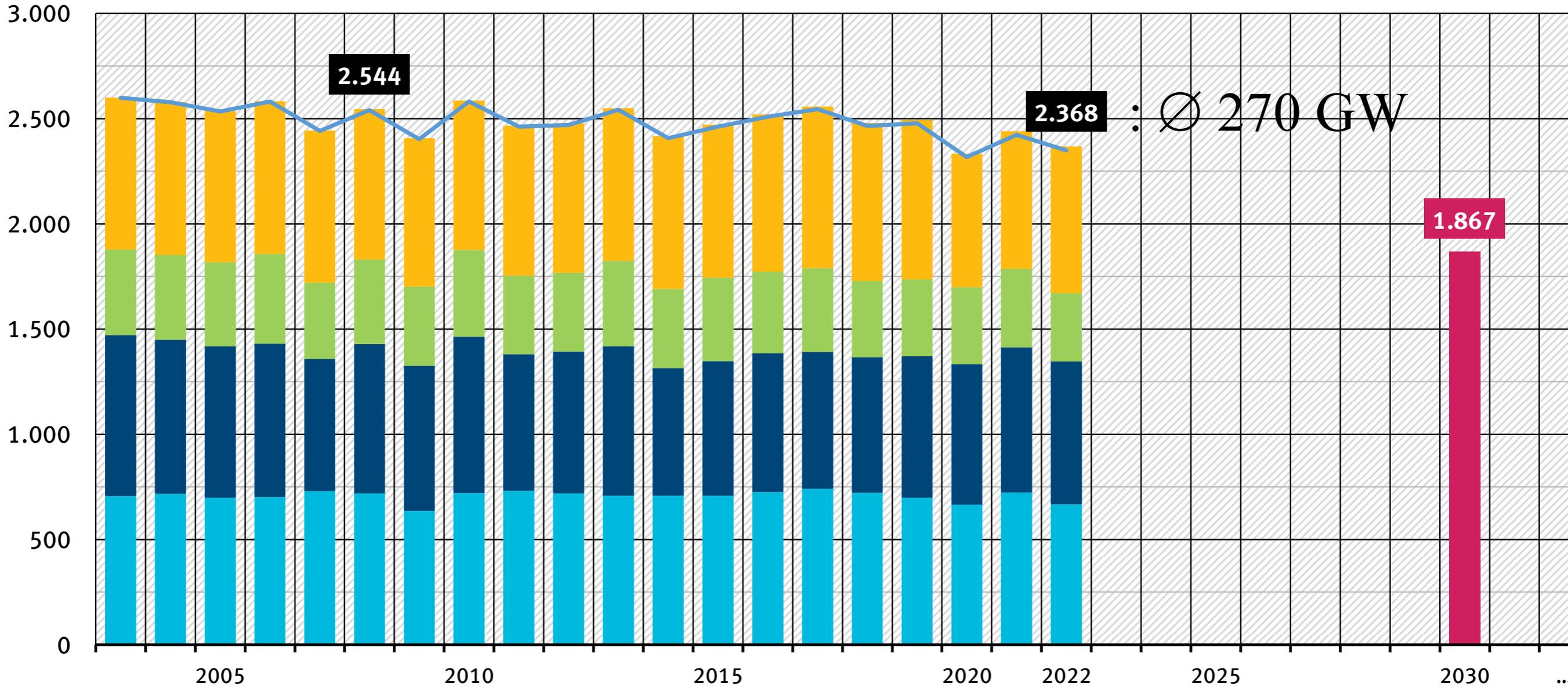


End-Energiebedarf

Endenergieverbrauch nach Sektoren

*

Terawattstunden



Industrie

Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Ziele Energieeffizienzgesetz 2023*

Haushalte

Verkehr

Gesamt nach Definition Energieeffizienzgesetz

* Für die Ziele nach dem Energieeffizienzgesetz (EnEg) wird die Umweltwärme nicht berücksichtigt. Diese machte im Jahr 2022 weniger als 1 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus.

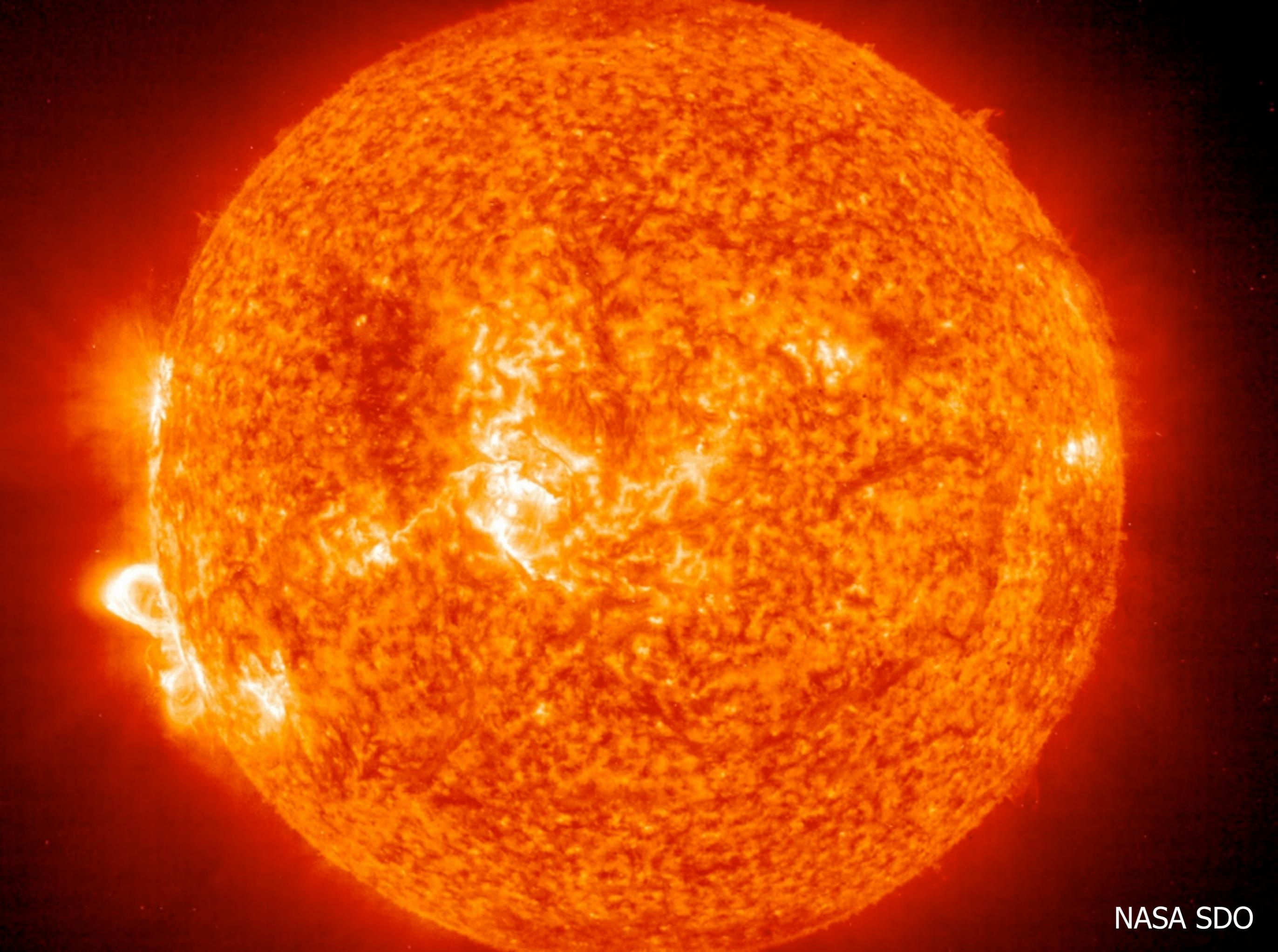
Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen: "Auswertungstabelle"

*Differenz zum Primärenergiebedarf: Verluste ca. 30%

Woher?

Energiewende

**CO₂-freie
Energiequellen?**



Sonne

- Leuchtkraft / Leistung:

$$L_{\odot} = 3 \times 10^{26} \text{ W} = 3 \times 10^{14} \text{ TW}$$

- davon Erdeinstrahlung

$$L_{\oplus} = 1.7 \times 10^{17} \text{ W} = 173.000 \text{ TW}$$

- Solarkonstante

$$s_{\oplus} = 1.36 \text{ kW/m}^2$$

- Sonne erzeugt **Winde!**

geringer Wind : 75 W/m^2
(5 m/s)

frischer Wind : 600 W/m^2
(10 m/s)

