

Energie und Ernährung

Grundlagen und Aussichten

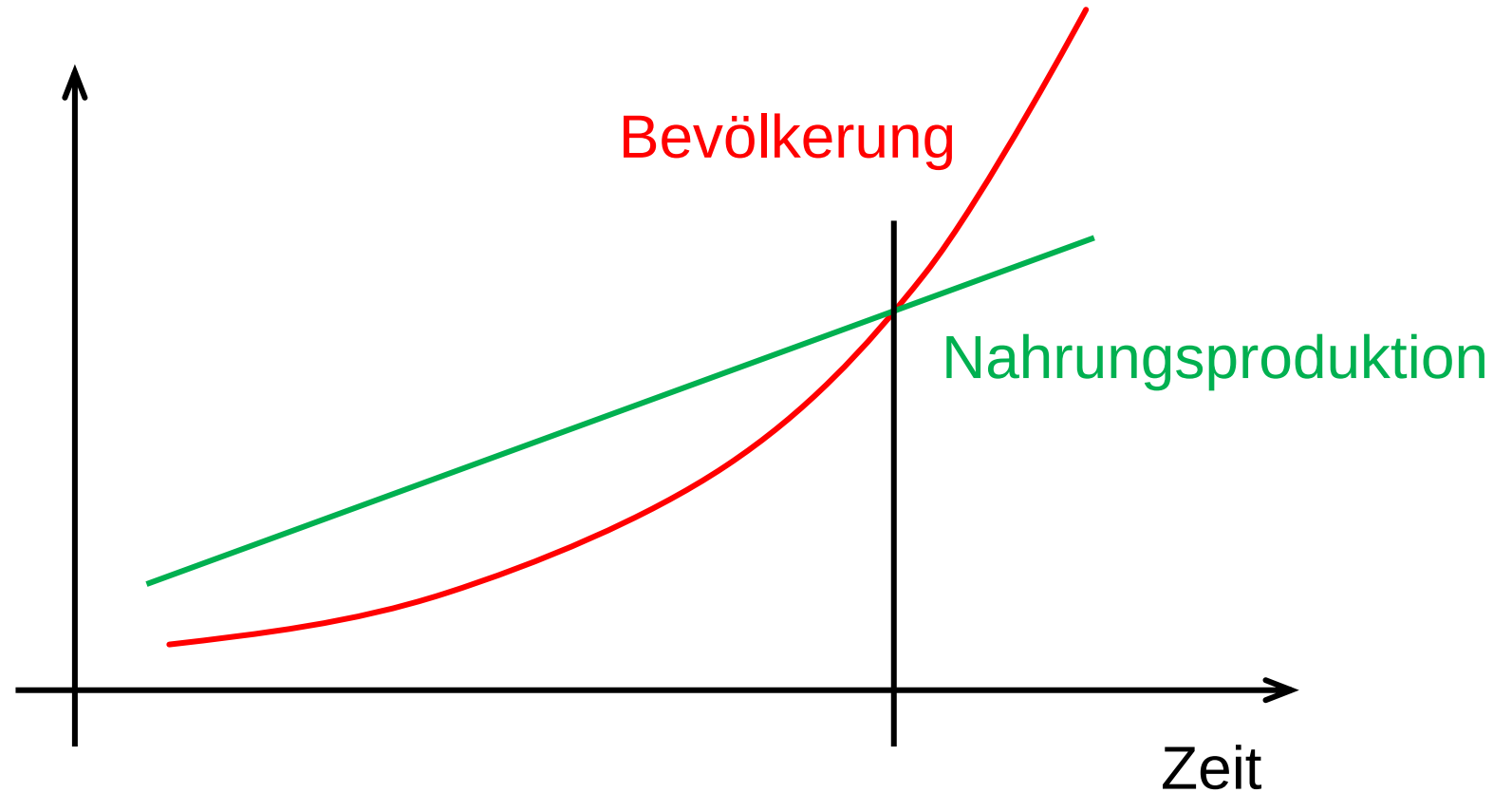
2. Mai 2025, Bern «Cube»

Lino Guzzella, 30' + 10' Q&A

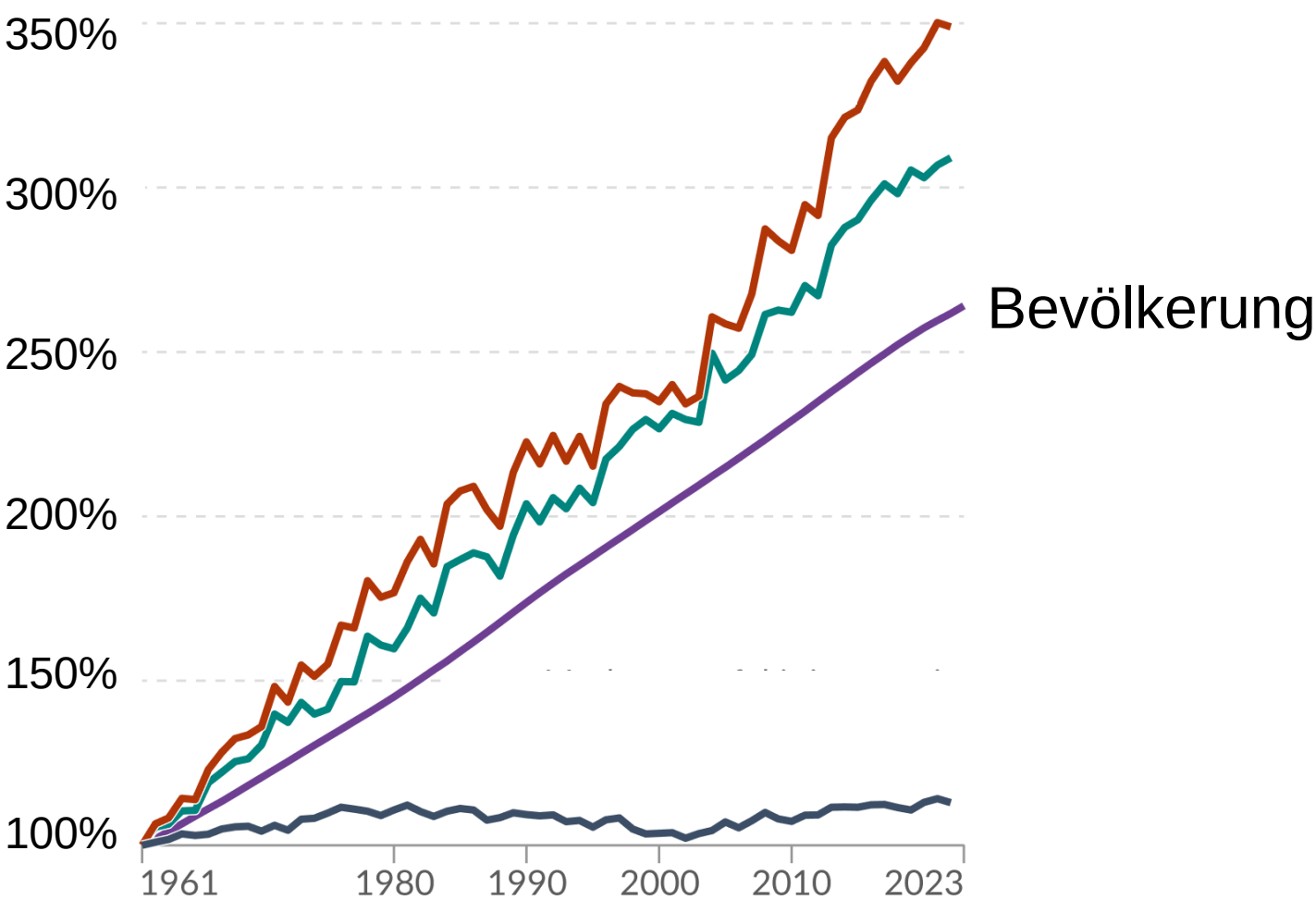
Eigentlich sollten wir schon lange verhungert sein ...



Thomas R. Malthus, 1766-1834

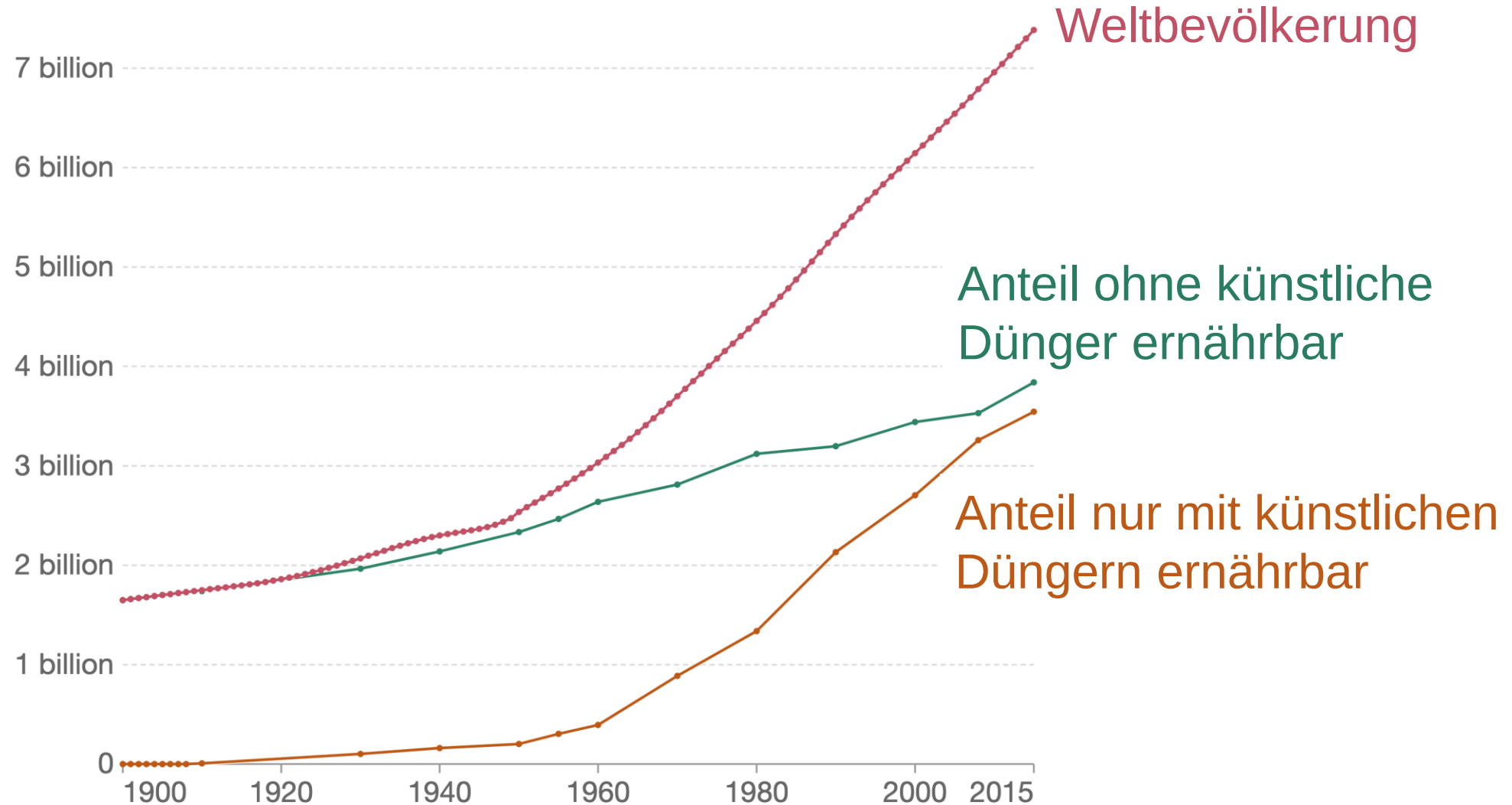


Die wahre «Grüne Revolution»



Data source: UN FAO (2023); UN WPP (2024)

Was ernährt die Welt?



Wie macht man künstlichen Dünger?

Stickstoff

(78% der Umgebungsluft)



Erdgas



The Nutrien Redwater Fertilizer plant near Fort Saskatchewan, Alberta, Canada, October 7, 2021.

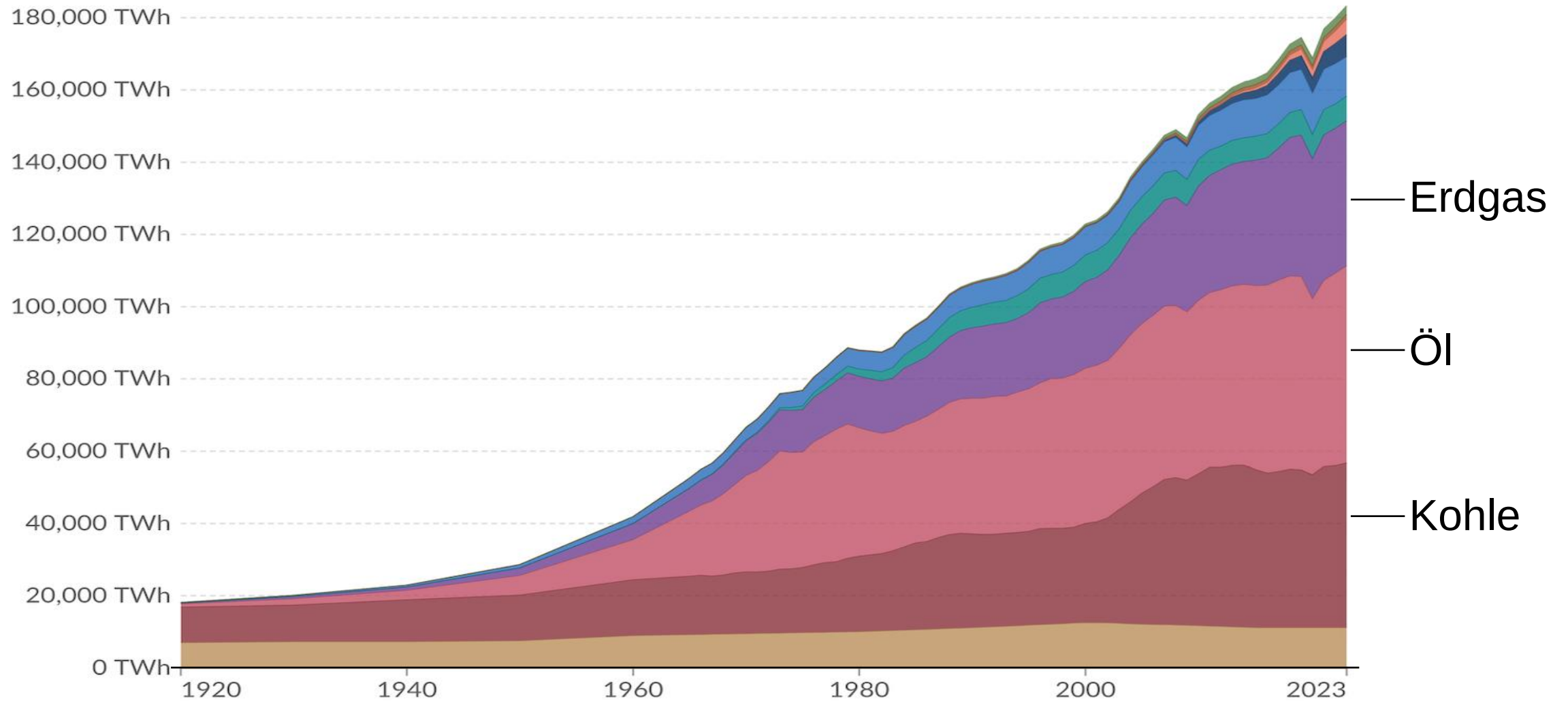


Ammoniumnitrat
Harnstoff

.....

Total ca. 230 Mio. t pro Jahr, ca. 30 % China, ca. 10% Russland, ...

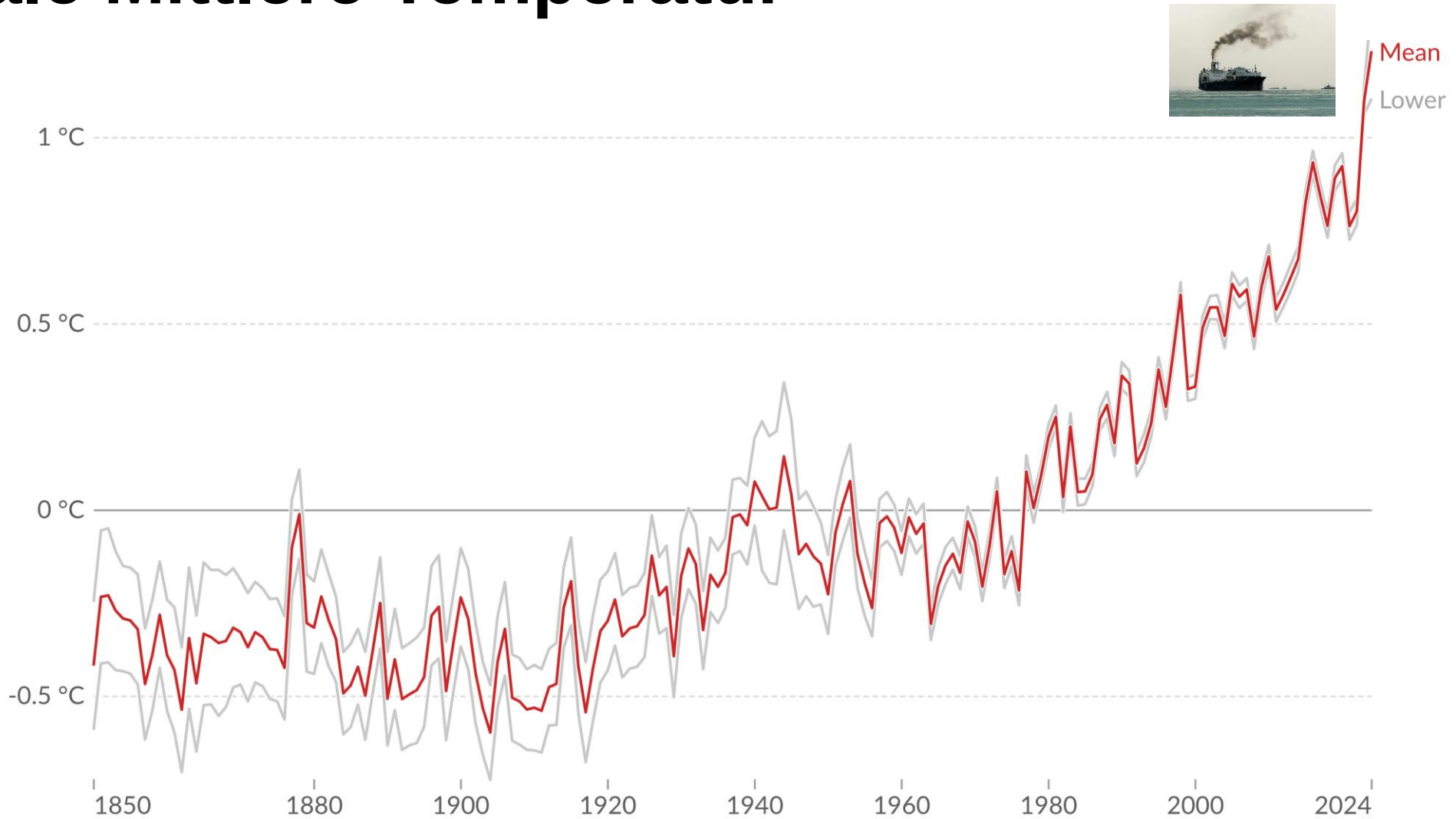
Globaler Verbrauch von Primärenergieträger



