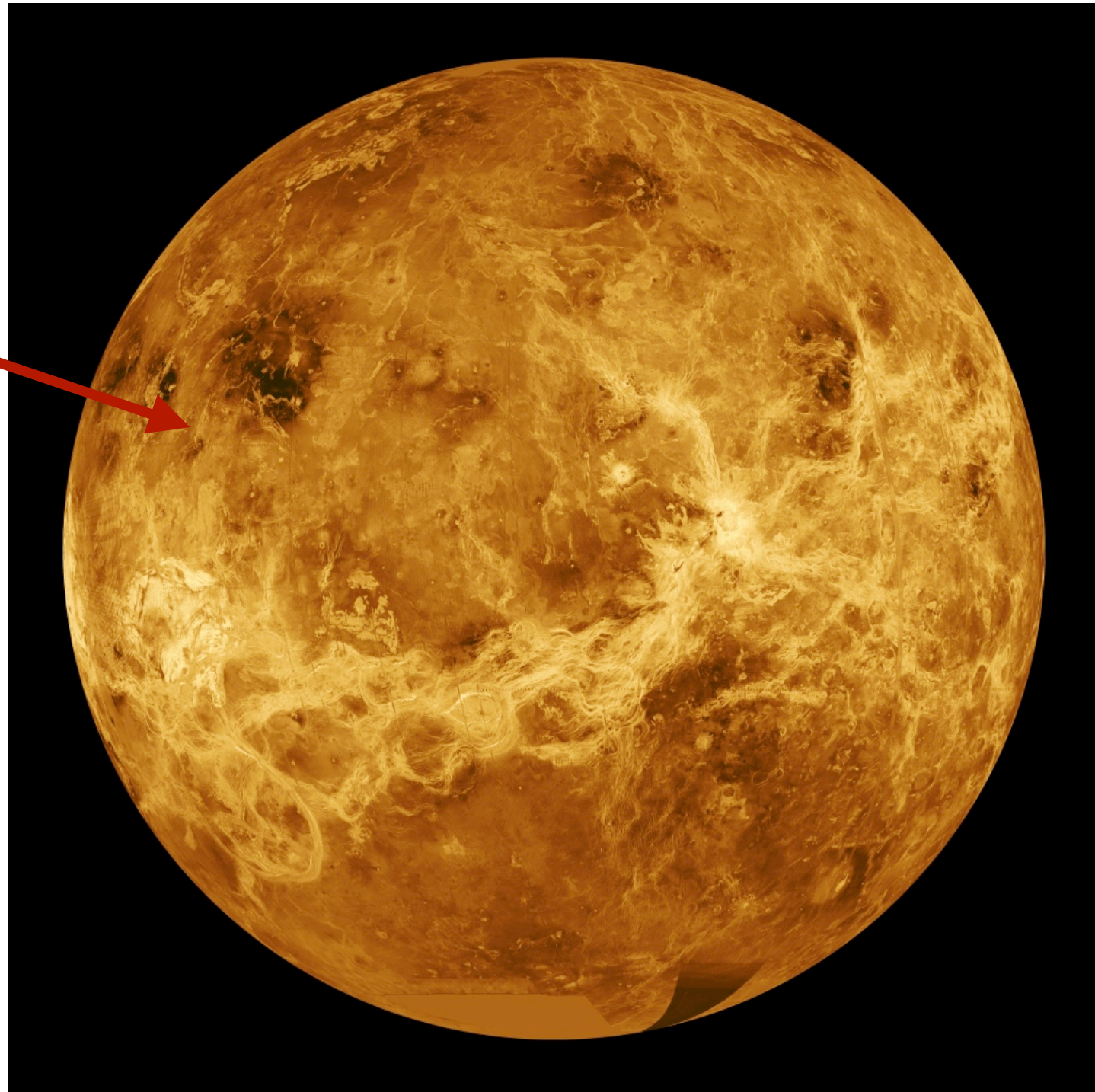
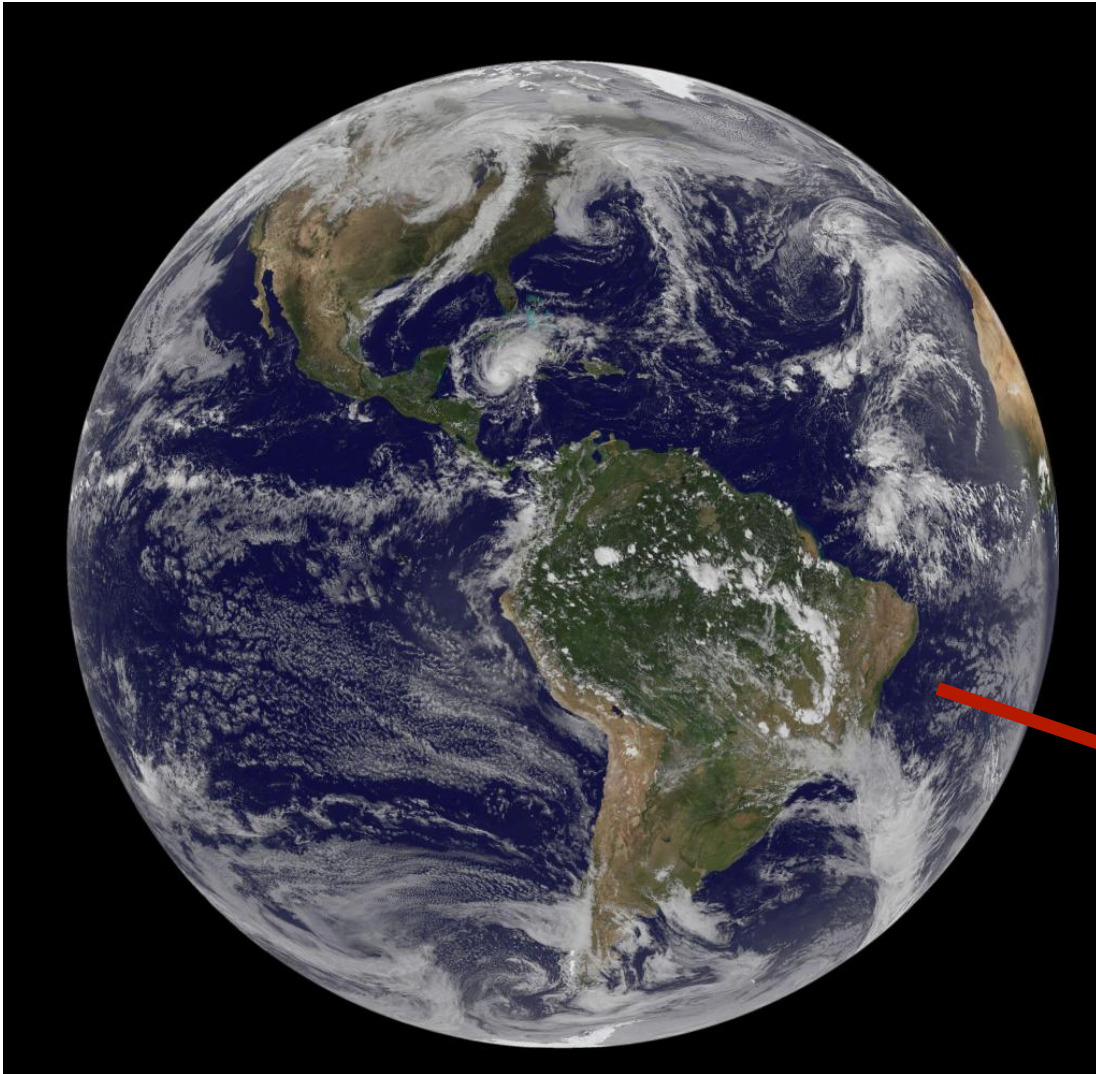


die eWende

Wie schaffen wir die Energiewende?

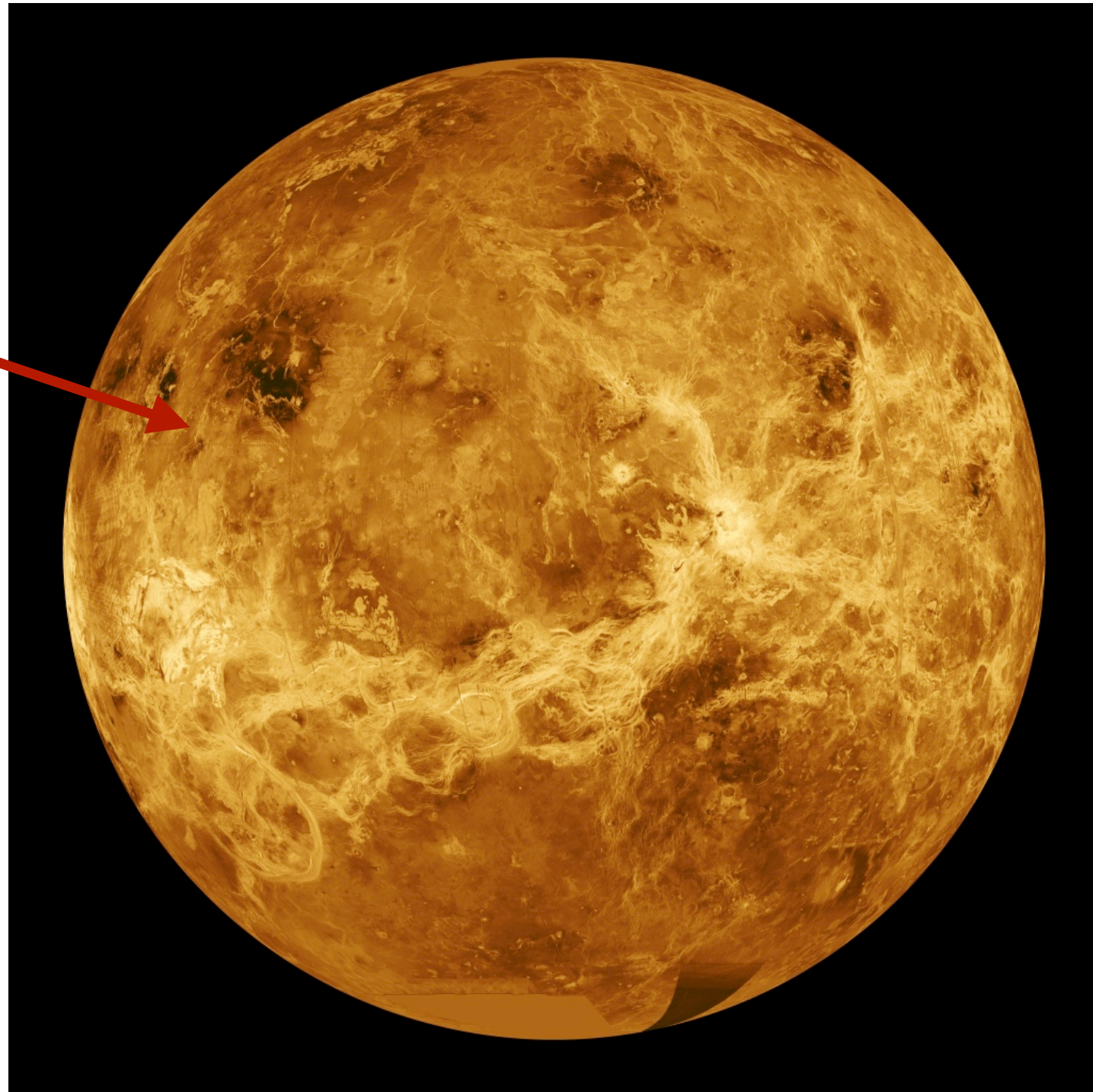
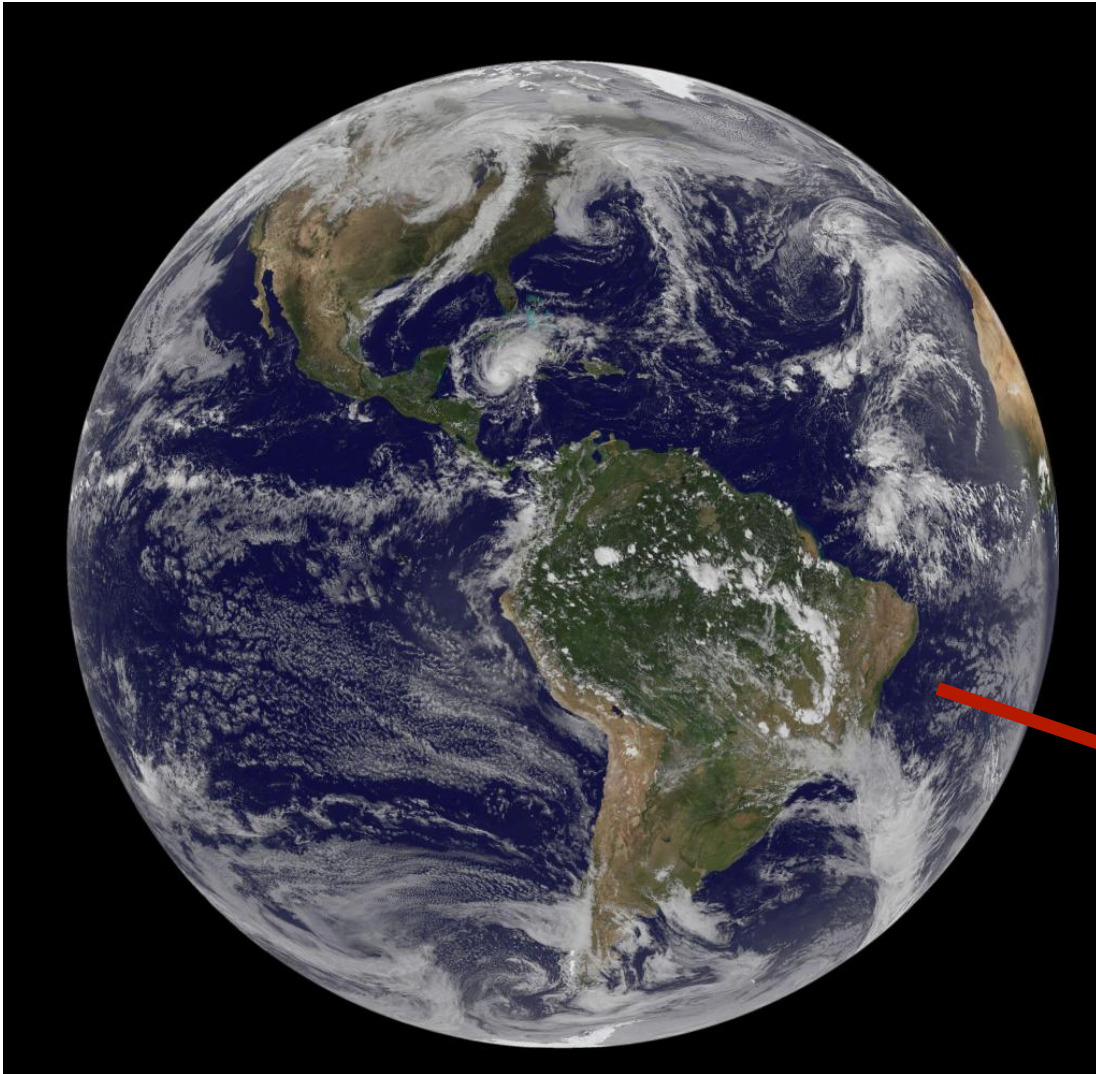
Prof. Dr. Robi Banerjee
Universität Hamburg / Hamburger Sternwarte

Warum?



Venus Atmosphäre:
96% CO₂

Warum?

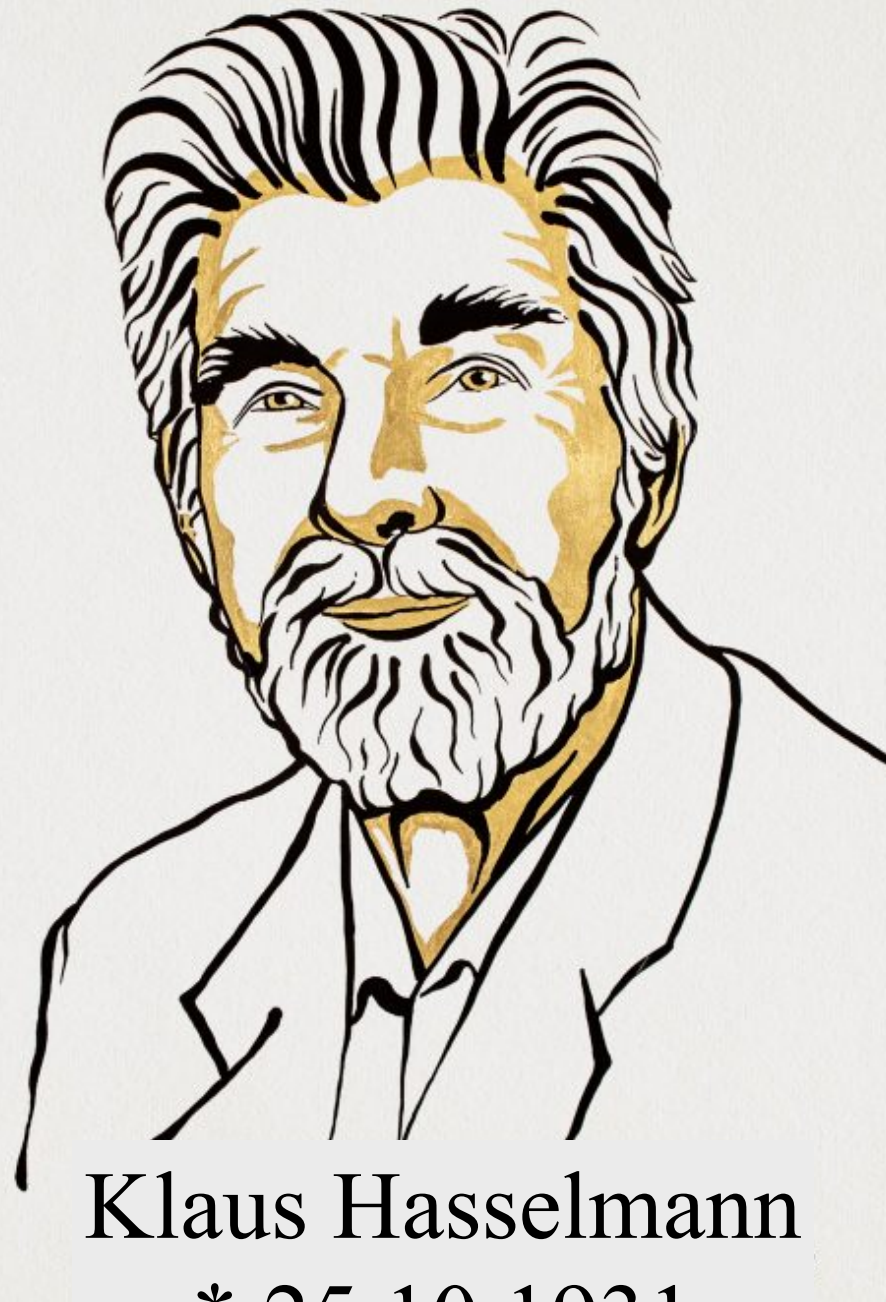


- Anthropogener Klimawandel
- Endliche Ressourcen
- Verantwortungsvoller Umgang
- soziale Gerechtigkeit