Sonne



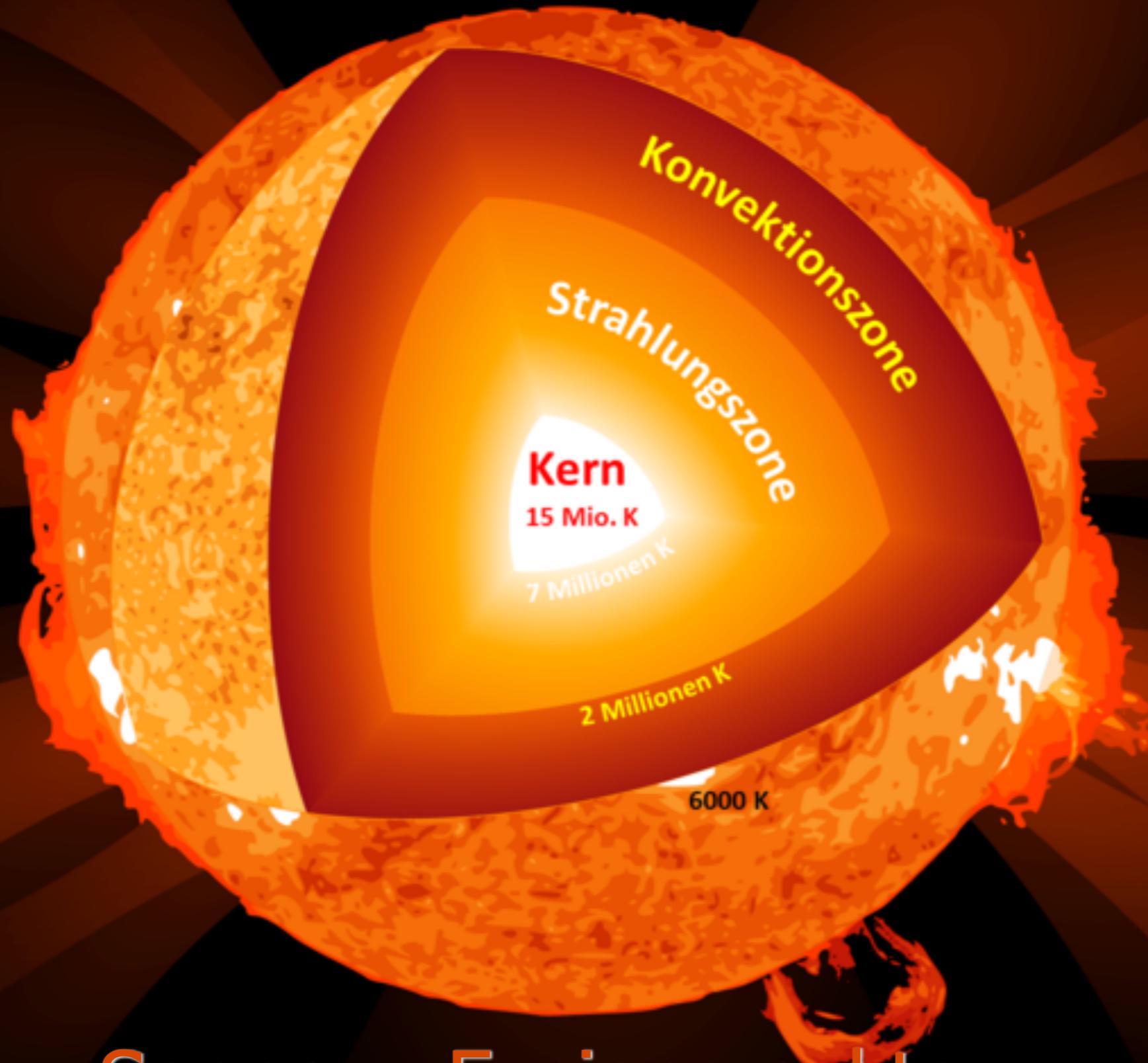
- Erdeinstrahlung

$$L_{\oplus} \approx 1.7 \times 10^{17} \text{ W} \approx 173.000 \text{ TW}$$

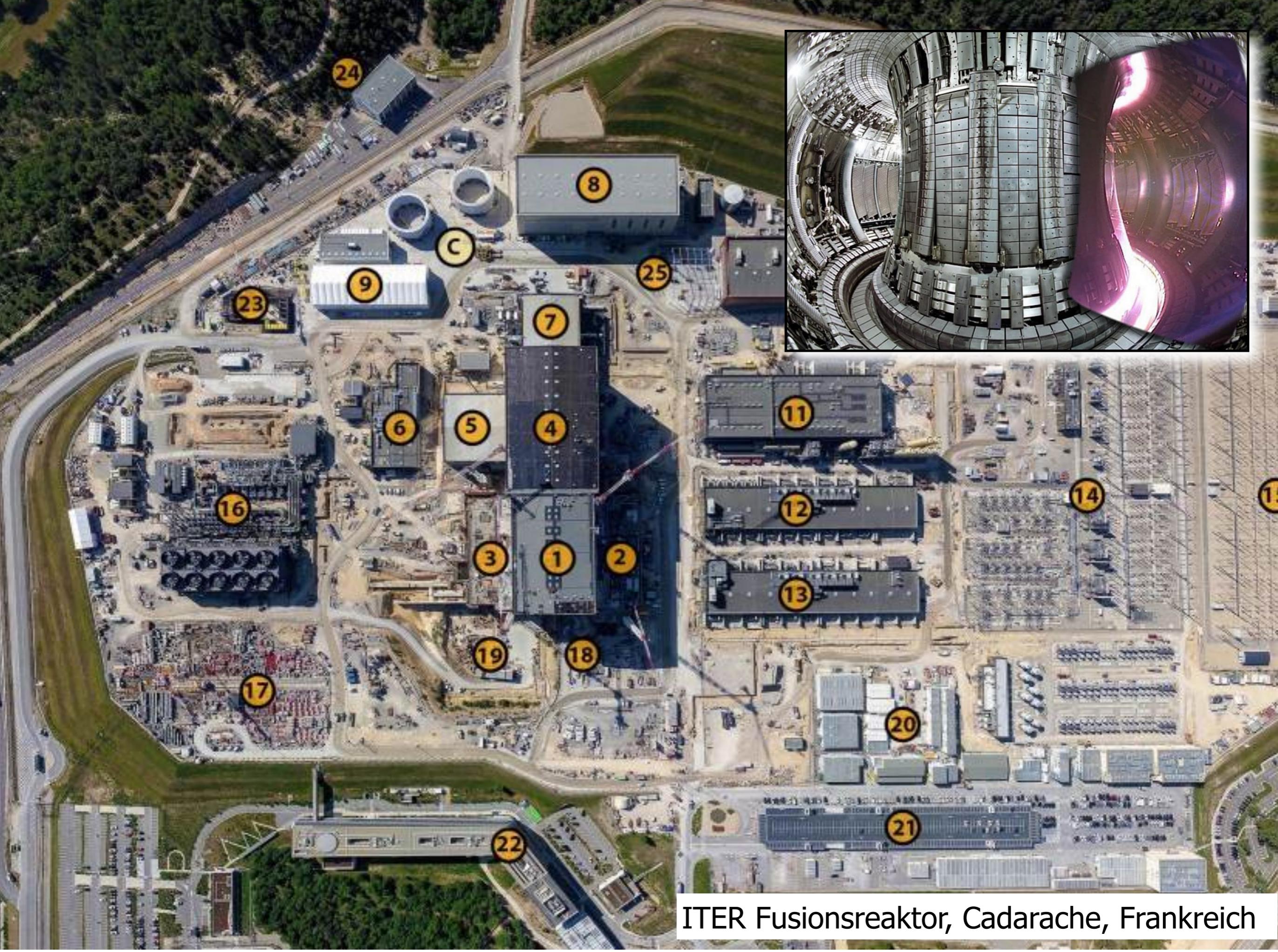
→ ca. **9.200** × Weltenergiebedarf

→ weniger als **60 Minuten** um den Weltenergiebedarf eines Jahres zu decken

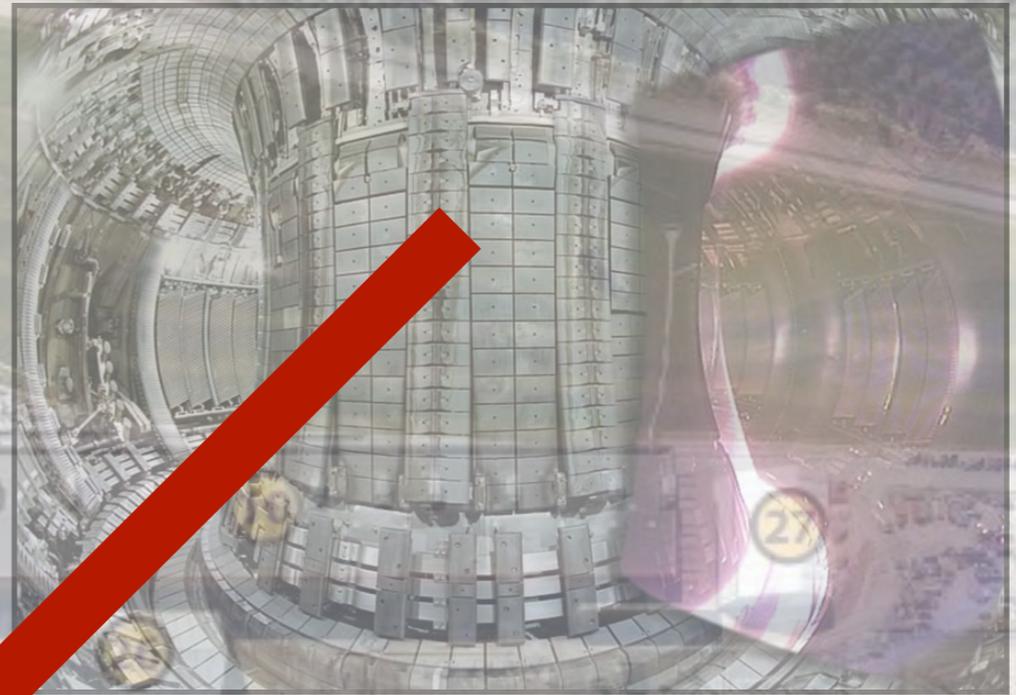
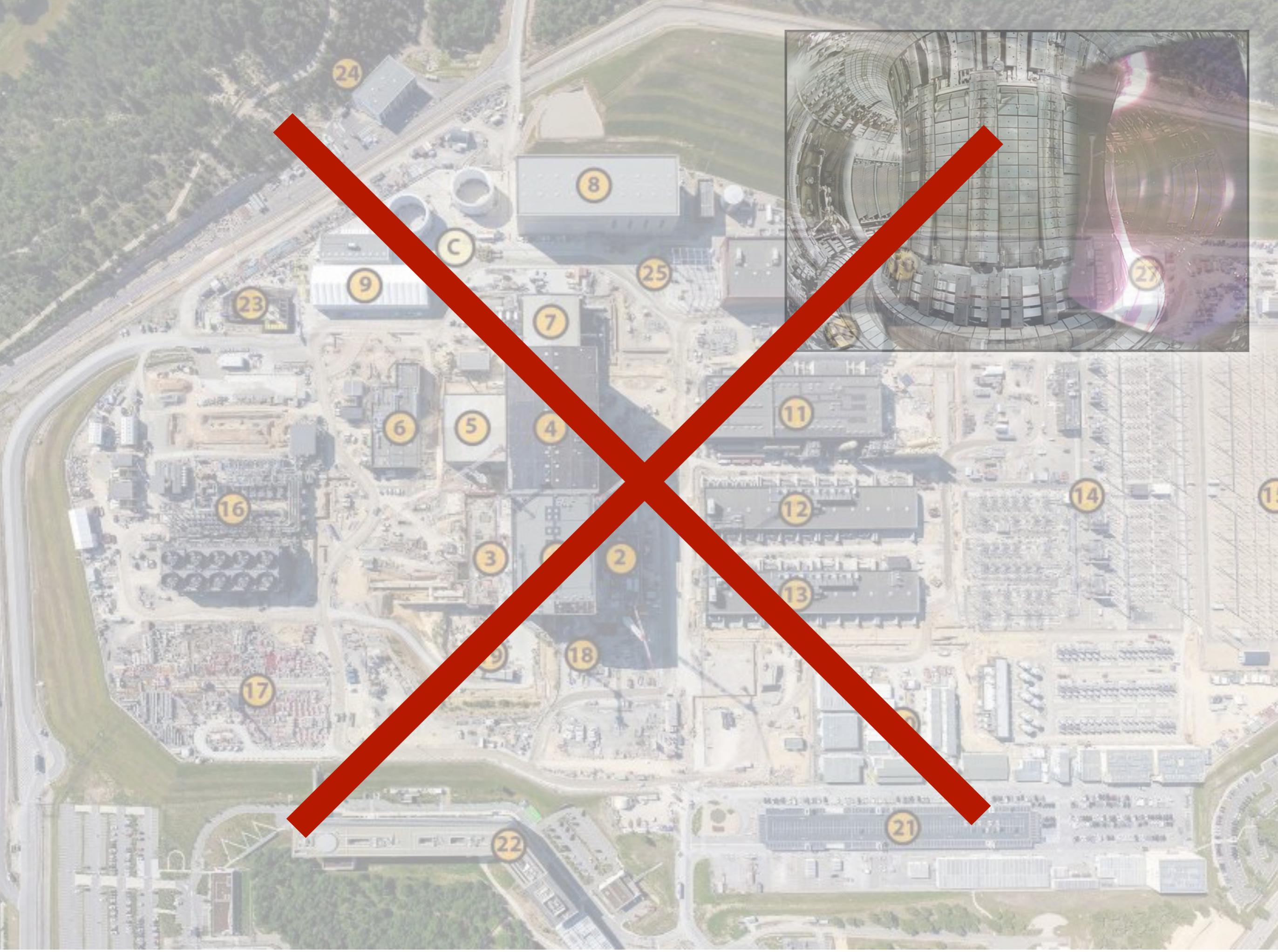
- Wissenschaftliche Studien 100 % EE: z.B. Jacobson & Delucchi (Scientific American, 2009), Jacobson et al. (Joule, 2017), DWI Studie (Wochenbericht 29+30/2021)



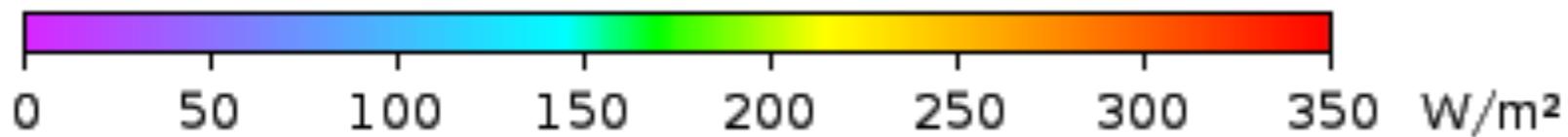
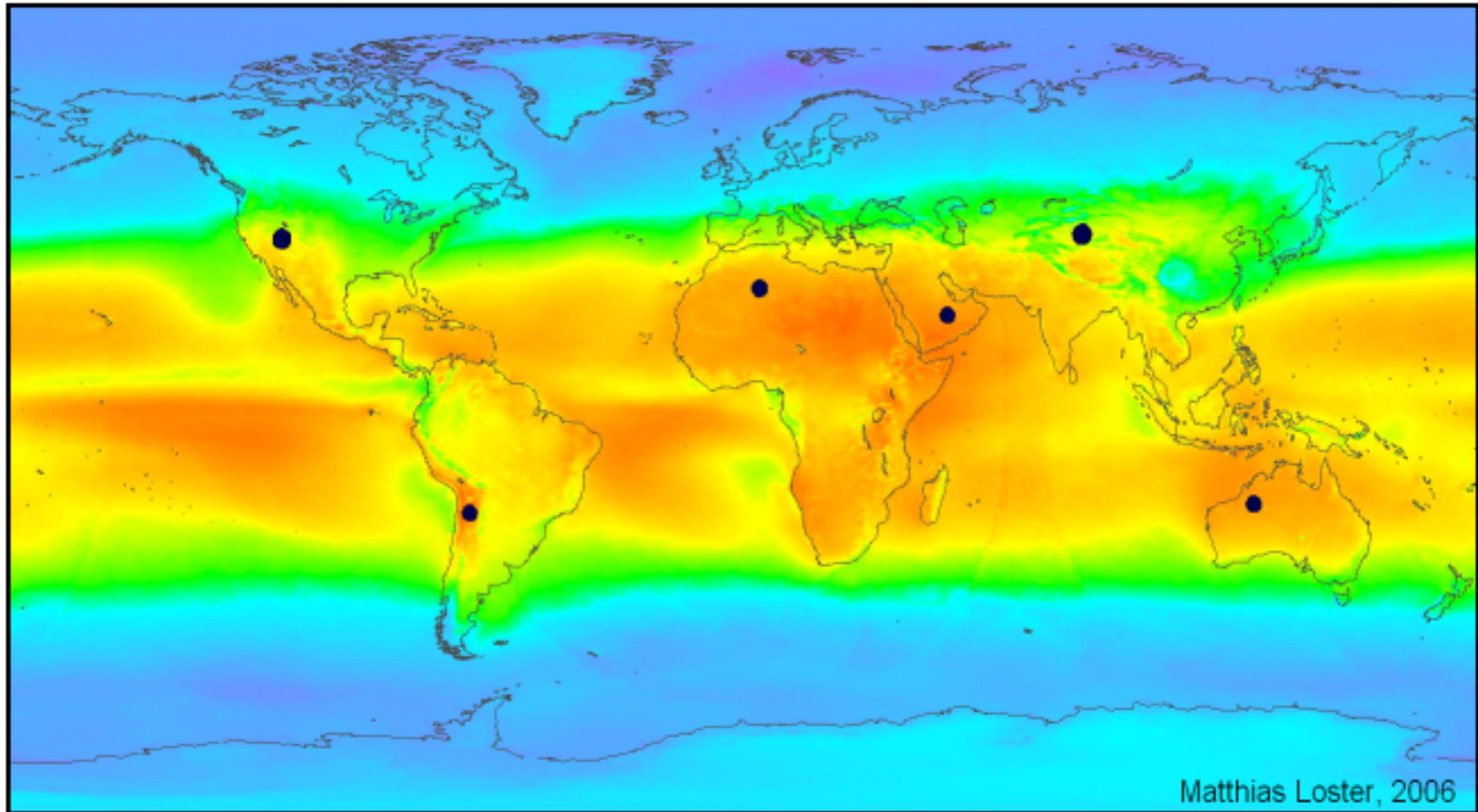
Sonne = Fusionsreaktor



ITER Fusionsreaktor, Cadarache, Frankreich



Sonnenenergie



$\Sigma \bullet = 18 \text{ TWe}$

Photovoltaik

- BRD: nur 3,5 % Fläche (12.500 qkm) notwendig = 2500 TWh !

12.500
qkm

- 7 % bereits überbaute Fläche

360.000 qkm

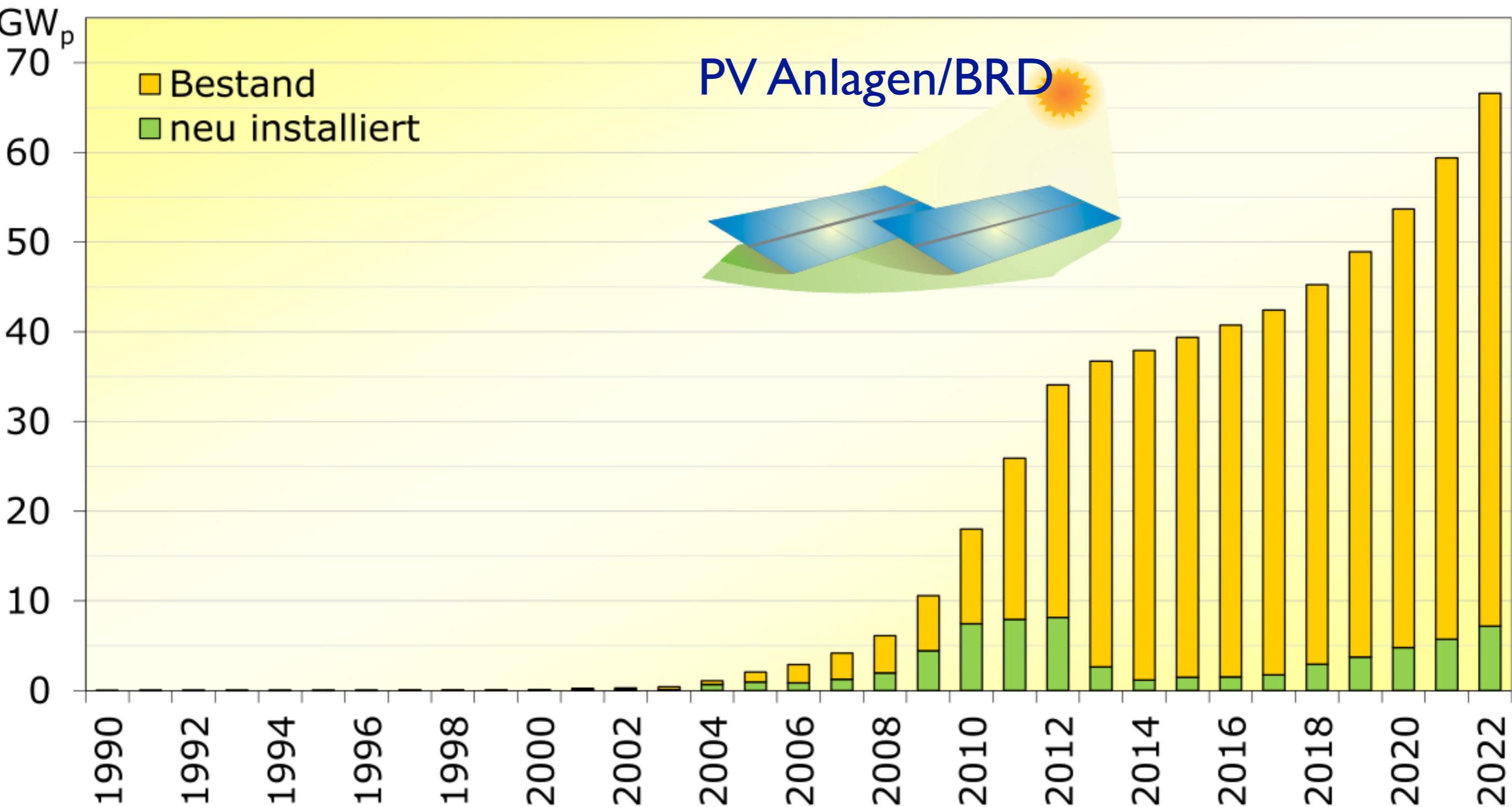


Photovoltaik

- BRD: nur 3,5 % Fläche (12.500 qkm) notwendig = 2500 TWh !
- bereits überbaute Fläche: 7 %
- Flächenversiegelung 1992 – 2021 : mehr als 11.000 qkm!
- Braunkohleabbau: 28 qkm im Jahr 2019 !
d.h. 7,7 ha/Tag (Dörfer und Wälder verschwinden)