<https://ourworldindata.org>

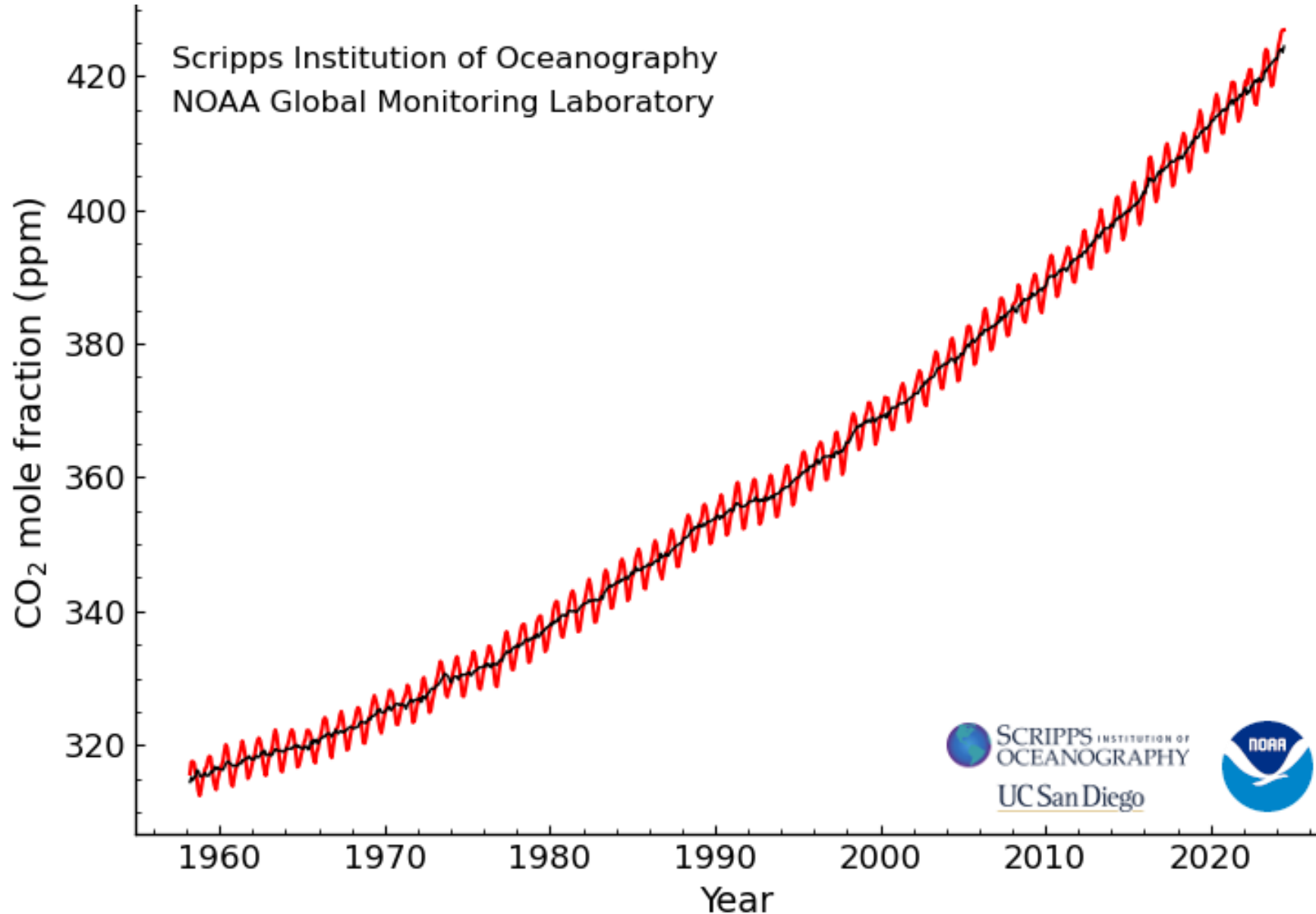
Das Klima verändert sich

Globale Mittlere Temperatur

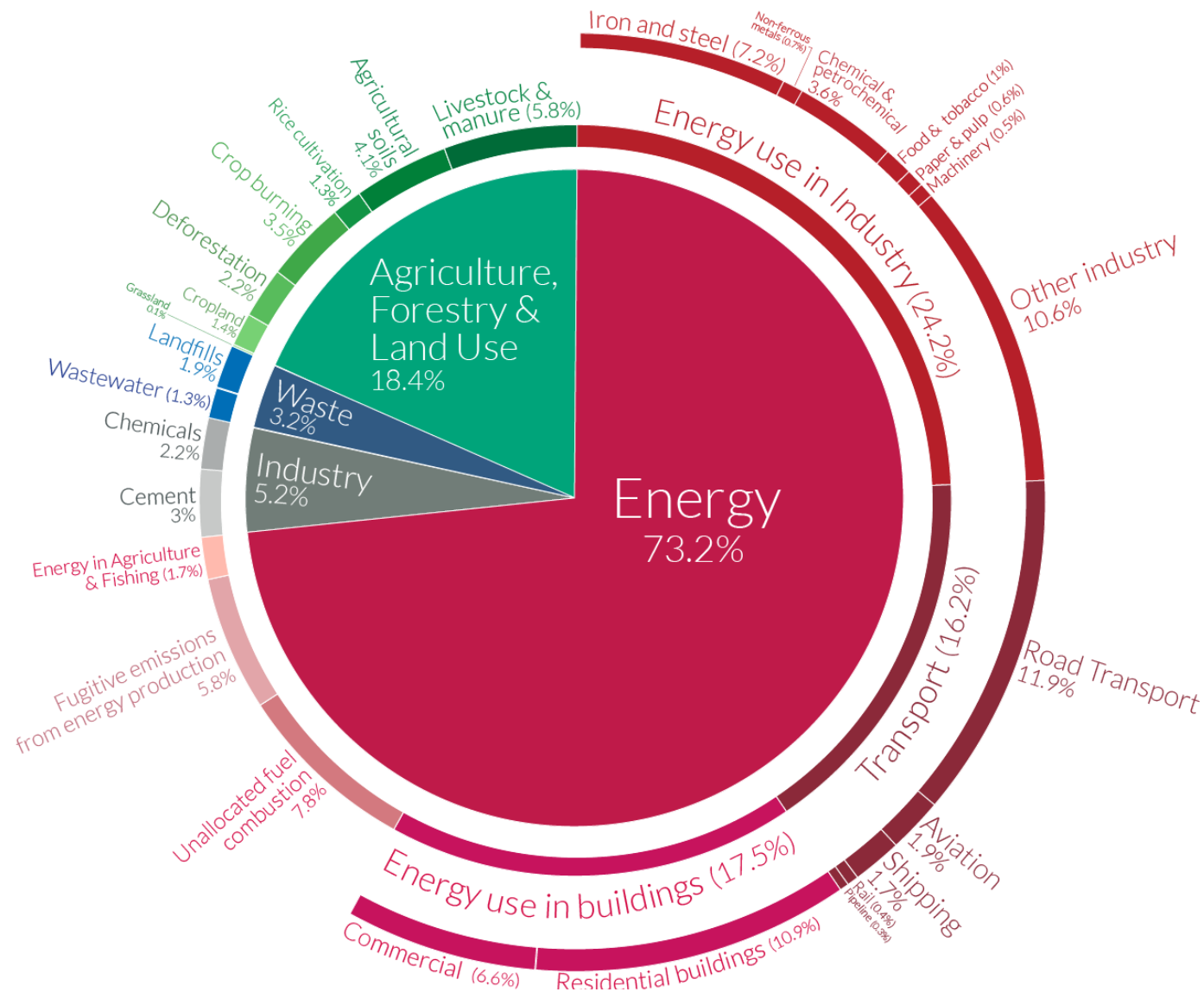


Source: <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01442-3>

CO₂ Konzentration in der Atmosphäre

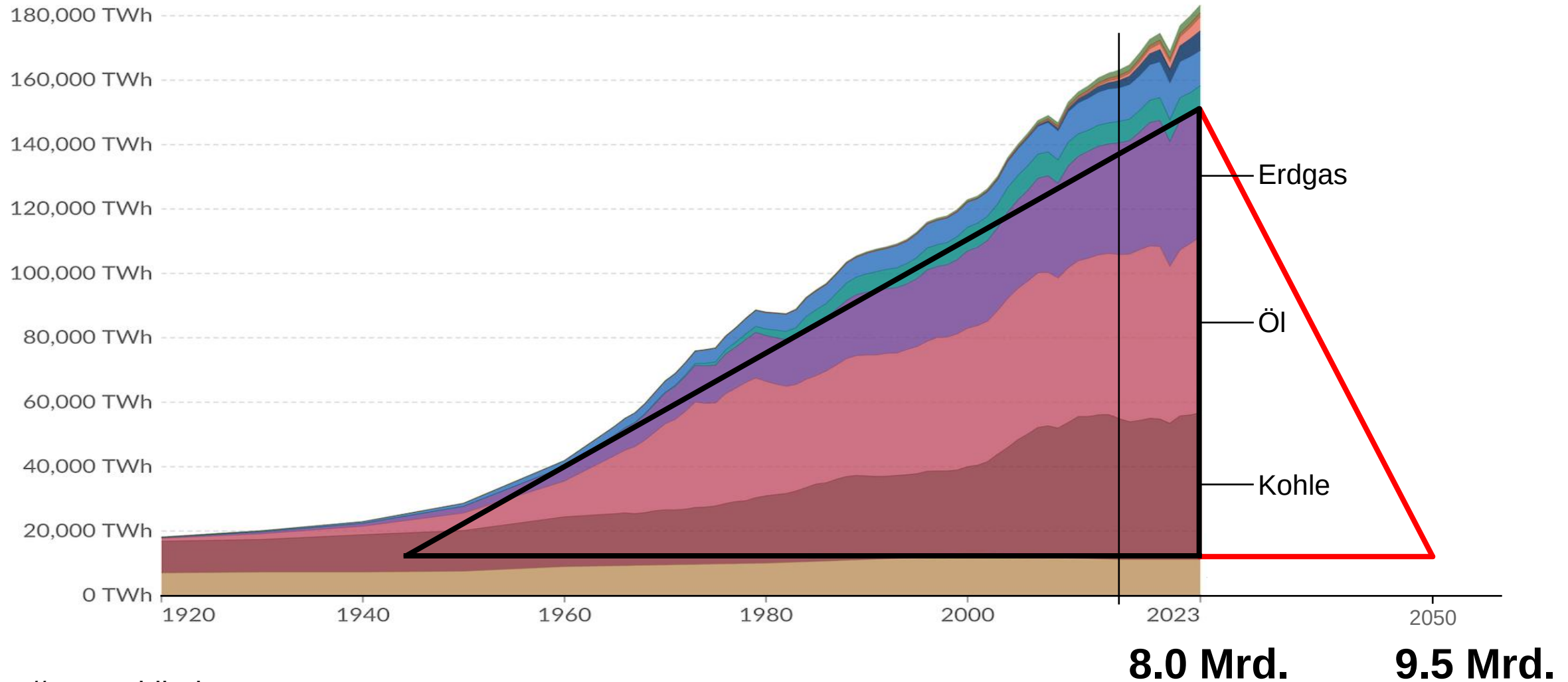


Menschenverursachte CO₂-Emissionen (2020)



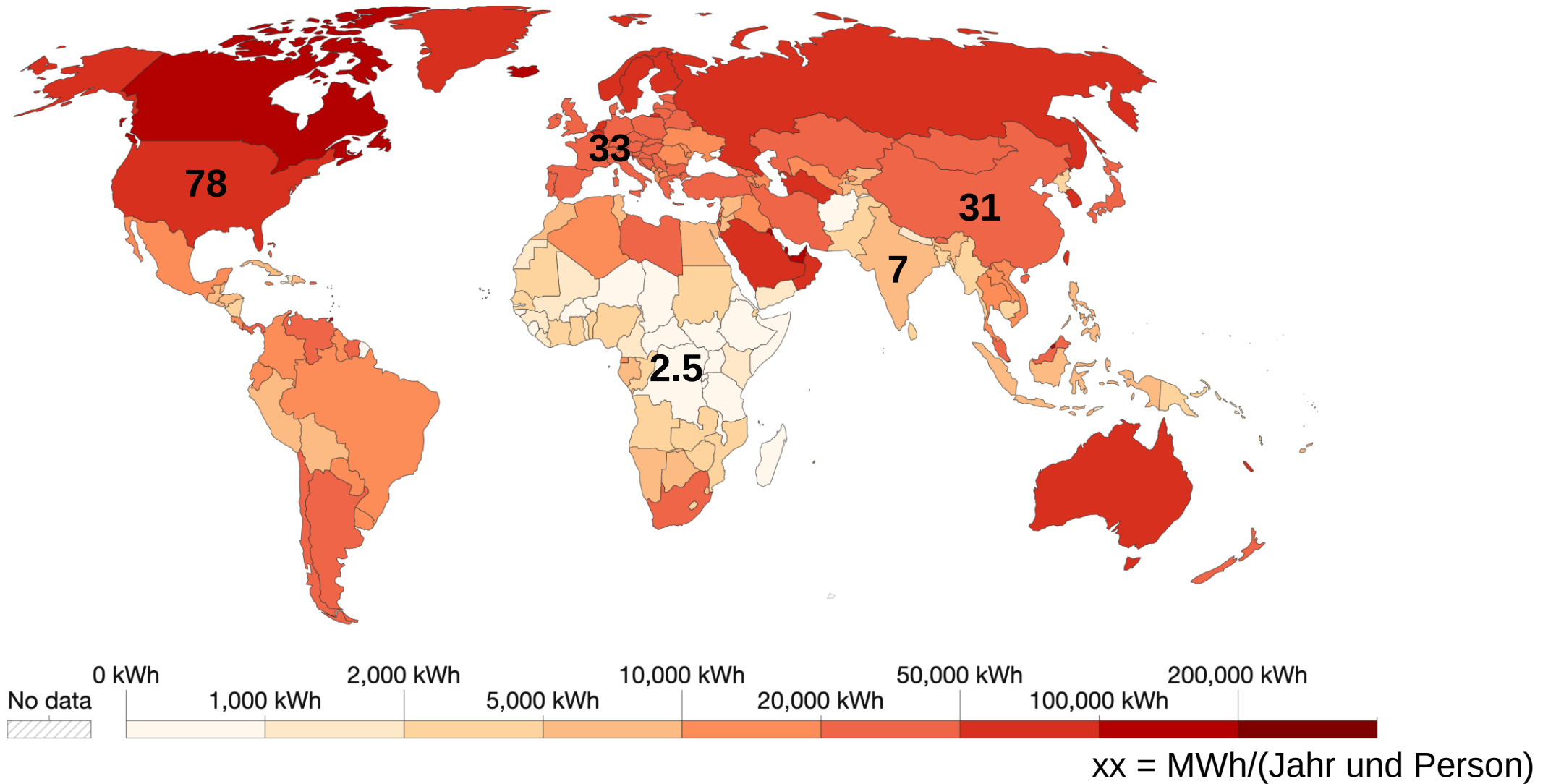
Die Ziele der COP 21 (Paris, 2015)

Weitgehende Defossilisierung bis 2050



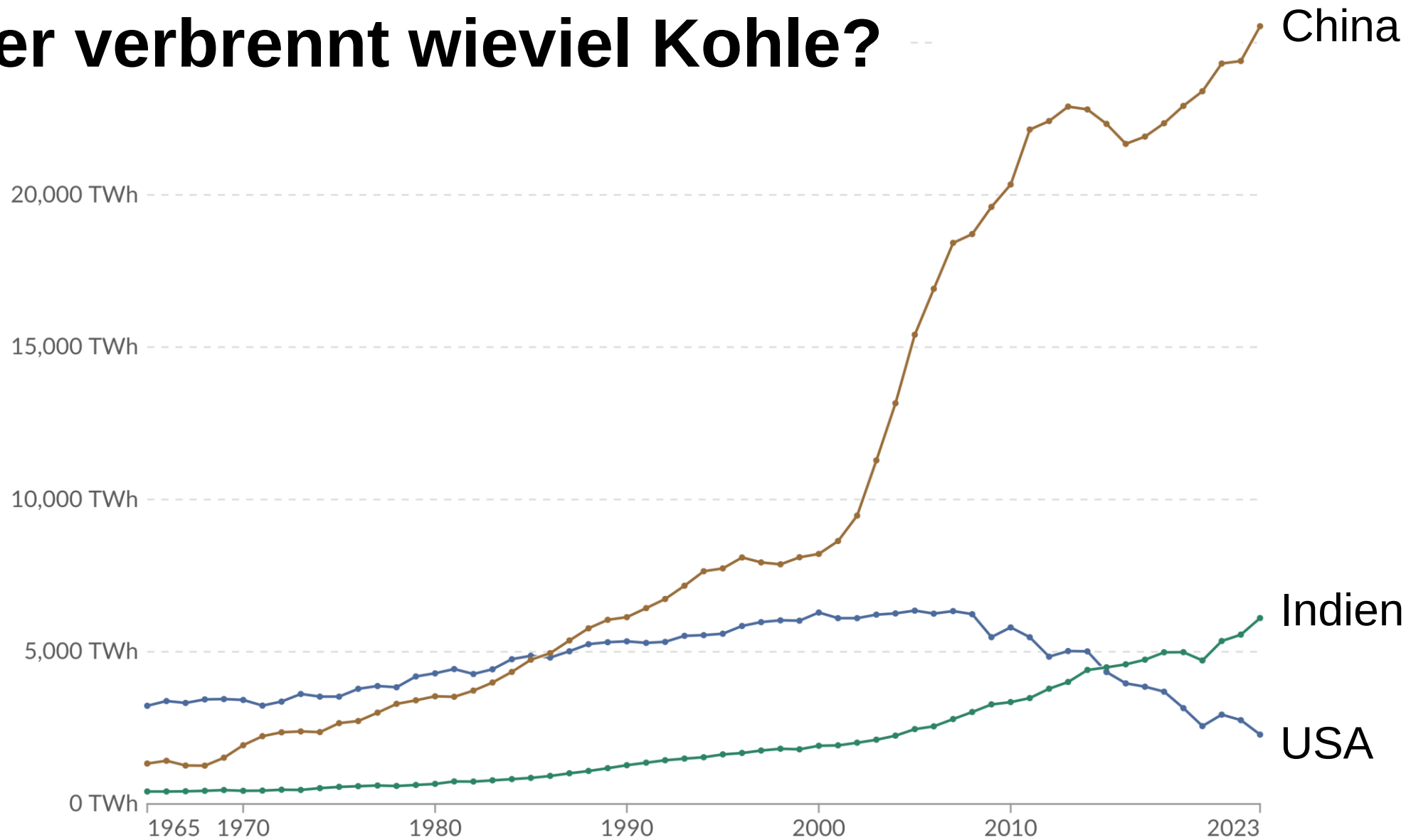
<https://ourworldindata.org>

Welt – Primärenergieverbrauch pro Kopf und Jahr



<https://ourworldindata.org>

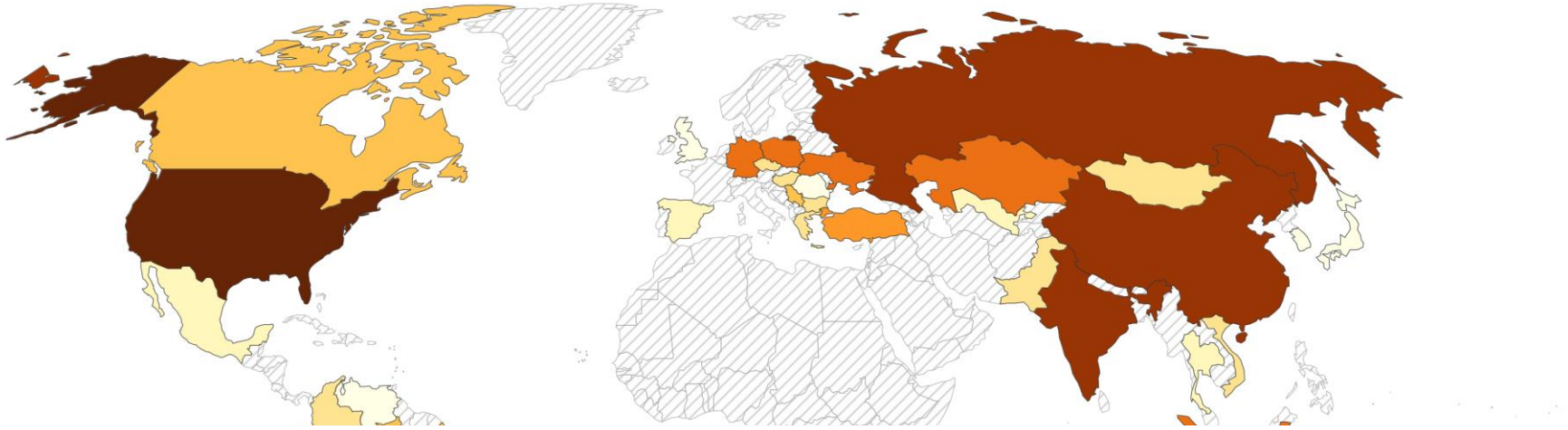
Wer verbrennt wieviel Kohle?



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024)

OurWorldinData.org/fossil-fuels | CC BY

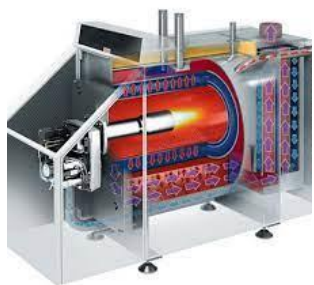
Wie viel Kohlereserven sind bekannt?