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

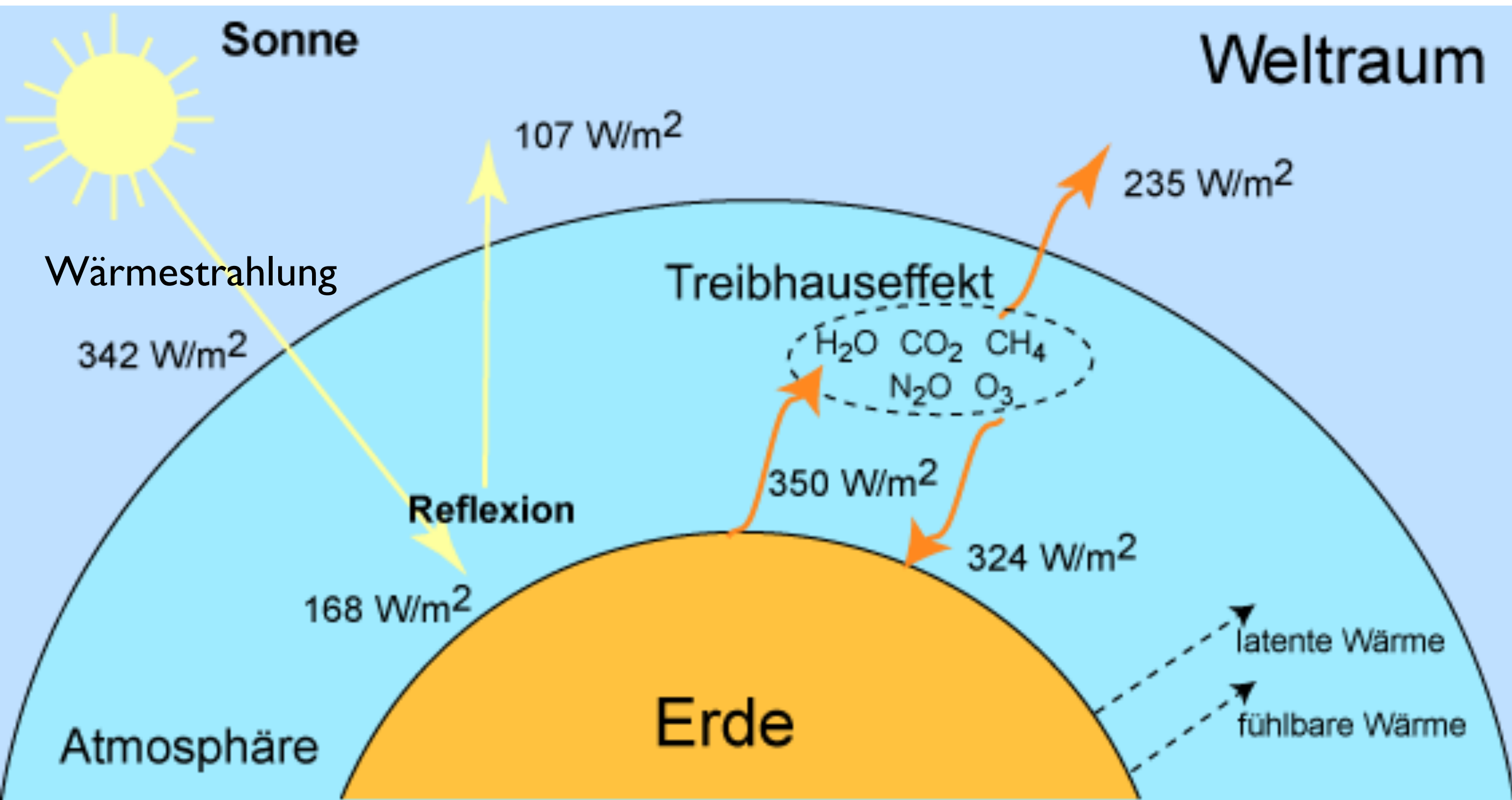
Klimaforschung

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

Svante Arrhenius
1859 – 1927



Natürlicher Treibhauseffekt



Welt-Energiebedarf

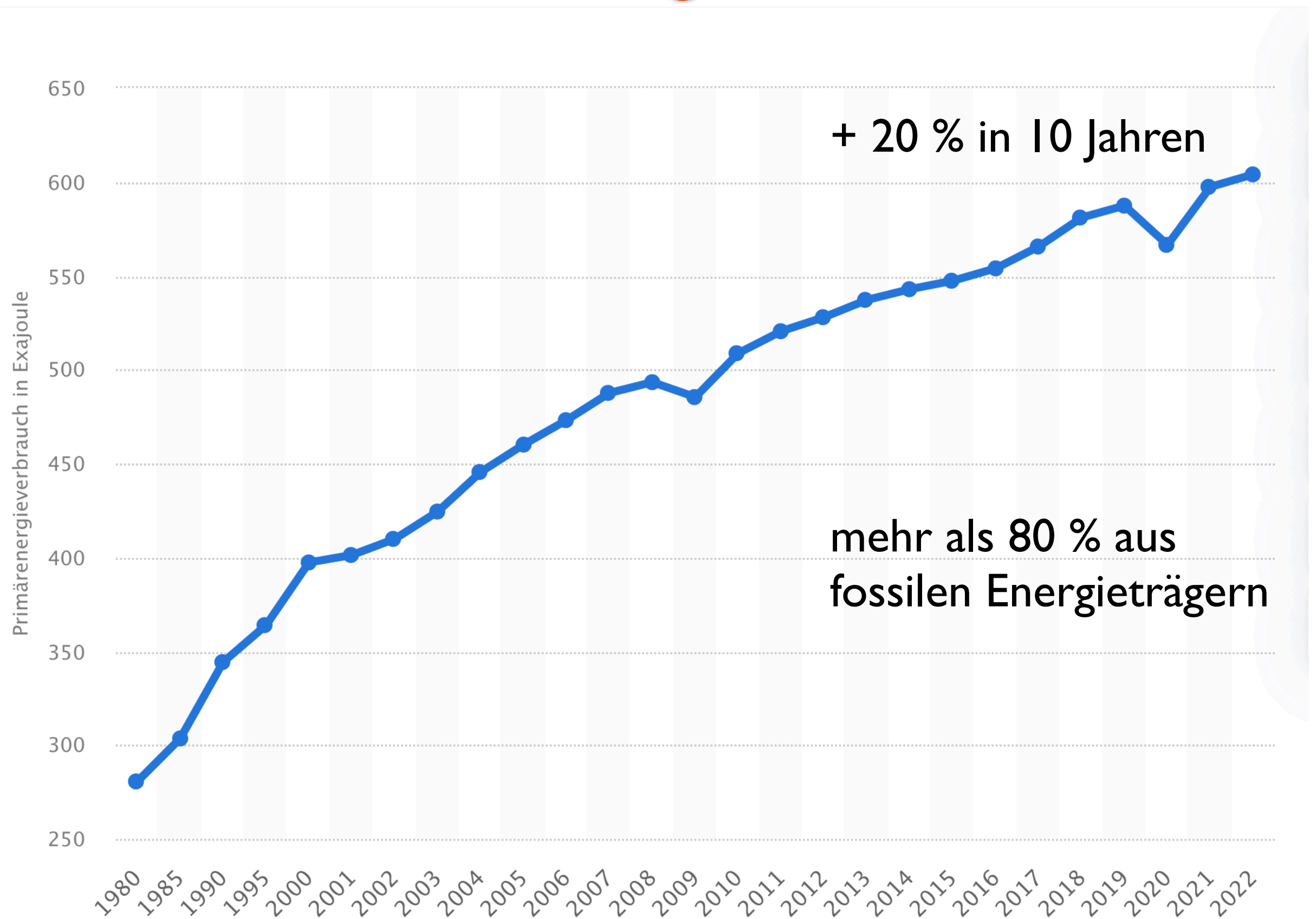
ca. 600 Exa Joule pro Jahr*
 ≈ 170.000 Milliarden kWh / Jahr

durchschnittlicher Leistungsbedarf
 ≈ 19 TW



*Quelle: Statista GmbH, Hamburg

Welt-Energiebedarf

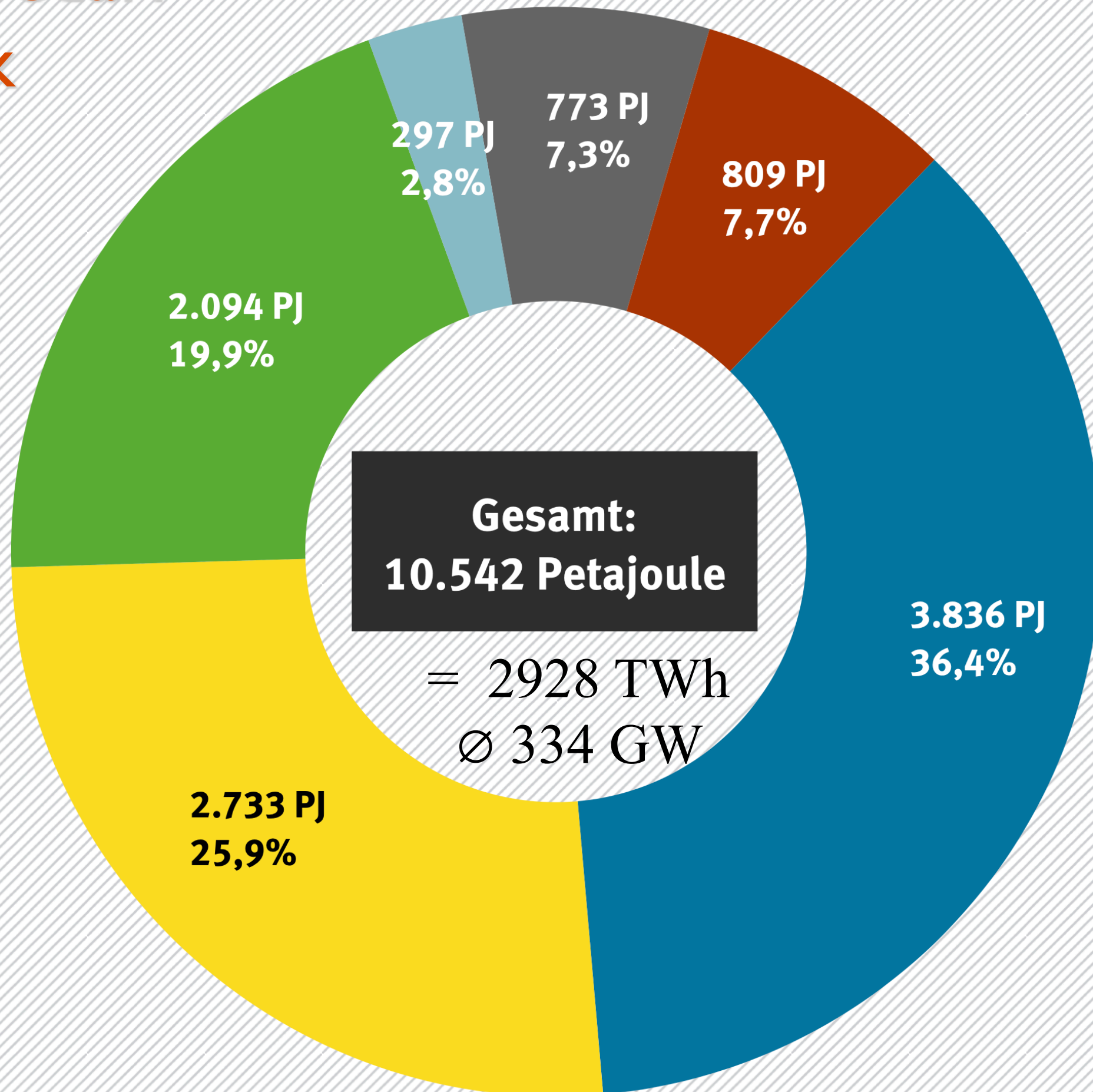


*Quelle: Statista GmbH, Hamburg

Primärenergiebedarf Bundesrepublik

2024

- Steinkohle
- Braunkohle
- Mineralöl
- Gase
- Kernenergie
- Erneuerbare Energien
- Sonstige Energieträger

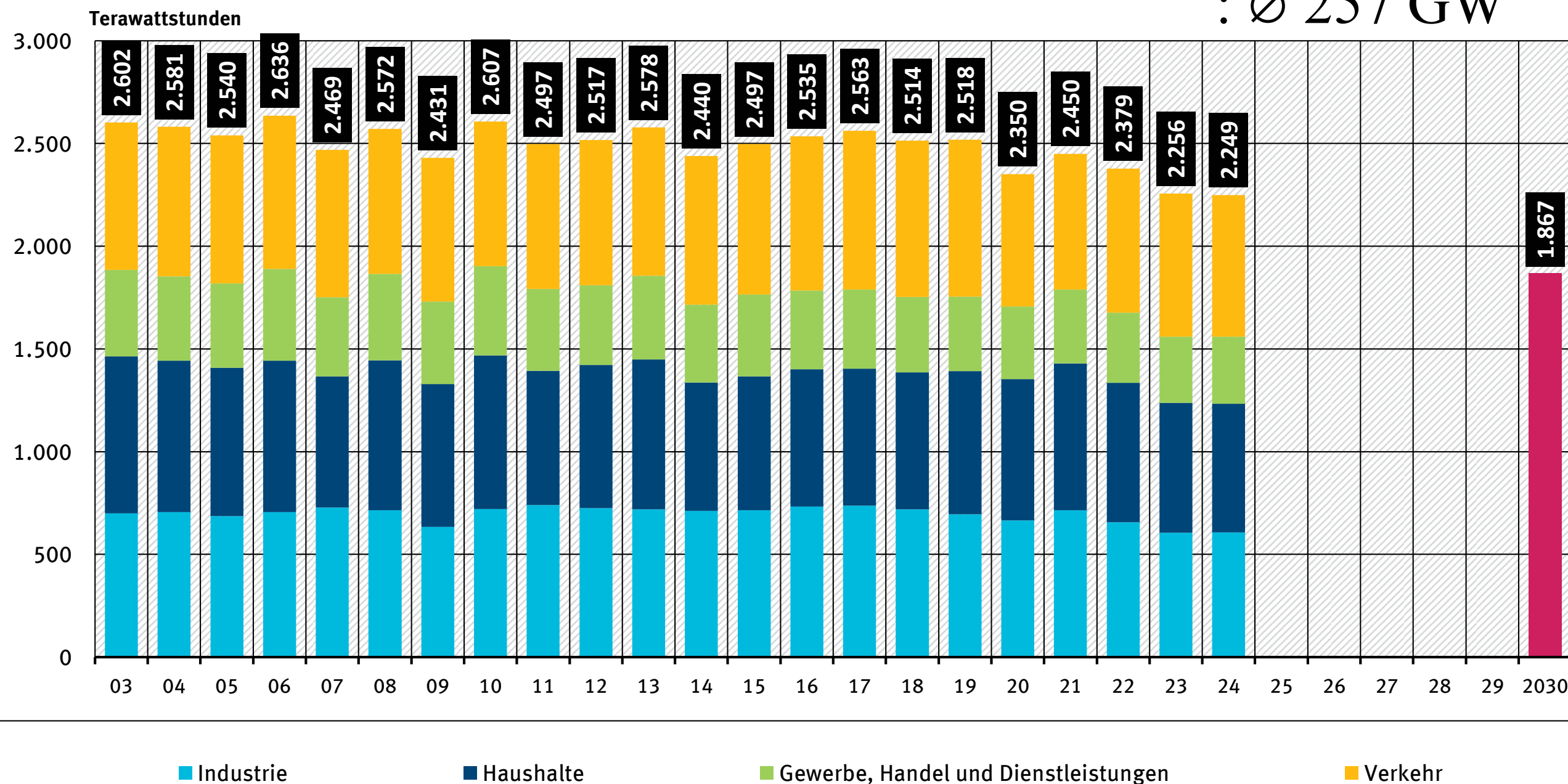


End-Energiebedarf

*

Endenergieverbrauch nach Sektoren¹

: Ø 257 GW



¹ gemäß AGEB-Definition

² gemäß § 4 Abs. 1 Nr. 1 EnEg

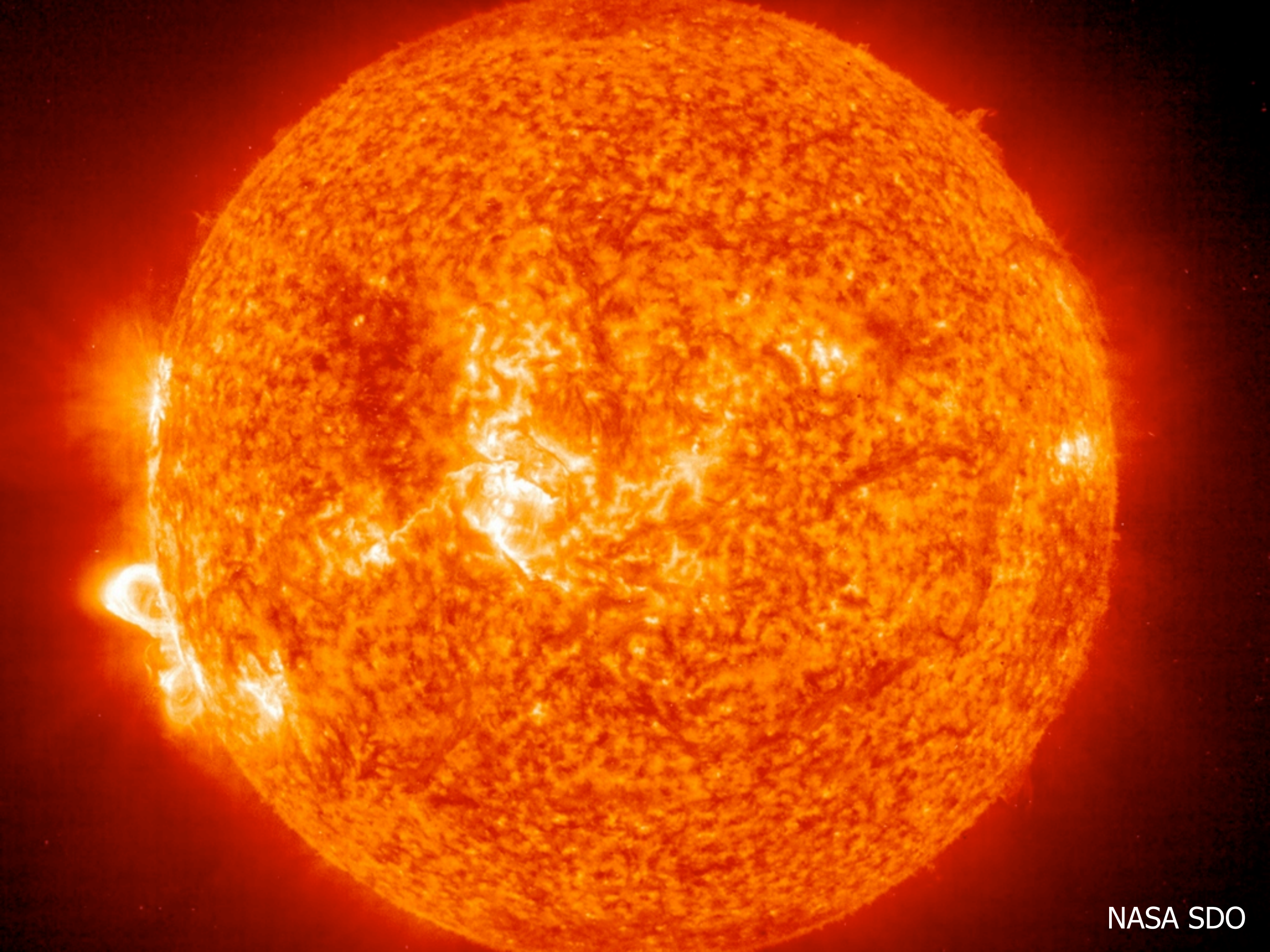
Quelle: UBA-Darstellung auf Basis
AGEB, Auswertungstabellen, Stand 09/2025;
Energieeffizienzgesetz (EnEg).

*Differenz zum Primärenergiebedarf: Verluste ca. 30%

Woher?