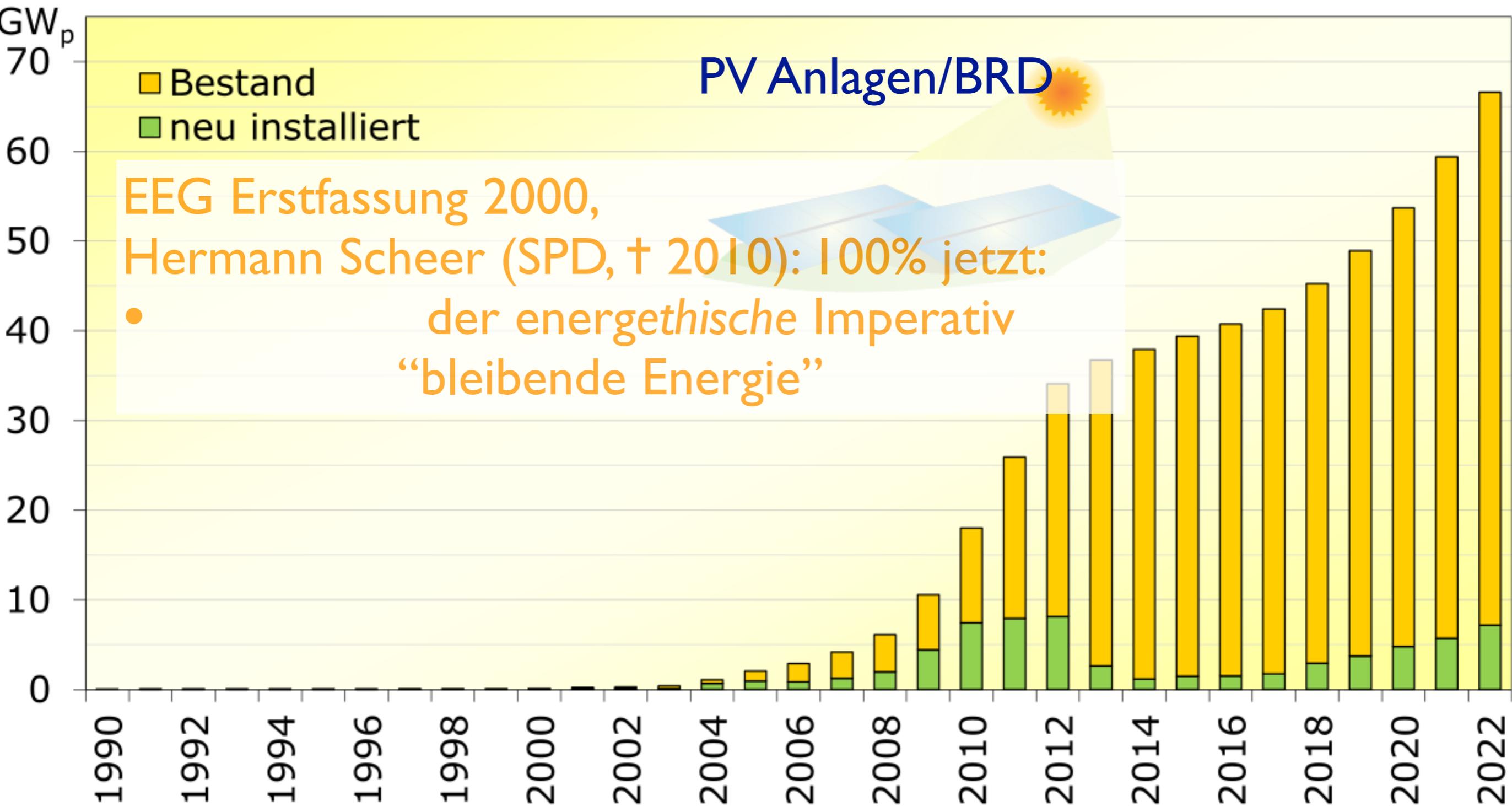
12.500
qkm

Photovoltaik



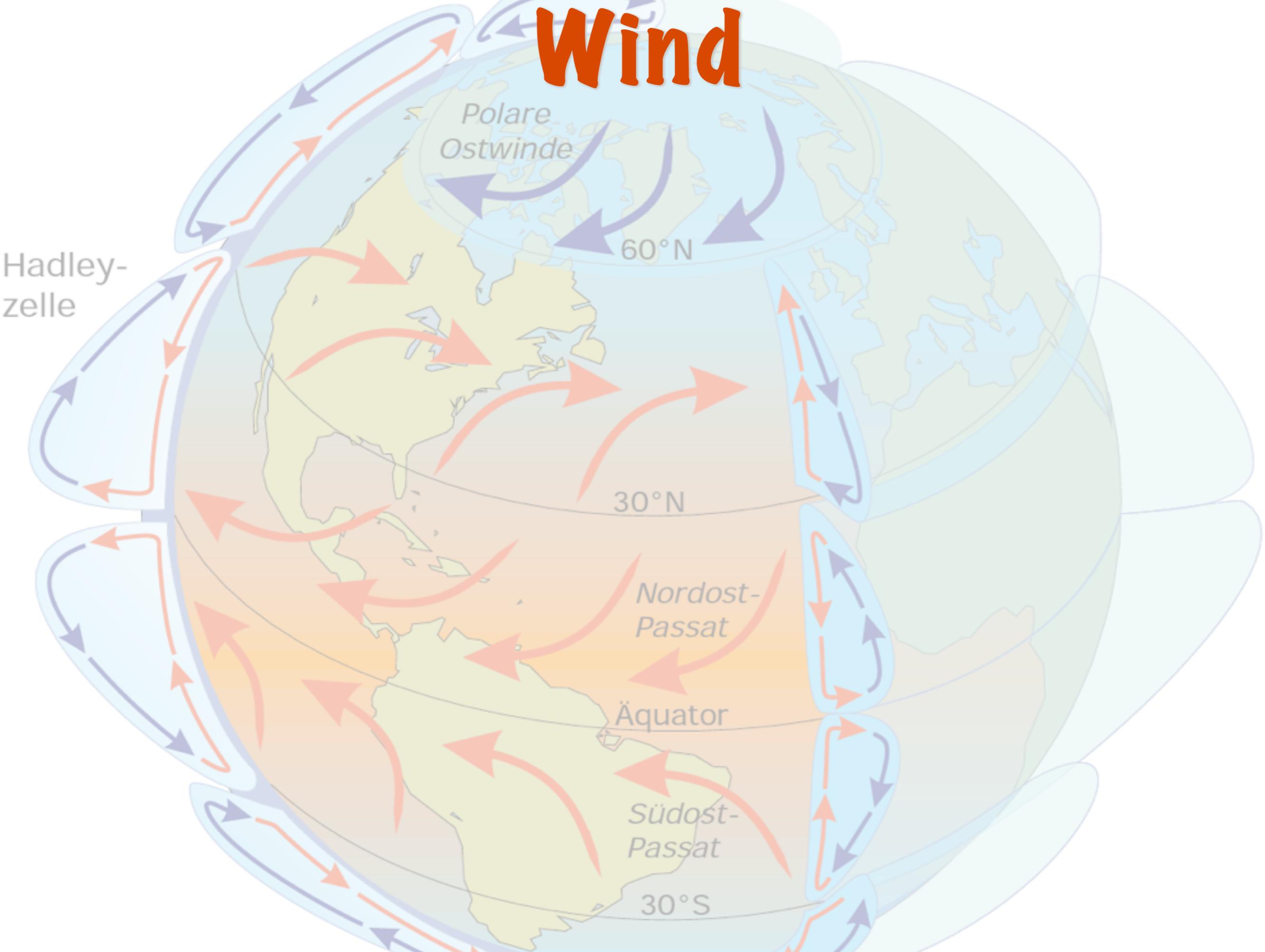
Quelle: Volker Quaschnig (www.volker-quaschnig.de)

Photovoltaik



Quelle: Volker Quaschnig (www.volker-quaschnig.de)

Wind



SCIENTIFIC AMERICAN

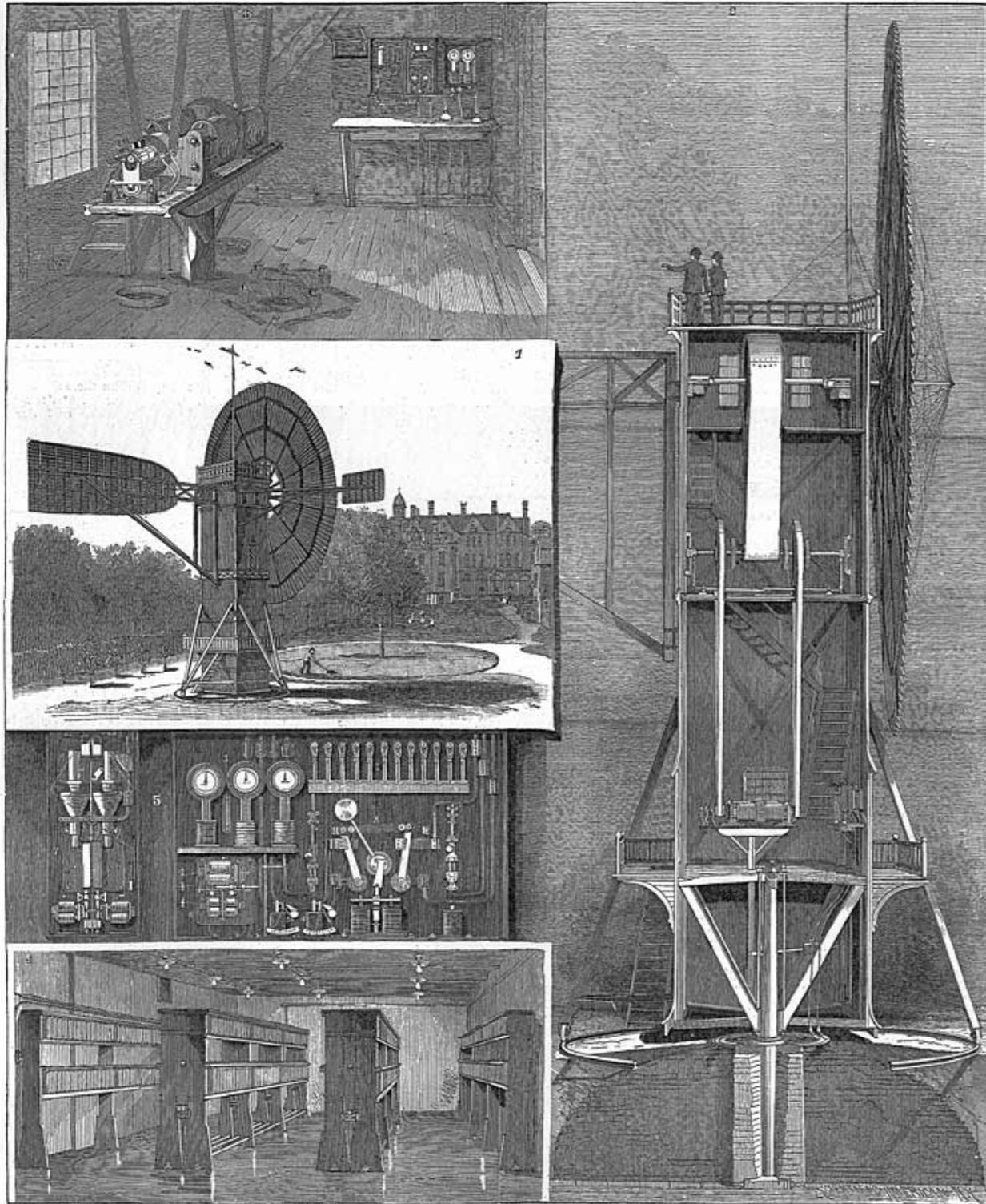
[Entered at the Post Office of New York, N. Y., as Second Class Matter. Copyrighted, 1890, by Mann & Co.]

A WEEKLY JOURNAL OF PRACTICAL INFORMATION, ART, SCIENCE, MECHANICS, CHEMISTRY, AND MANUFACTURES.

Vol. LXIII.—No. 26.
ESTABLISHED 1845.

NEW YORK, DECEMBER 20, 1890.

(\$3.00 A YEAR.
WEEKLY.)



1. Windmill in the park. 2. Vertical section of the tower. 3. Dynamo. 4. Storage batteries. 5. Regulating apparatus.

THE WINDMILL DYNAMO AND ELECTRIC LIGHT PLANT OF MR. CHARLES F. BRUSH, CLEVELAND, O.—[See page 889.]



Windmühle Bergedorf von 1831

Windkraftanlage von Charles Brush 1888, Cleveland, Ohio

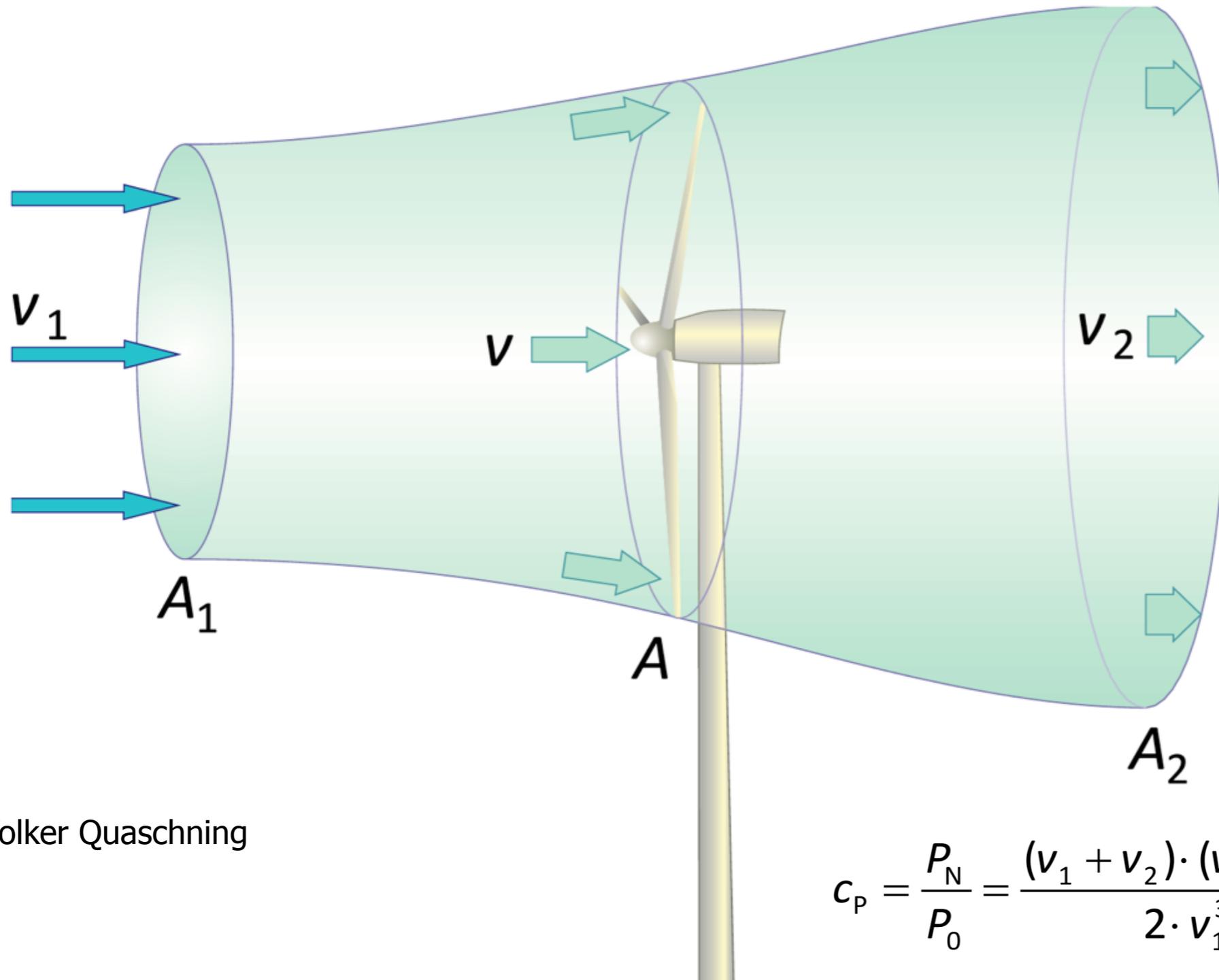


Veja Mate, Nordsee, ca. 400 MW



Stöben-Teuchern ca. 177 MW

Windkraftanlage



Wind
Leistungsdichte:

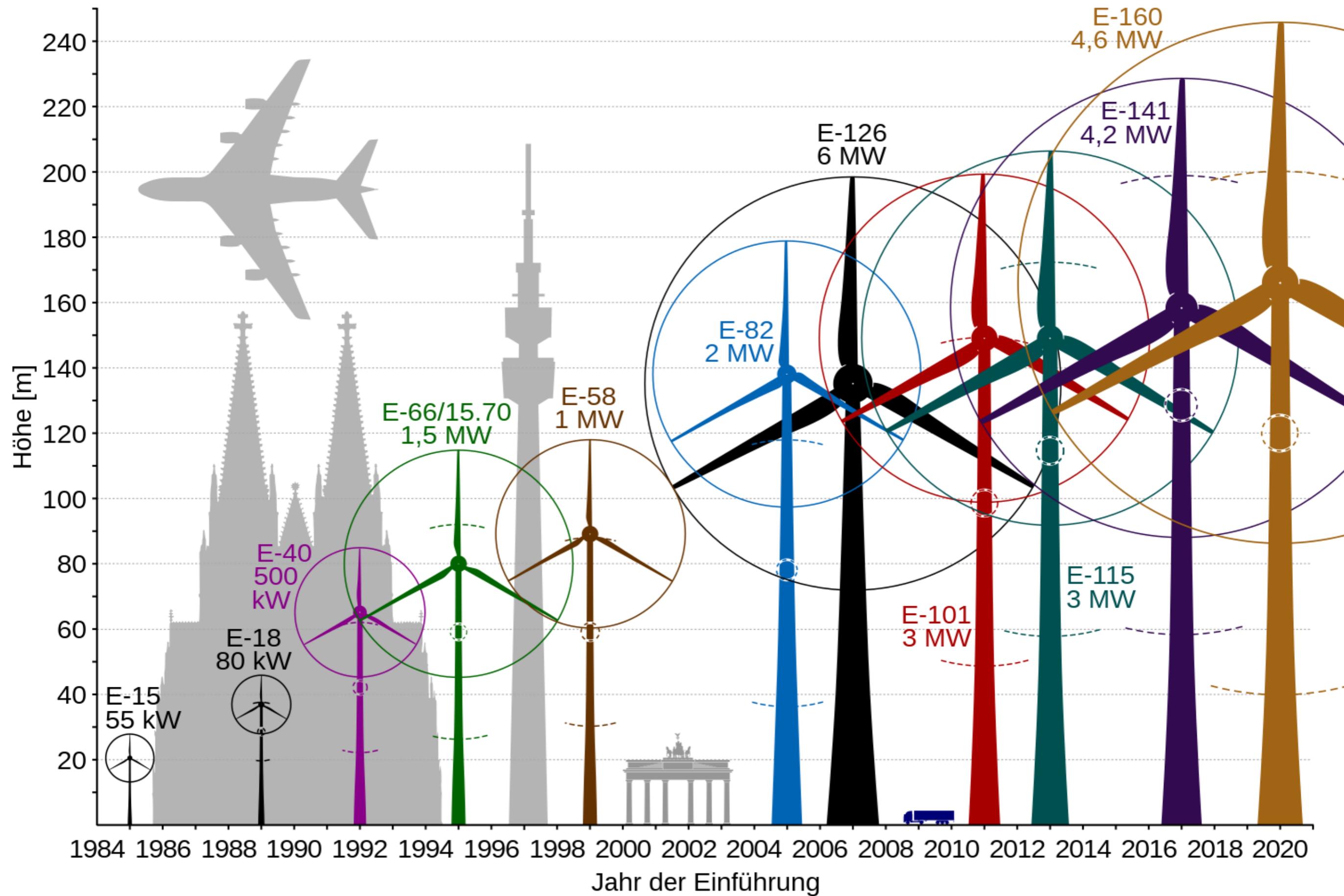
$$\propto v^3$$

Volker Quaschnig

$$c_p = \frac{P_N}{P_0} = \frac{(v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2 \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right)$$

$$c_{P,Betz} = \frac{16}{27} \approx 0,593$$

$$\zeta_{id} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$$



Enercon Windkraftanlagen

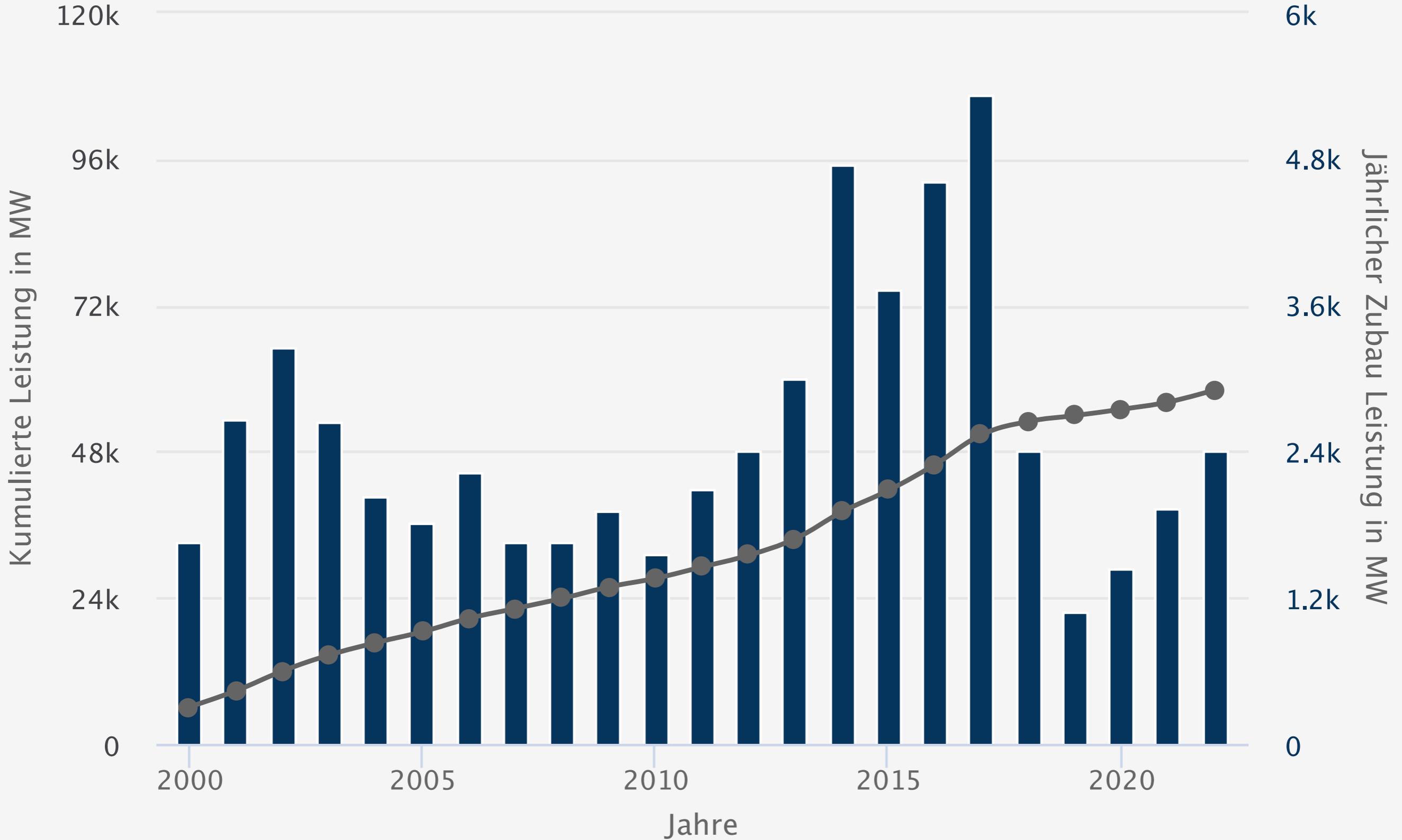
Installierte Windenergieleistung in Deutschland