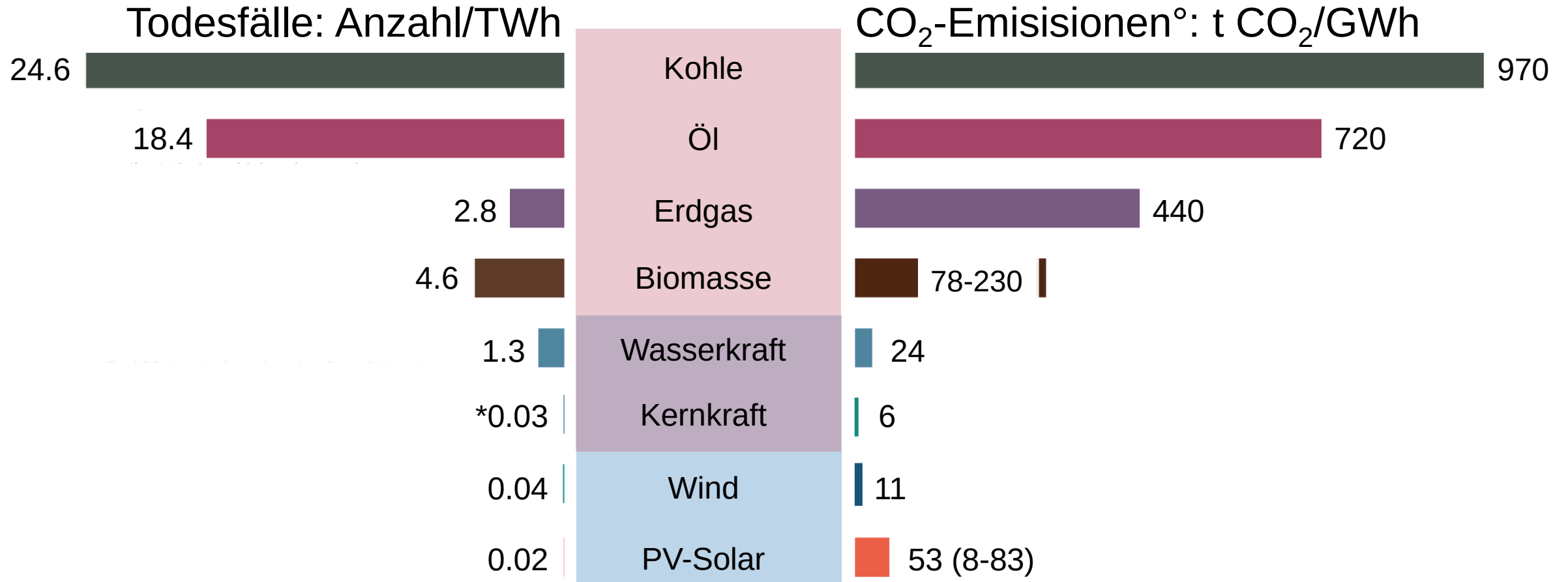
Weltverbrauch ca. 8.3 Milliarden t pro Jahr,
d.h. für mehr als 350 Jahre Reserven ...



Defossilisierung durch Elektrifizierung



Vergleich diverser Stromerzeugungsarten



<https://ourworldindata.org>

[°] Einschliesslich aller Emissionen beim Bau, Betrieb, ... («graues» CO₂)

* Einschliesslich aller Unfälle (Tschernobyl, Fukushima, ...)