**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

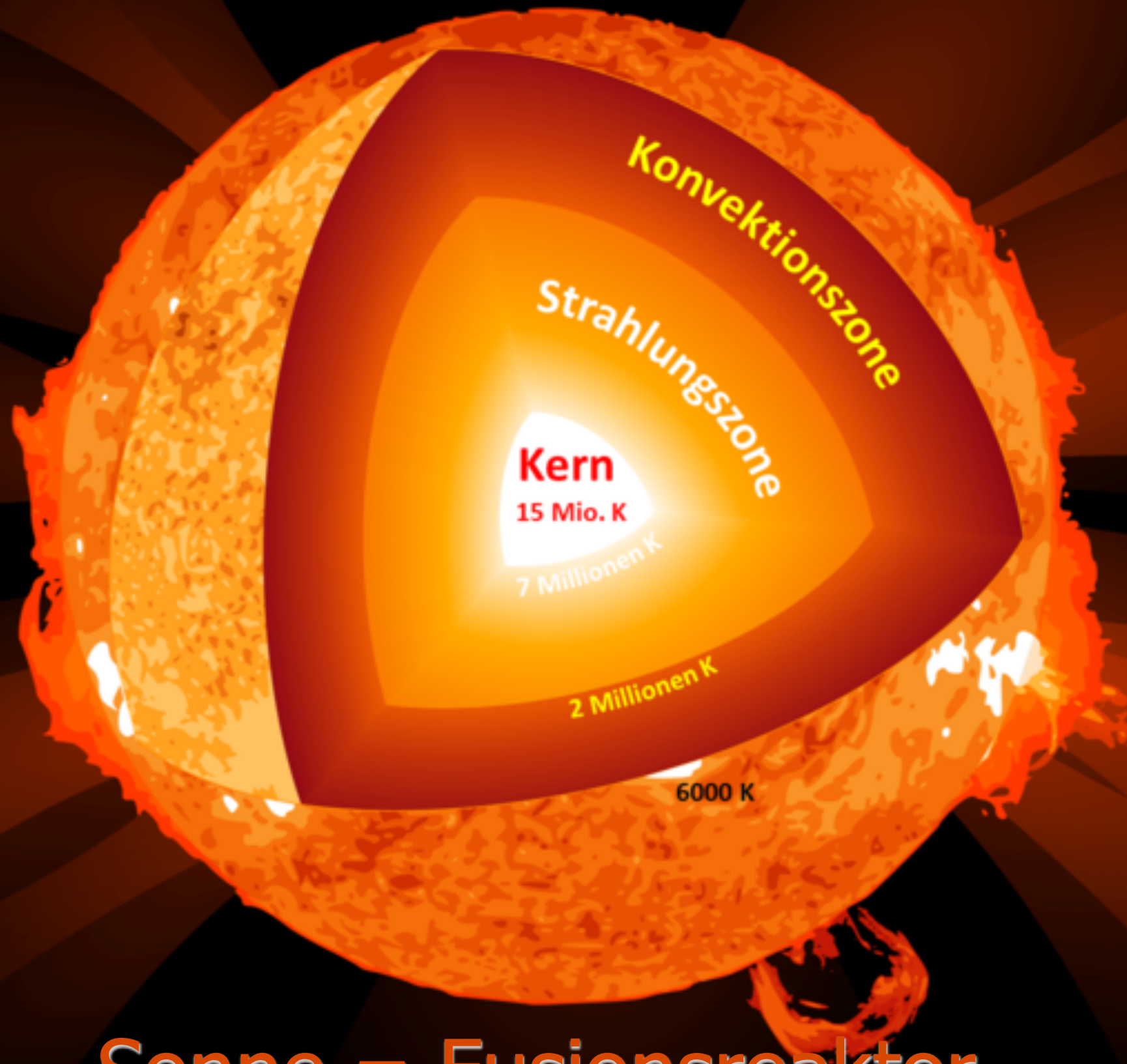
- Erdeinstrahlung

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

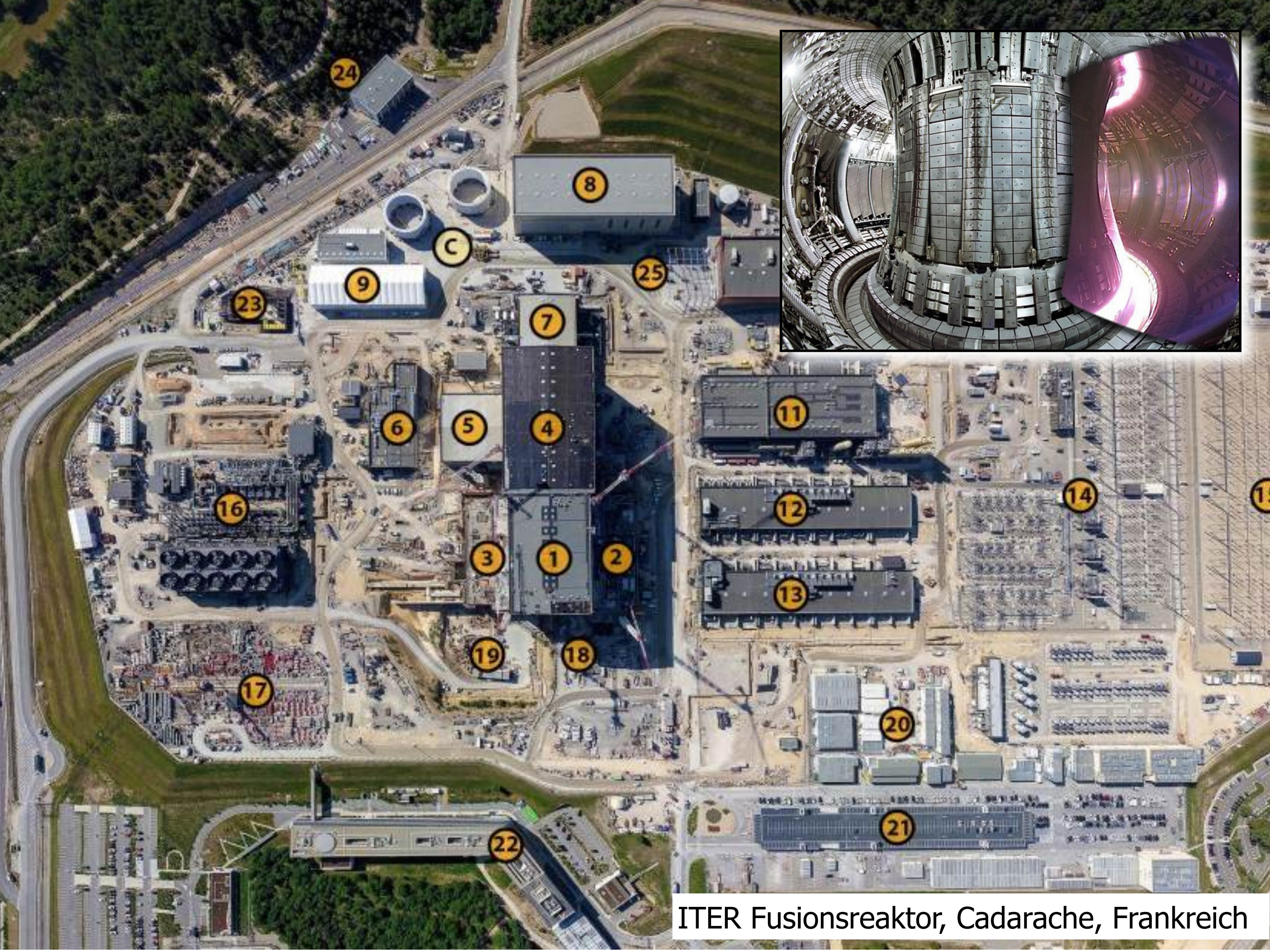
→ ca. **9.200** × Weltenergiebedarf

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

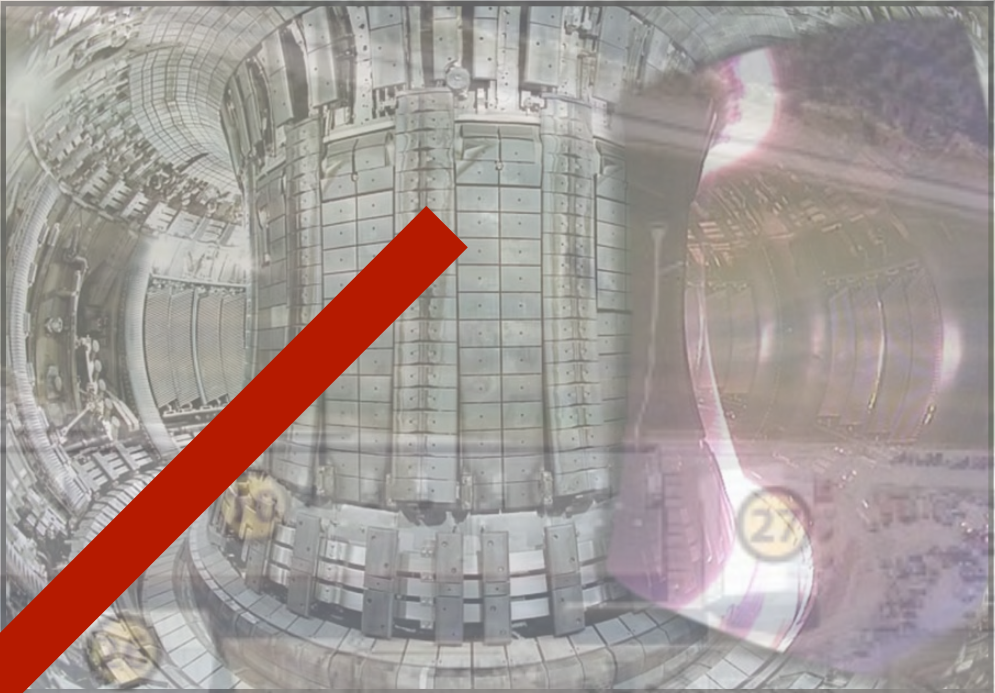
- Wissenschaftliche Studien 100 % EE: z.B. Jacobson & Delucchi (Scientific American, 2009), Jacobson et al. (Joule, 2017), DWI Studie (Wochenbericht 29+30/2021)



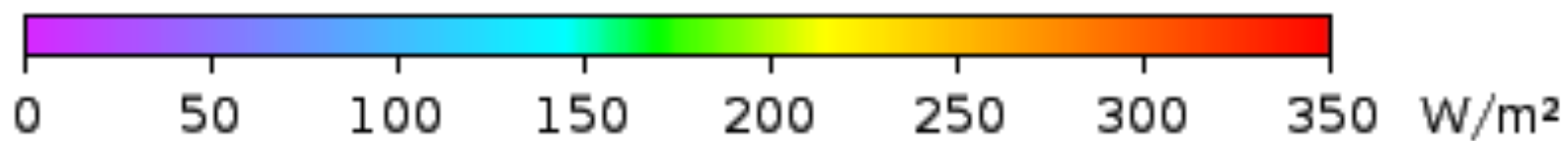
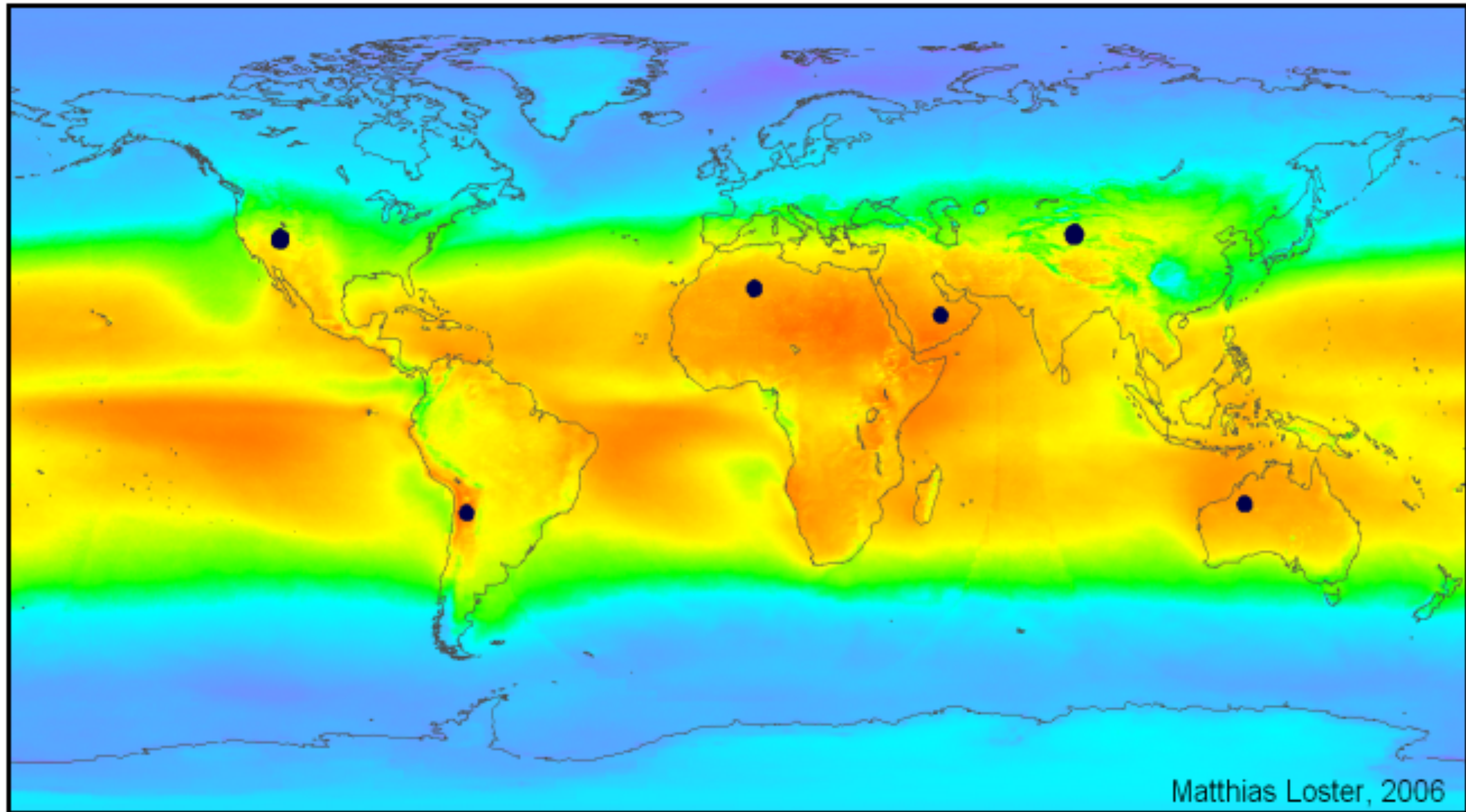
Sonne = Fusionsreaktor



ITER Fusionsreaktor, Cadarache, Frankreich



Sonnenenergie



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

Photovoltaik

- BRD: nur 3,2 % Fläche (11.500 qkm)
notwendig = 2300 TWh !

11.500
qkm

- 7 % bereits überbaute Fläche

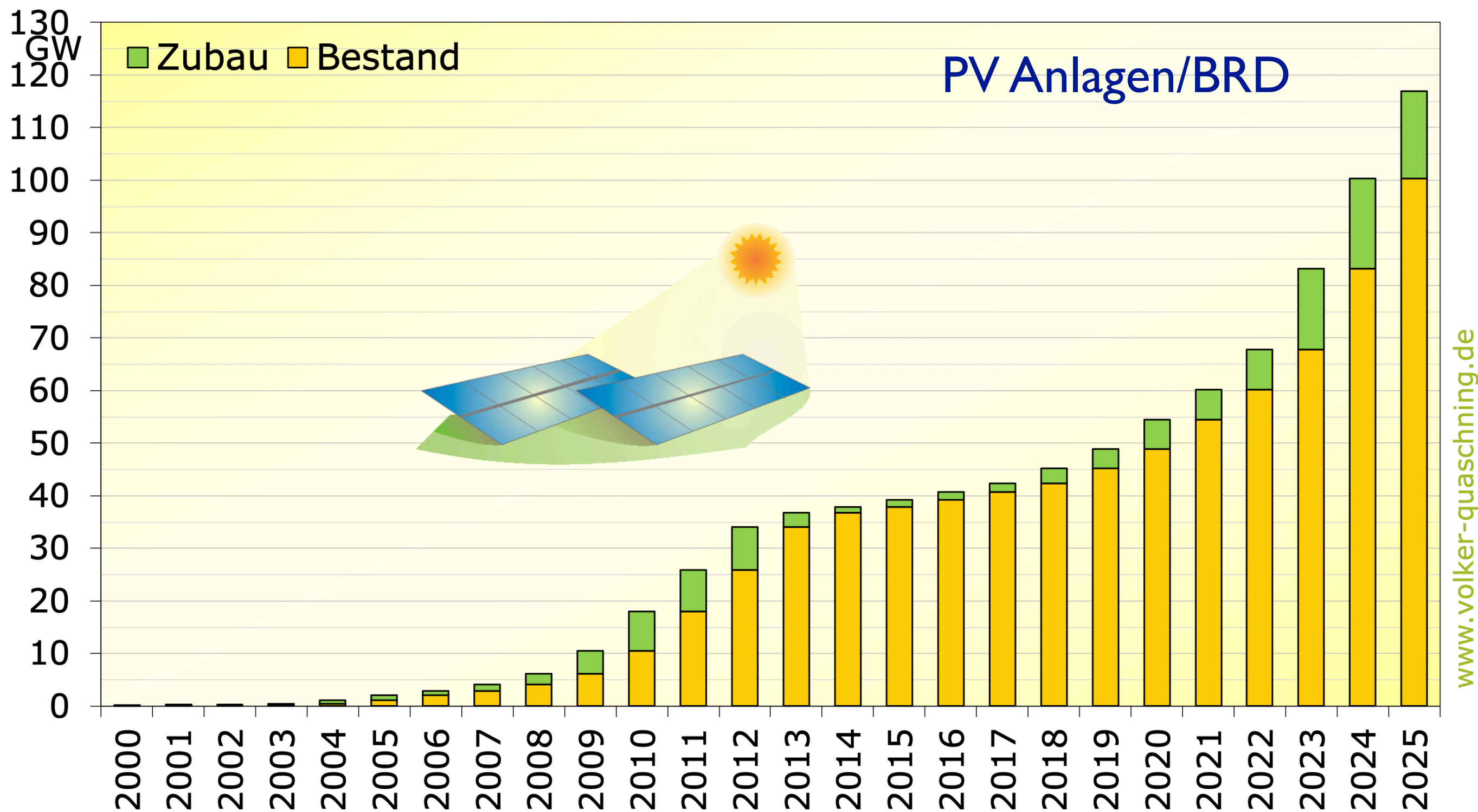
360.000 qkm

Photovoltaik

- BRD: nur 3,2 % Fläche (11.500 qkm) notwendig = 2300 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)