Stand: 31.12.2022

Onshore, installierte Leistung 2023: 58,1 GW



Bundesverband WindEnergie



eWende

Strombasierte Energienutzung mit EE-Strom

⇒ weg vom Verbrennen von Kohle, Öl und Gas

⇒ Alles elektrisch

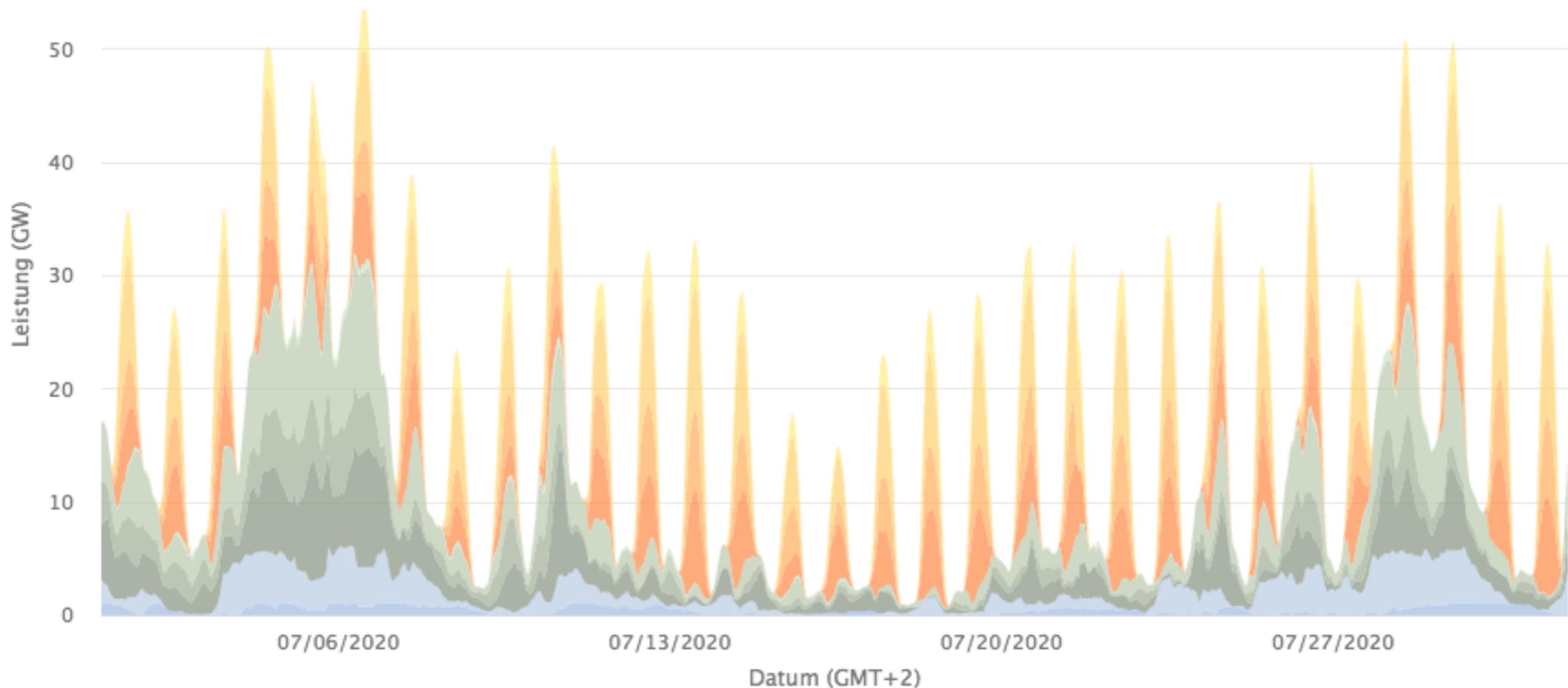
- keine CO₂ Emission
- unerschöpfliche Energie
= "bleibende Energie" (Hermann Scheer)
- dezentrale Stromgewinnung (versorgungsangepasst)
- günstiger
- effizienter
- keine Abgase, keine Verbrennungsrückstände
(kein Schornsteinfeger), kein Gestank
- weniger Lärm
- ...

Transport & Speicher

Stromproduktion in Deutschland im Juli 2020

Fraunhofer (ISE) Energie Chart:

<https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm>



● Wind offshore 50Hertz
● Wind onshore Tennet
● Solar Tennet

● Wind offshore Tennet
● Wind onshore Transnet BW
● Solar Transnet BW

● Wind onshore 50Hertz
● Solar 50Hertz

● Wind onshore Amprion
● Solar Amprion

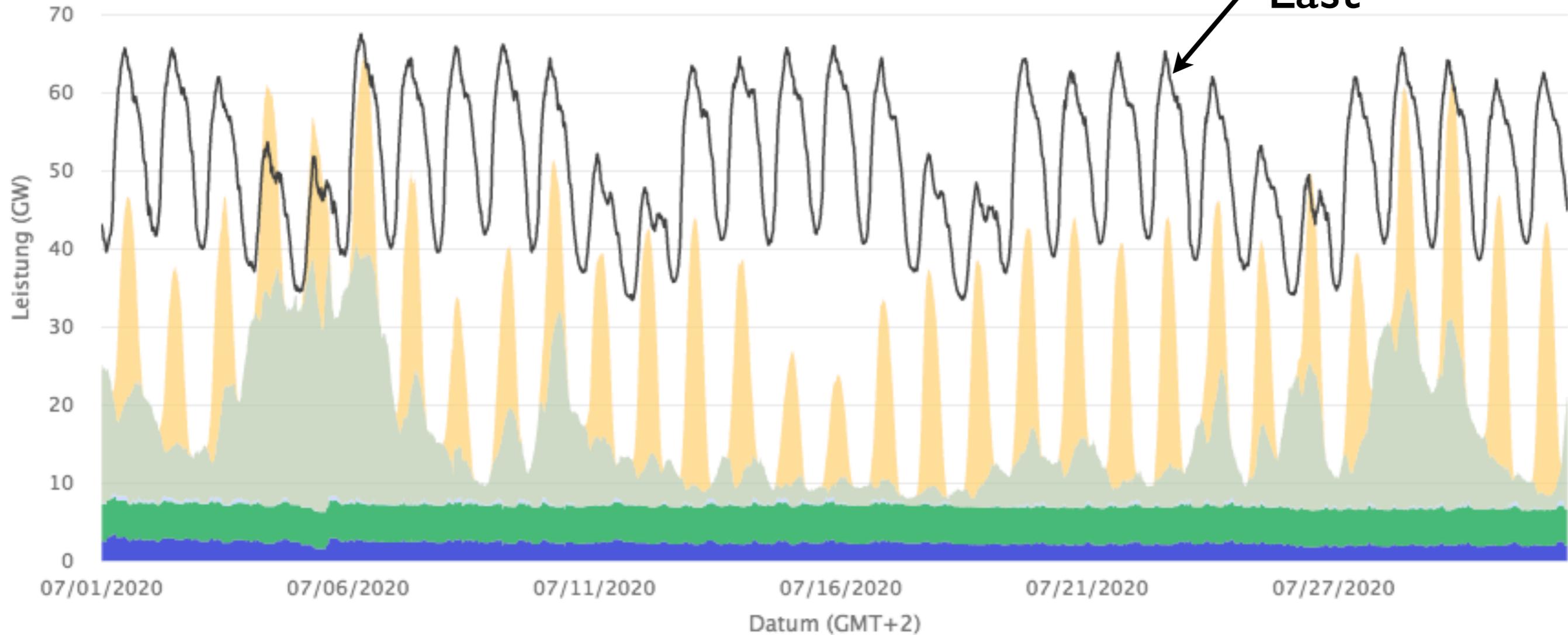
Transport & Speicher

Stromerzeugung in Deutschland im Juli 2020

Fraunhofer (ISE) Energie Chart:

<https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm>

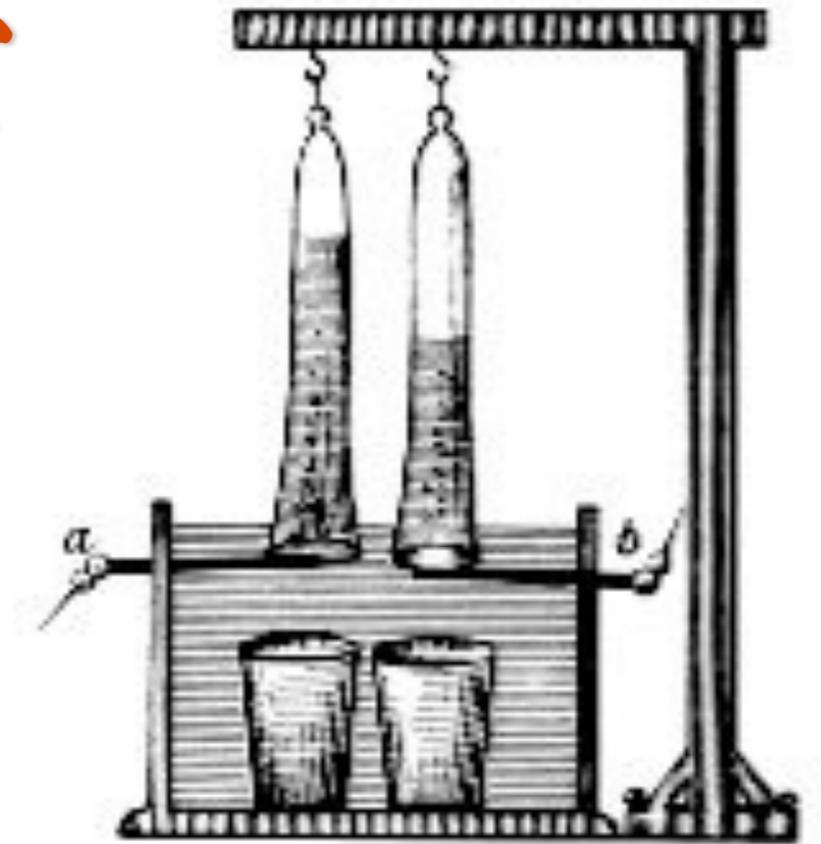
Strombezug/
Last



- Pumpspeicher Verbrauch
- Kernenergie
- Gas
- Wind
- Anteil EE
- Import Saldo
- Braunkohle
- Andere
- Solar
- Wasserkraft
- Steinkohle
- Pumpspeicher
- Last
- Biomasse
- Öl
- Saisonspeicher
- Residuallast

Wasserstoff

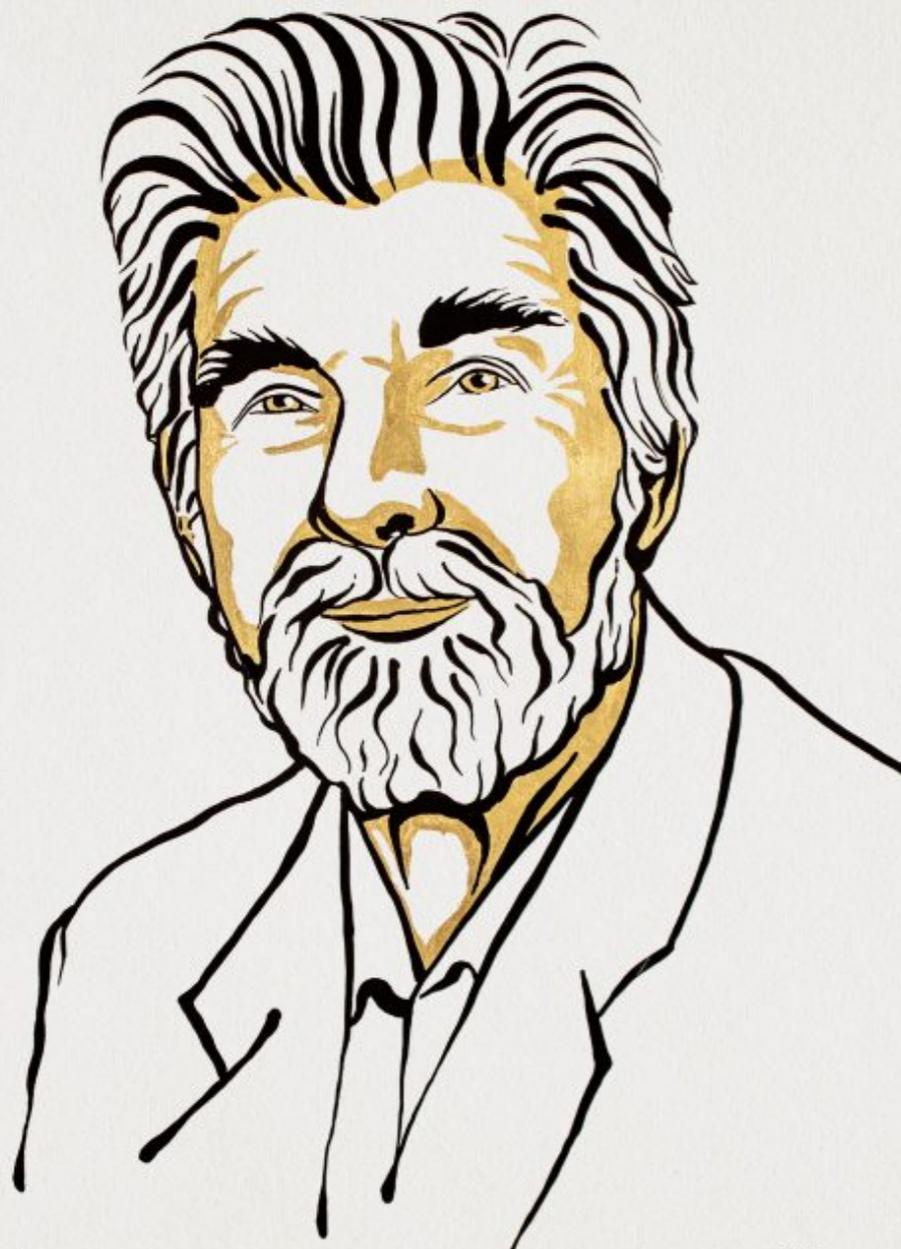
- häufigste Element im Universum
- einfache Gewinnung durch **Elektrolyse**
- Jules Verne in *Die geheimnisvolle Insel* (1875):



Johann Wilhelm Ritter um 1800

Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.