Leistung, Energie und Lastfaktoren

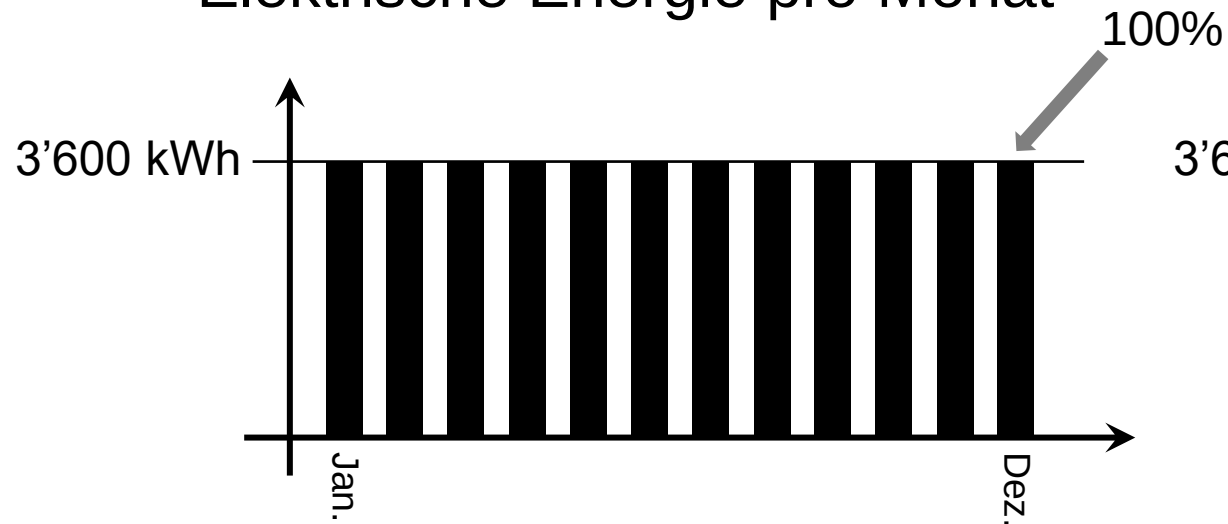
Maximale Leistung 5 kW



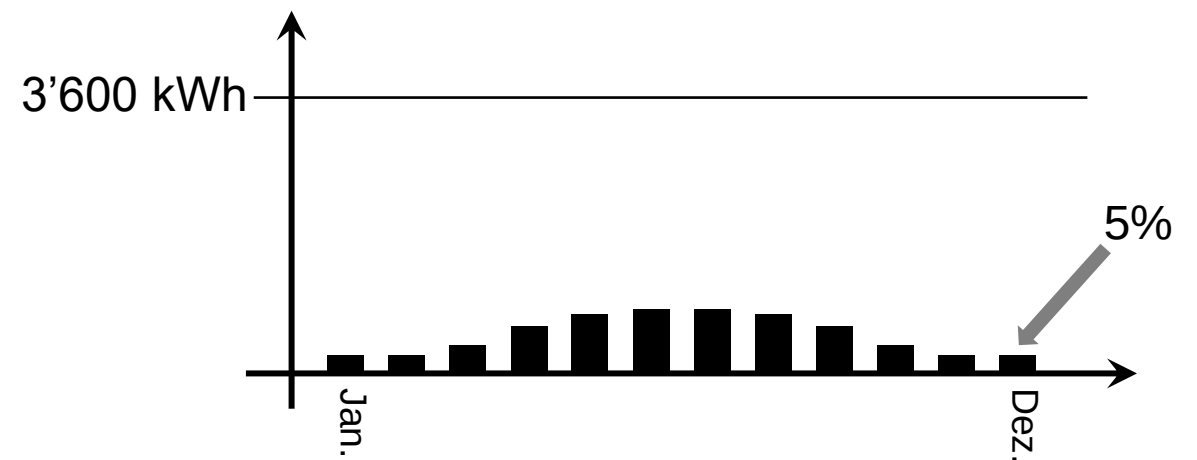
Maximale Leistung 5 kW



Elektrische Energie pro Monat

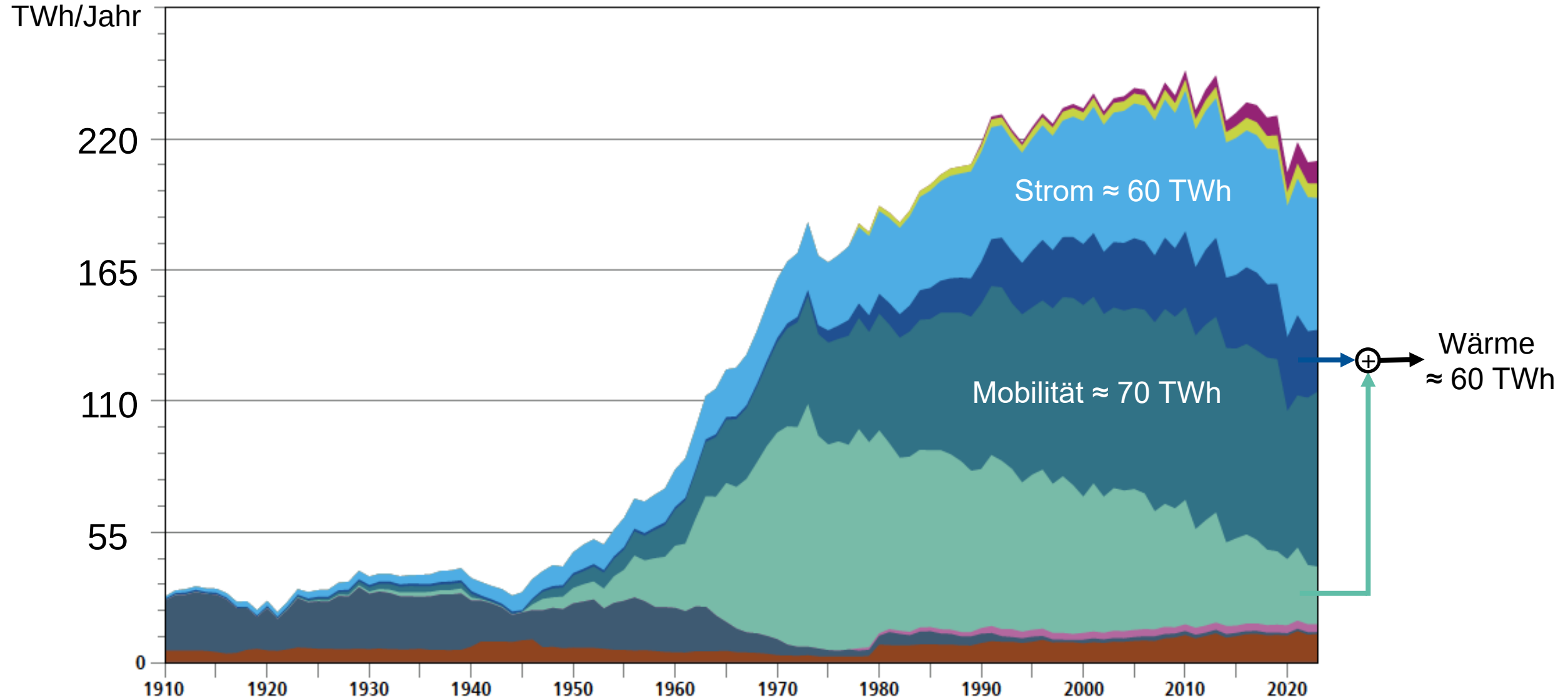


Elektrische Energie pro Monat



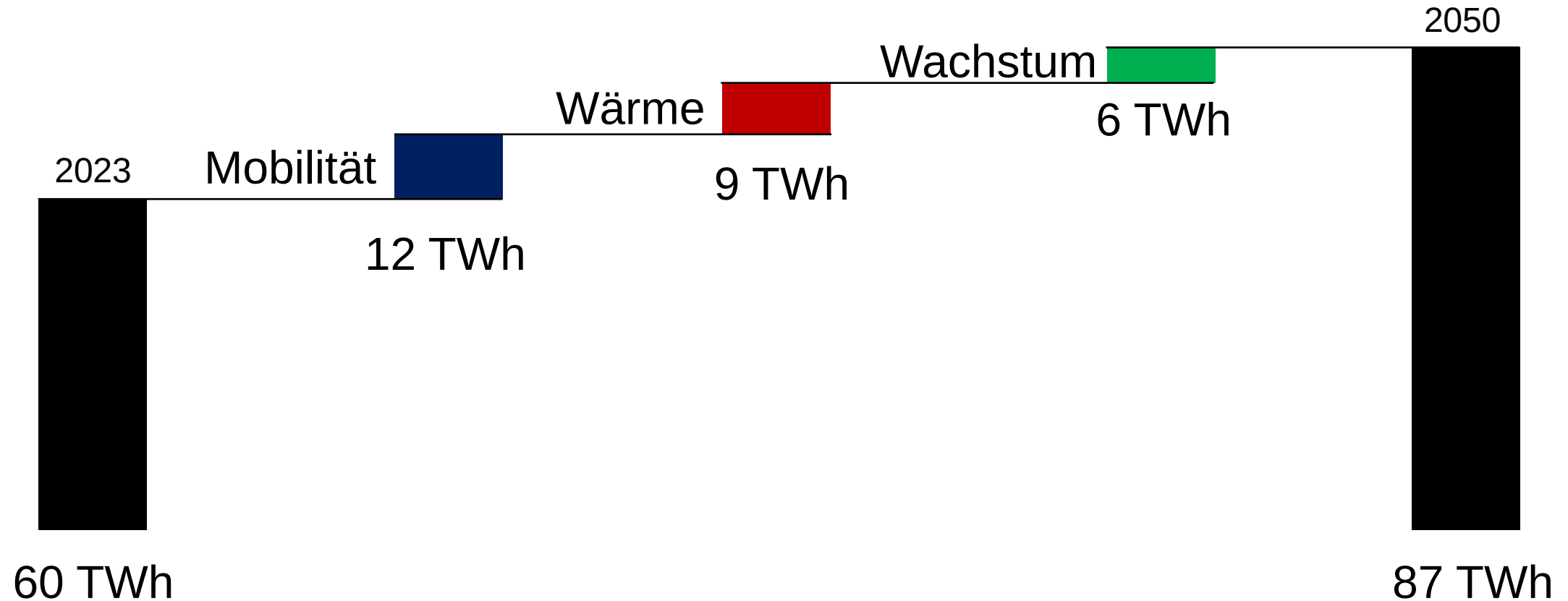
Schweiz heute

Endenergieeinsatz 2023

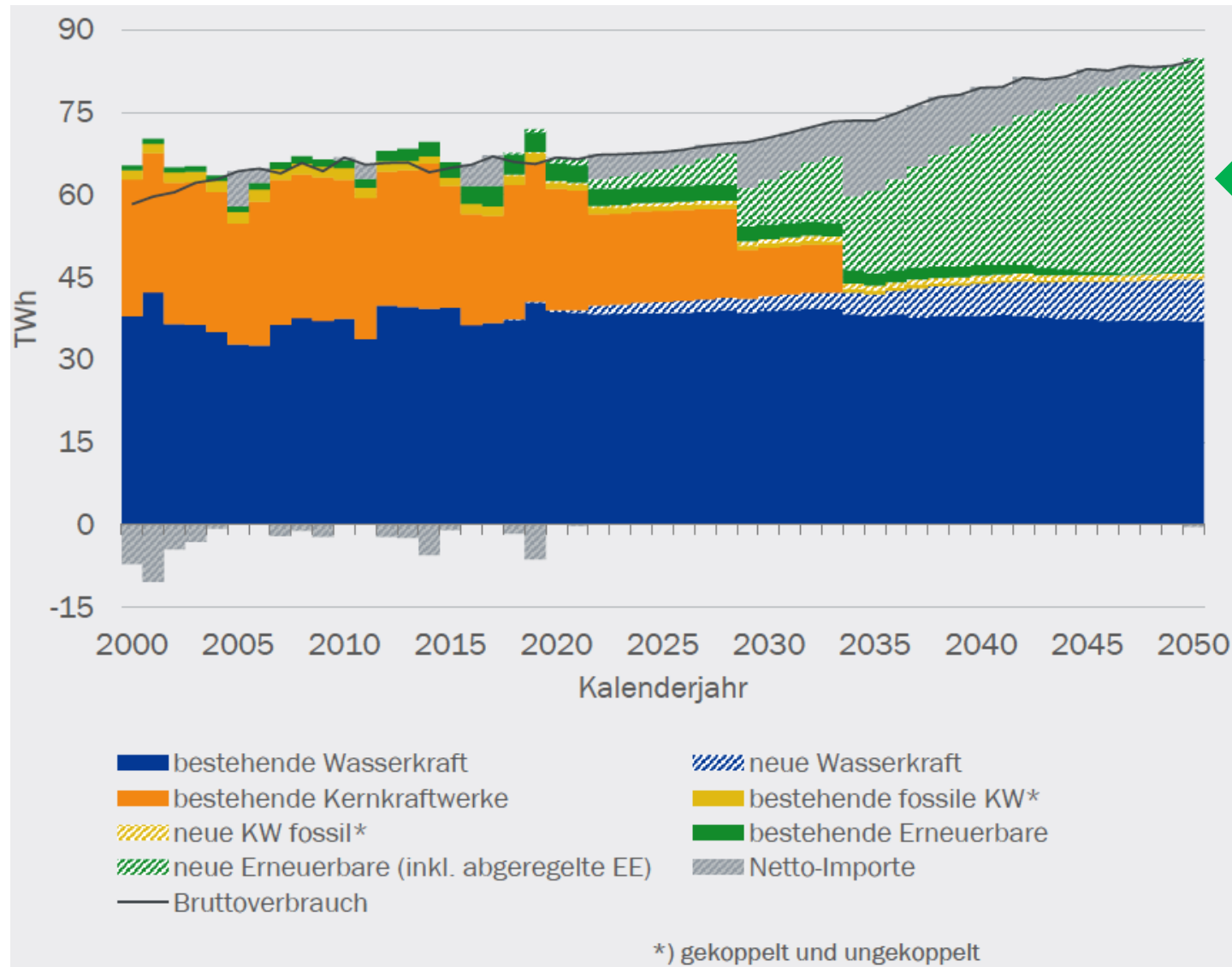


Schweiz 2050

Abschätzung jährlicher Strombedarf CH – 2050

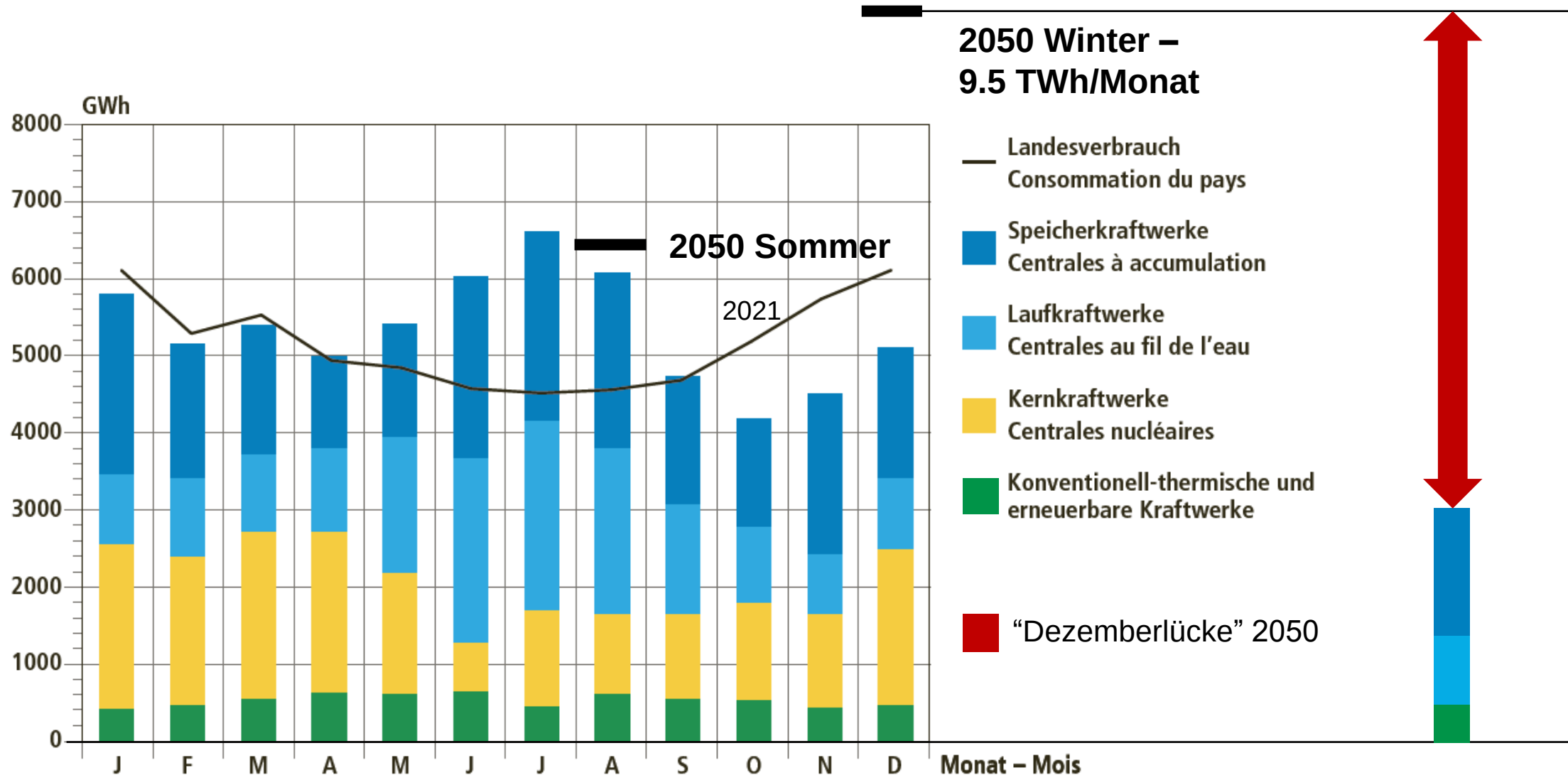


Energiestrategie 2050 – Jahresbetrachtung

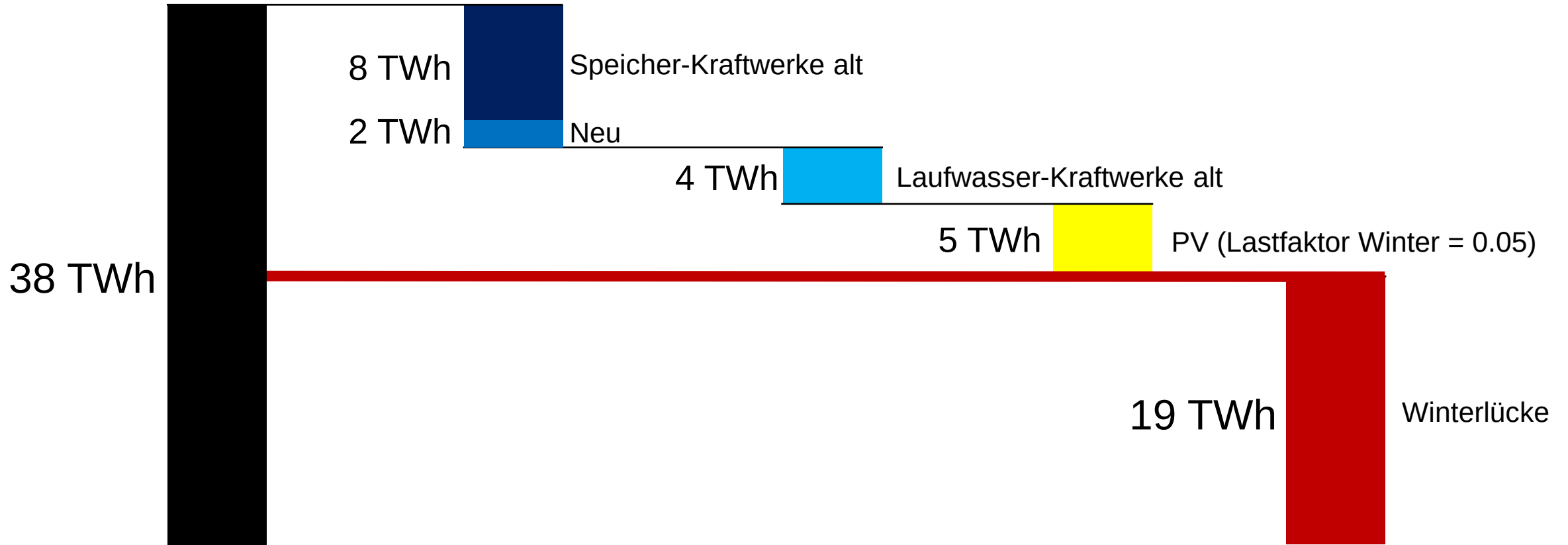


80% davon PV
34 TWh pro Jahr
36 GW installierte
PV-Leistung

Prognose Verbrauch 2050 – Monatsbetrachtung

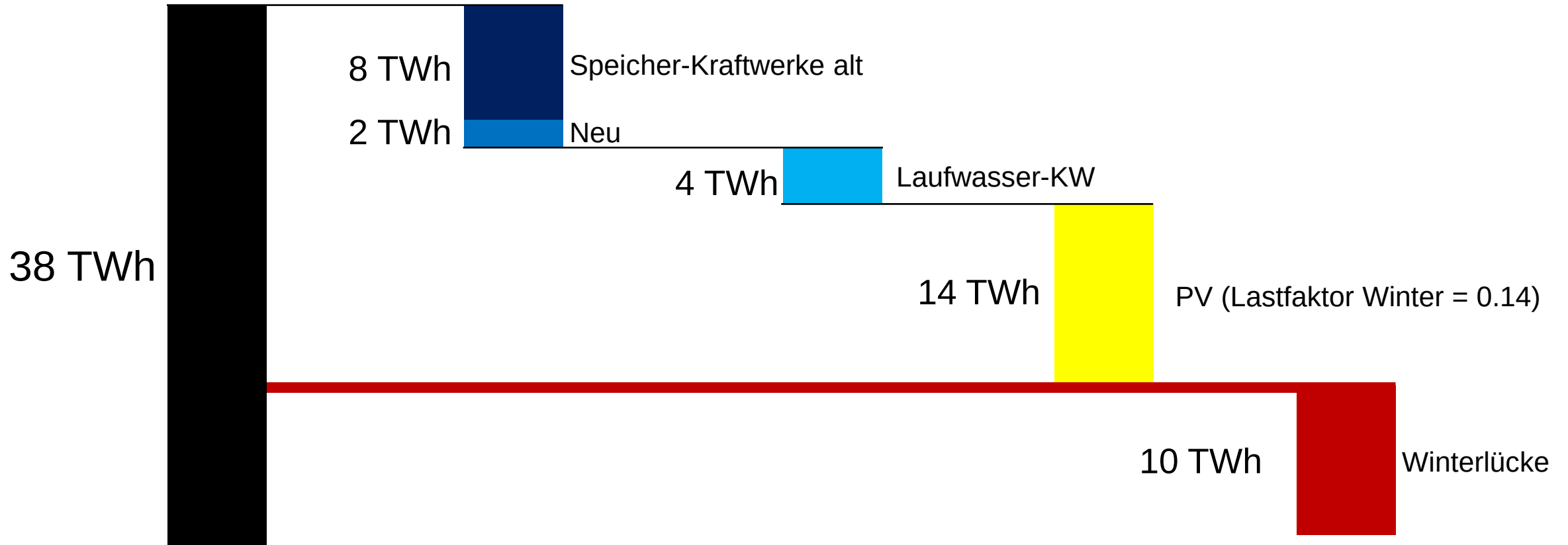


Auslegeordnung Winter° – 36 GW PV im Mittelland

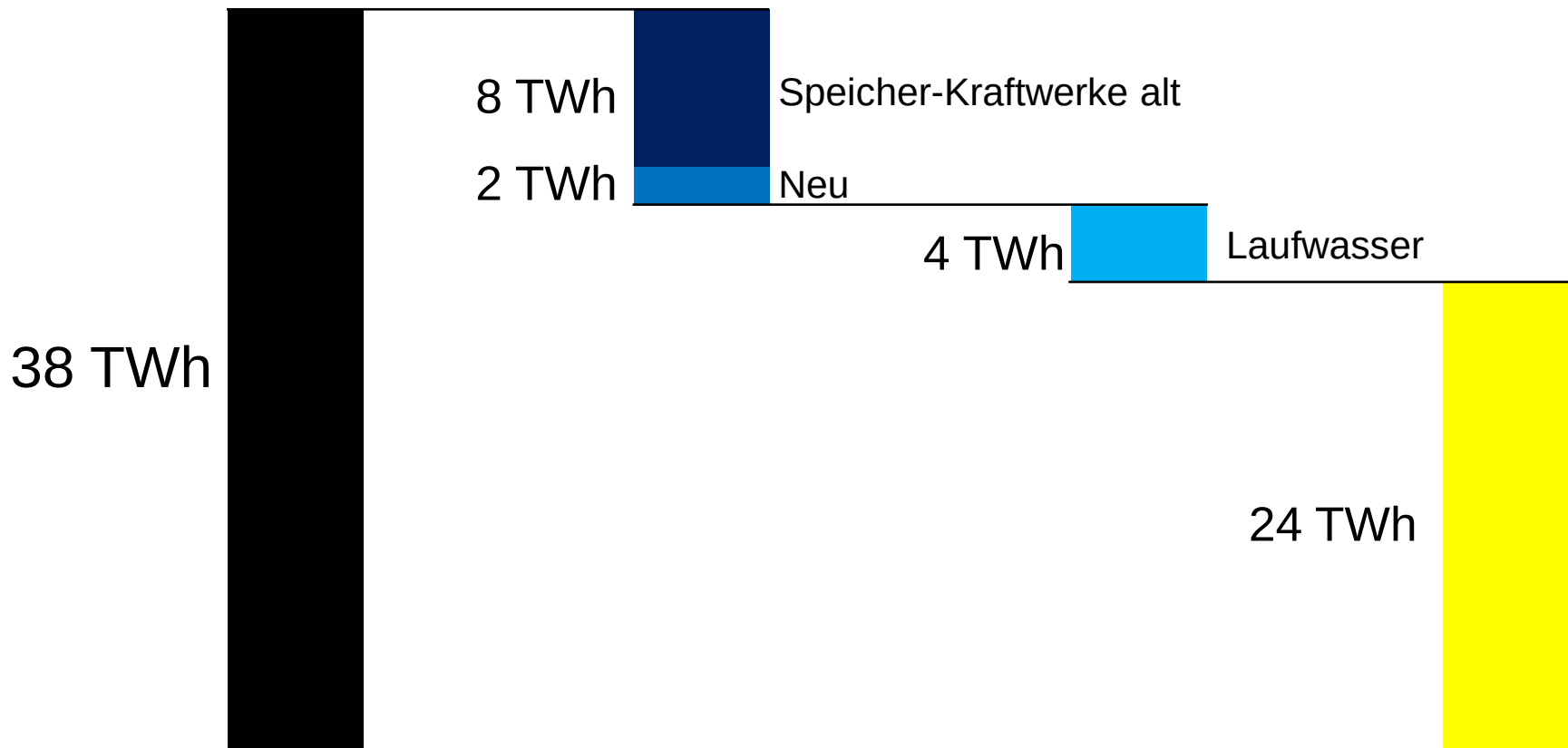




Auslegeordnung Winter° – 36 GW PV in den Alpen



Auslegeordnung Winter – 60 GW PV in den Alpen

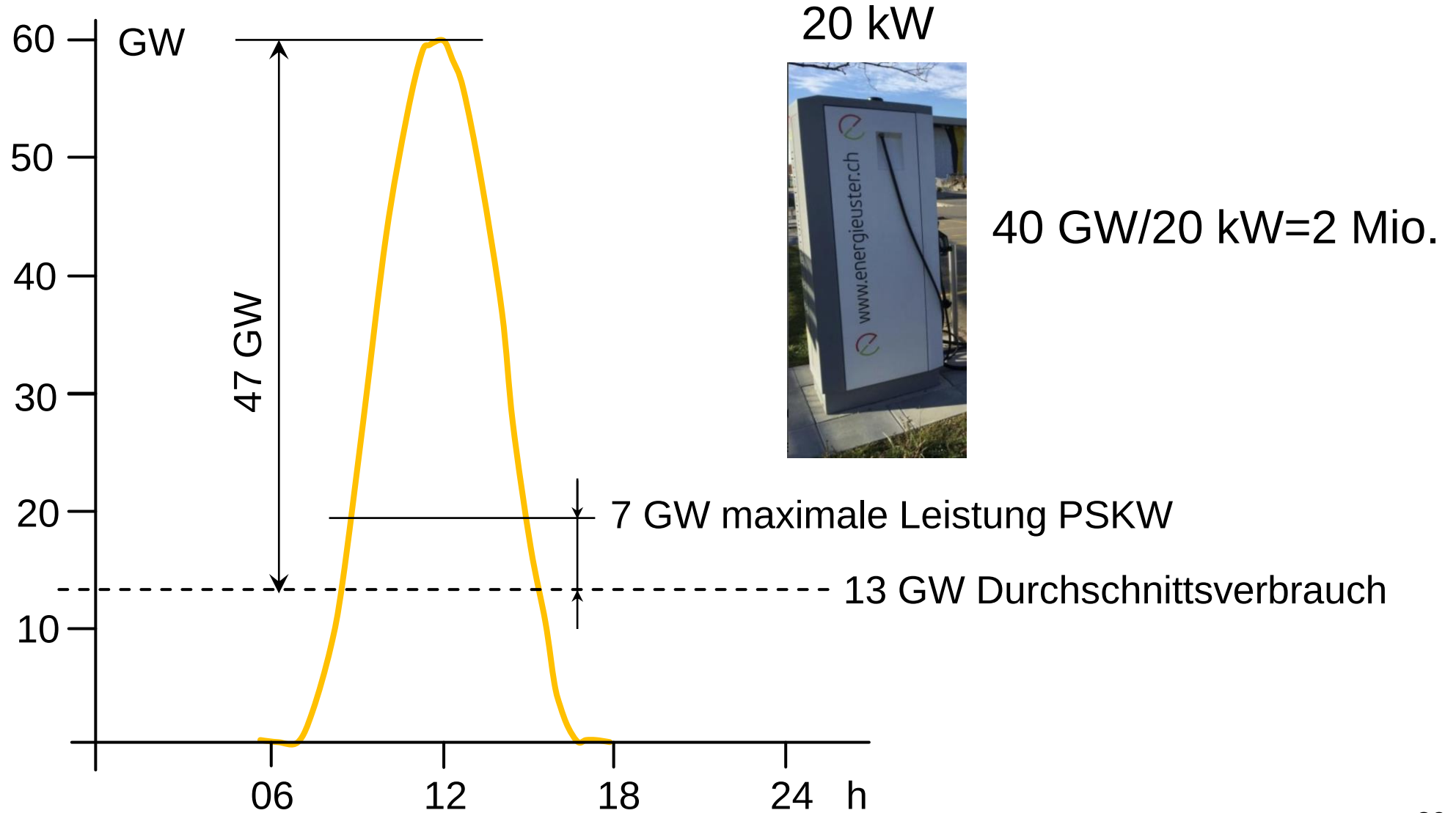


Etwa 4'600 "Gondosolar"

Etwa 7.4 Mio. "Solarbäume"

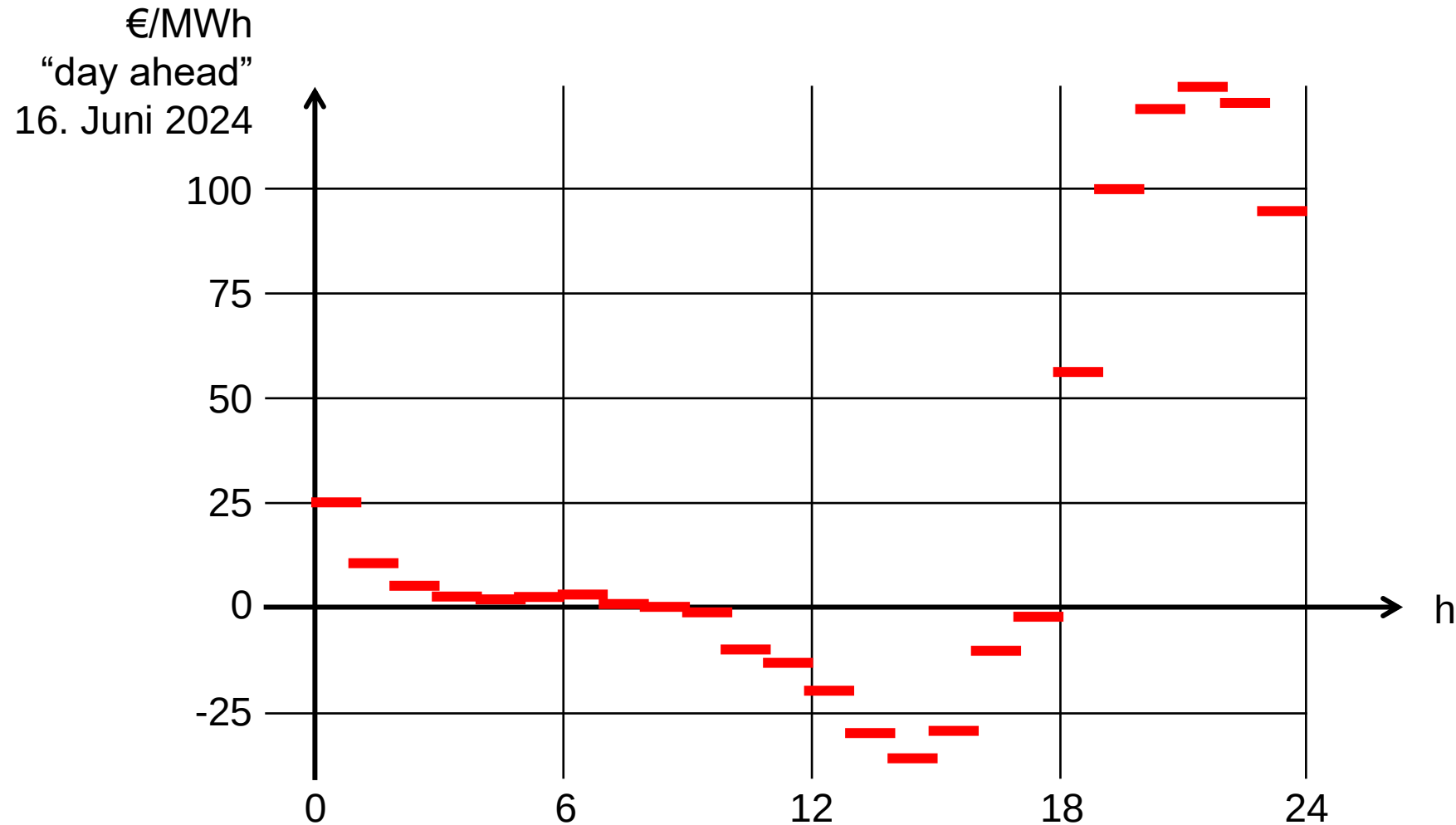
Lebensdauer, Netze, Kosten,...?

Tagesschwankungen – 60 GW PV in den Alpen



PSKW= Pump-Speicher-Kraft-Werke

Tagesschwankungen – Preisauswirkungen D 2024



- Die Welt (Schweiz) braucht mehr (elektrische) Energie.
- Absichtserklärungen sind gut, Resultate sind besser, Denkverbote sind schlecht.
- Der Umbau muss so geschehen, dass die Versorgung mit ausreichender und bezahlbarer (elektrischer) Energie jederzeit sichergestellt ist.
- Forschung und Entwicklung sind die besten Investitionen.
- Nur ökonomisch sinnvolle Ansätze werden die nötigen Skalen erreichen.
- Der Ausstoss von Treibhausgasen muss weltweit einen Preis bekommen.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