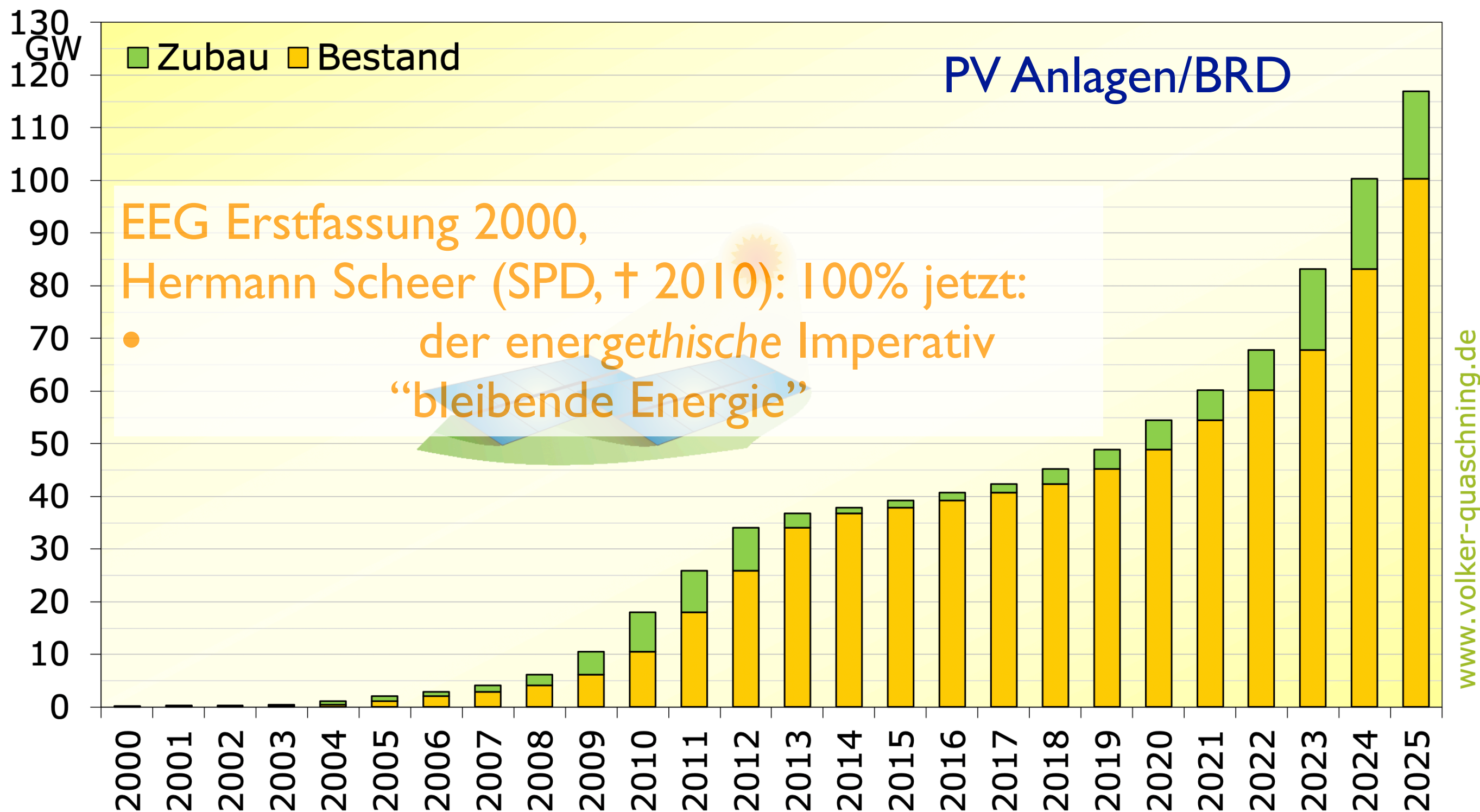
11.500
qkm

Photovoltaik



Quelle: Volker Quaschning (www.volker-quaschning.de)

Photovoltaik



Quelle: Volker Quaschning (www.volker-quaschning.de)

Photovoltaik

Philosophical
Magazine

Series 5
(1876-1900)

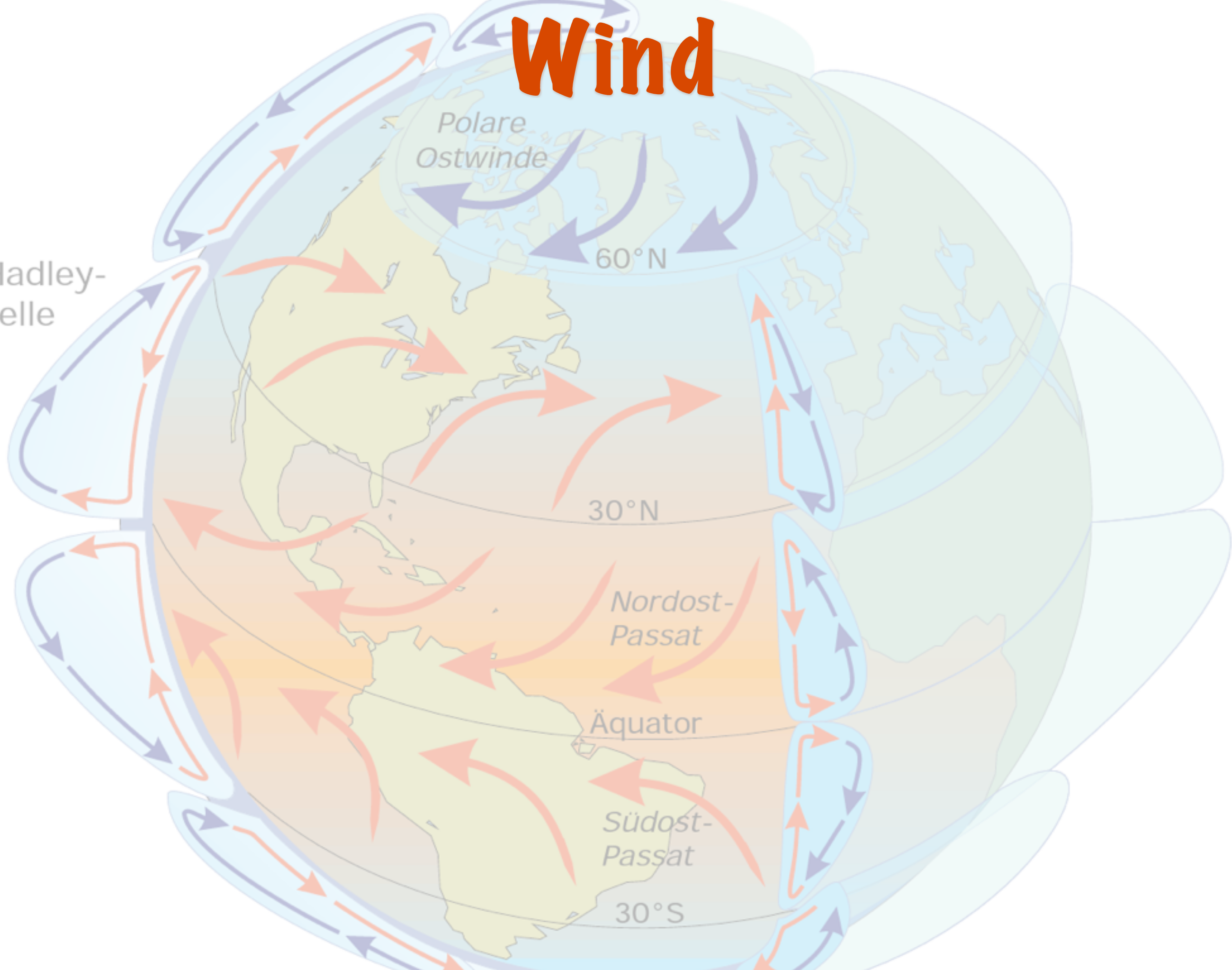
First Published in 1798

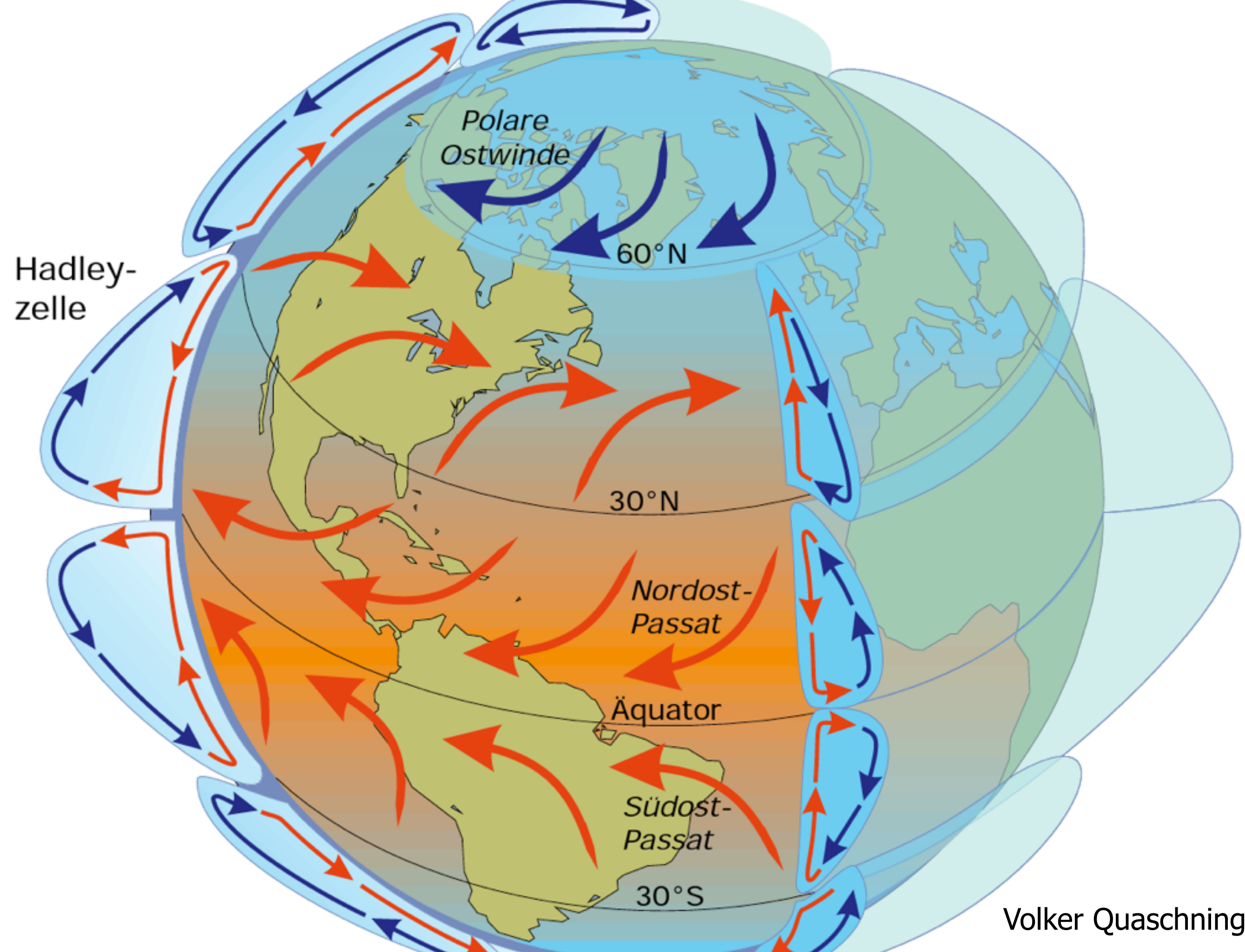
ON THE ELECTROMOTIVE ACTION OF ILLUMINATED SELENIUM,
DISCOVERED BY MR. FRITTS OF NEW YORK. BY WERNER
SIEMENS.

electromotive action of light on many selenium plates. Nevertheless the existence of a single selenium plate with the properties described is a fact of the greatest scientific importance, for here we meet for the first time with an instance of the direct conversion of the energy of light into electrical energy.—*Sitzungsberichte der Akad. der Wissen. zu Berlin*, Feb. 12, 1885.

Wind

Hadley-
zelle





SCIENTIFIC AMERICAN

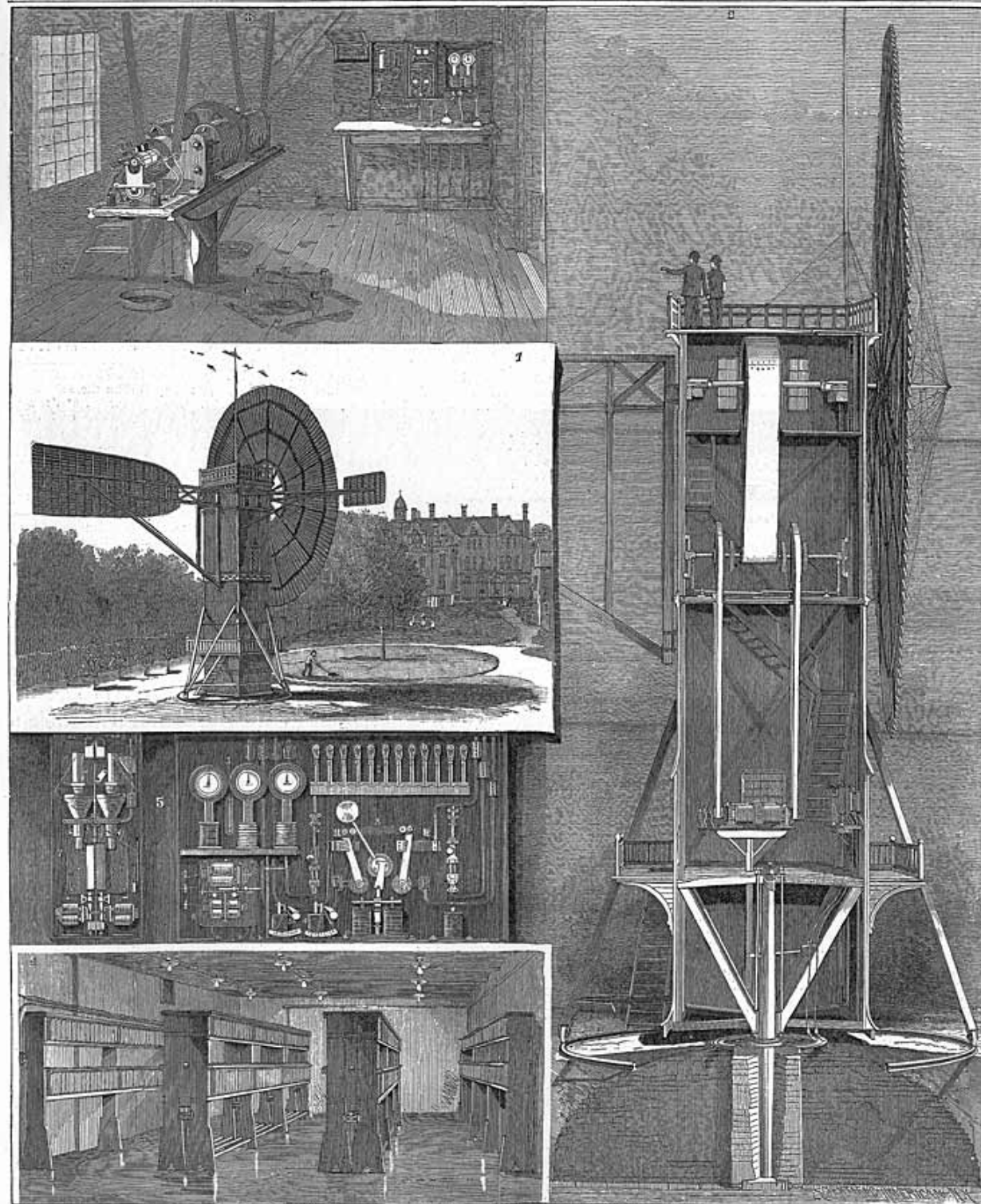
[Entered at the Post Office of New York, N. Y., as Second Class Matter. Copyrighted, 1890, by Mann & Co.]

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

Vol. LXIII.—No. 25.
ESTABLISHED 1845.

NEW YORK, DECEMBER 20, 1890.

[\$3.00 A YEAR.
WHOLELY.



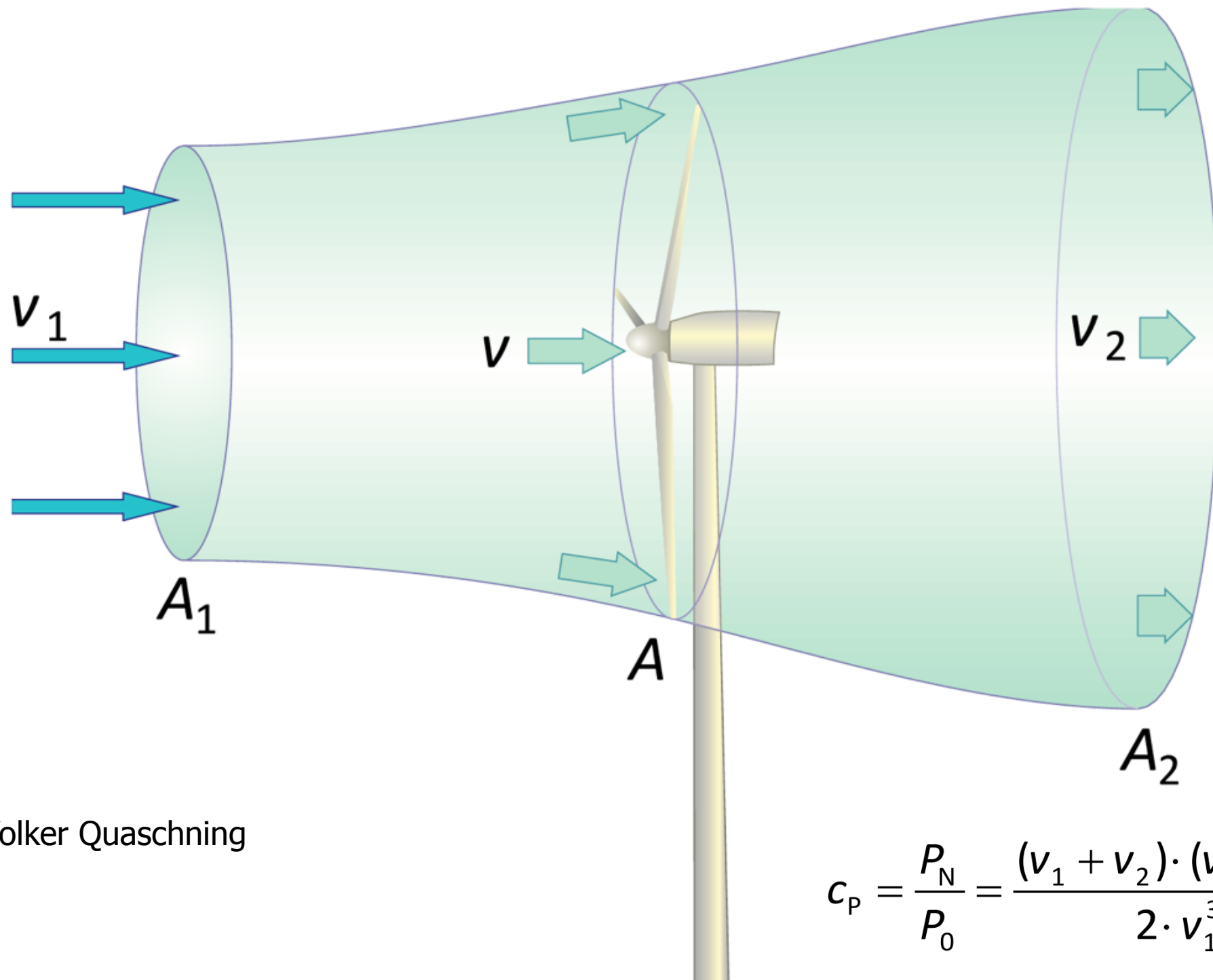
1. Windmill in the park. 2. Vertical section of the tower. 3. Dynamo. 4. Storage batteries. 5. Regulating apparatus.
THE WINDMILL DYNAMO AND ELECTRIC LIGHT PLANT OF MR. CHARLES F. BRUSH, CLEVELAND, O.—[See page 389.]