Physik Nobelpreis 2021



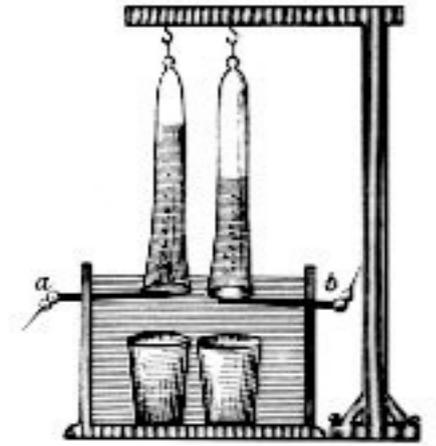
Klaus Hasselmann

* 25.10.1931

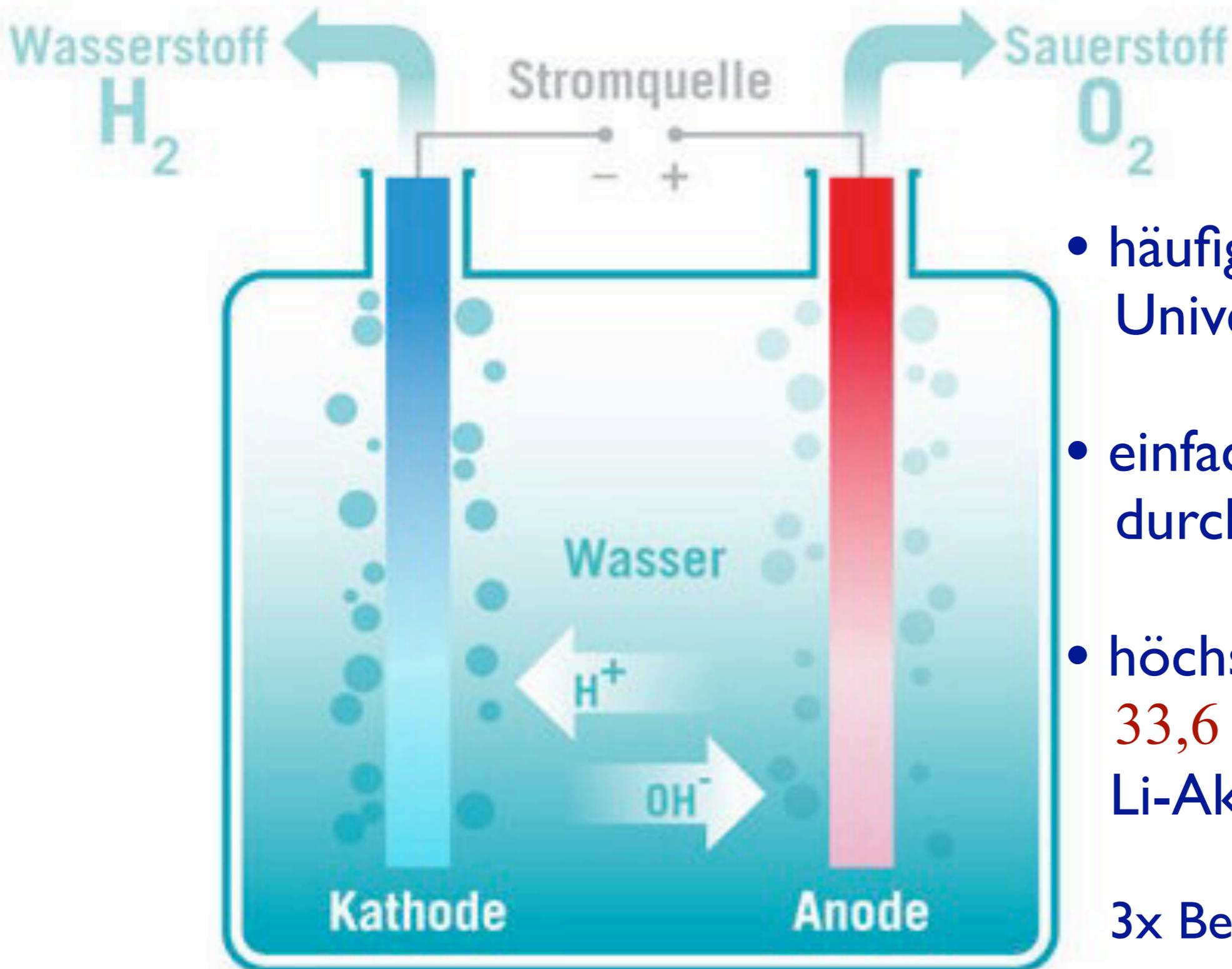
“Wir müssen doch nur von fossilen auf regenerative Energien umsteigen, von Öl, Kohle und Gas auf Sonnen- und Windenergie und Wasserstoff. Technisch ist das recht leicht.”

Interview in Die Zeit, 28.10.2021

Wasserstoff



Johann Wilhelm Ritter um 1800



- häufigste Element im Universum
- einfache Gewinnung durch **Elektrolyse**
- höchste Energiedichte:
33,6 kWh/kg
Li-Akku: 0,2 kWh/kg
3x Benzin/Gas: 11 kWh/kg

Wasserstoff



- flexible Handhabung für
Mobilität / Wärme /
Prozesswärme

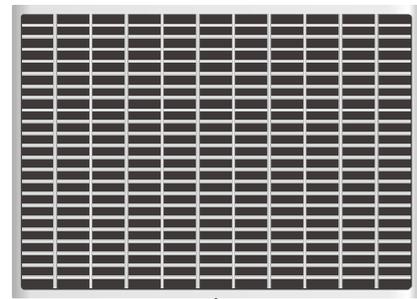
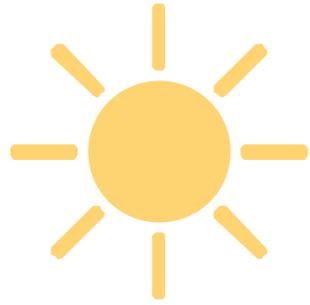
⇒ **Sektorkopplung**

- Netz vorhanden:
Industrie Gasnetz (max. 5%)
u.a. > 50% im Stadtgas

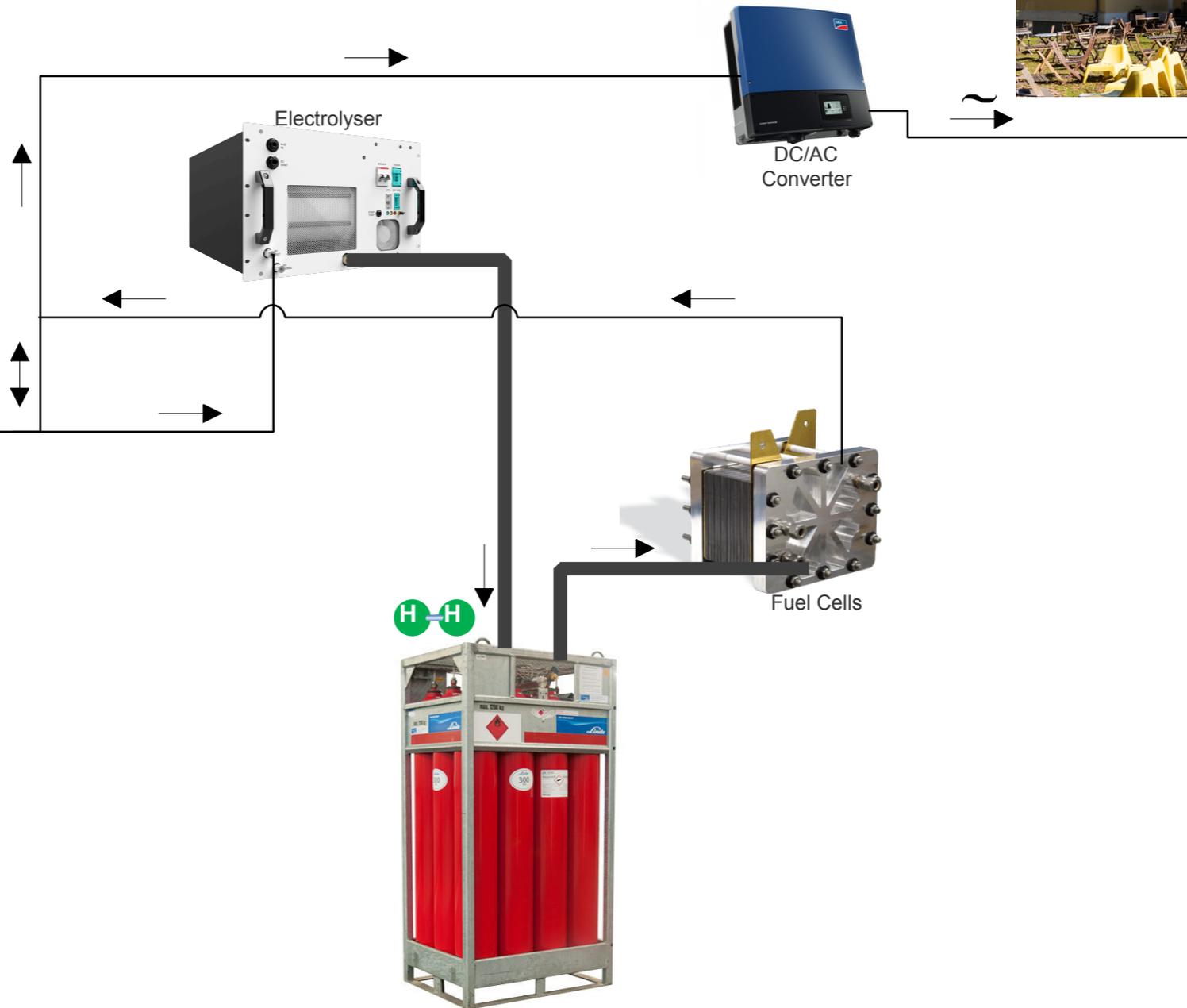
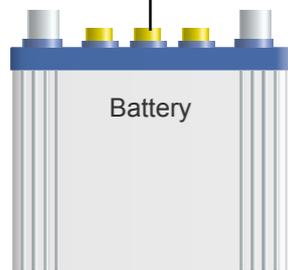
Energie

Mobilität

H₂ Projekt Sternwarte

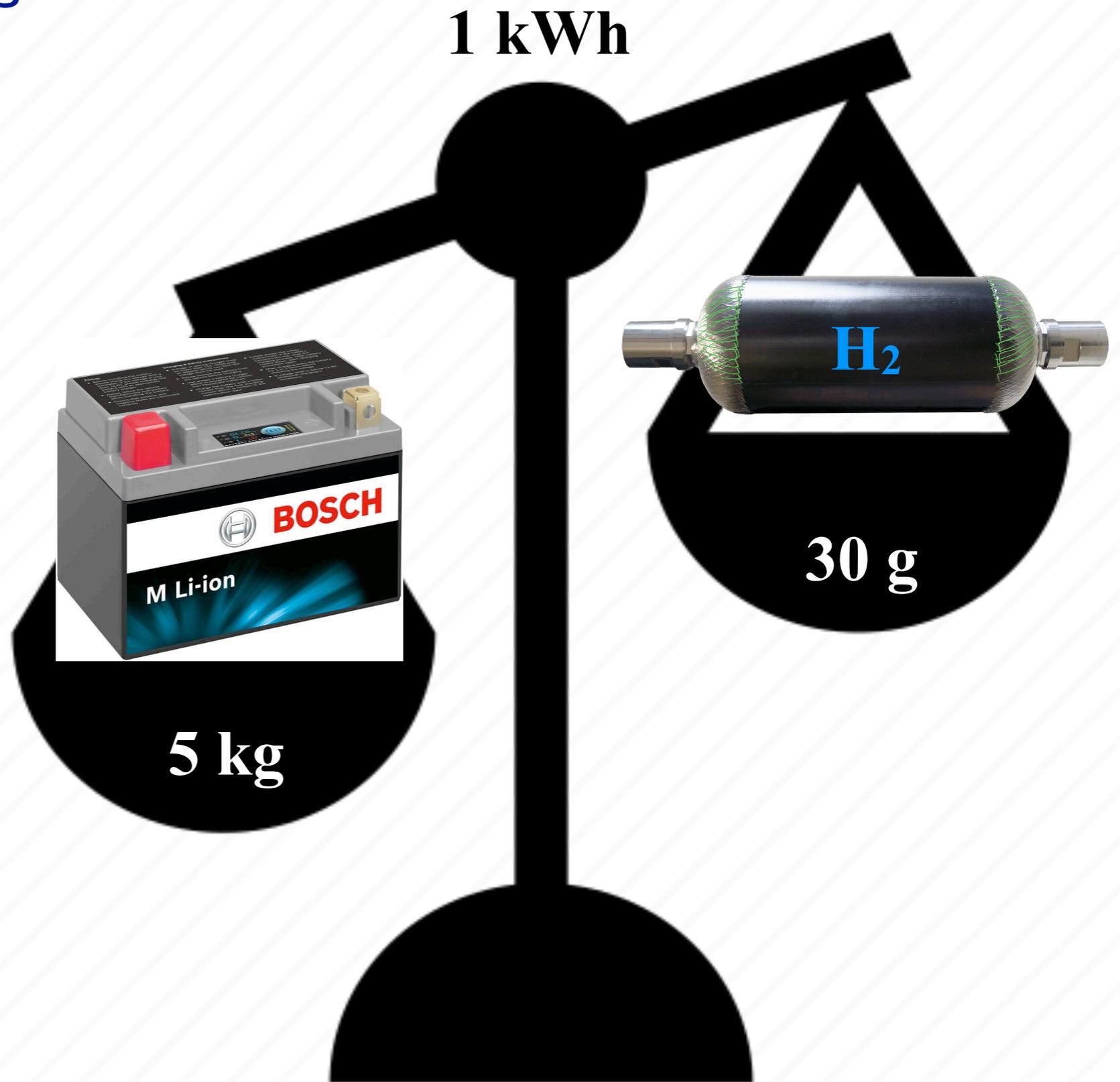


Solar Charge Controller
MPPT 75 | 15 0

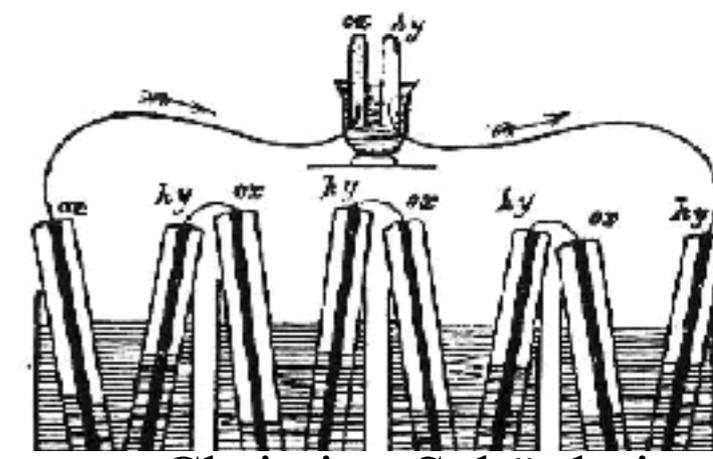


Wasserstoff

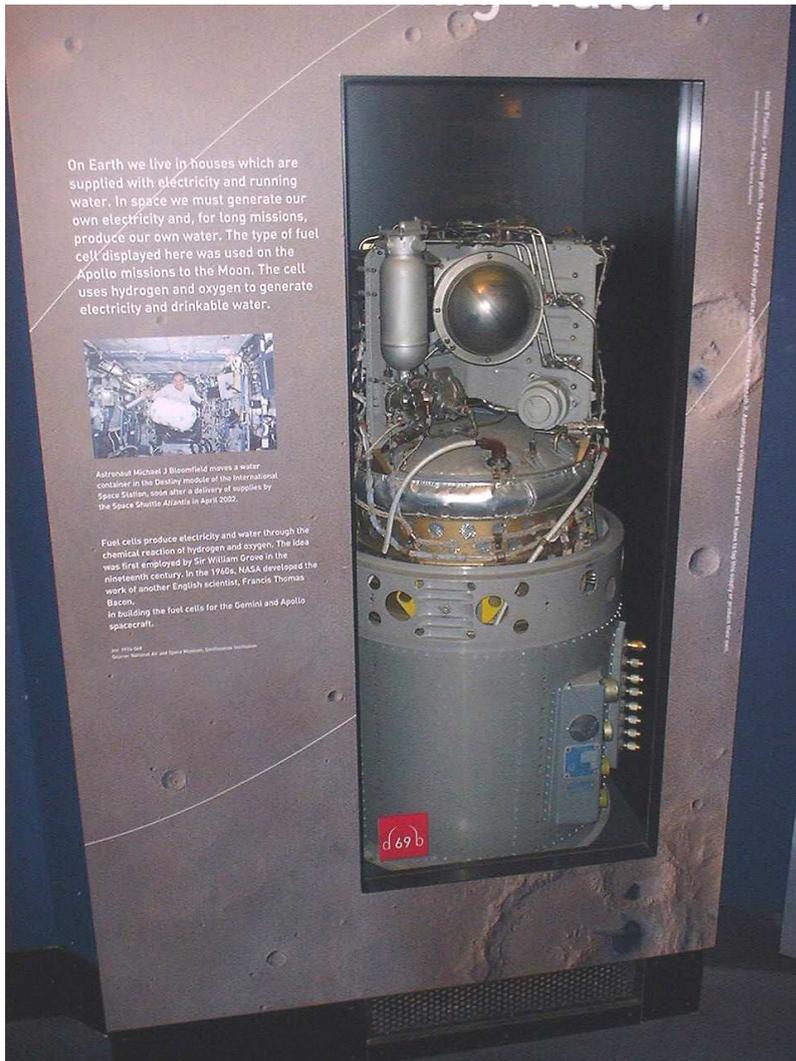
- preiswerte Herstellung und Speicherung
- hohe Energiedichte:
33,6 kWh/kg
Li-Akku: 0,2 kWh/kg



Wasserstoff



Christian Schönbein,
William Grove 1838



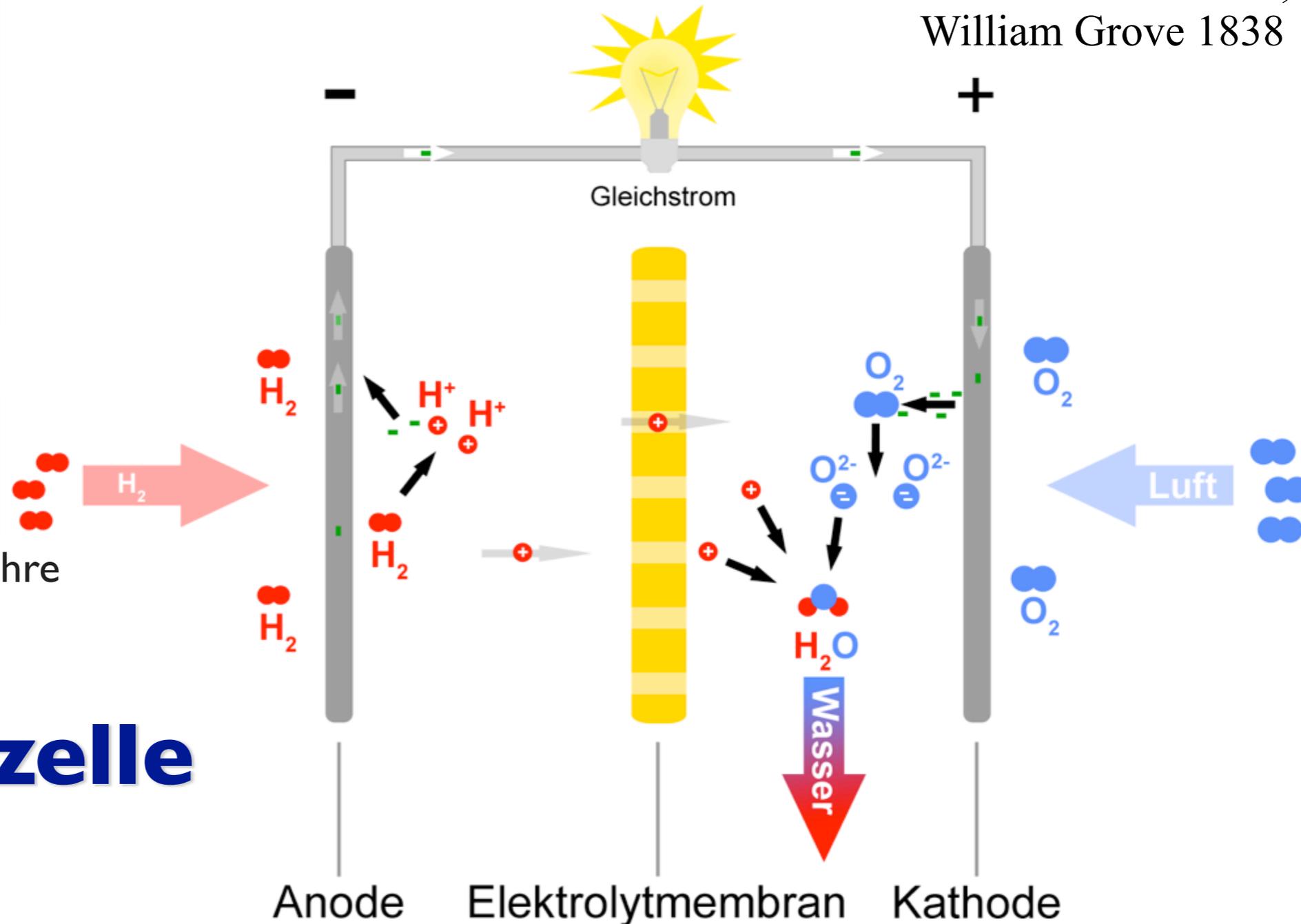
On Earth we live in houses which are supplied with electricity and running water. In space we must generate our own electricity and, for long missions, produce our own water. The type of fuel cell displayed here was used on the Apollo missions to the Moon. The cell uses hydrogen and oxygen to generate electricity and drinkable water.