guzzella@mac.com

Reserve- bzw. Q&A-Folien

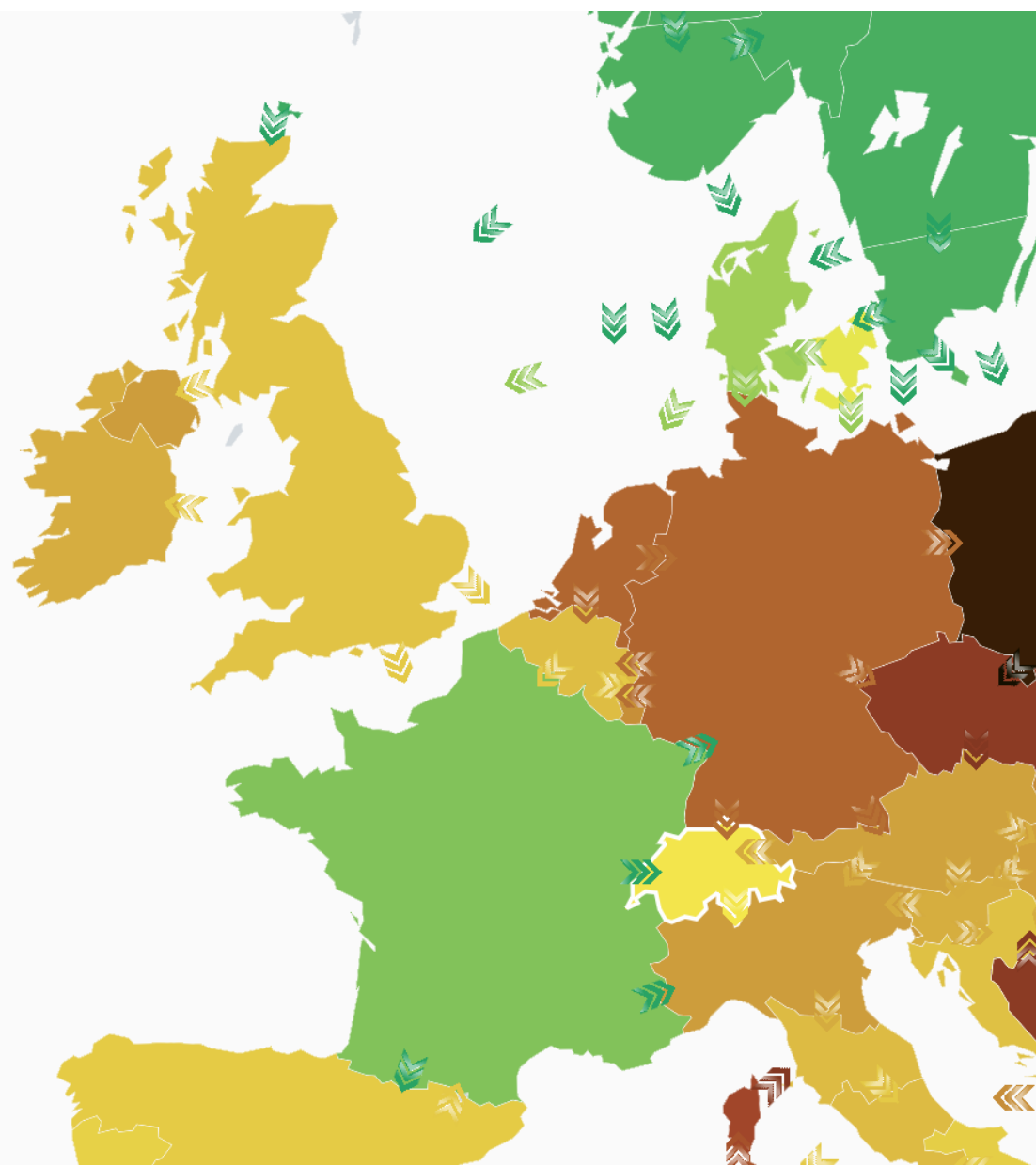
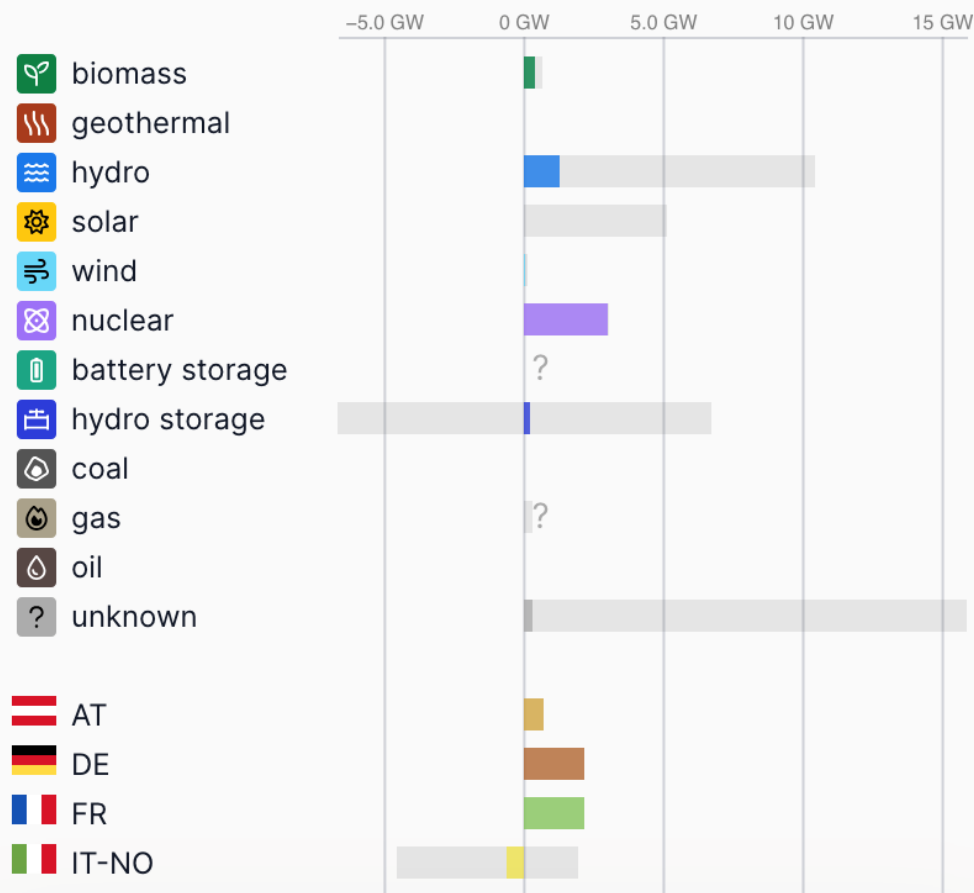
Switzerland

15 January 2025 at 05:00 CET

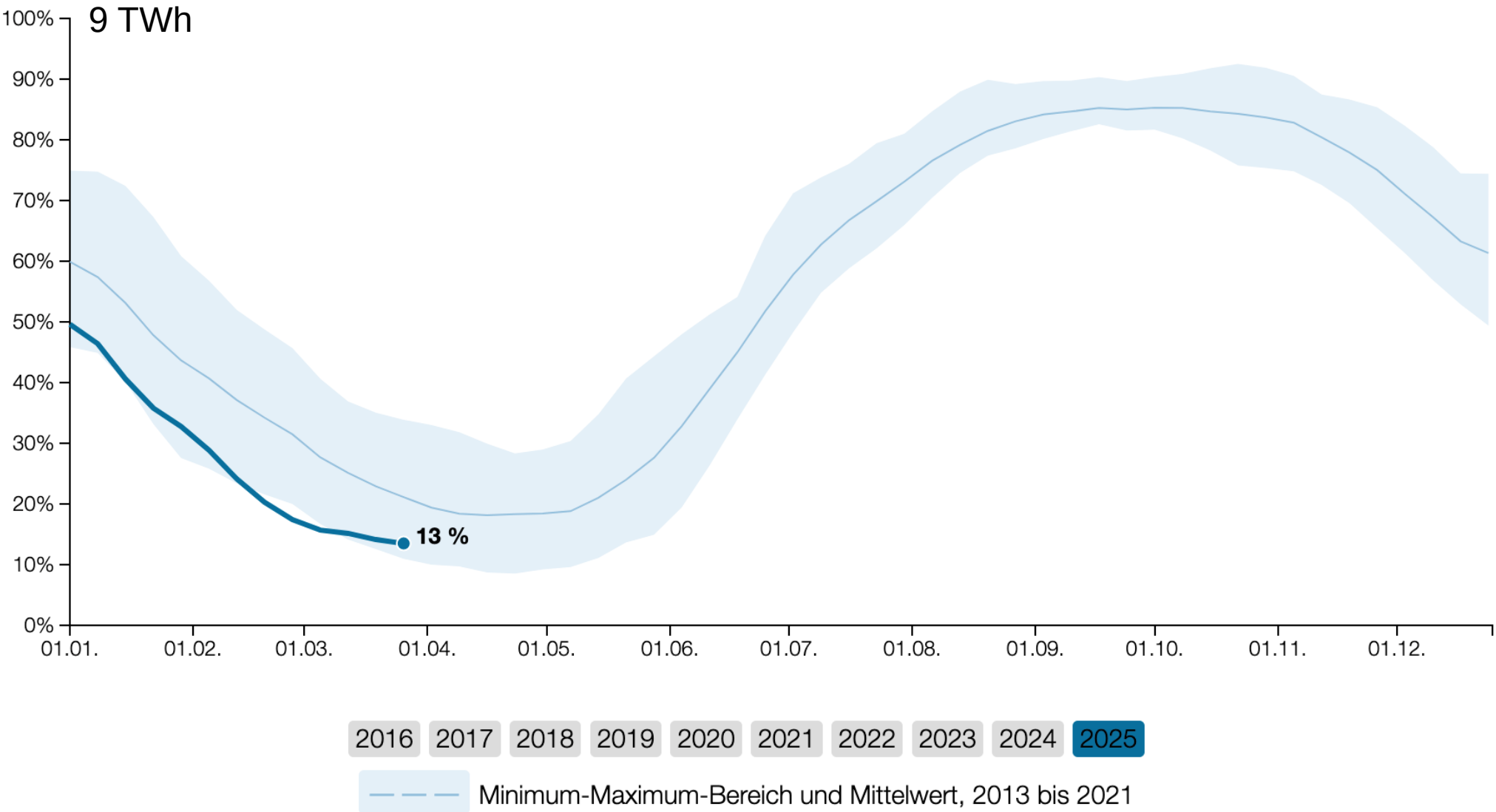
Electricity consumption by source

Incomplete

GW



Füllungsgrad Schweizer Stauseen



Quelle: https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/AP_FuellungsgradSpeicherseen/?lang=de

Bio-Masse Schweiz

Kann Bandenergie oder Spitzenenergie liefern, bedarf thermische Kraftwerke (WKK)



Heute genutzt 14 TWh, weiter 12 TWh nutzbar.¹⁾

Umwandlung von 12 TWh zu Elektrizität mit 30% Wirkungsgrad, zusätzliche 4 TWh

1) Oliver Thees, et al., Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, WSL Report

Geothermie

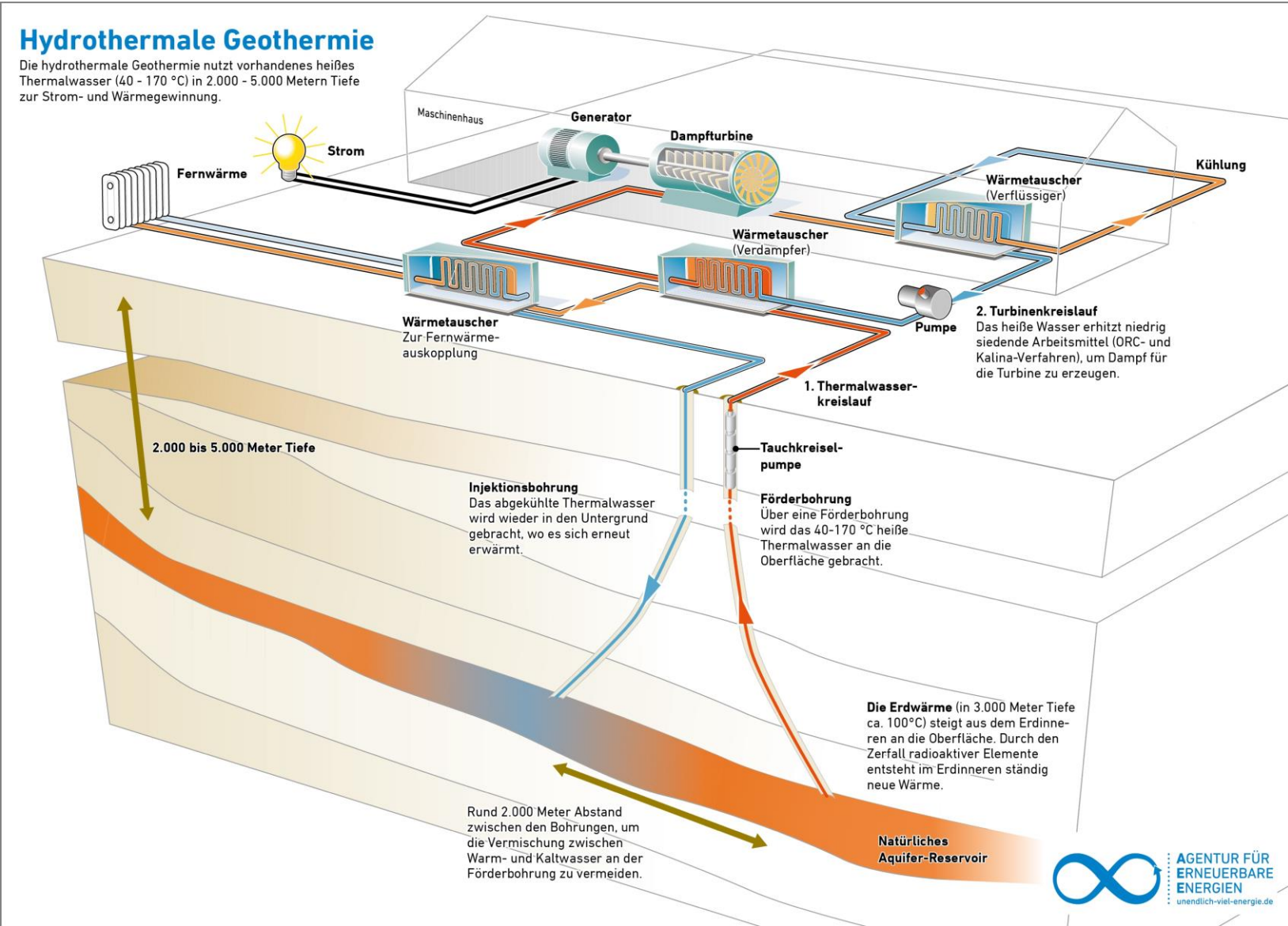
	Hydrothermal	Petrothermal
Stromerzeugung	Wasserführende Schichten “Thermalquellen” Mind. 85° (ORC), besser 110°	Aktiviertes Gestein “Fracking” Mind. 85° (ORC), besser 110°
Wärmeversorgung	Wasserführende Schichten “Thermalquellen” Mindestens 35°	Molasse, ... “Wärmepumpen-Sonden” Mindestens 15°

“ORC”: Organic Rankine Cycle

Geothermie

Hydrothermal

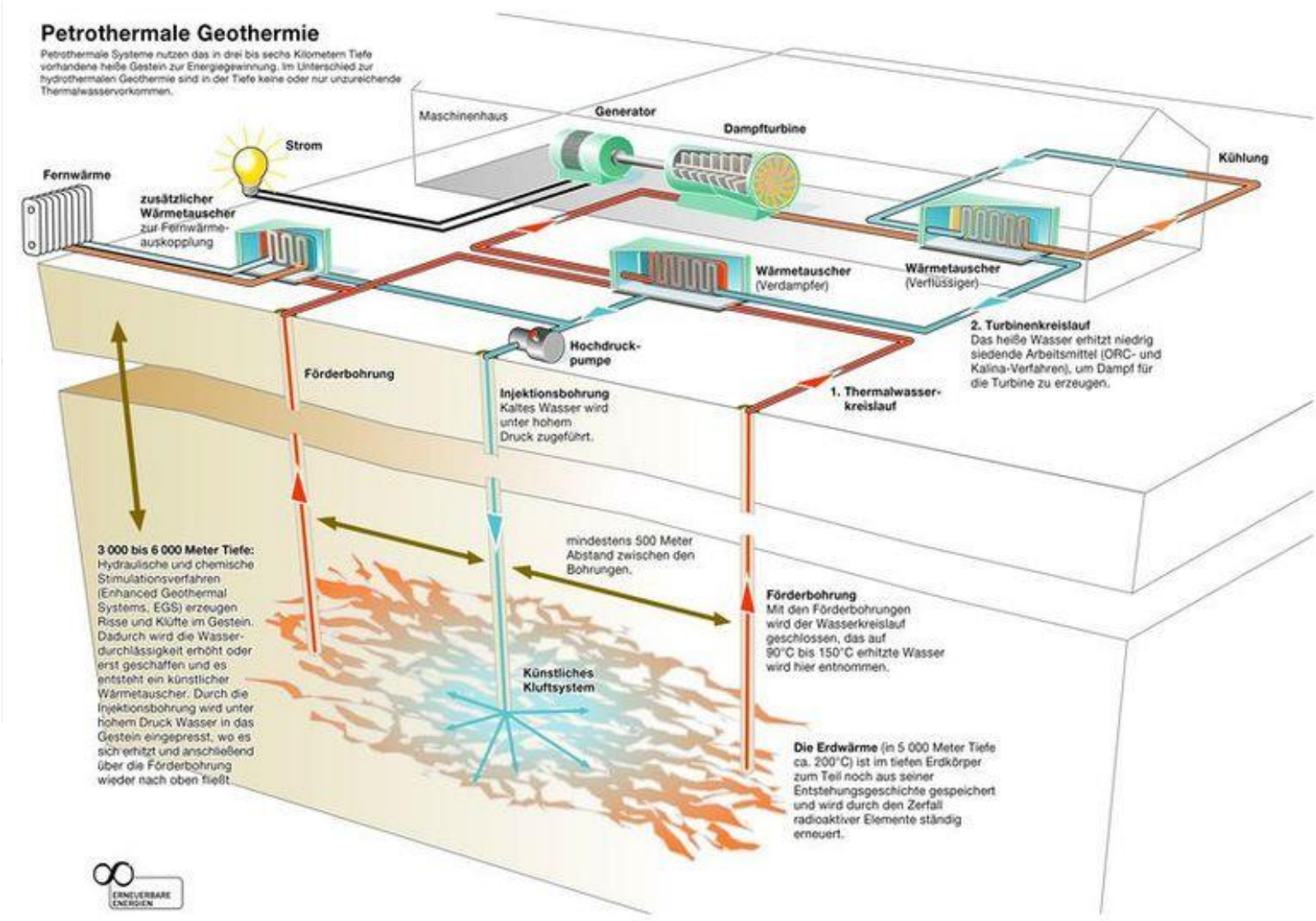
Stromerzeugung



Geothermie

Stromerzeugung

Petrothermal



Geothermieprojekte (Strom) in der Schweiz



Basel, 2011



St. Gallen, 2013

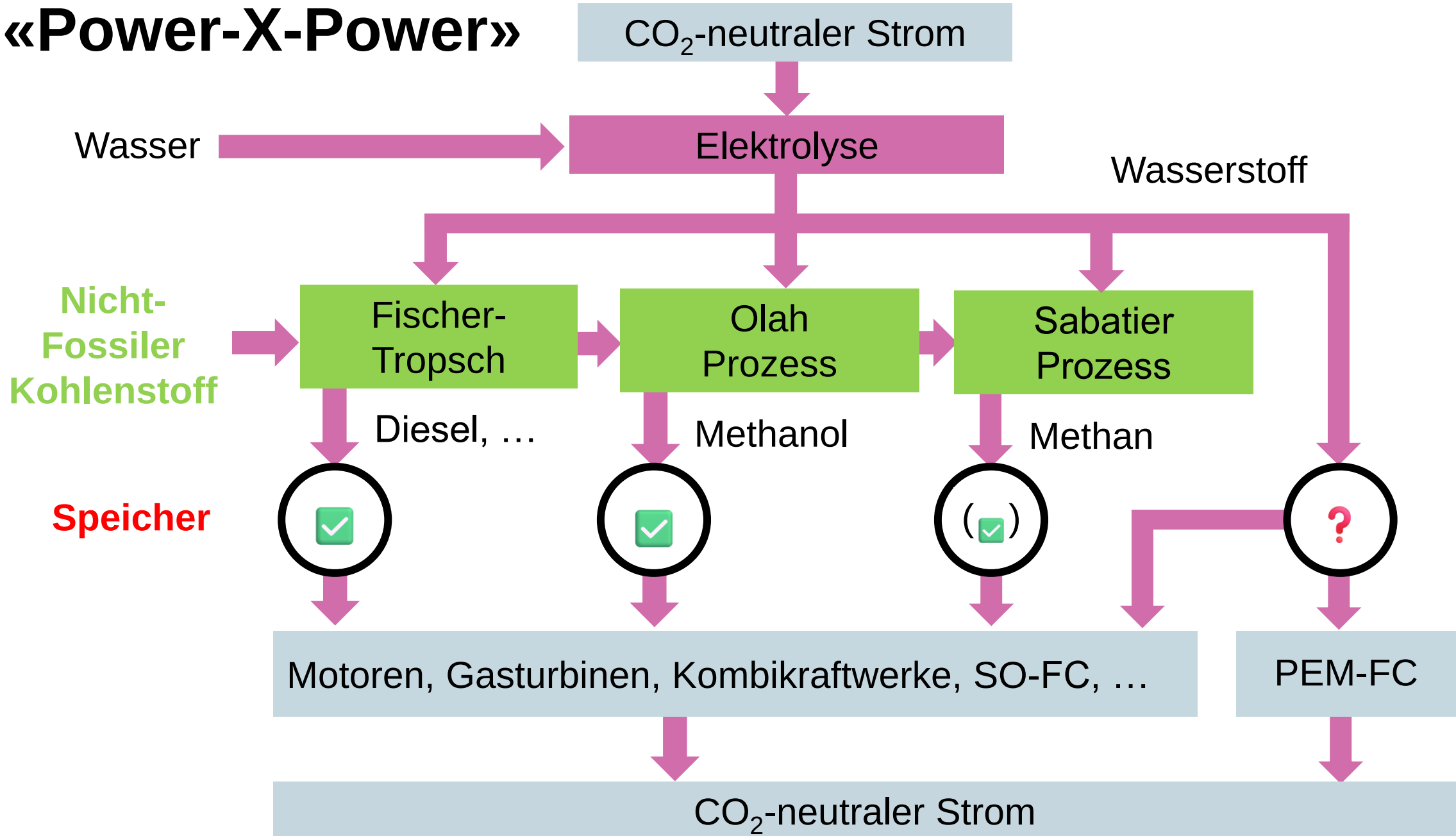


Lavey Les-Bains, 2022



Haute Sorne, ab 2024

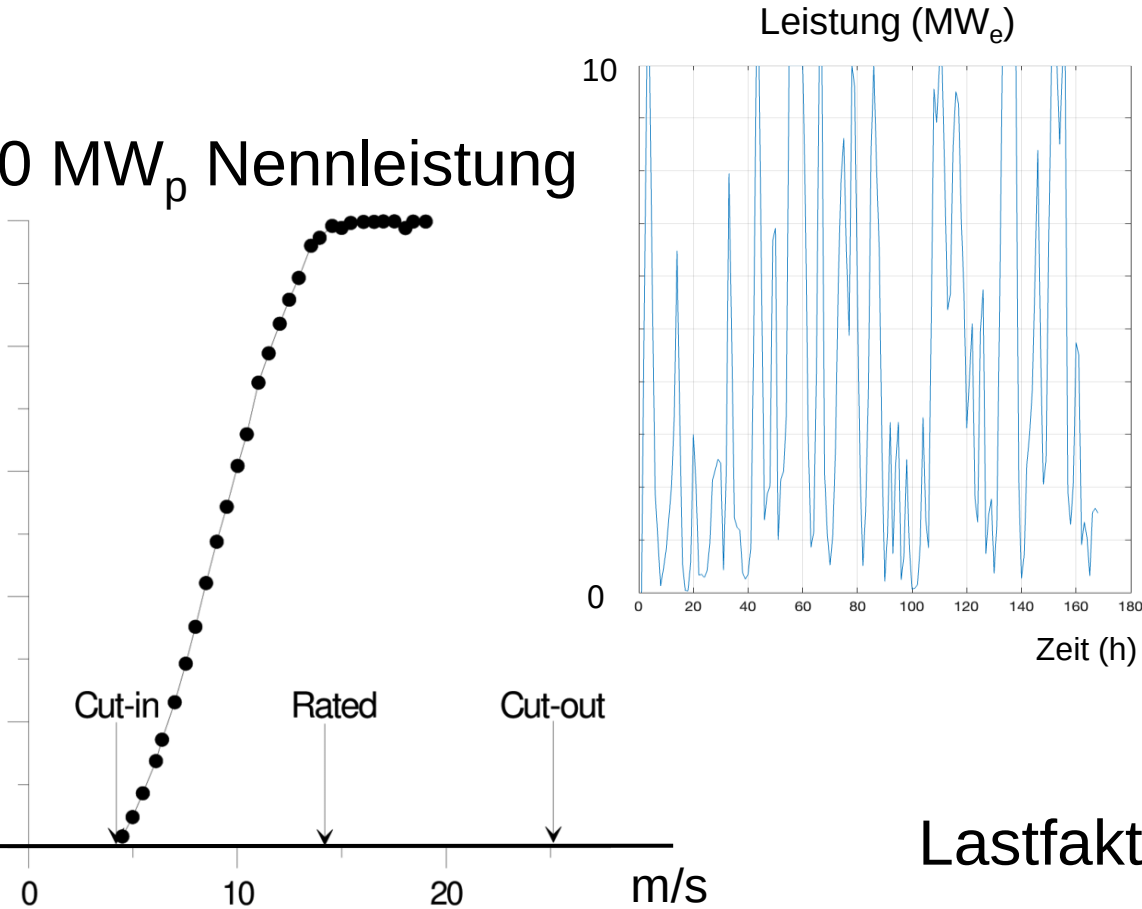
«Power-X-Power»