Windmühle Bergedorf von 1831

Windkraftanlage von Charles Brush 1888, Cleveland, Ohio

Windkraftanlage



Wind
Leistungsdichte:

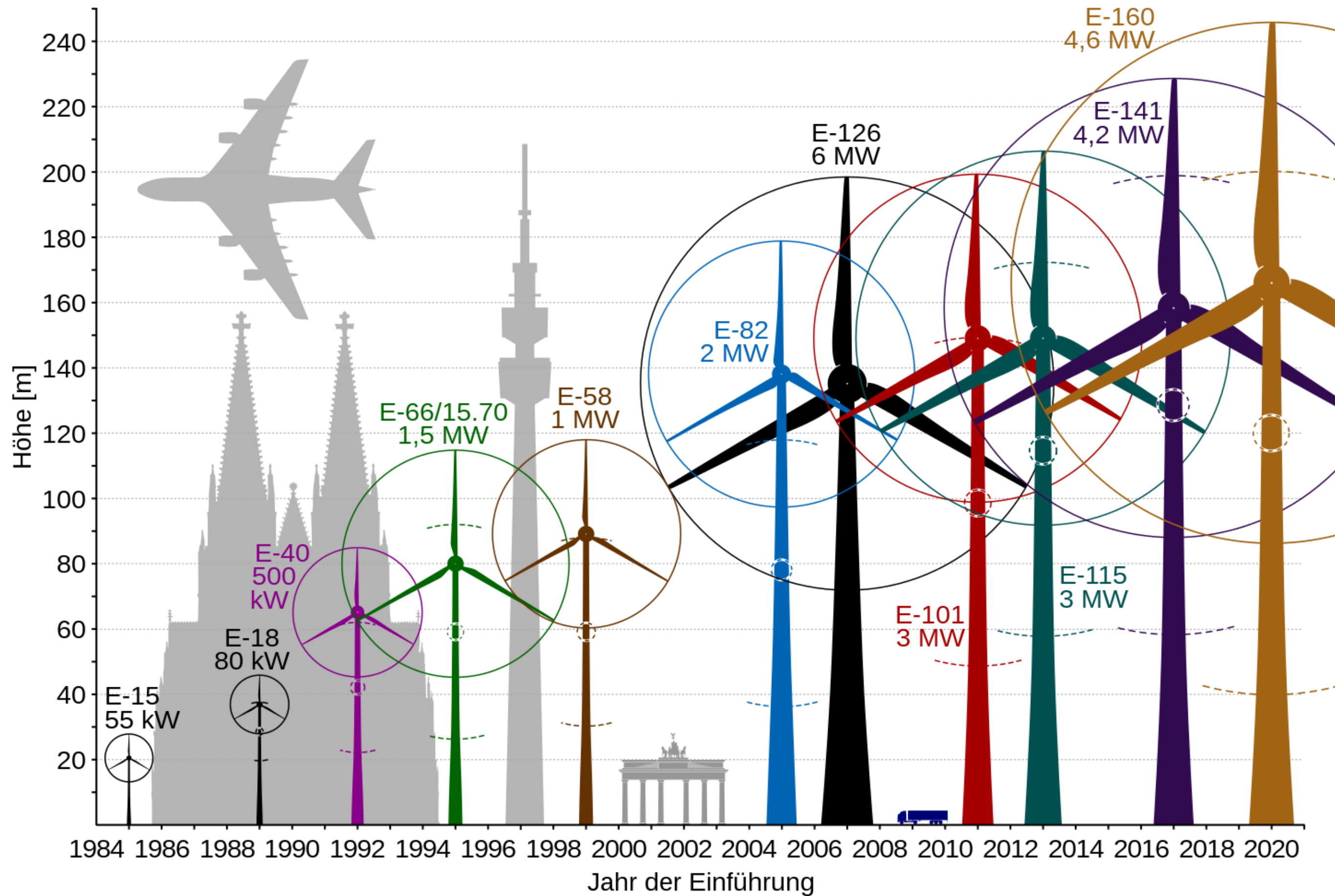
$$\propto v^3$$

Volker Quaschnig

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

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

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

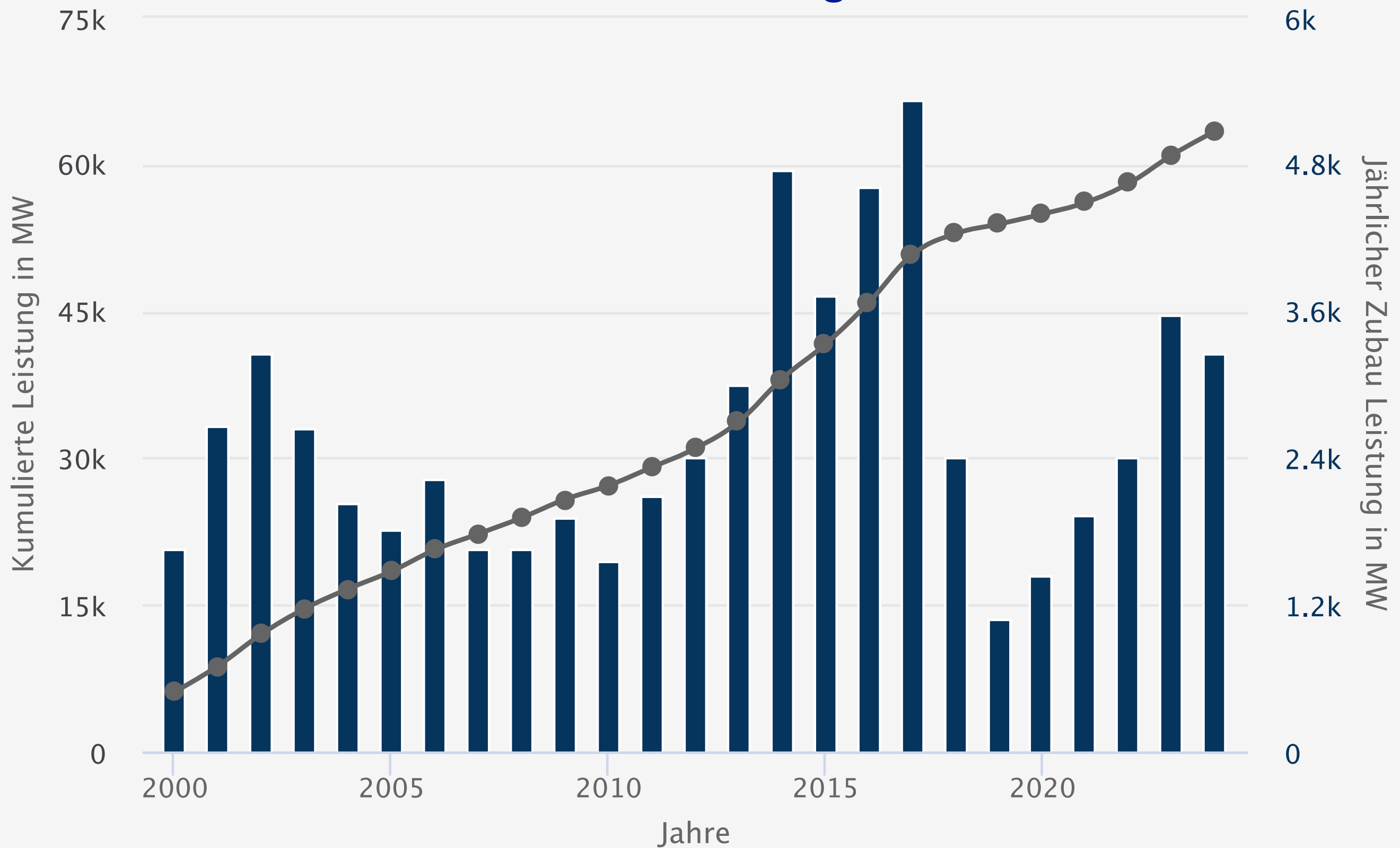


Enercon Windkraftanlagen

Installierte Windenergieleistung in Deutschland

Stand: 15.01.2025 Onshore, installierte Leistung 2025: 68.1 GW

Onshore, installierte Anlagen 2024: 28.766

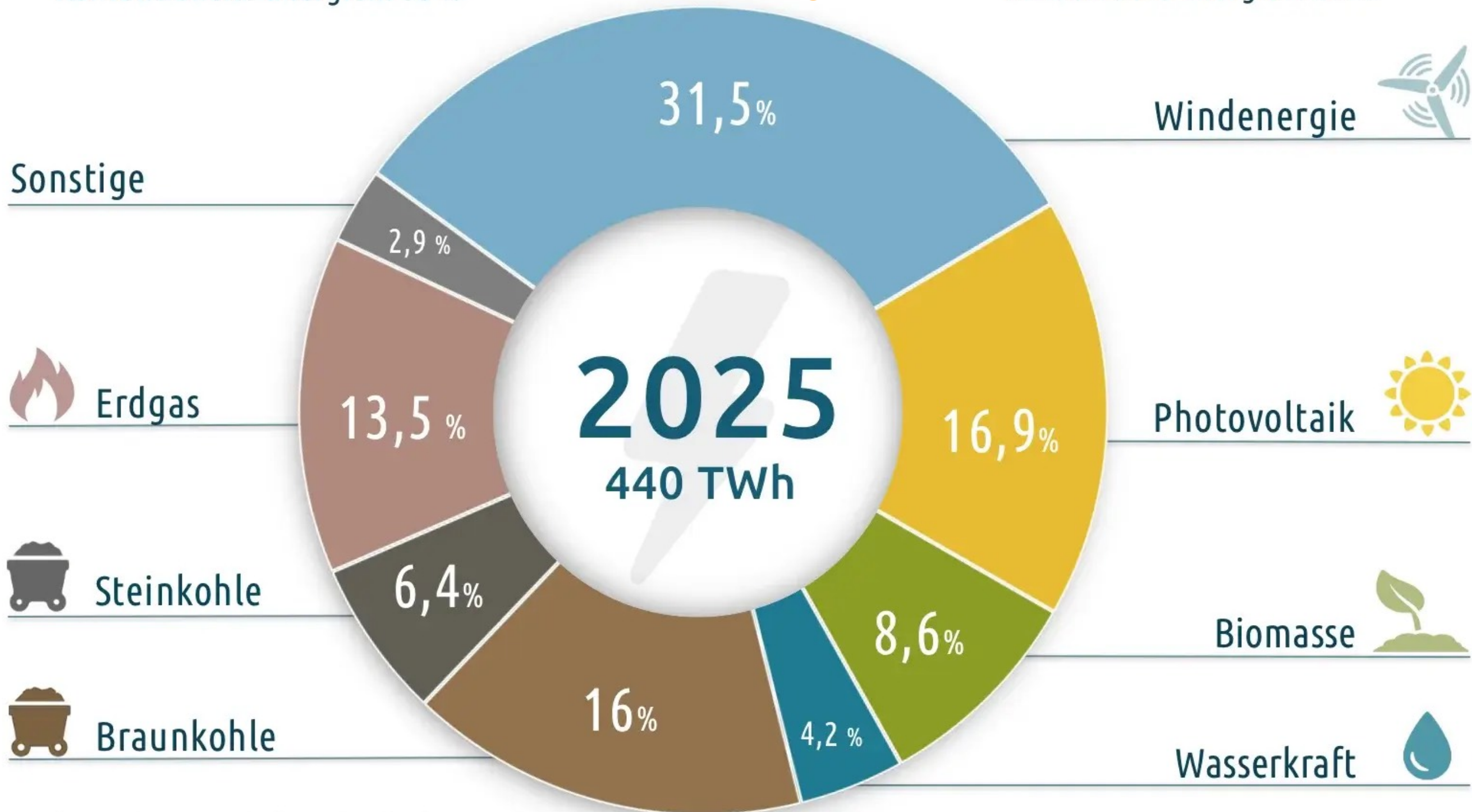




DER STROMMIX IN DEUTSCHLAND 2025

Anteil der Energieträger an der Stromerzeugung [netto]

Konventionelle Energien: 38 % **ca. 1/6 Ges.Energiebedarf** Erneuerbare Energien: 62 %



Es wird die Nettoproduktion aller Kraftwerke dargestellt.

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

Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Juni 2025

Fraunhofer (ISE) Energie Chart:

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



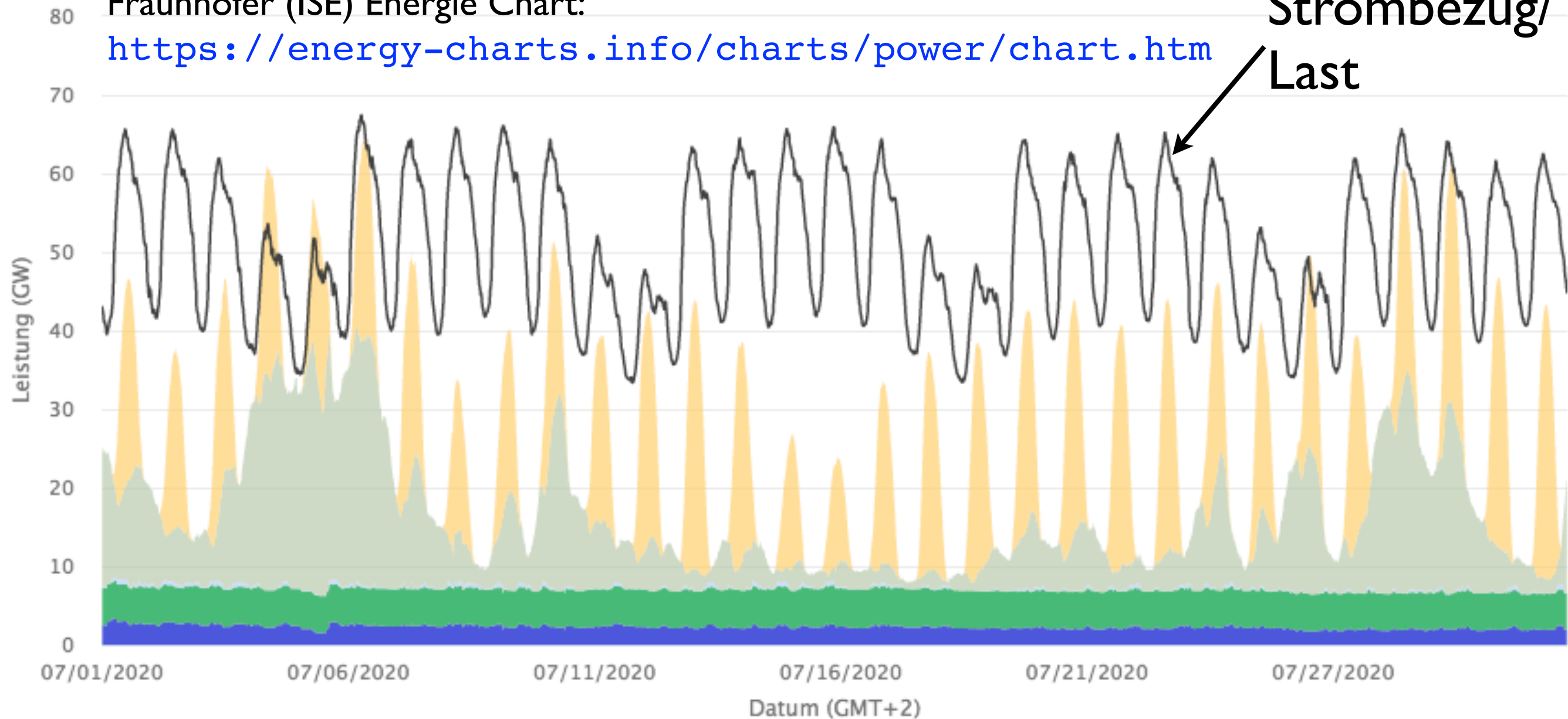
Transport & Speicher

Stromerzeugung in Deutschland im Juli 2020

Fraunhofer (ISE) Energie Chart:

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

Strombezug/
Last



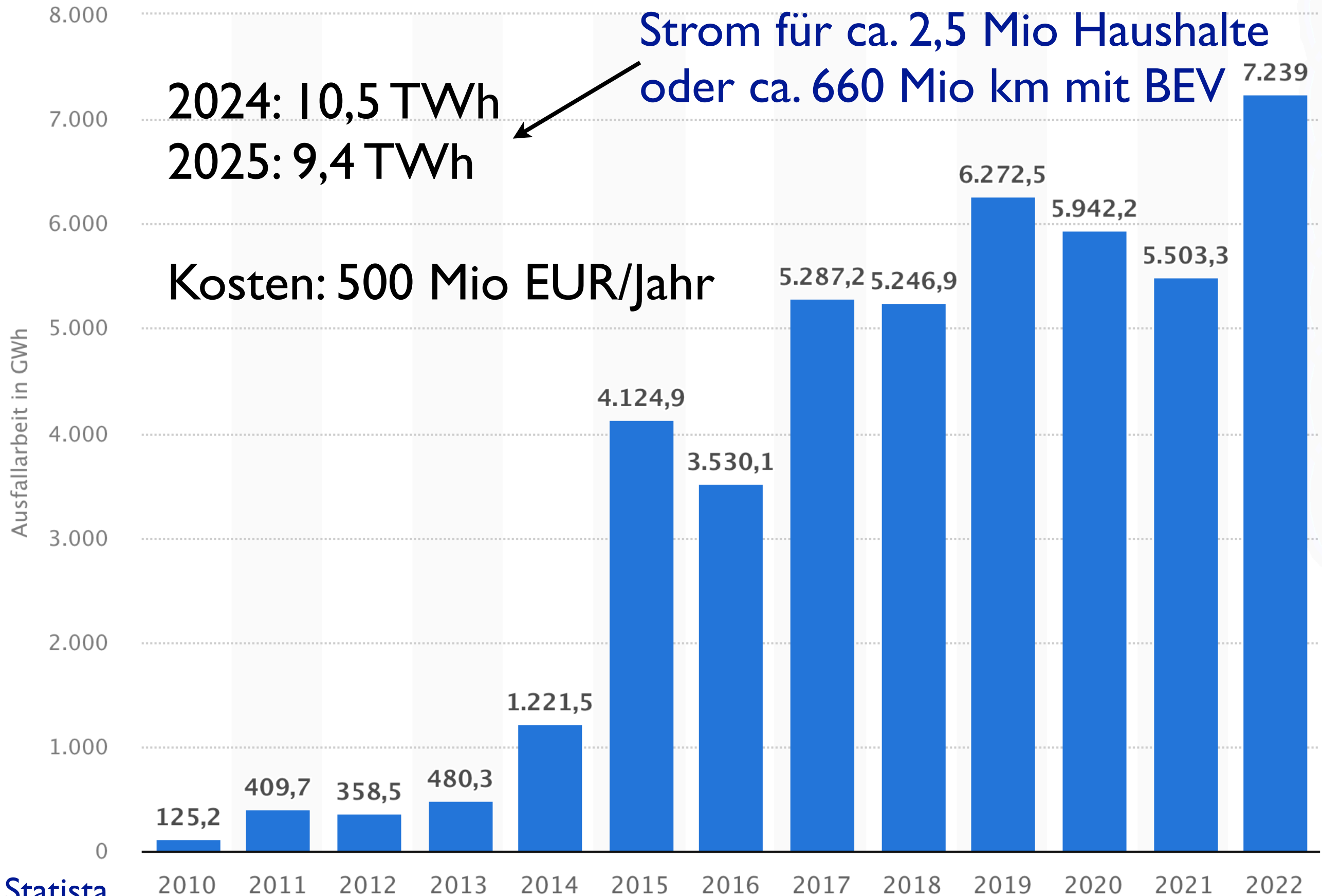
● Pumpspeicher Verbrauch
● Kernenergie
● Gas
● Wind
— Anteil EE