Astronaut Michael J. Bloomfield moves a water container in the Destiny module of the International Space Station, soon after a delivery of supplies by the Space Shuttle Atlantis in April 2002.

Fuel cells produce electricity and water through the chemical reaction of hydrogen and oxygen. The idea was first employed by Sir William Grove in the nineteenth century. In the 1940s, NASA developed the work of another English scientist, Francis Thomas Bacon, in building the fuel cells for the Gemini and Apollo spacecraft.

Apollo Missionen: 60er/70er Jahre



Brennstoffzelle (fuel cell)

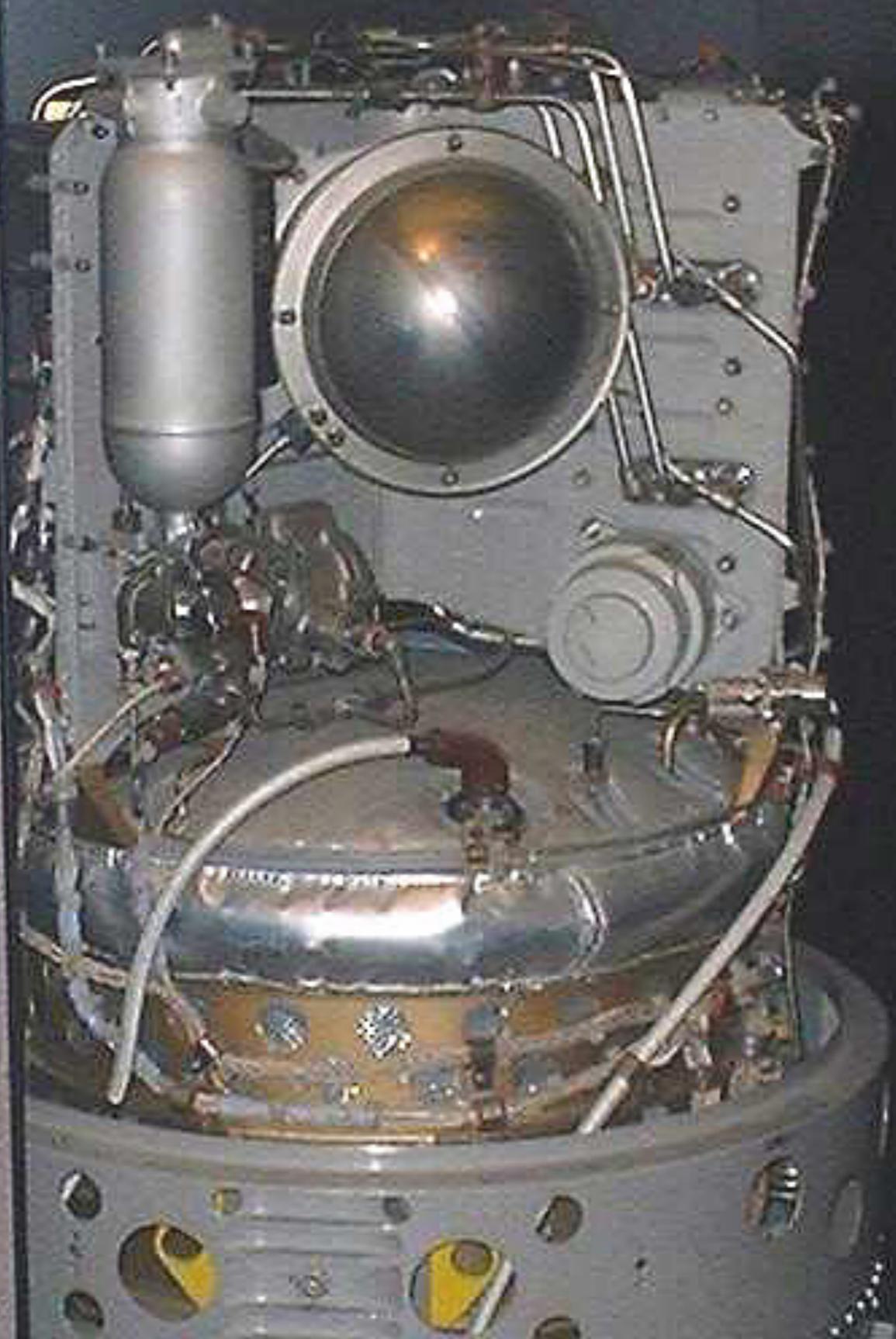
“kalte Verbrennung”

On Earth we live in houses which are supplied with electricity and running water. In space we must generate our own electricity and, for long missions, produce our own water. The type of fuel cell displayed here was used on the Apollo missions to the Moon. The cell uses hydrogen and oxygen to generate electricity and drinkable water.



Astronaut Michael J. Bloomfield moves a water container in the Destiny module of the International Space Station, soon after a delivery of supplies by the Space Shuttle Atlantis in April 2002.

Fuel cells produce electricity and water through the chemical reaction of hydrogen and oxygen. The idea was first employed by Sir William Grove in the nineteenth century. In the 1960s, NASA developed the work of another English scientist, Francis Thomas Bacon, in building the fuel cells for the Gemini and Apollo spacecraft.



Technologie vorhanden: Wasserstoffkraftwerk



Rostock-Laage: Wasserstoffkraftwerk

- Stromerzeugung aus H₂: 16 GWh/Jahr (2 MW Leistung)

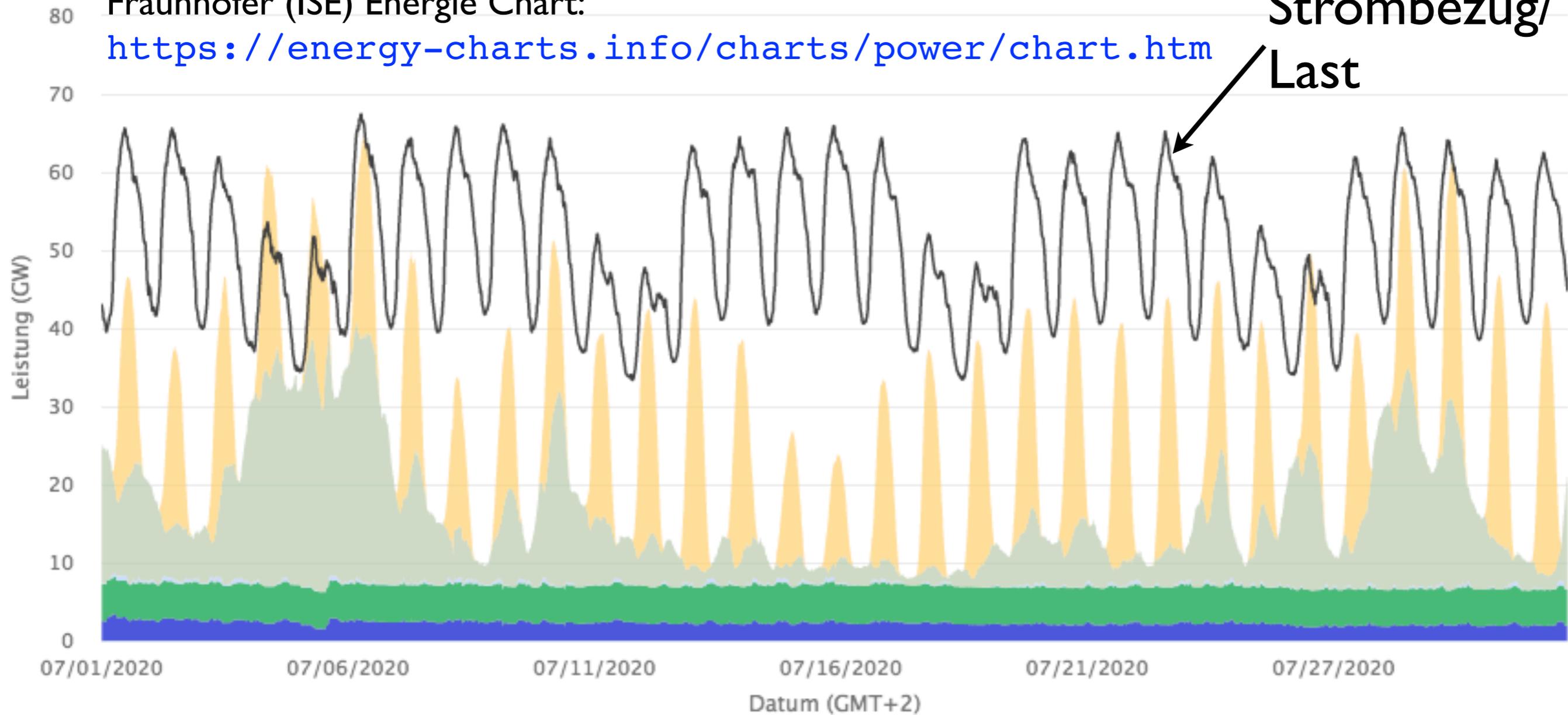
Transport & Speicher

Stromerzeugung in Deutschland im Juli 2020

Fraunhofer (ISE) Energie Chart:

<https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm>

Strombezug/
Last



- Pumpspeicher Verbrauch
- Kernenergie
- Gas
- Wind
- Anteil EE
- Import Saldo
- Braunkohle
- Andere
- Solar
- Wasserkraft
- Steinkohle
- Pumpspeicher
- Last
- Biomasse
- Öl
- Saisonspeicher
- Residuallast