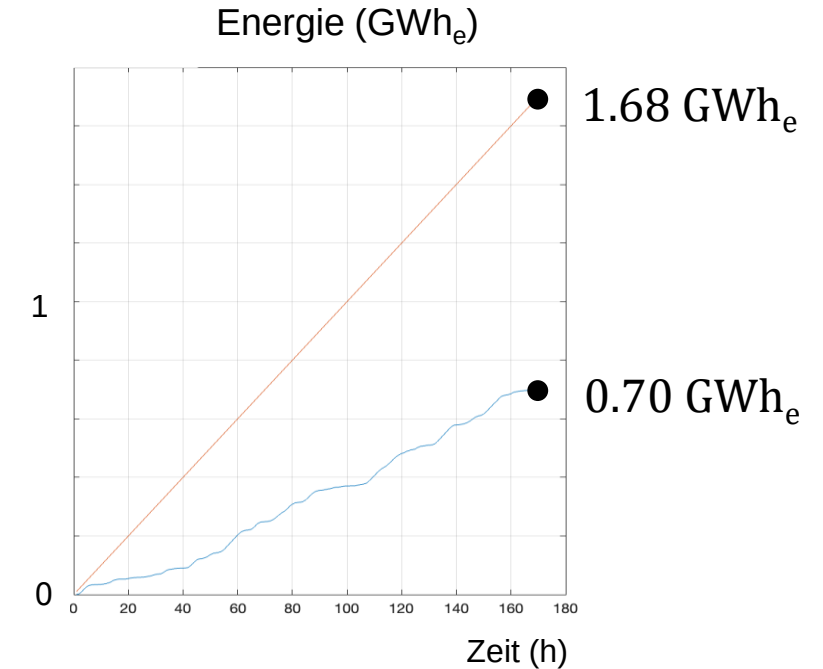
Nennleistung und Energieertrag



10 MW_p Nennleistung

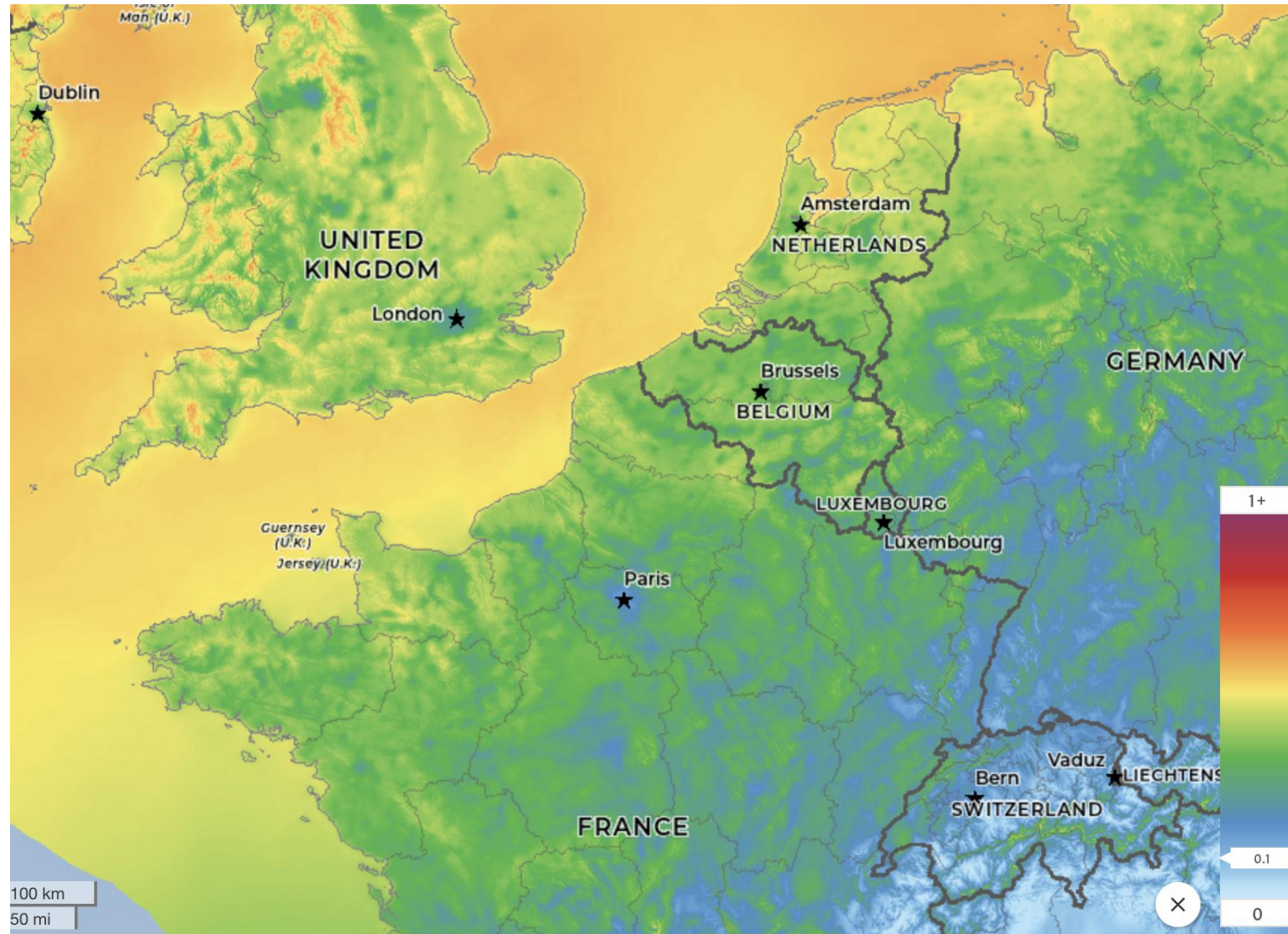


$$10 \text{ MW}_p \cdot 7 \text{ d} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 1.68 \text{ GWh}_e$$

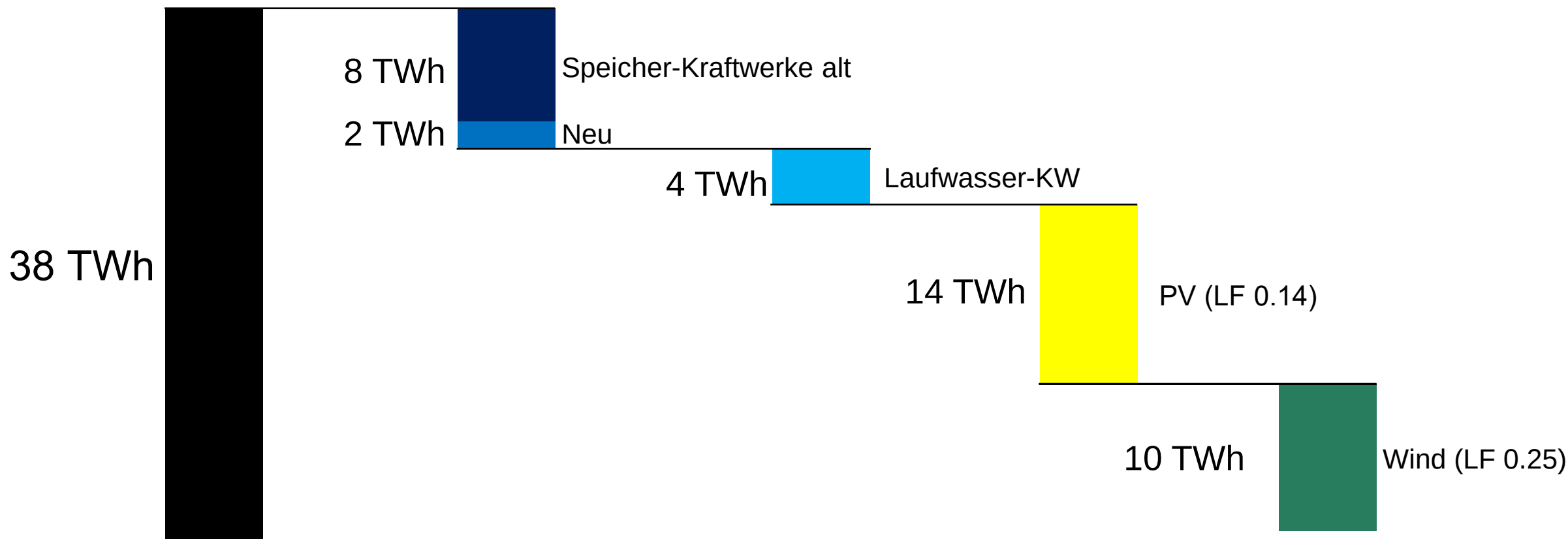


$$\text{Lastfaktor} = \frac{0.70 \text{ GWh}_e}{1.68 \text{ GWh}_e} = 0.42$$

Lastfaktor Windturbinen – Jahresdurchschnitt¹⁾



Winter – 36 GW PV und 5 GW Wind in den Alpen



Gütsch (Andermatt) – 4 Anlagen mit Gesamtleistung 3.3 MW_p



Bild zur Verfügung gestellt von wind-data.ch

$$7 \text{ GW}_p = 2'100 \times 3.3 \text{ MW}_p$$

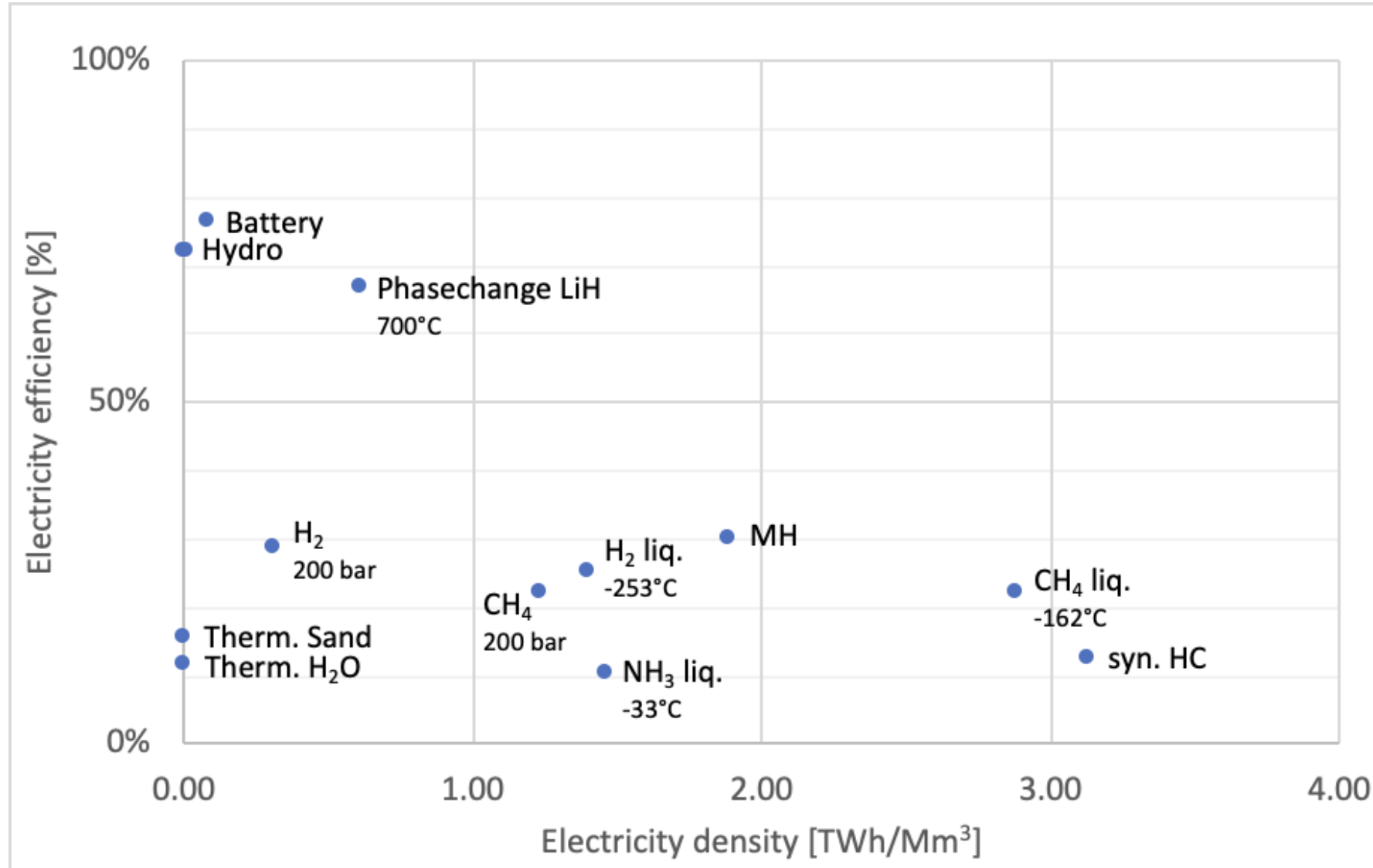
Batteriespeicher



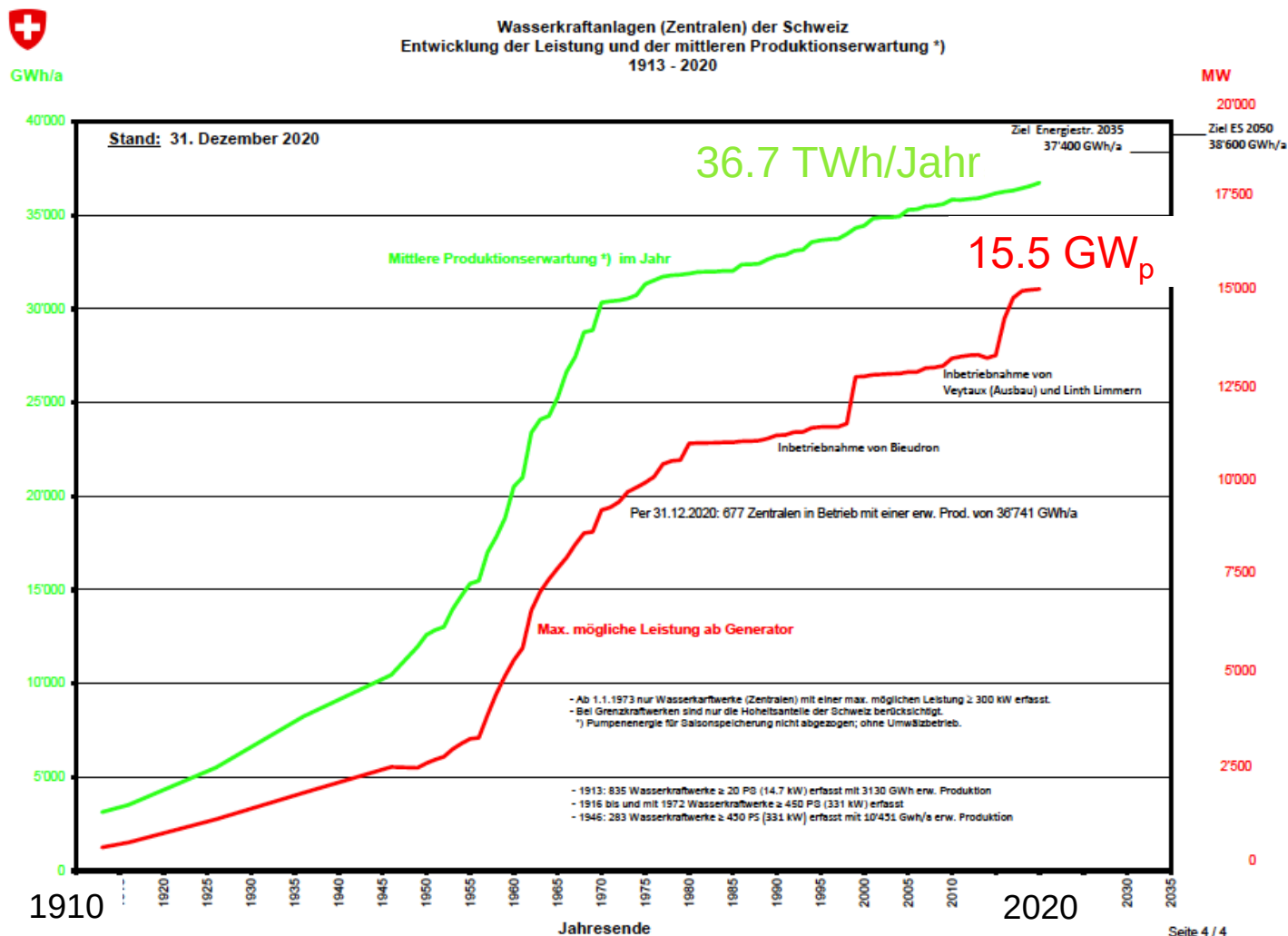
Kosten Batteriespeicher Tagesausgleich Sommer

- Kosten 6 Mio. CHF
 - Leistung 18 MW_e
 - Gespeicherte Energie 7.5 MWh_e
 - Masse 150 t
 - Fläche 450 m²
- > Leistungsbedarf ca. 25 GW_e (Mittagssonne) ergibt das ca. 1'400 Anlagen und Kosten von ca. 8 Mrd. CHF
- > Speicherbedarf ca. 2 TWh_e (kleiner Beitrag zur Winterlücke) ergibt ca. 270'000 Anlagen Kosten von ca. 1'600 Mrd. CHF