● Import Saldo
● Braunkohle
● Andere
● Solar

● Wasserkraft
● Steinkohle
● Pumpspeicher
— Last

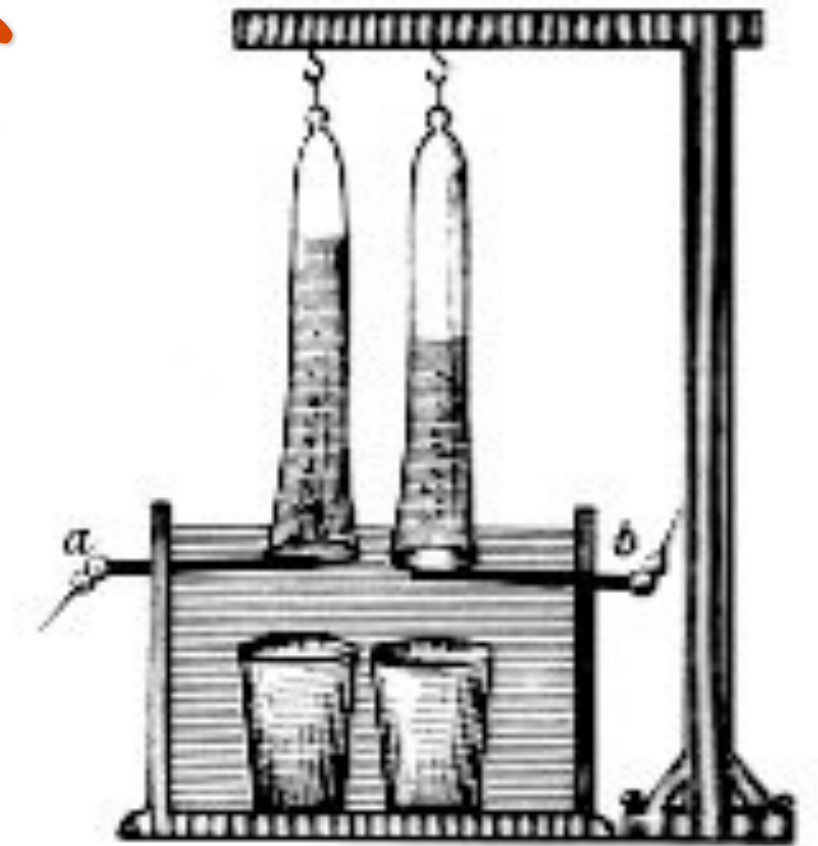
● Biomasse
● Öl
● Saisonspeicher
— Residuallast

Verluste durch Abschaltung



Wasserstoff

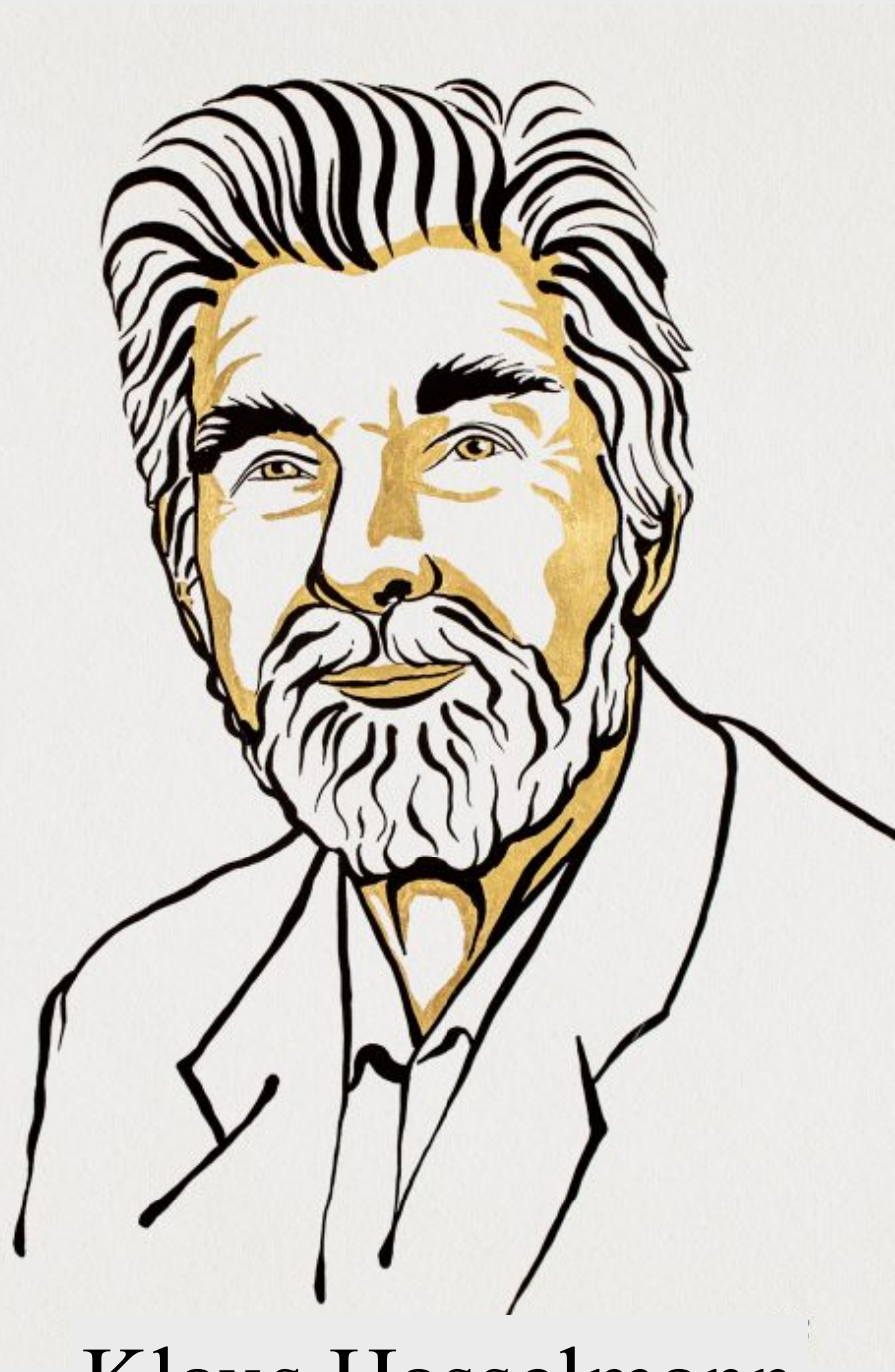
- häufigste Element im Universum
- einfache Gewinnung durch **Elektrolyse**
- Jules Verne in *Die geheimnisvolle Insel* (1875):



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

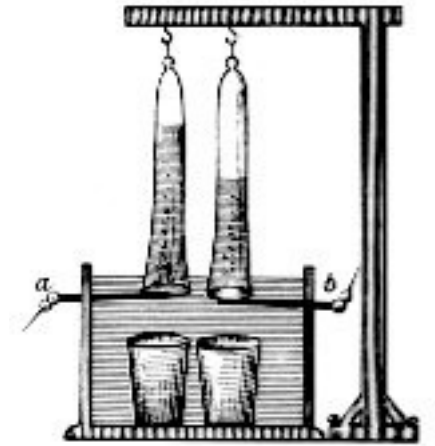


Klaus Hasselmann
* 25.10.1931

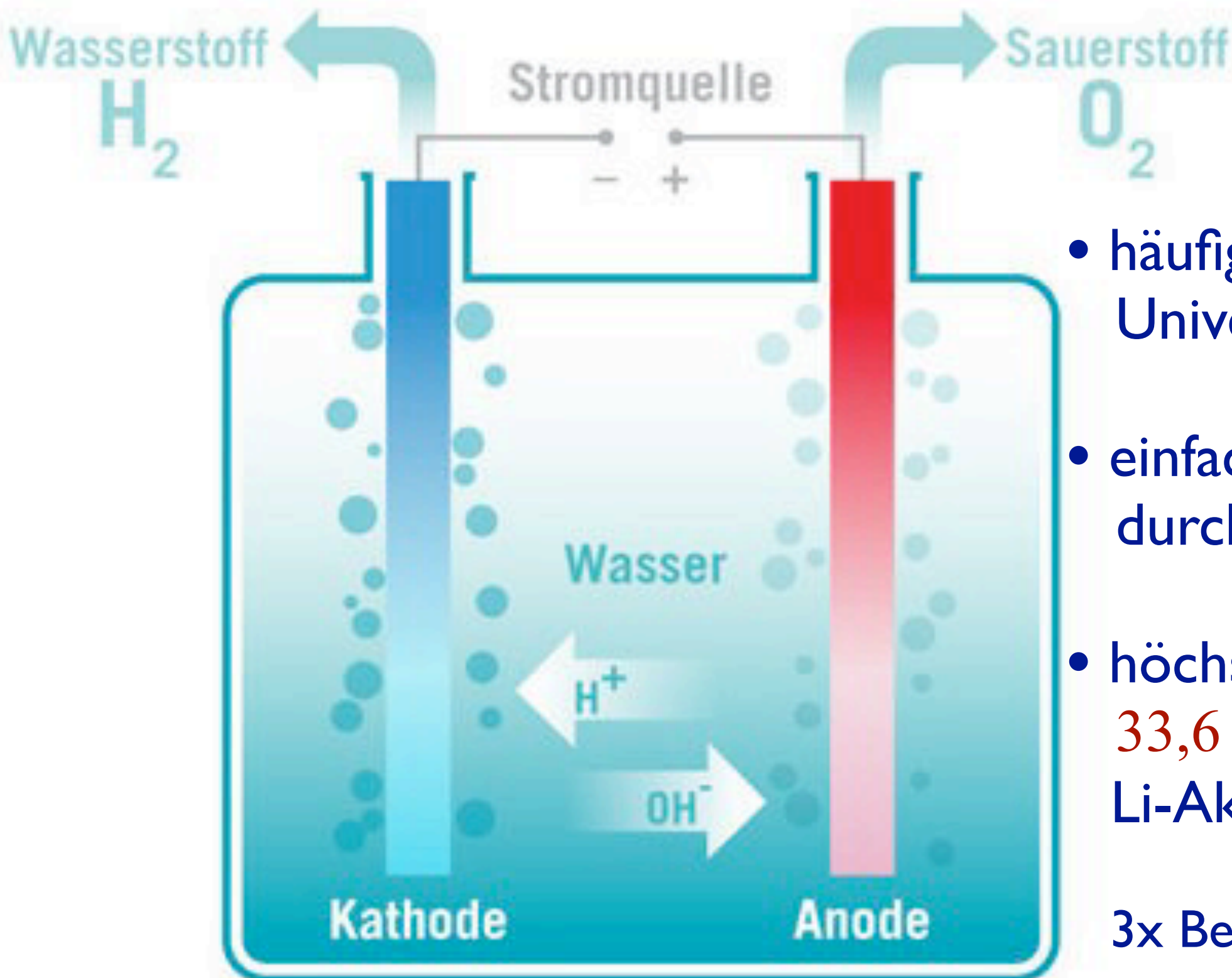
“Wir müssen doch nur von fossilen auf regenerative Energien umsteigen, von Öl, Kohle und Gas auf Sonnen- und Windenergie und Wasserstoff. Technisch ist das recht leicht.”

Interview in Die Zeit, 28.10.2021

Wasserstoff



Johann Wilhelm
Ritter um 1800



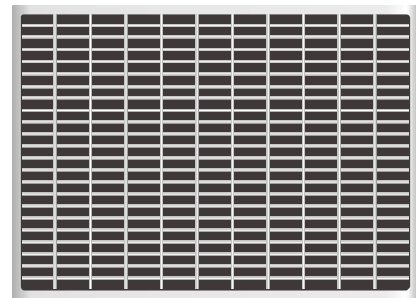
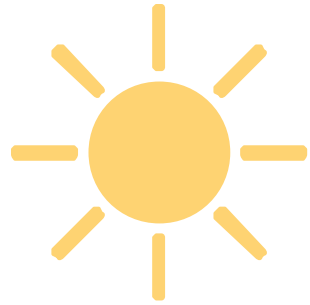
- häufigste Element im Universum
- einfache Gewinnung durch **Elektrolyse**
- höchste Energiedichte:
33,6 kWh/kg
Li-Akku: 0,2 kWh/kg
3x Benzin/Gas: 11 kWh/kg

Wasserstoff

- flexible Handhabung für
Mobilität / Wärme /
Prozesswärme
⇒ **Sektorkopplung**
- Netz vorhanden:
Gasnetz (max. 5%)
u.a. > 50% im Stadtgas



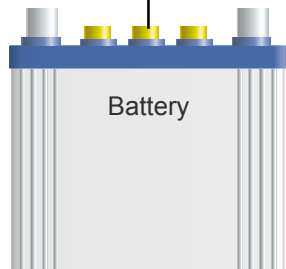
H₂ Projekt Sternwarte



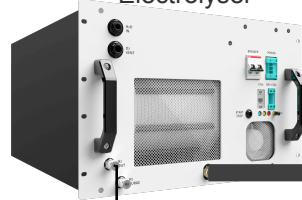
Solar
Charge
Controler



Battery



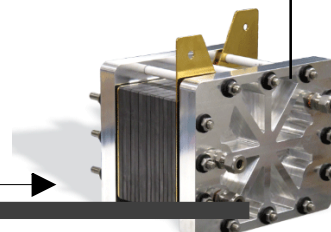
Electrolyser



DC/AC
Converter

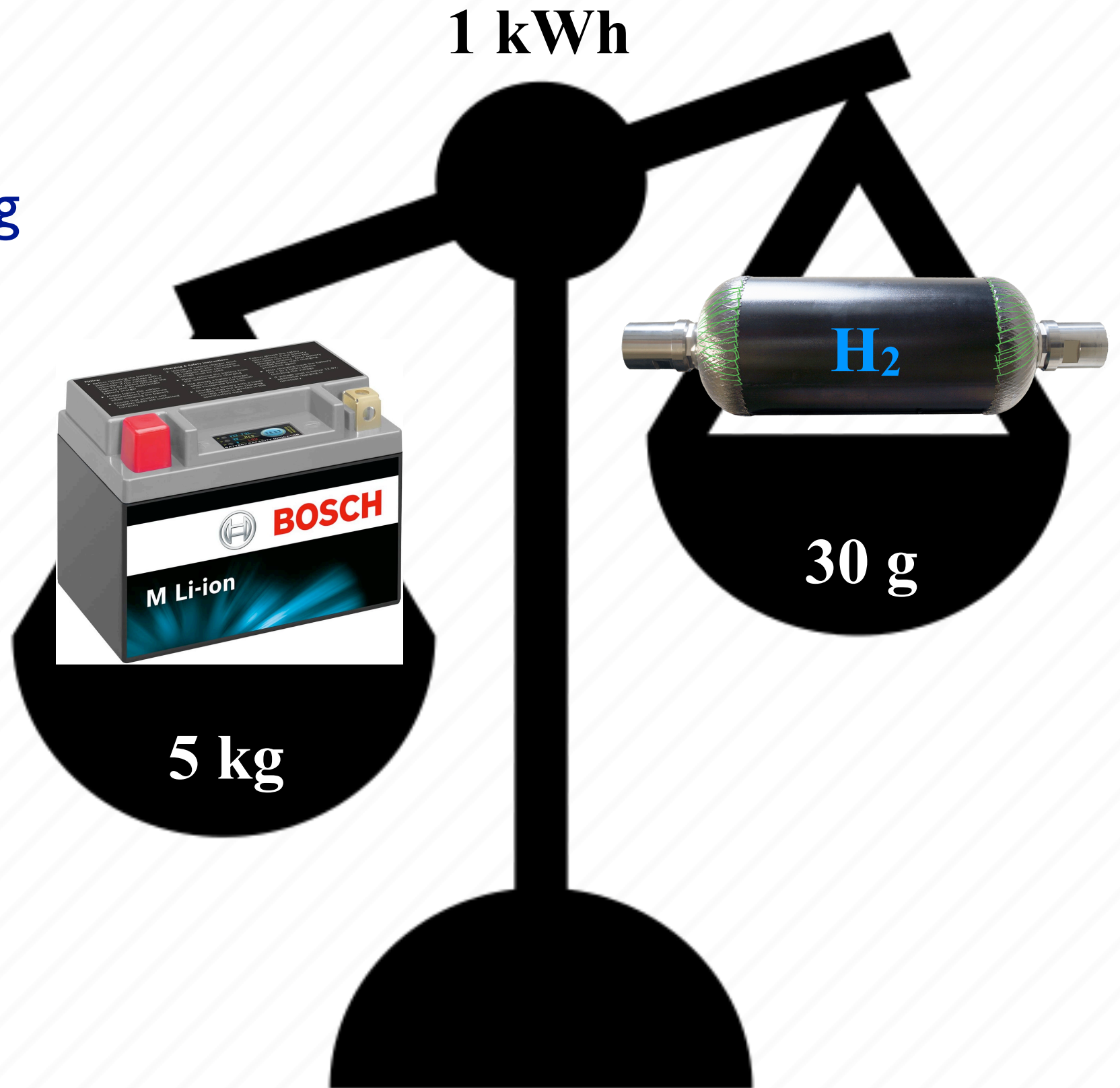


Fuel Cells

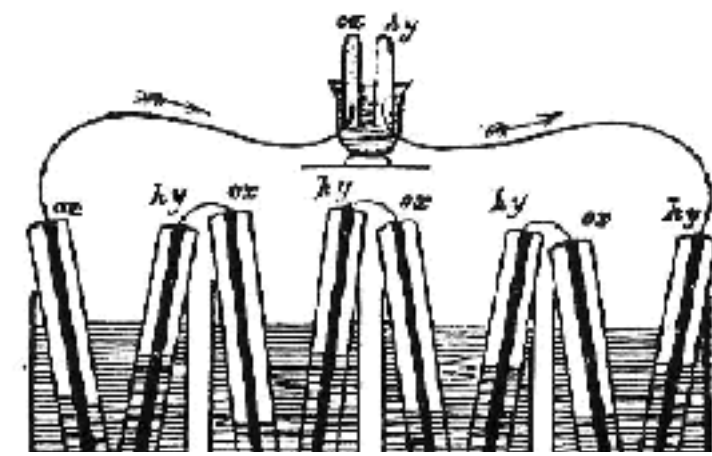


Wasserstoff

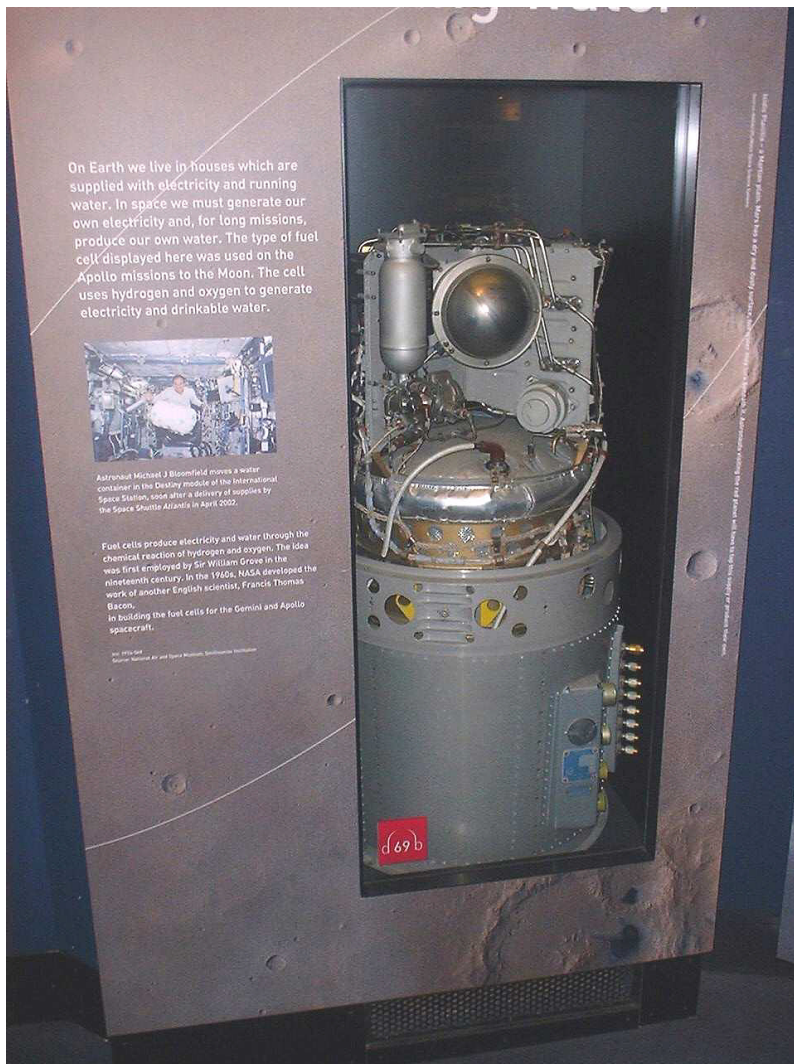
- preiswerte Herstellung und Speicherung
- hohe Energiedichte:
33,6 kWh/kg
Li-Akku: 0,2 kWh/kg