Mobilität

Sektor- kopplung

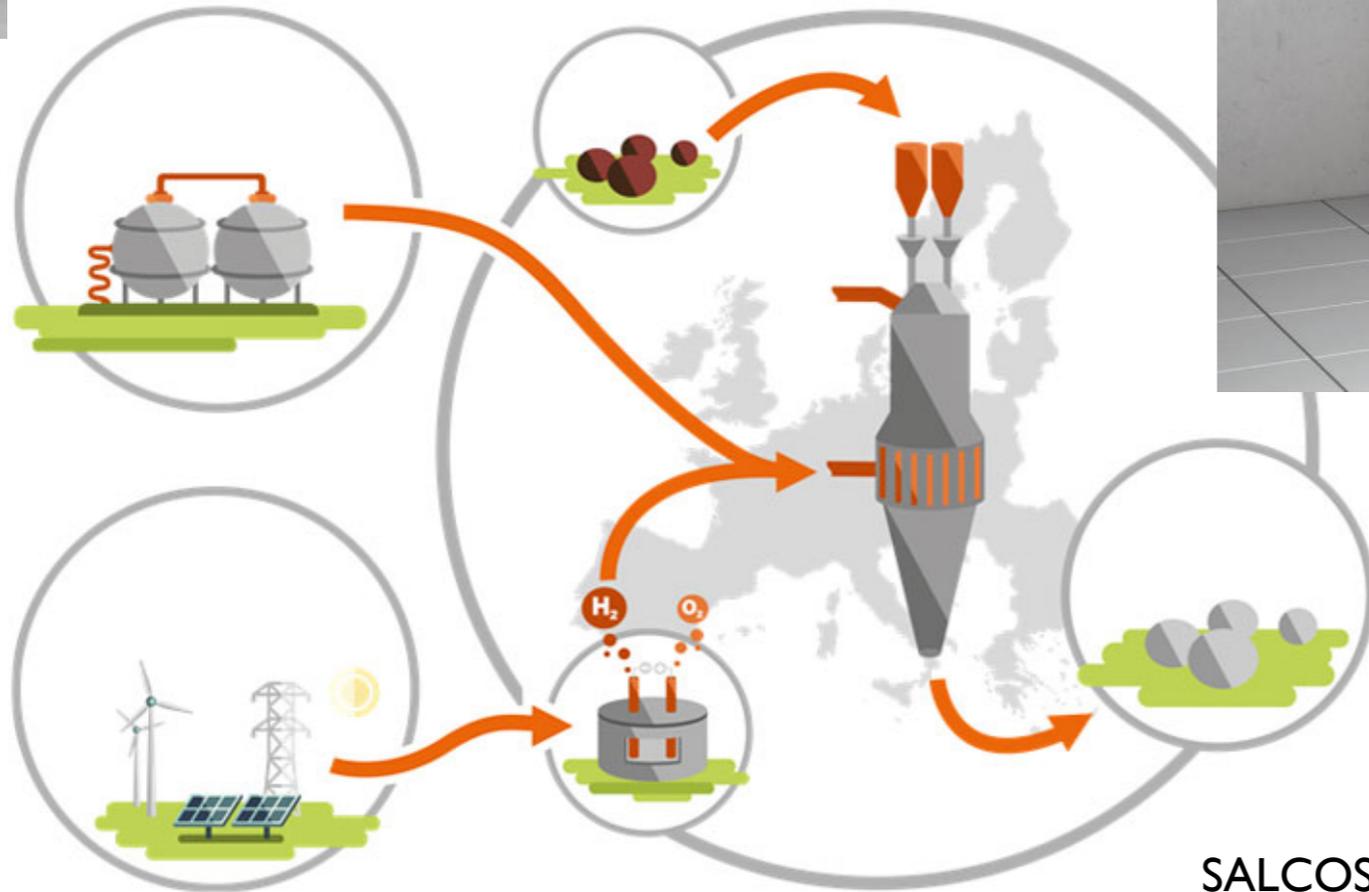
Wasserstoffstation HafenCity



Wärme



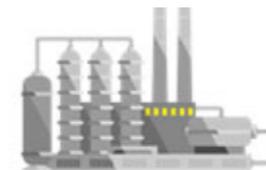
Viessmann Vitovalor



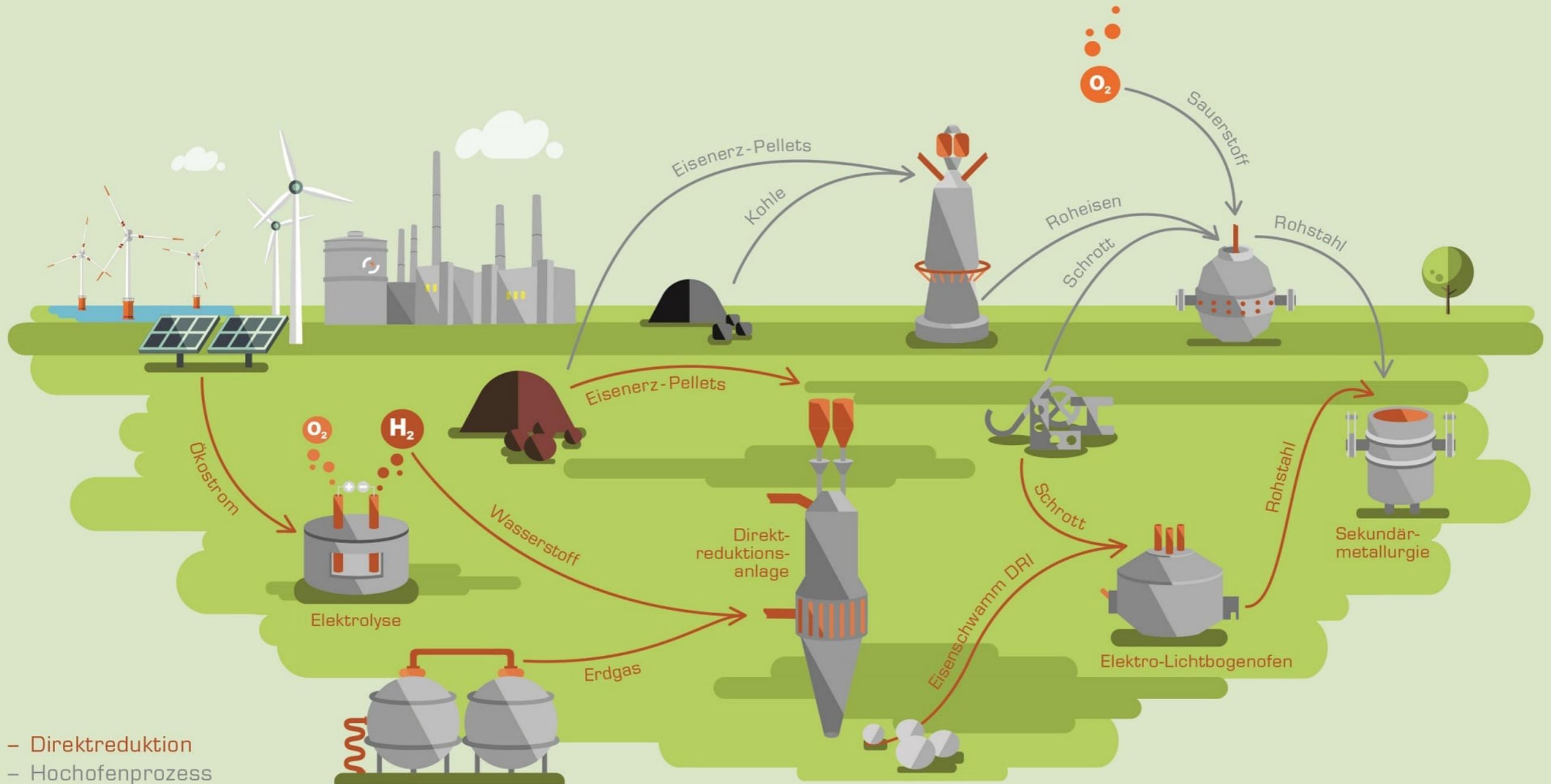
CDA
up to 82%

Industrie

SALCOS®



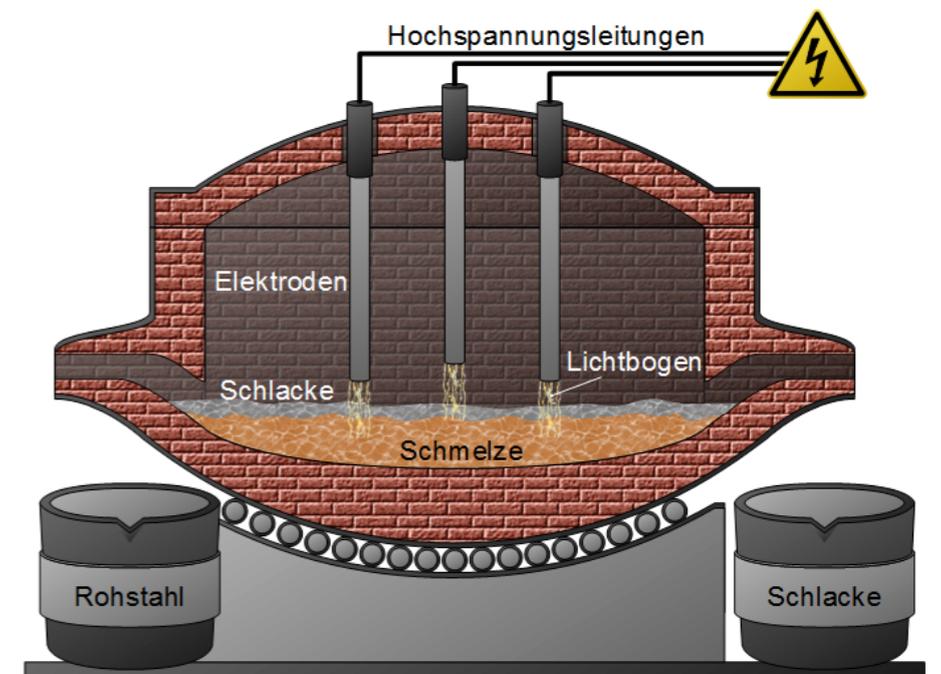
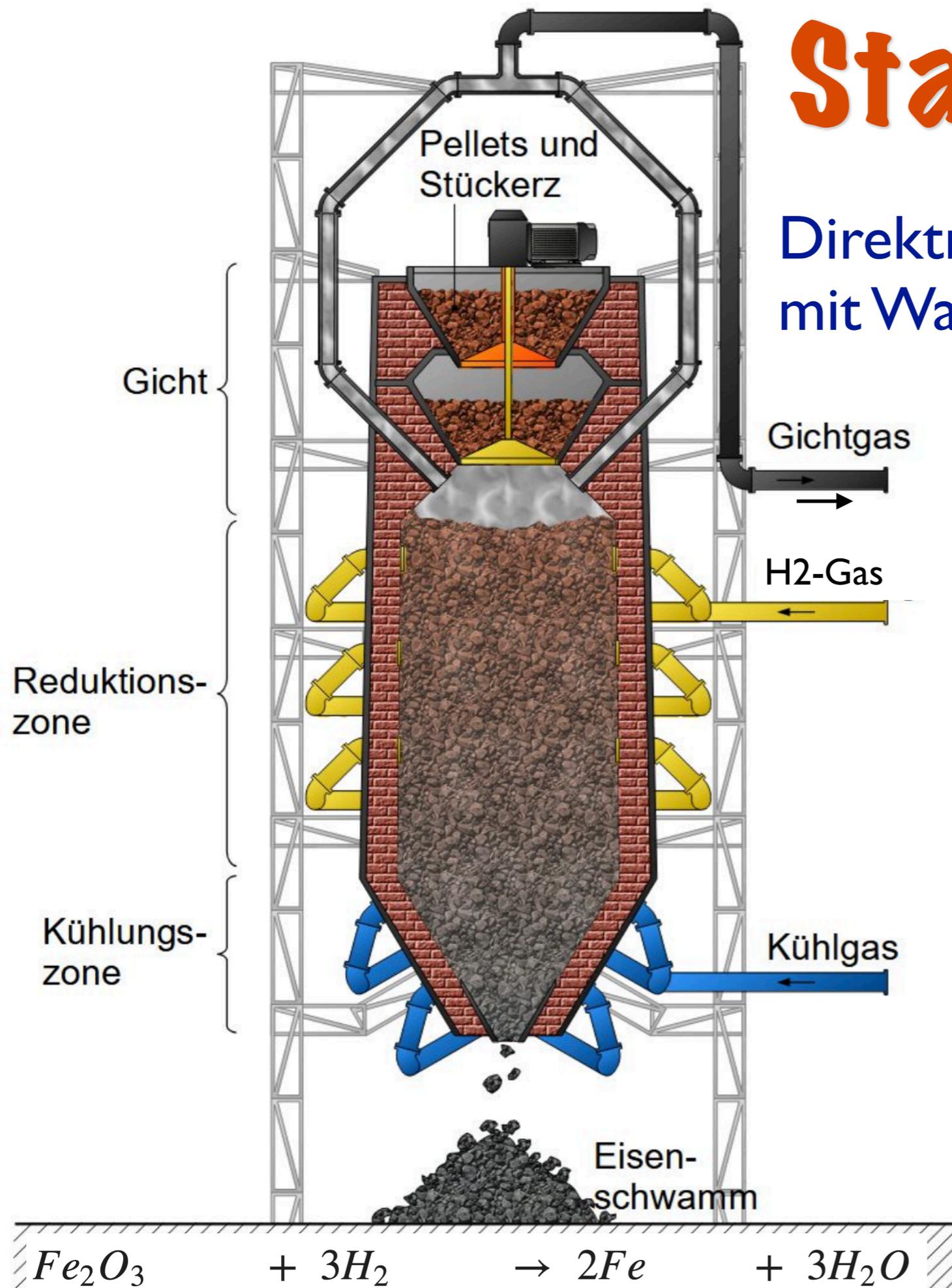
Stahl-Industrie



- Direktreduktion
- Hochofenprozess

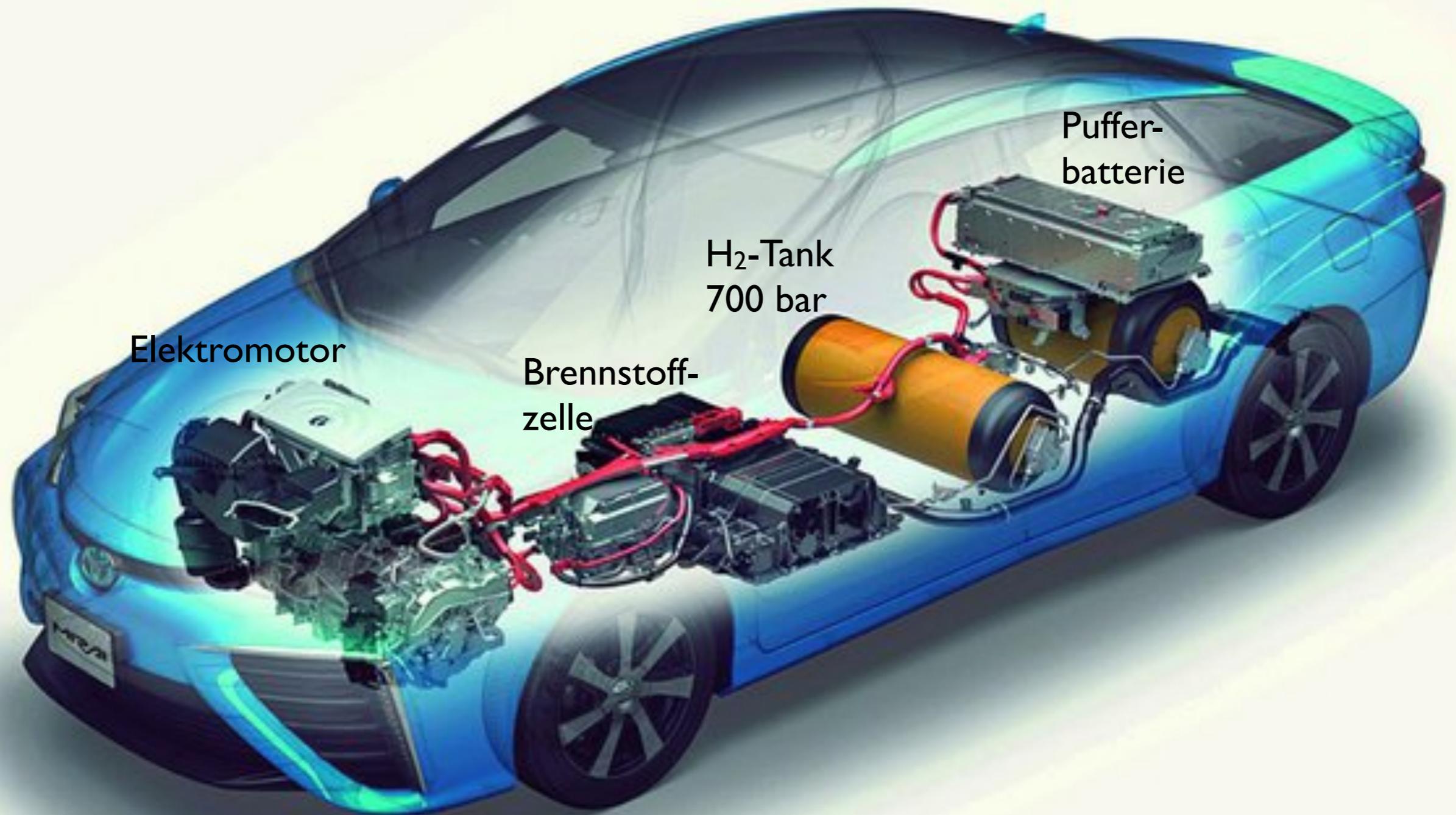
Stahl-Industrie

Direktreduktionsverfahren mit Wasserstoff



strombetriebener Lichtbogenschmelzofen

Brennstoffzellen Fahrzeuge



Toyota Mirai, Fuel Cell Vehicle



The Telegraph, Andrew Crowley

Brennstoffzellen Fahrzeuge

- keine CO₂ Emission
- keine Abgase ... nur Wasser
- keine Verbrennungsrückstände
- kein Gestank
- kaum Motorgeräusche

- kein Getriebe
- kein Anlasser
- einfacher Motor: **Elektromotor**
- sehr **hohe Effizienz**
- durchgängiges Drehmoment
- bessere Beschleunigung
- ...

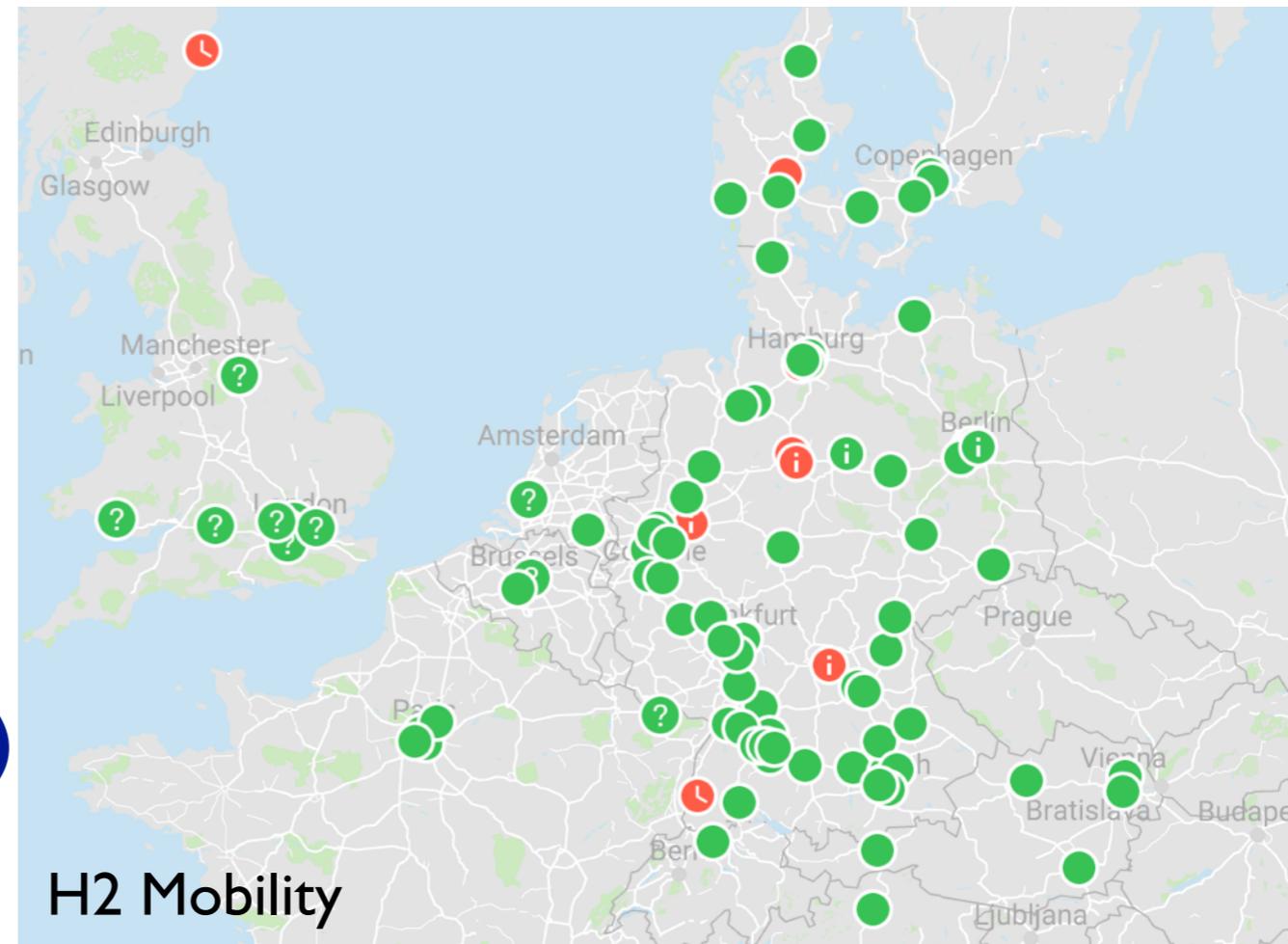


1919: Slaby-Beringer Elektroautos

das automobiler Zeitalter begann **elektrisch**

Mobilität & Transport

- FCV (e.g., Toyota MIRAI, Hyundai NEXO/ix35)
- **Standard Einfüllstutzen** (e.g., WEH H70)
- **Standard Druck, PKW:** 700 bar,
LKW: 350 bar
- ca. 90 H₂-Tankstellen (2023)
- Japan 2023: 160 H₂-Tankstellen
- LKW: z.B. Nikola Motor
- Nutzfahrzeuge: Faun Bluepower
- Züge: z.B. Alstom 'ilint Coradia'
- Schiffe: z.B. Siemens BZ (U-Boot)



Mobilität & Transport



Schiffahrt



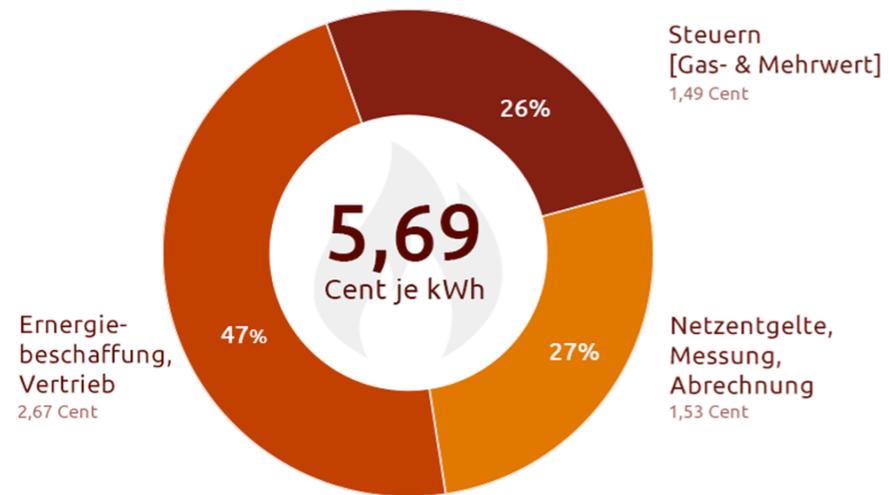
Mythen zum Wasserstoff

- **Energieträger der Zukunft ?**
- **geringe Effizienz ?**
- **große Mengen müssen importiert werden ?**
- **hohes Sicherheitsrisiko ?**