Vergleich Totalwirkungsgrad vs. Speicherdichte



Produktion und Leistung Wasserkraft



Total Produktion 36.7 TWh

Installierte Leistung 15.5 GW_p

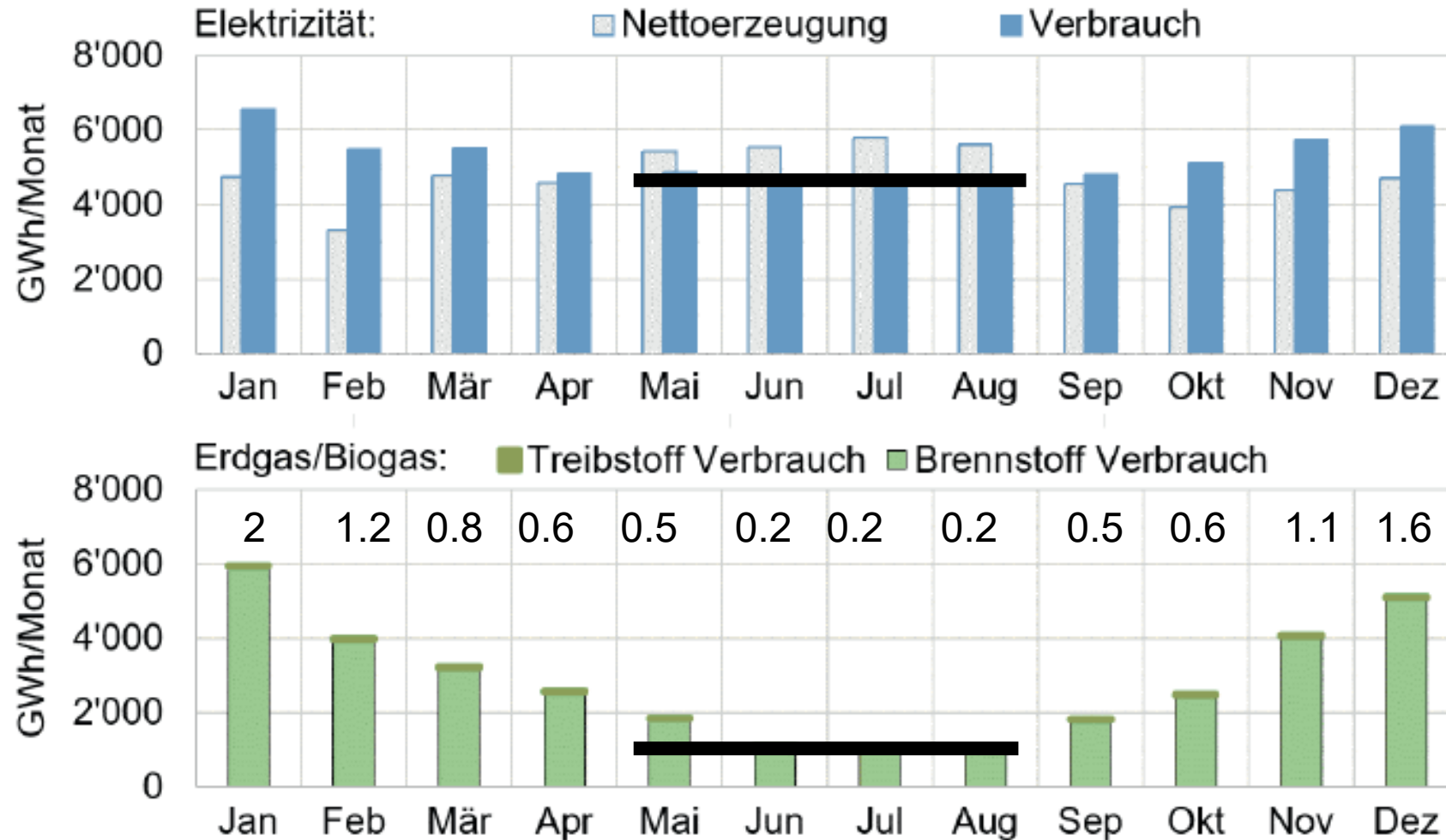
Davon 3.5 GW_p PSP-KW

Davon 3 GW_p in LW-KW

Rest SSP-KW und Kleinanlagen

Lastfaktor $36.7 \text{ TWh} / 135.7 \text{ TWh} = 0.27$

Monatsbetrachtung Schweiz Strom und Gas – Sommer



4'500 GWh/Monat entspricht

ca. 6.3 GW_e Dauerleistung

Zusätzlich:

1.40 GW_e für Mobilität

0.35 GW_e für Gasersatz

0.35 GW_e für Ölersatz

Sommer 2018 ≈ 8.4 GW_e

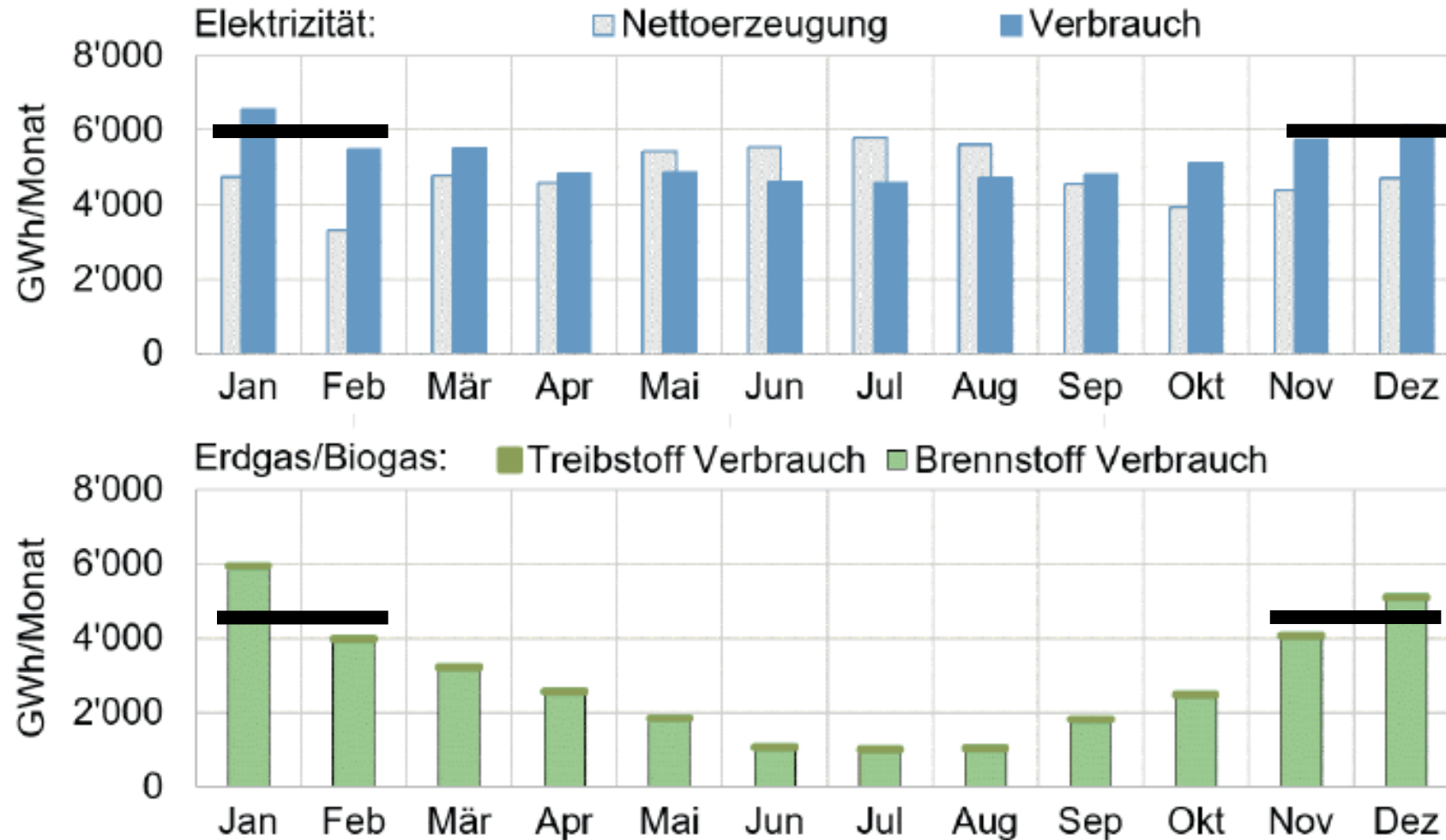
Sommer 2050 ≈ 9.3 GW_e

1'000 GWh_{th}/Monat entspricht

ca. 0.35 GW_e Dauerleistung

(Wärmepumpen mit COP 4)

Monatsbetrachtung Schweiz Strom und Gas – Winter



6'000 GWh/Monat entspricht
ca. 8.0 GW_e Dauerleistung

Zusätzlich:

1.6 GW_e für Mobilität
2.1 GW_e für Gasersatz
2.1 GW_e für Ölersatz

Winter 2018 ≈ 13.8 GW_e

Winter 2050 ≈ 13.4 GW_e

4'500 GWh_{th}/Monat entspricht
ca. 2.1 GW_e Dauerleistung
(COP 3.0), bis 2050 Isolation
Häuser ca. -50% Reduktion

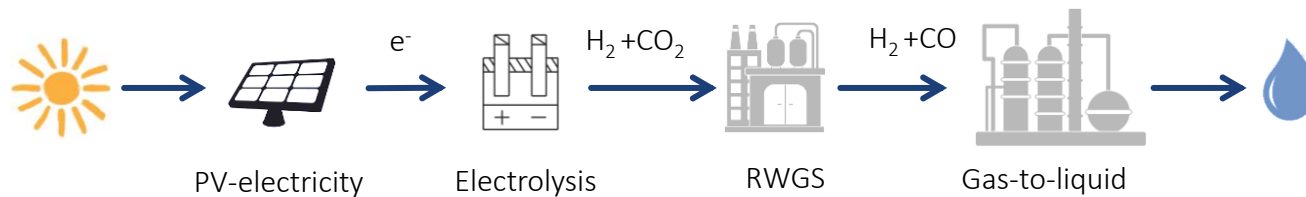
SynFuels – Viele Wege führen nach Rom

Major Pathways

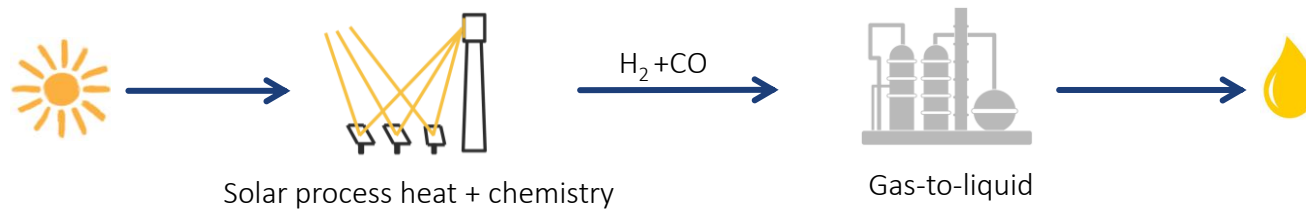
Bio-fuels



Electrochemistry



Thermochemistry (Synhelion)



Energy conv. efficiency	CO ₂ -reduction potential
< 1%	< 100%
~ 8%	100%
~ 18%	100%
> 30% (hybrid)	50% (hybrid)

Beispiel George Olah Plant, 2011



Nominale Kapazität
5 Mio. l MeOH pro Jahr

CO₂-Quelle: Abgase
der “Svartsengi
Power Station”

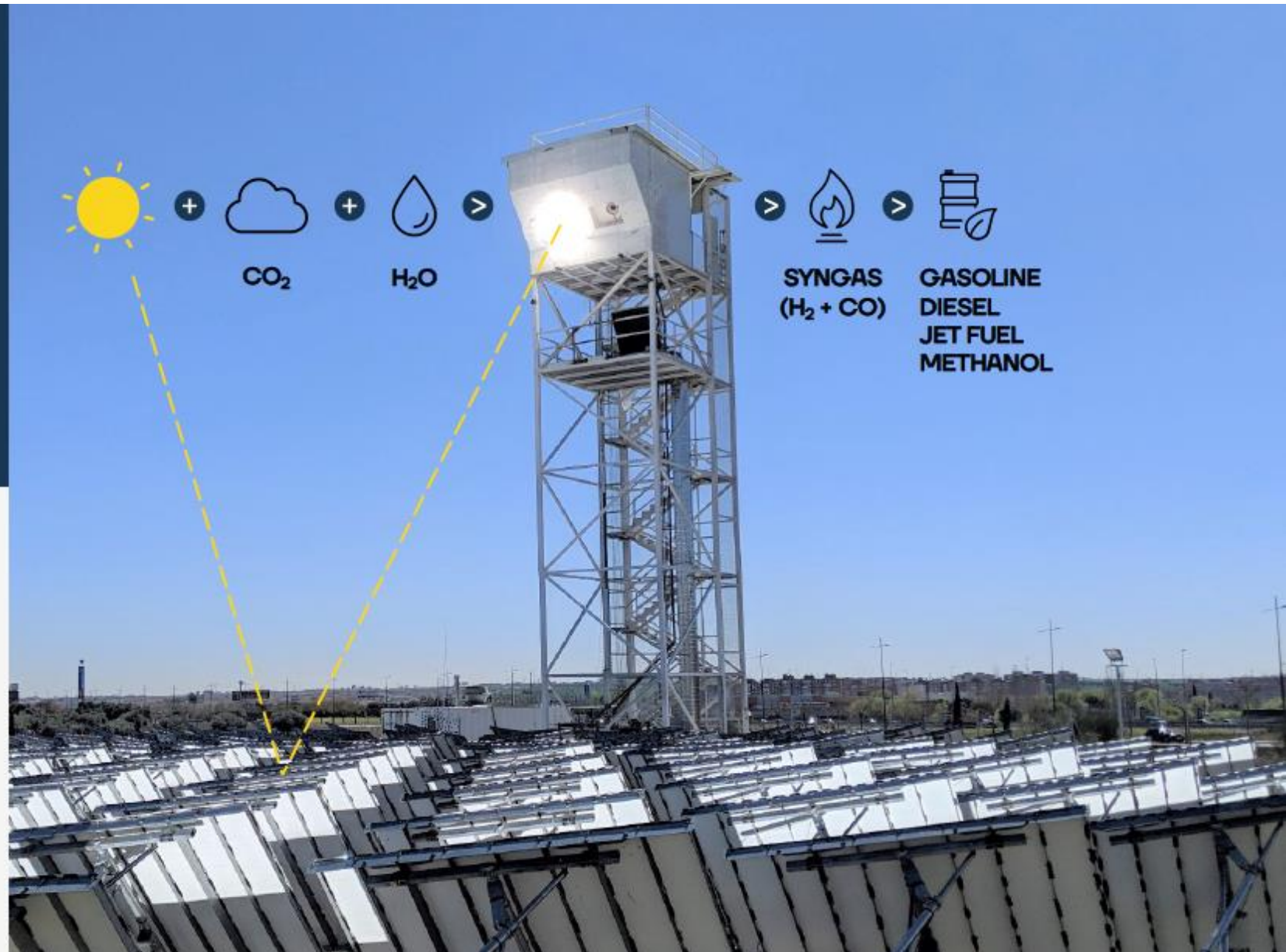
H₂-Quelle: Hydrolyse
mit CO₂-freiem Strom
(Geothermie)



Synhelion technology

WE TURN CO_2
INTO FUEL.

Synhelion uses
solar heat to
convert CO_2 and
 H_2O into synthetic
fuels – so-called
solar fuels.



CO₂ – Woher nehmen?

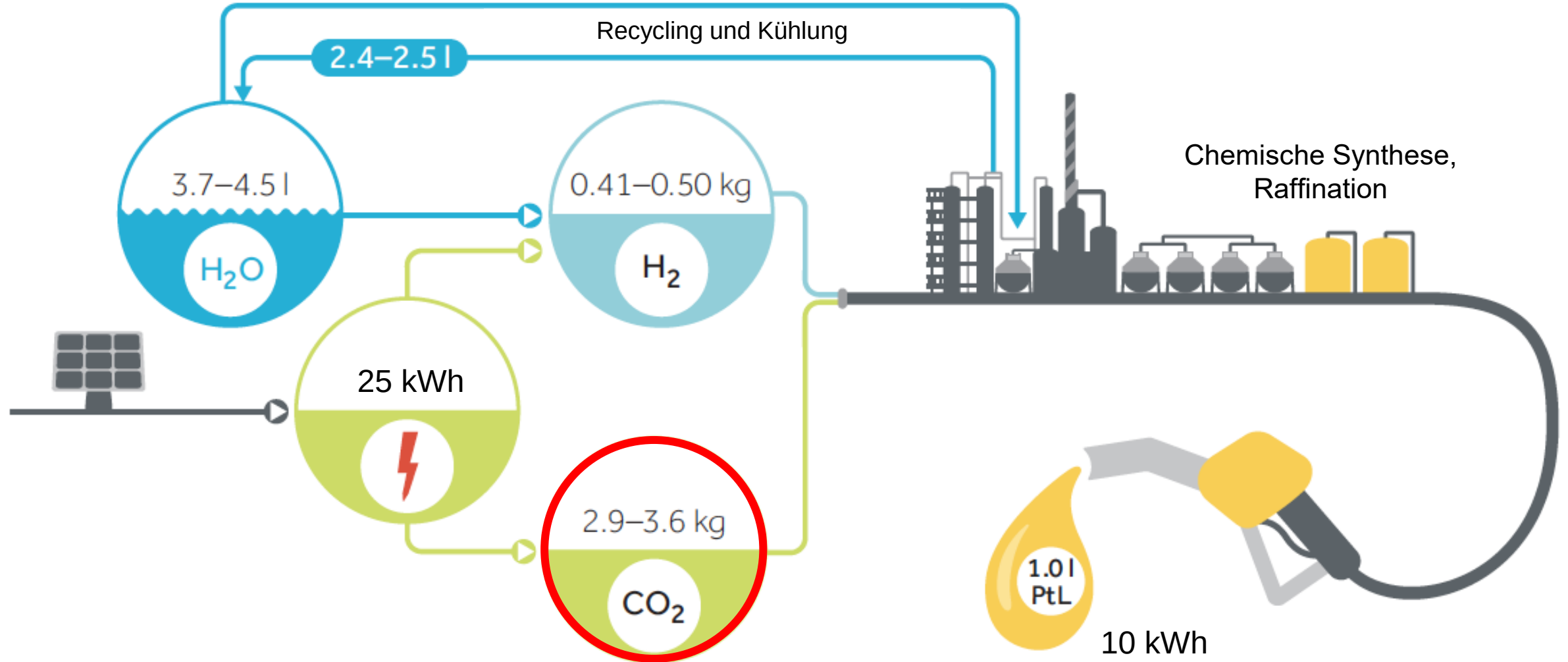


«Power-Diesel-Power»

Source: Shell (2018a)