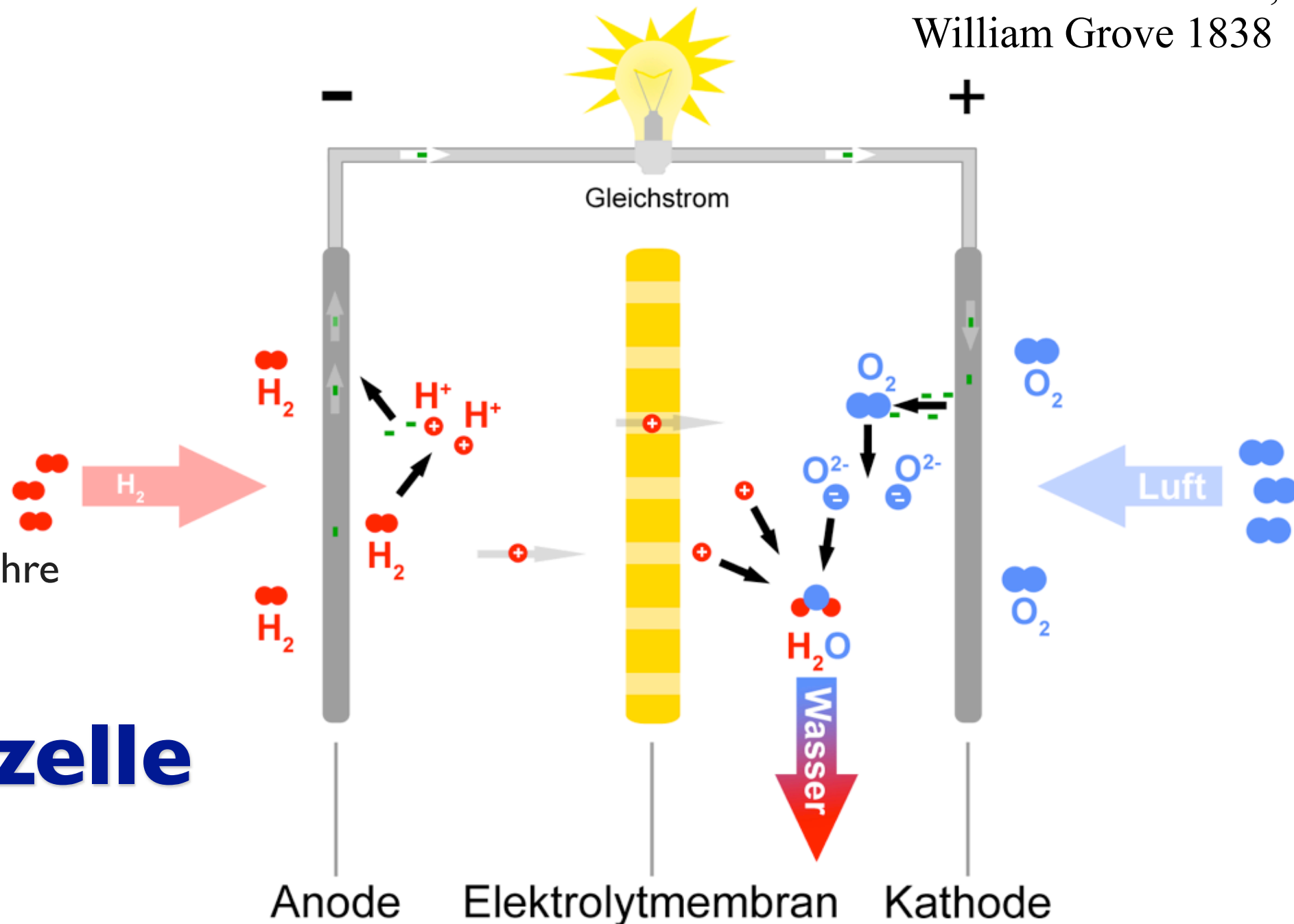
Wasserstoff



Christian Schönbein,
William Grove 1838



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)

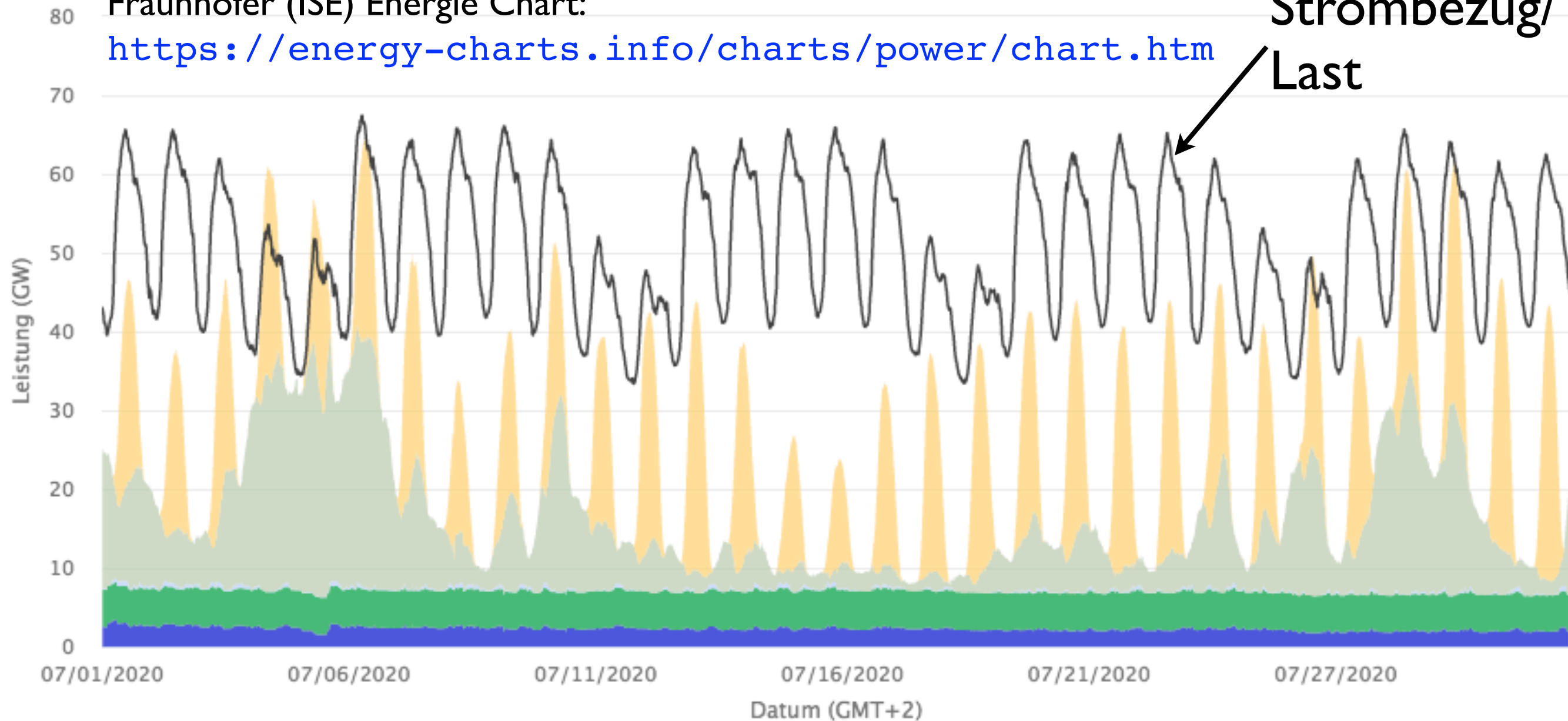
Transport & Speicher

Stromerzeugung in Deutschland im Juli 2020

Fraunhofer (ISE) Energie Chart:

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

Strombezug/
Last



Mobilität

Sektor- kopplung

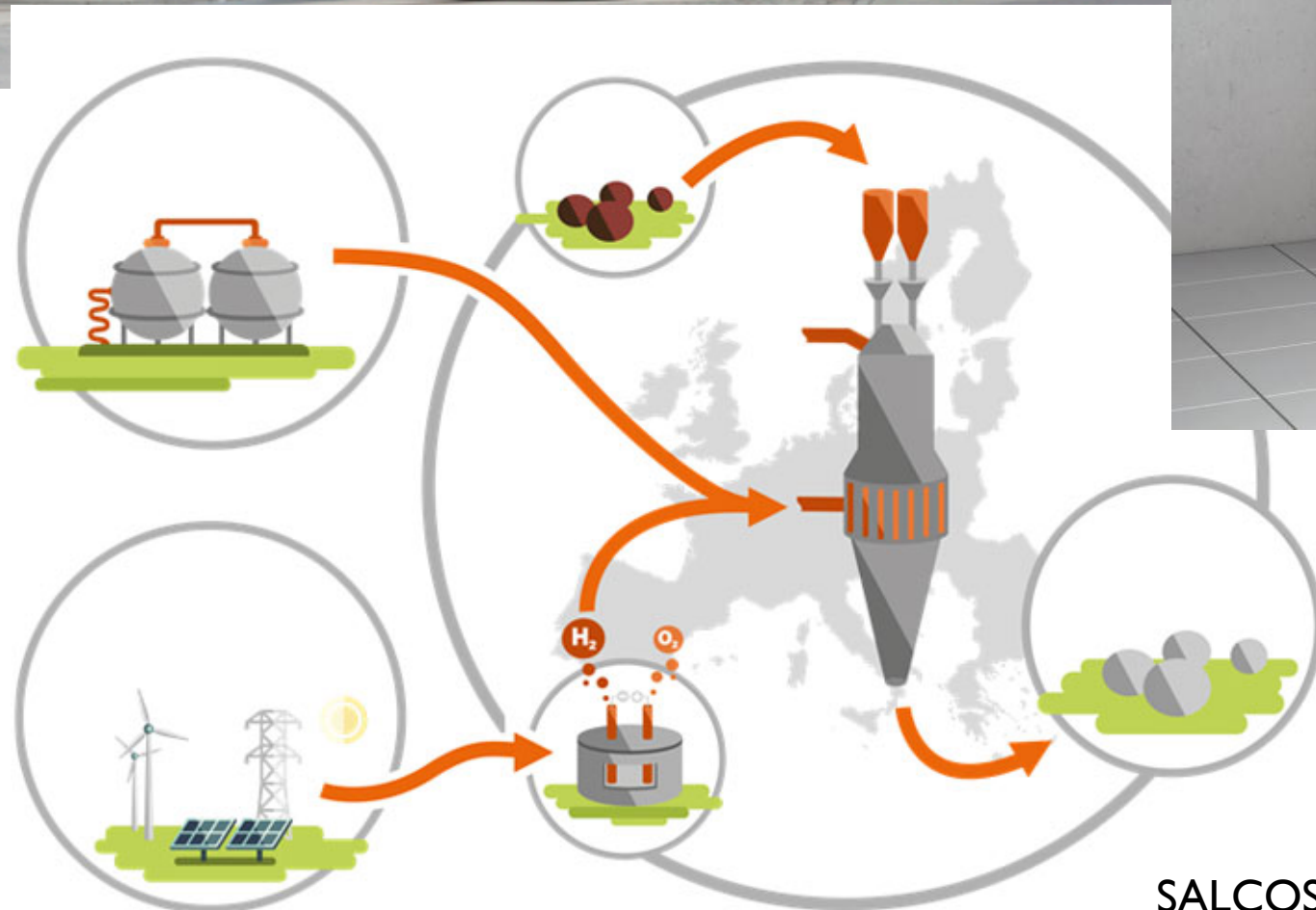
Wärme

Viessmann Vitovalor

Industrie

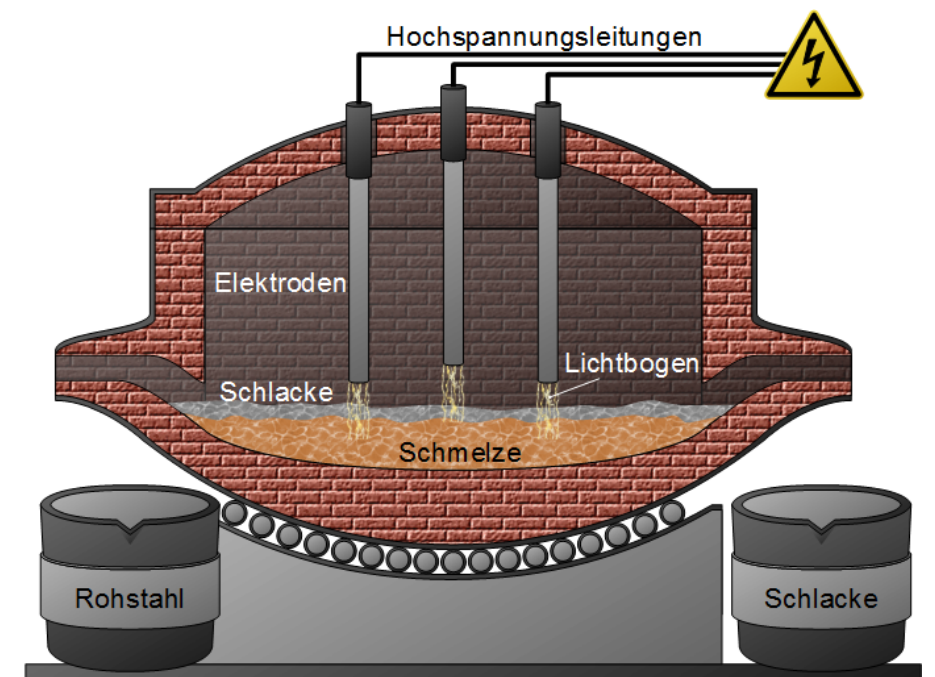
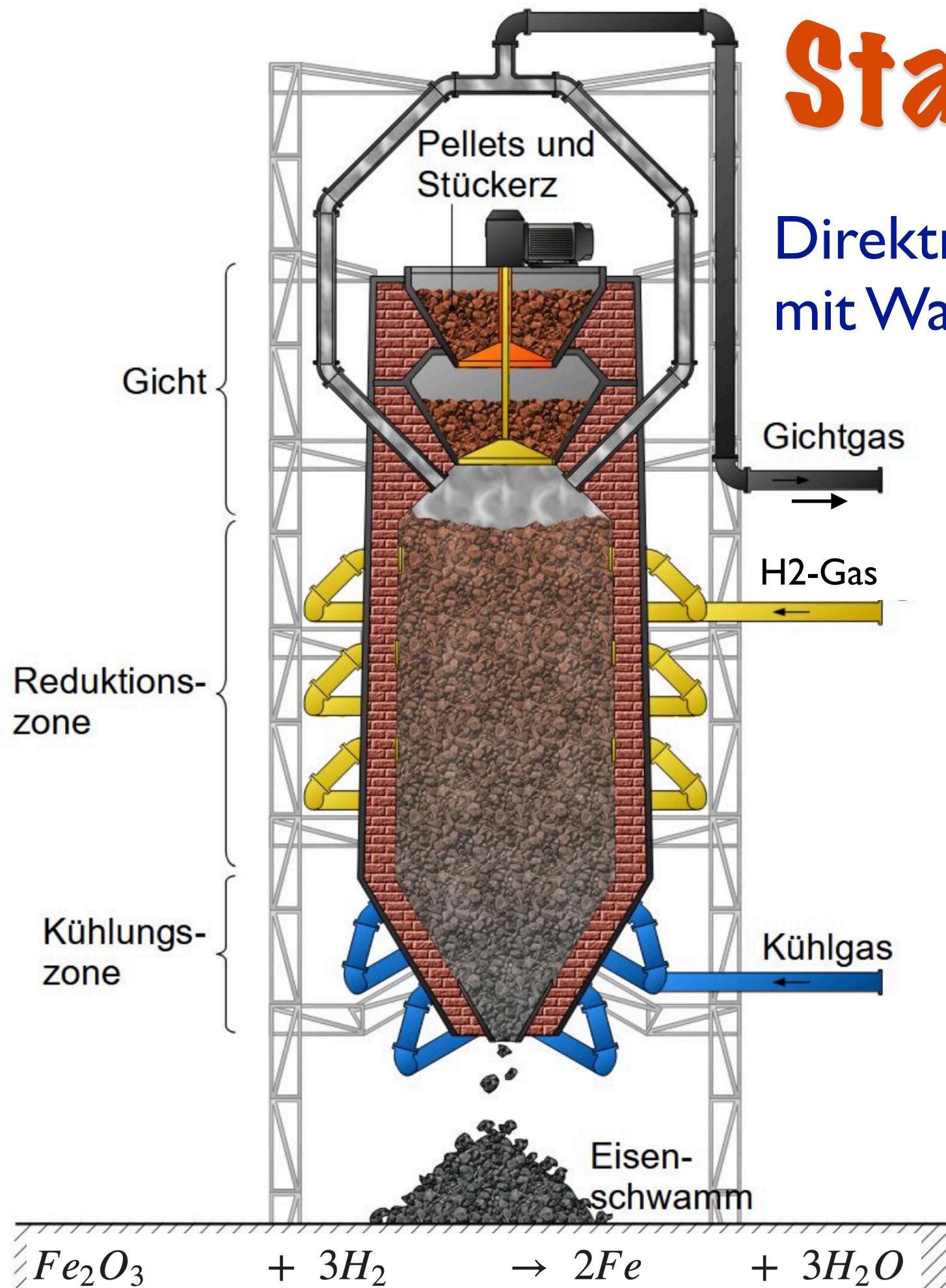
SALCOS®

CDA
up to 82%



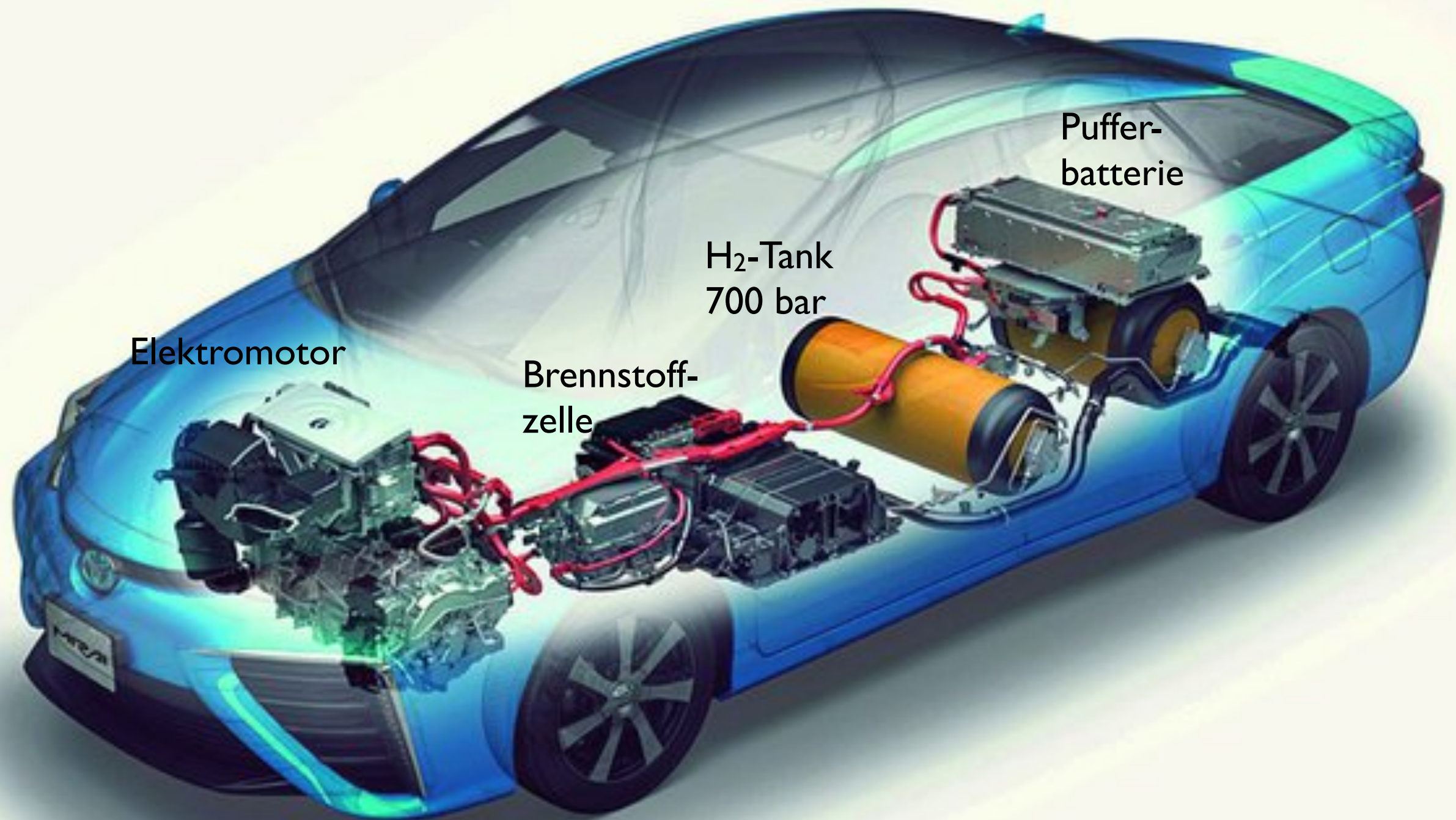
Stahl-Industrie

Direktreduktionsverfahren mit Wasserstoff



strombetriebener Lichtbogenschmelzofen

Brennstoffzellen Fahrzeuge



Toyota Mirai, Fuel Cell Vehicle



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
- ...