Politische Energiekosten

ZUSAMMENSETZUNG DES GASPREISES 2018

Durchschnittlicher Gaspreis für Haushaltskunden in Deutschland

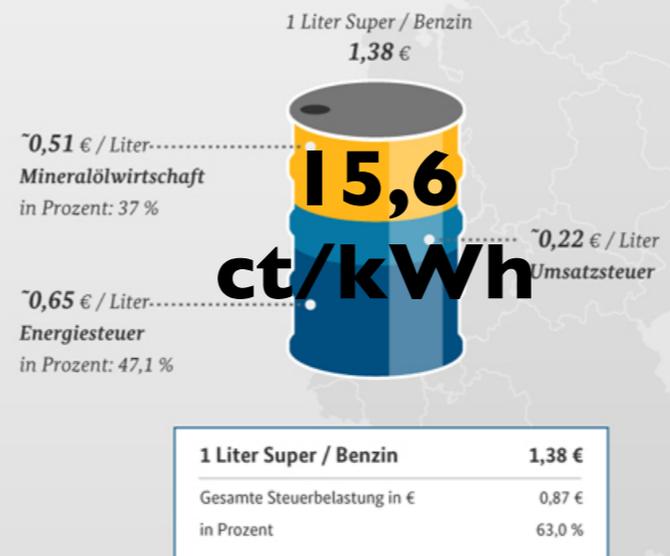


© 1-Gasvergleich.com

Daten: BDEW, Stand 2018

Anteil Steuern am Benzinpreis in Deutschland

Wie setzt sich der Benzinpreis zusammen?*

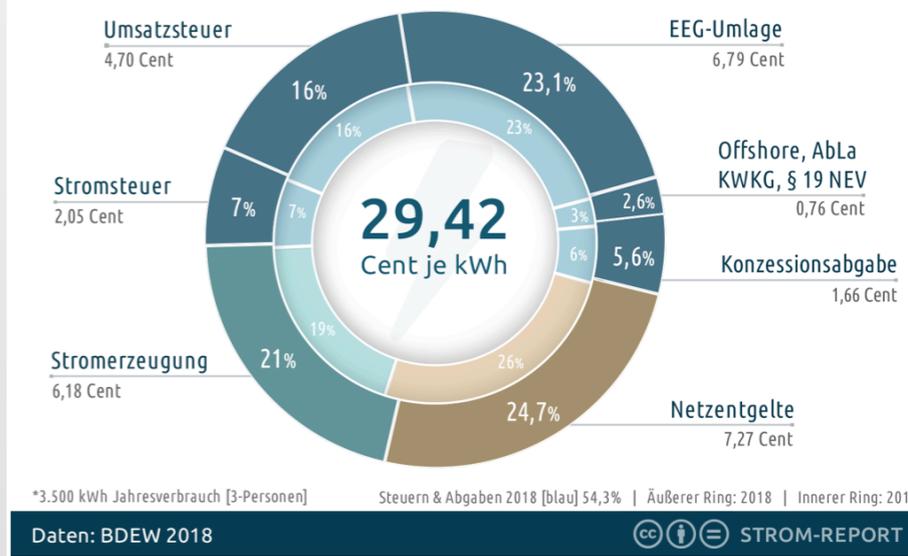


* Bei einem angenommenen Preis von 1,38 € für einen Liter Super

Stand: 11. Januar 2018
© Bundesministerium der Finanzen

STROMPREISZUSAMMENSETZUNG 2018

Durchschnittlicher Strompreis für Haushaltskunden in Deutschland*



*3.500 kWh Jahresverbrauch [3-Personen]

Steuern & Abgaben 2018 [blau] 54,3% | Äußerer Ring: 2018 | Innerer Ring: 2017

Daten: BDEW 2018

© STROM-REPORT

Erdgas

5 - 7 ct/kWh

Benzin

12 - 16 ct/kWh

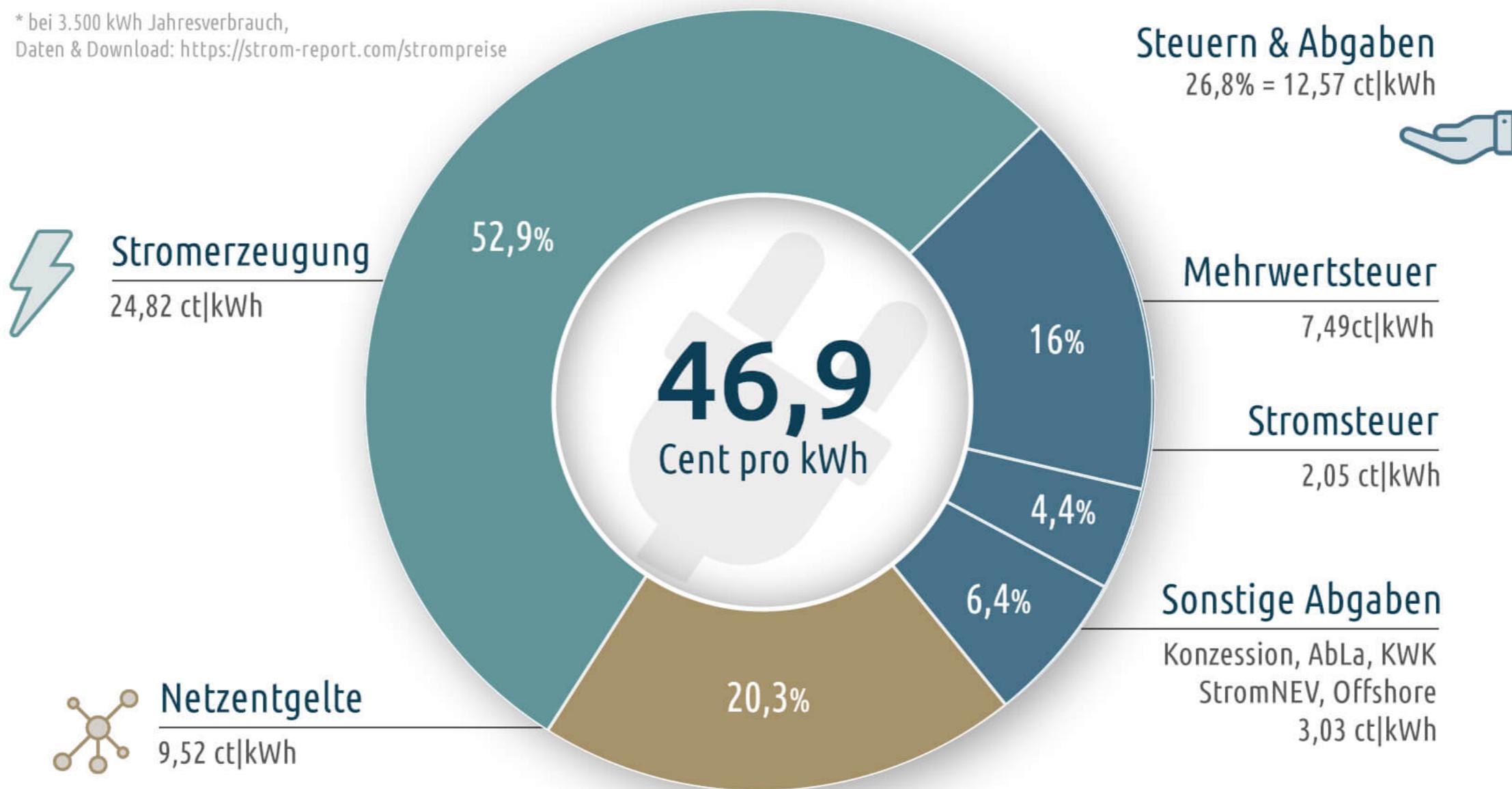
Strom

~ 30 ct/kWh

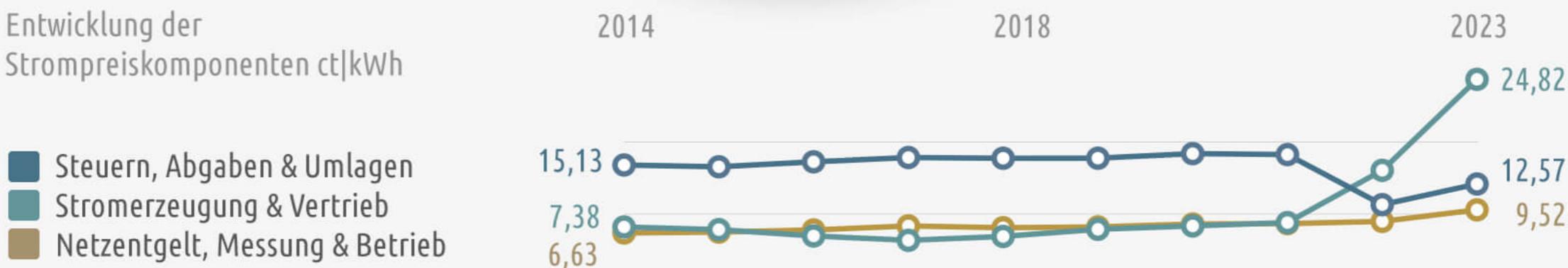
STROMPREISZUSAMMENSETZUNG 2023

Durchschnittl. Strompreis für Haushalte in Deutschland [ohne Preisbremse]

* bei 3.500 kWh Jahresverbrauch,
 Daten & Download: <https://strom-report.com/strompreise>

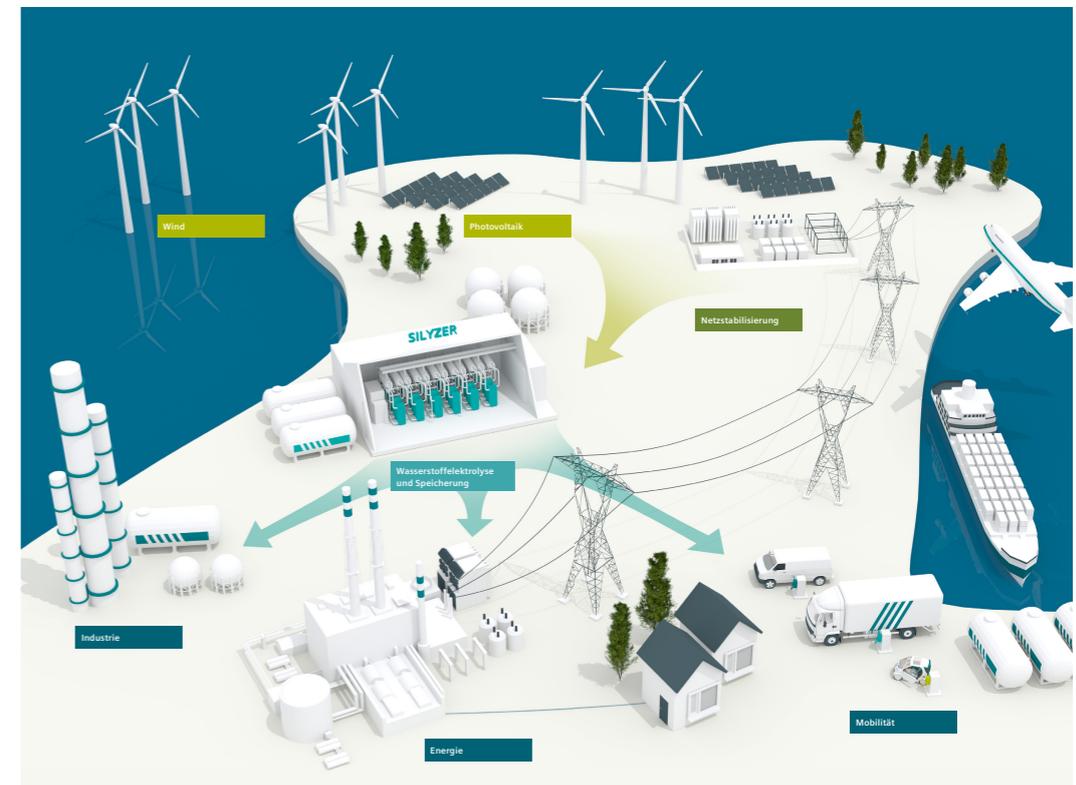
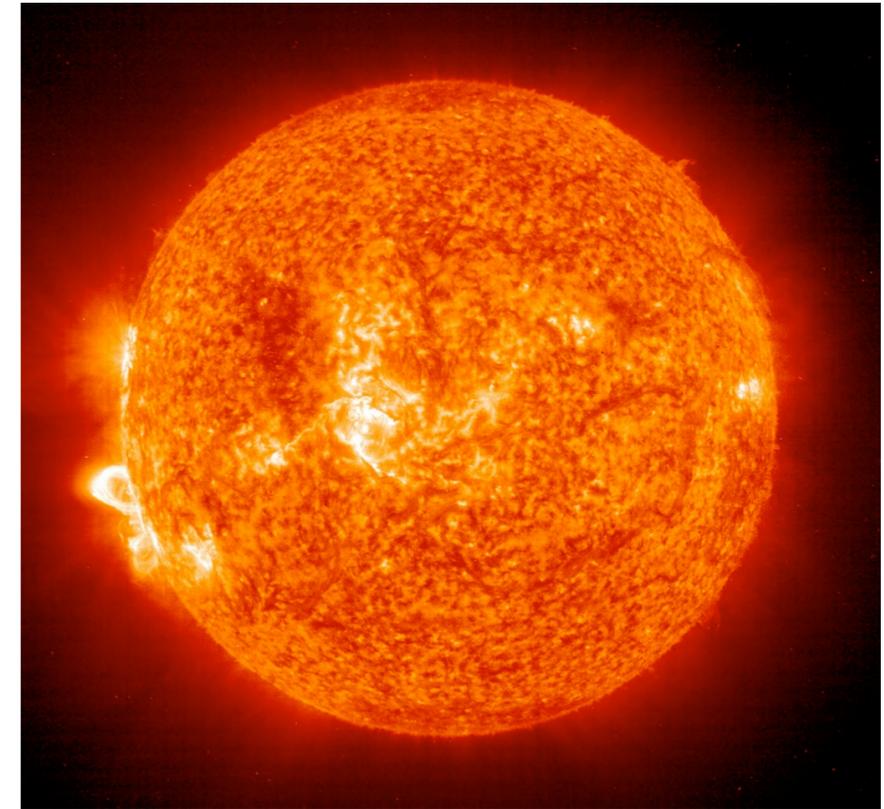


Entwicklung der Strompreiskomponenten ct|kWh



Fazit

- “regenerative” Energiequelle existiert:
Sonne
- Technologie zur Nutzarmachung
existiert (Solarkraftwerke, Windkraft, ...)
- Energiewende = **eWende**
- Versorgungsnetzwerk (Leitung, H₂, ...) muss weiter ausgebaut werden
- Politische / wirtschaftliche / gesellschaftliche Weichenstellung **nicht** ausreichend



Chancen nutzen !

Wasserstoff als Energieträger

- Energiedichte : 33,33 kWh/kg = 3x Benzin

<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/fahrzeugbau/wasserstoff-fuer-fahrzeuge/>

- 700 bar -> 40 kg/m³ (40 g/L)
 - > 4 kg in 100 Liter Tank
 - > 120 kWh
 - > ca. 350 km Strecke
- Benzin: 12 kWh/kg; 1 Liter = 750 g
 - > 50 l = 35,5 kg -> 450 kWh
- Li-Batterie: ~ 0.18 kWh/kg ~ 0.5% H₂
bzw. 180 kg Li-Batterie entspricht 1 kg H₂

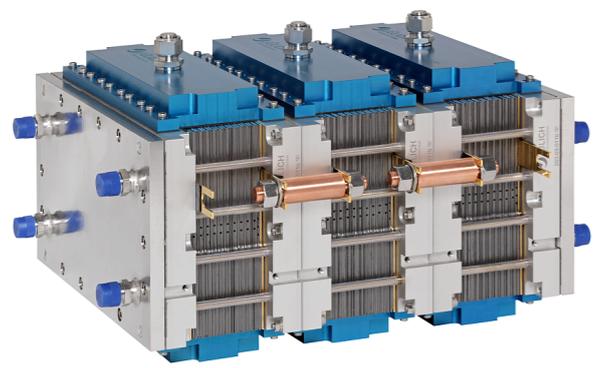
Mobilität

Wasserstoffstation Hafencity



Sektor- kopplung

mit Brennstoffzelle



FZ Jülich

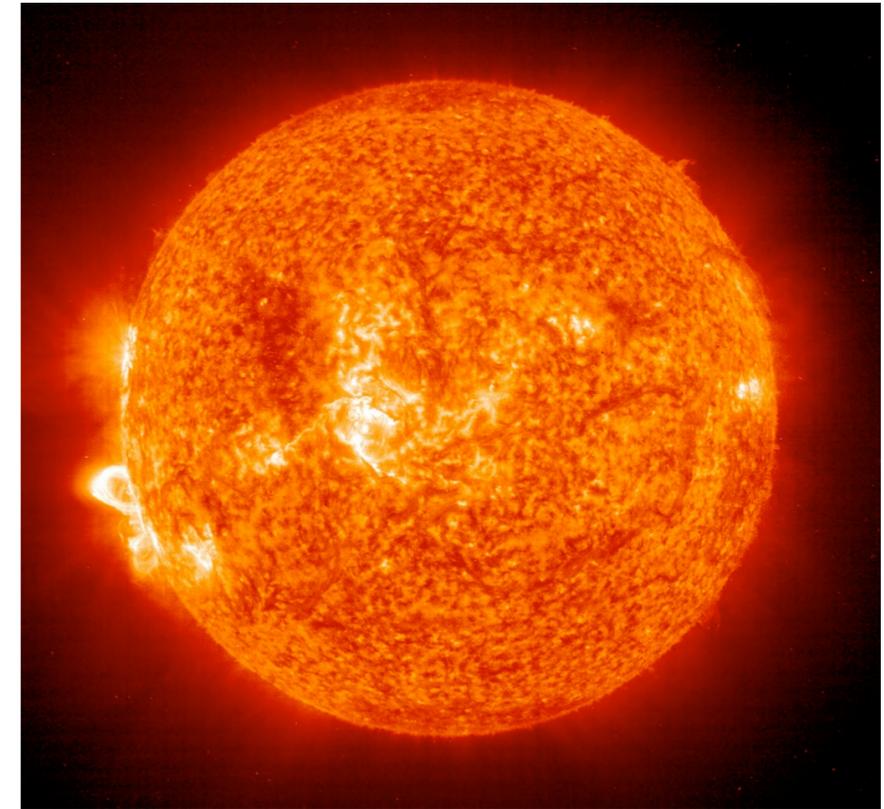
Wärme



Viessmann Vitovalor

Fazit

- “regenerative” Energiequelle *existiert*:
Sonne
- Technologie zur Nutzbarmachung
existiert (Solarkraftwerke, Windkraft, ...)
- Versorgungsnetzwerk (Leitung, H₂, ...) muss weiter ausgebaut werden
- Politische / wirtschaftliche / gesellschaftliche Weichenstellung
nicht ausreichend



Chancen nutzen !