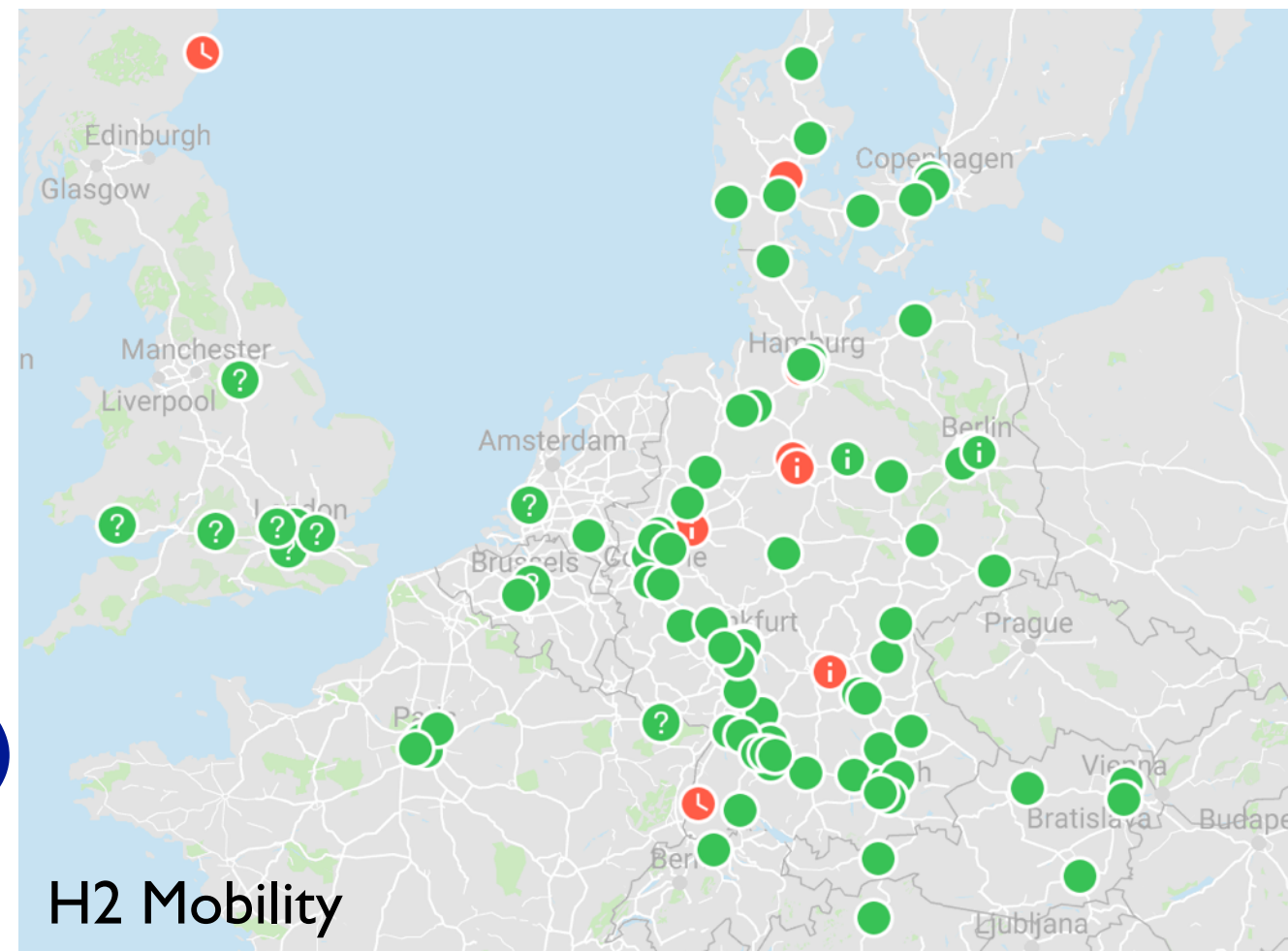


1919: Slaby-Beringer Elektroautos

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. 70 H₂-Tankstellen (2025)
- 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



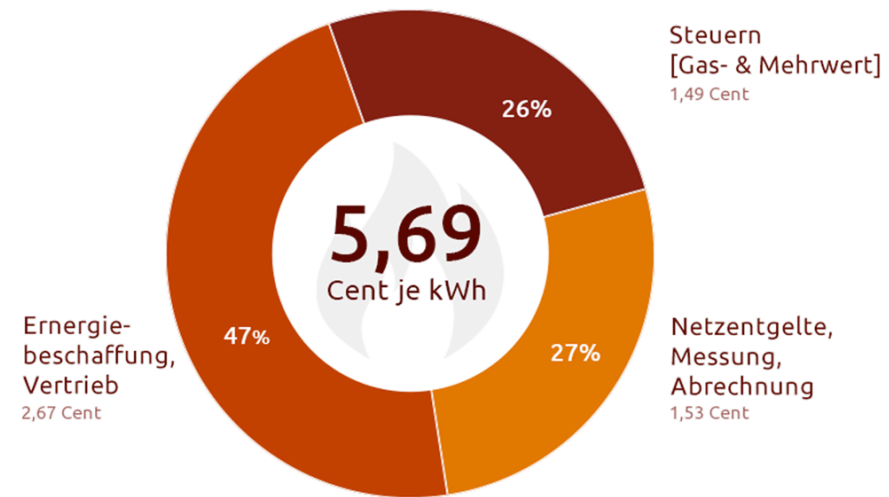
Mythen zum Wasserstoff

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

Politische Energiekosten

ZUSAMMENSETZUNG DES GASPREISES 2018

Durchschnittlicher Gaspreis für Haushaltskunden in Deutschland

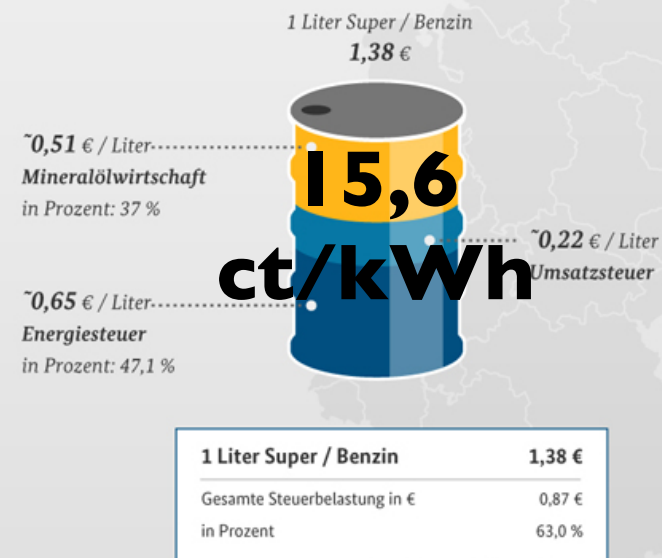


© 1-Gasvergleich.com

Daten: BDEW, Stand 2018

Anteil Steuern am Benzinpreis in Deutschland

Wie setzt sich der Benzinpreis zusammen?*

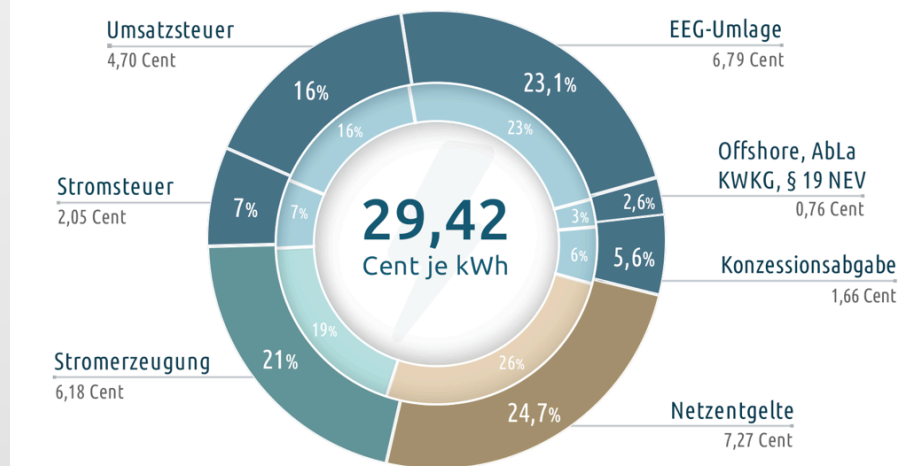


* Bei einem angenommenen Preis von 1,38 € für einen Liter Super

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

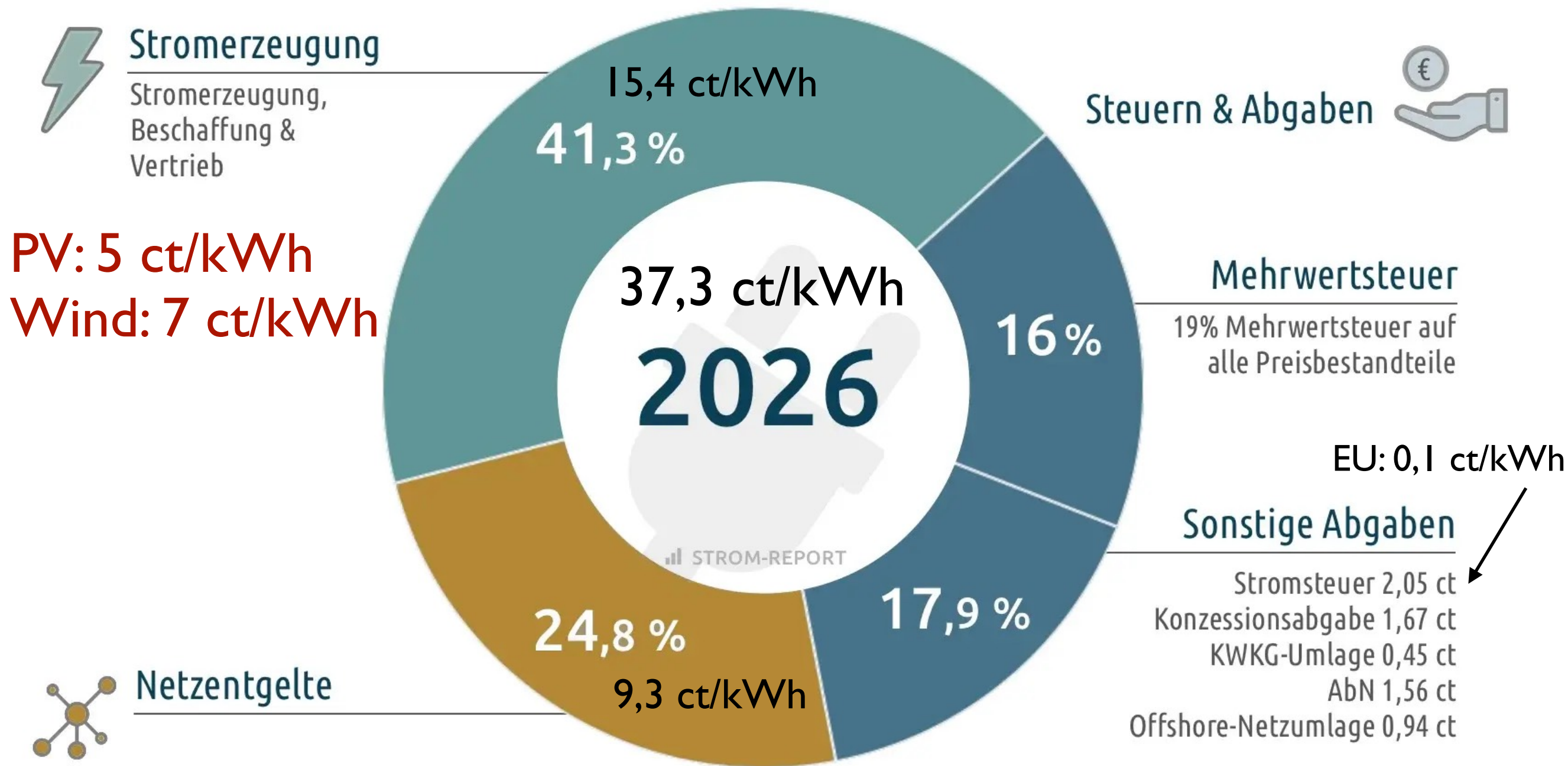
Strom

~ 35 ct/kWh



STROMPREIS ZUSAMMENSETZUNG 2026

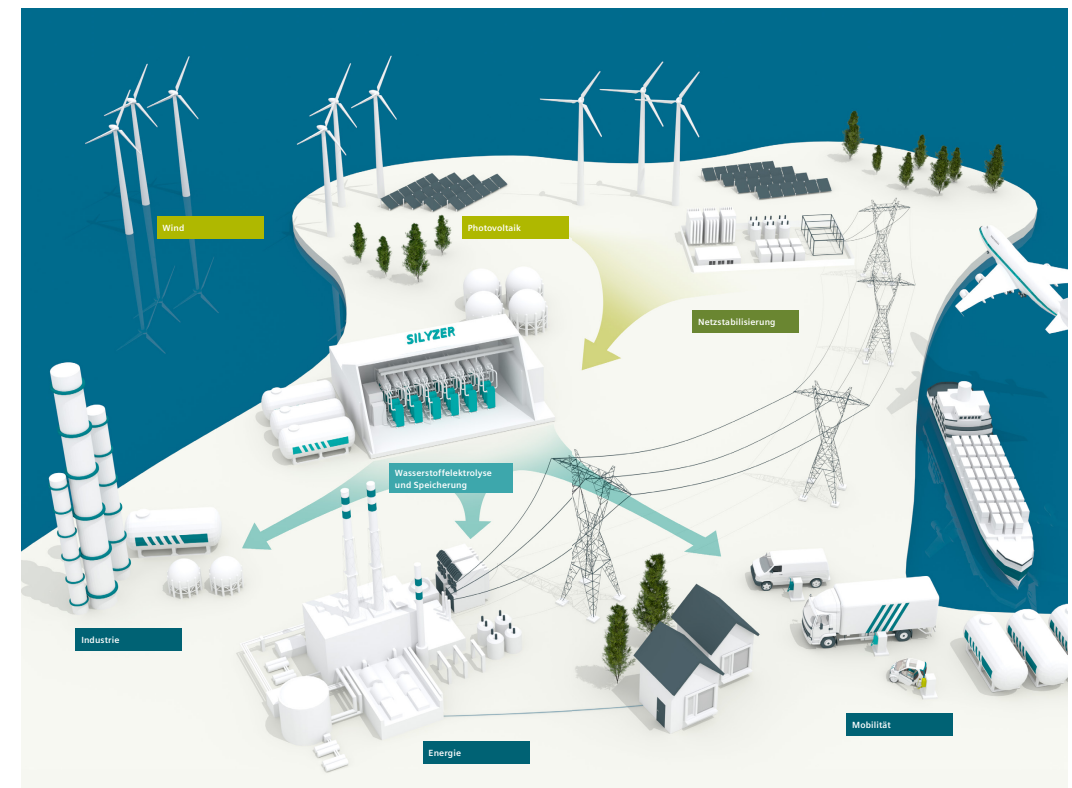
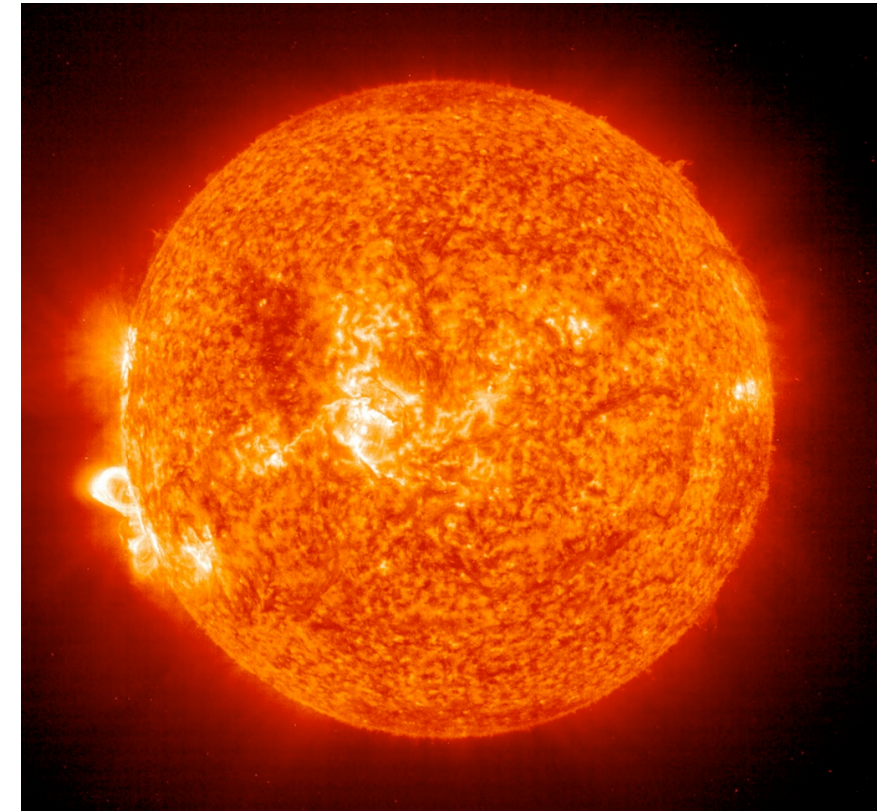
Komponenten des Strompreises für Privatkunden in Deutschland*



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

Fazit

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



Chancen nutzen !