Totaler Wirkungsgrad: $\frac{10}{25} \cdot 0.6 = 0.24$

Strombedarf im Sommer 14 TWh_e / 0.24 = 58 TWh_e



Widerstandsheizungen Schweiz

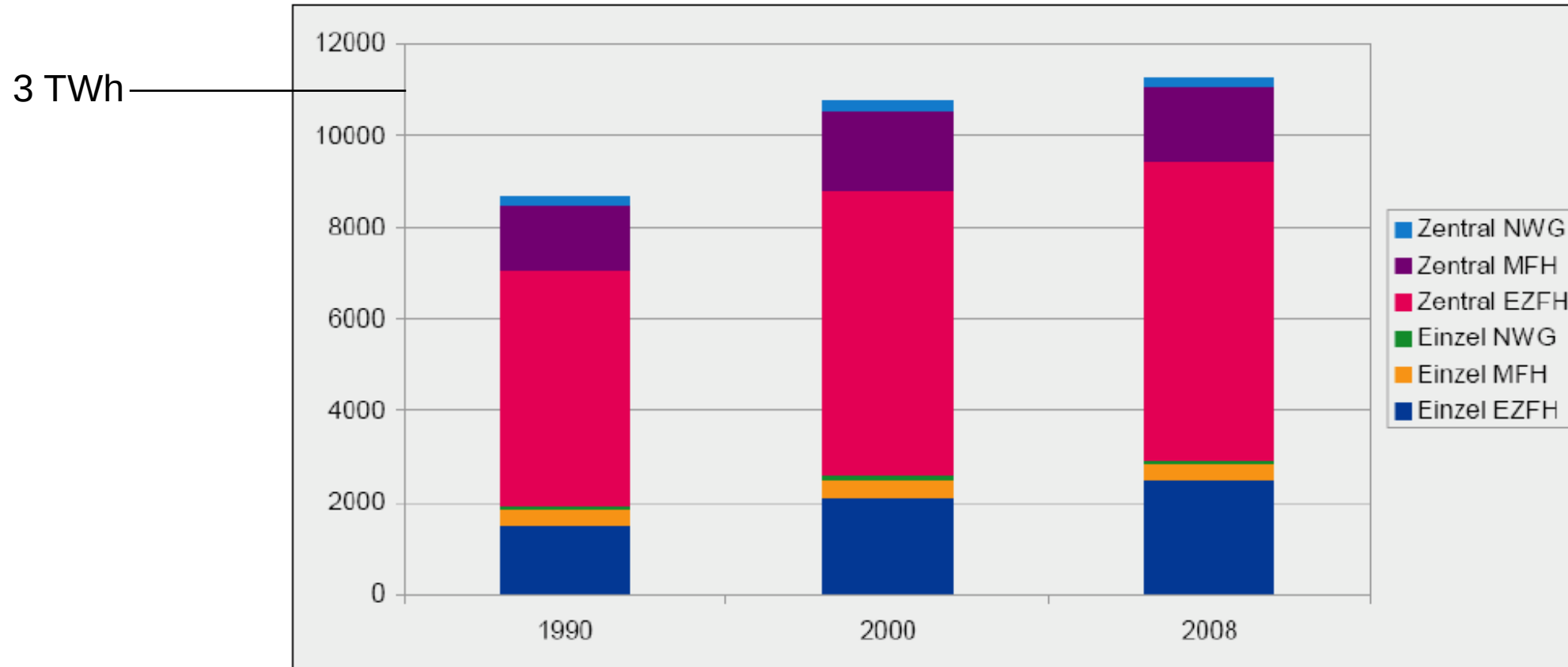


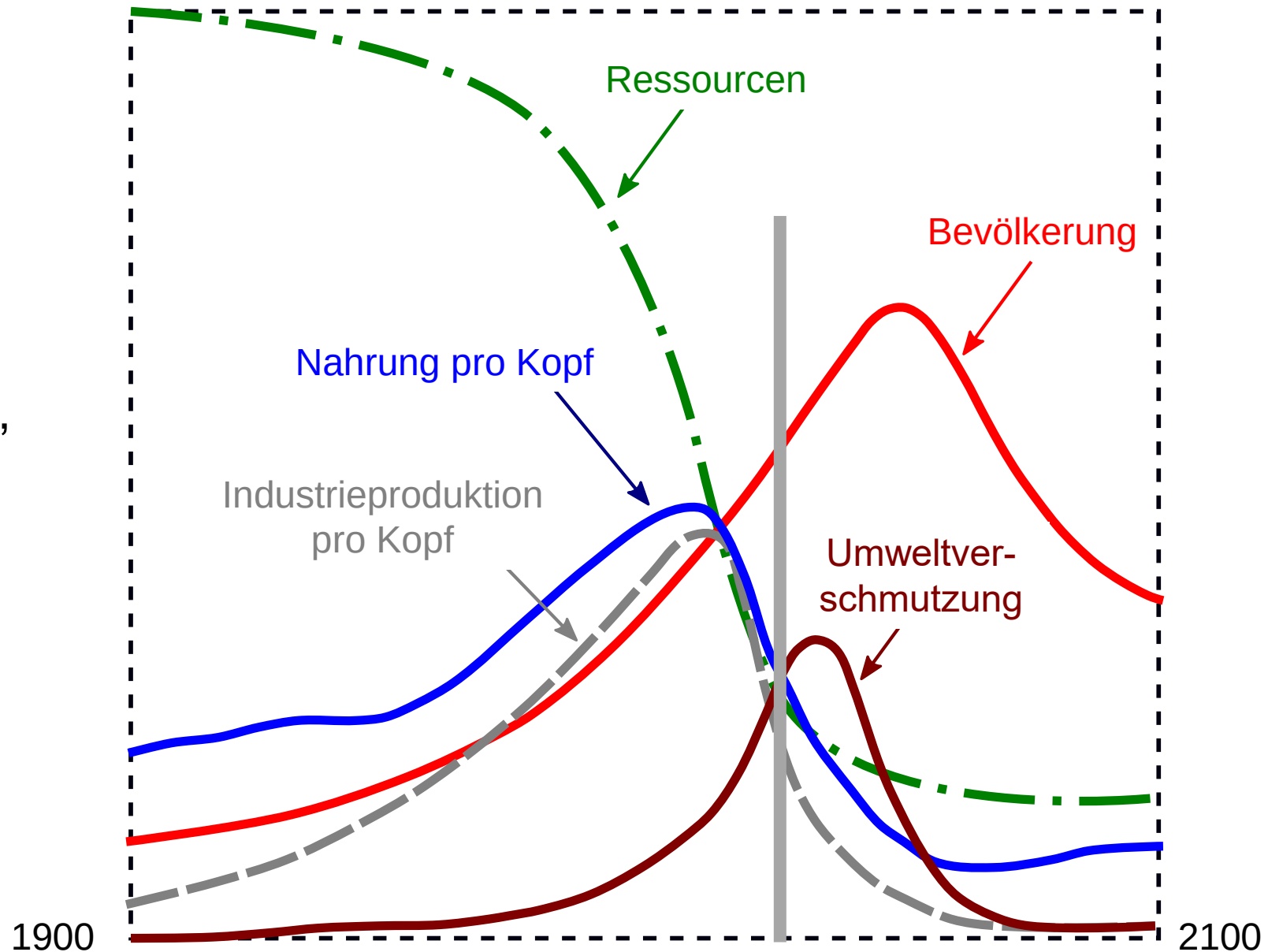
Fig. 16 Endenergieverbrauch durch elektrische Widerstandsheizungen, nach Heizungssystem und Gebäudetyp (in TJ) . NWG = Nichtwohngebäude. Quelle: Prognos [2]

... besonders wenn sie die Zukunft betreffen

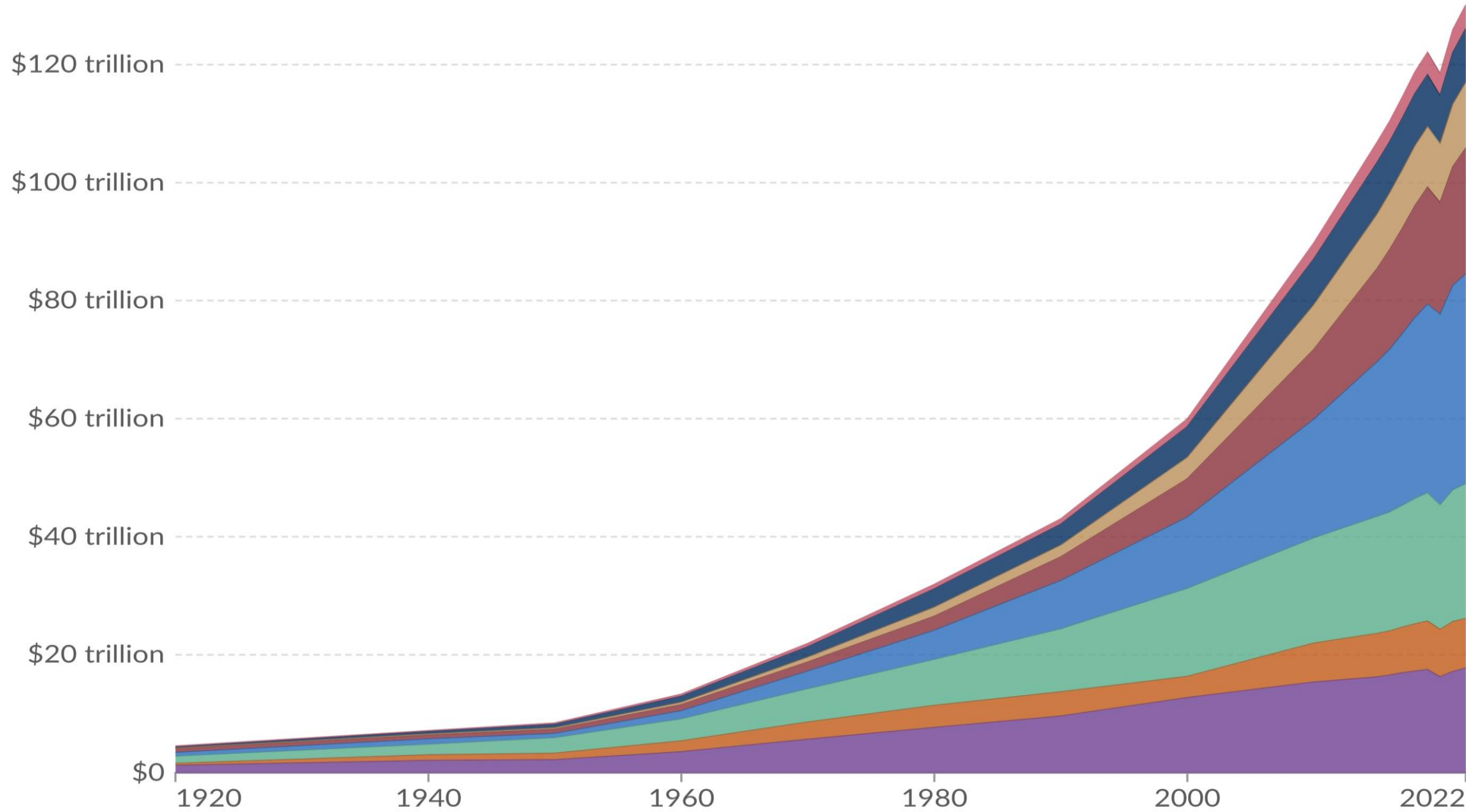
Club of Rome

*“Die Grenzen
des Wachstums”*

1972



Globale Entwicklung BIP



<https://ourworldindata.org>

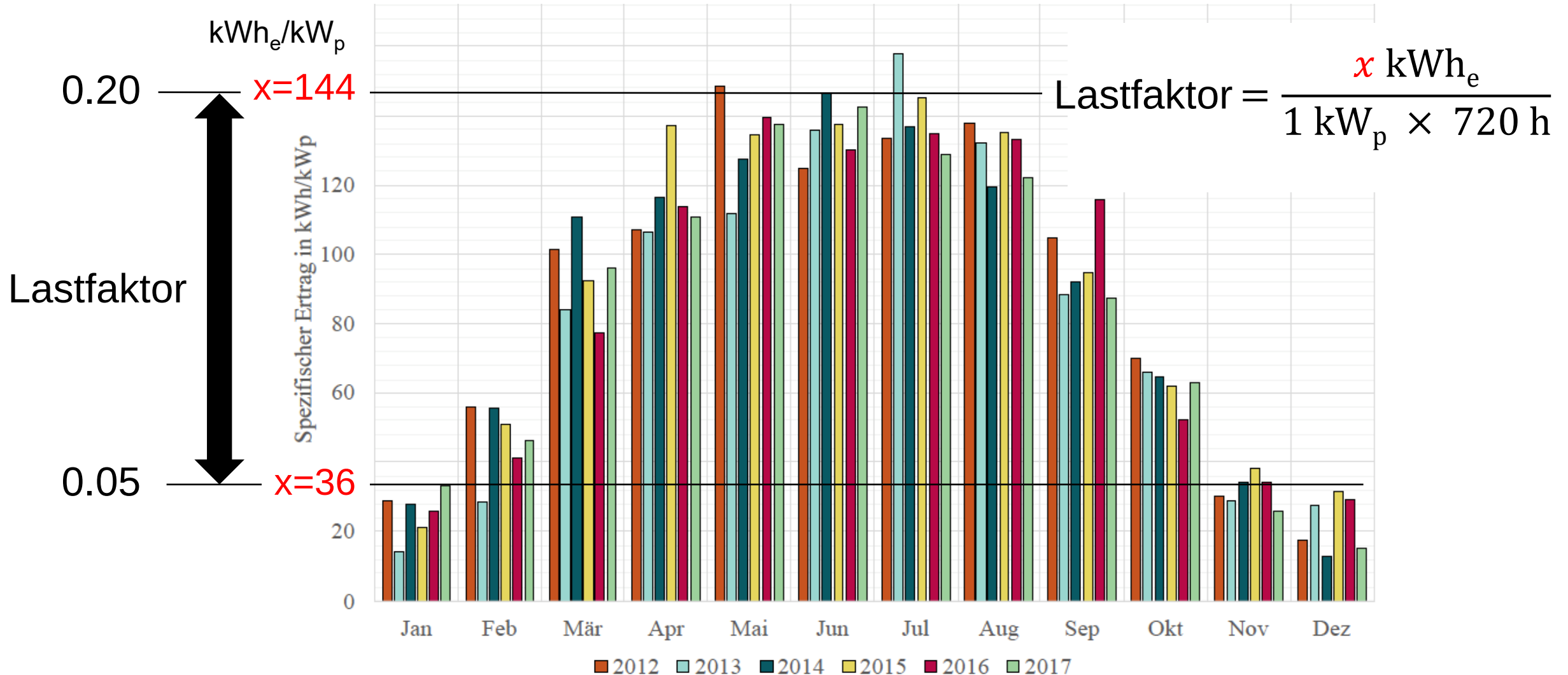
Abschätzung jährlicher Strombedarf CH – 2050

- Annahmen:
- Gebäude werden so weit wie möglich isoliert, Wärmebedarf statt heute 60 TWh nur noch 30 TWh
 - Alle Raumwärme wird durch Wärmepumpen erzeugt mit COP von 3.5 (gewichtetes Jahresmittel), $30 \text{ TWh} / 3.5 \approx 9 \text{ TWh}$
 - Mobilität rein elektrisch, 5 Mio. Autos, 20 kWh/100 km, 12'000 km/Jahr $\approx 12 \text{ TWh}$
 - Bevölkerungswachstum, neue Anwendungen, ... führen zu Wachstum (CAGR) von 0.35% pro Jahr, bis 2050 $\approx 6 \text{ TWh}$

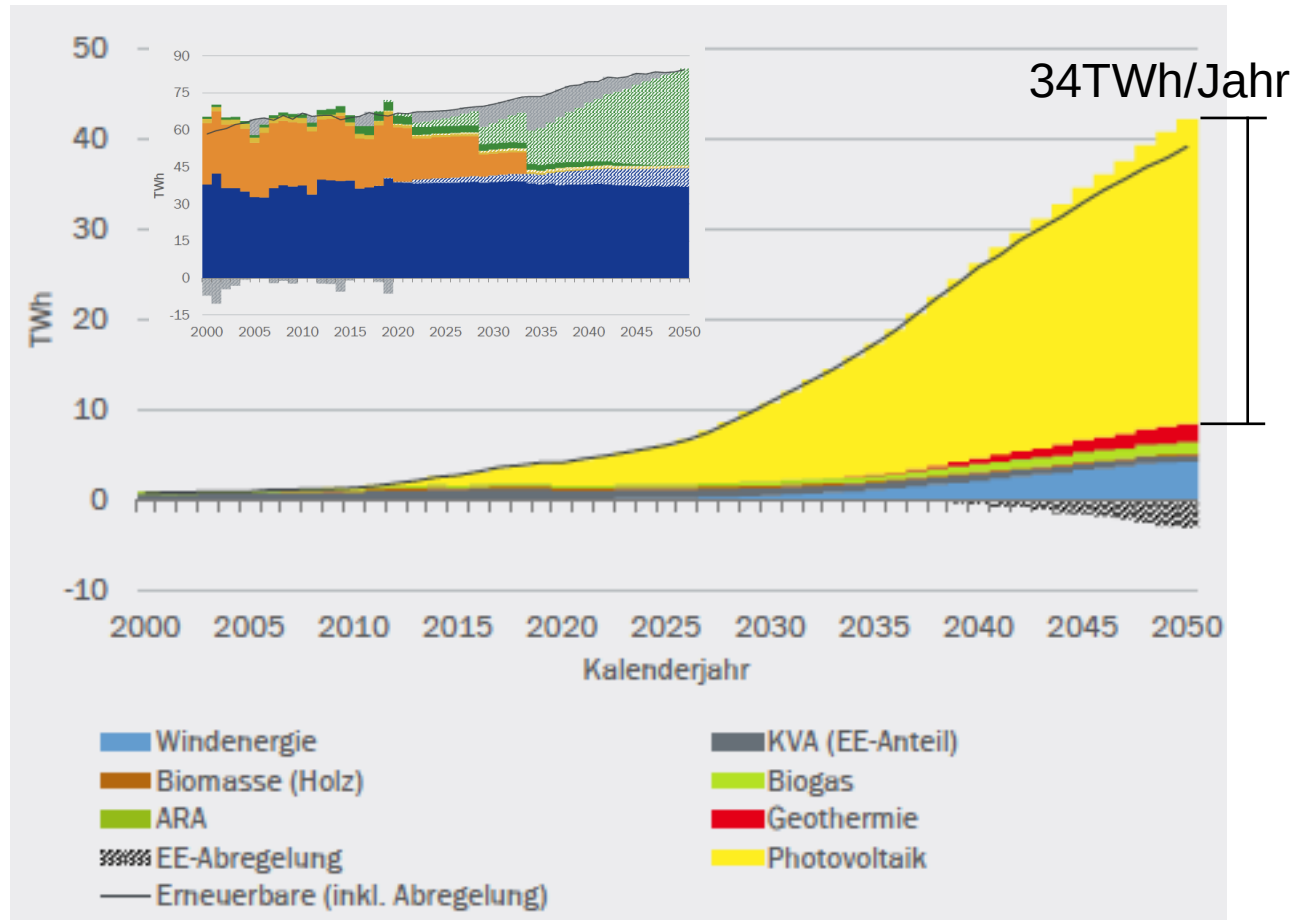
Beachte: Sommer $\approx 6.5 \text{ TWh/Monat}$, Winter $\approx 9.5 \text{ TWh/Monat}$

«Winter» hier die vier Monate 1. November bis 28. Februar

Lastfaktoren PV – Monatsdurchschnitt (Mittelland)



Energie und Leistung von PV – Jahresbetrachtung



PV-Anlagen CH, Jahr 2020

Installierte Leistung: 2.9 GW

Generierte elektrische Energie: 2'750 GWh/Jahr

Lastfaktor: $2'750 \text{ GWh} / (2.9 \text{ GW} \times 365 \times 24) = 0.11$

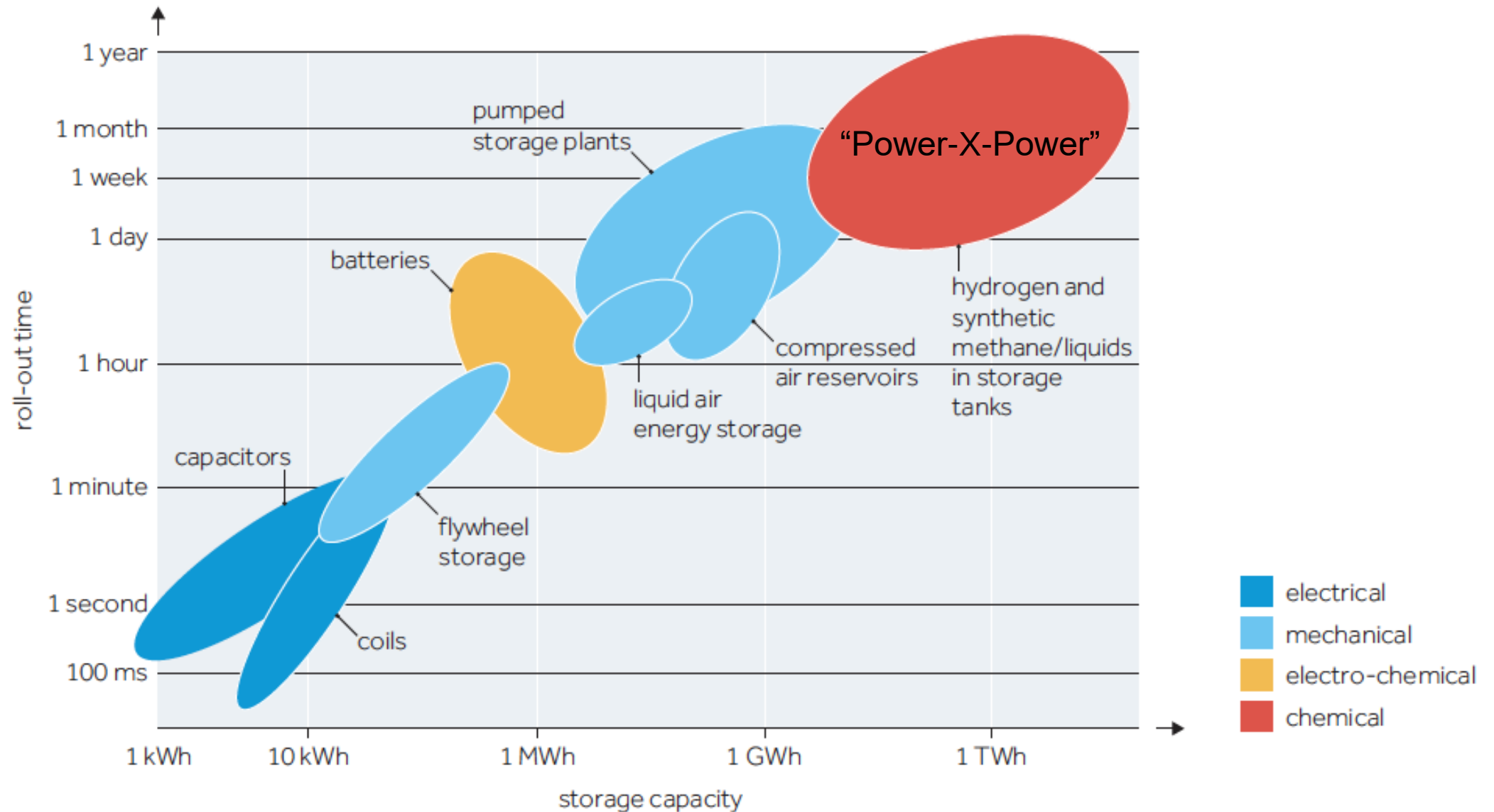
Quelle: Swissolar, Faktenblatt, 2021

PV-Anlagen CH, Prognosejahr 2050

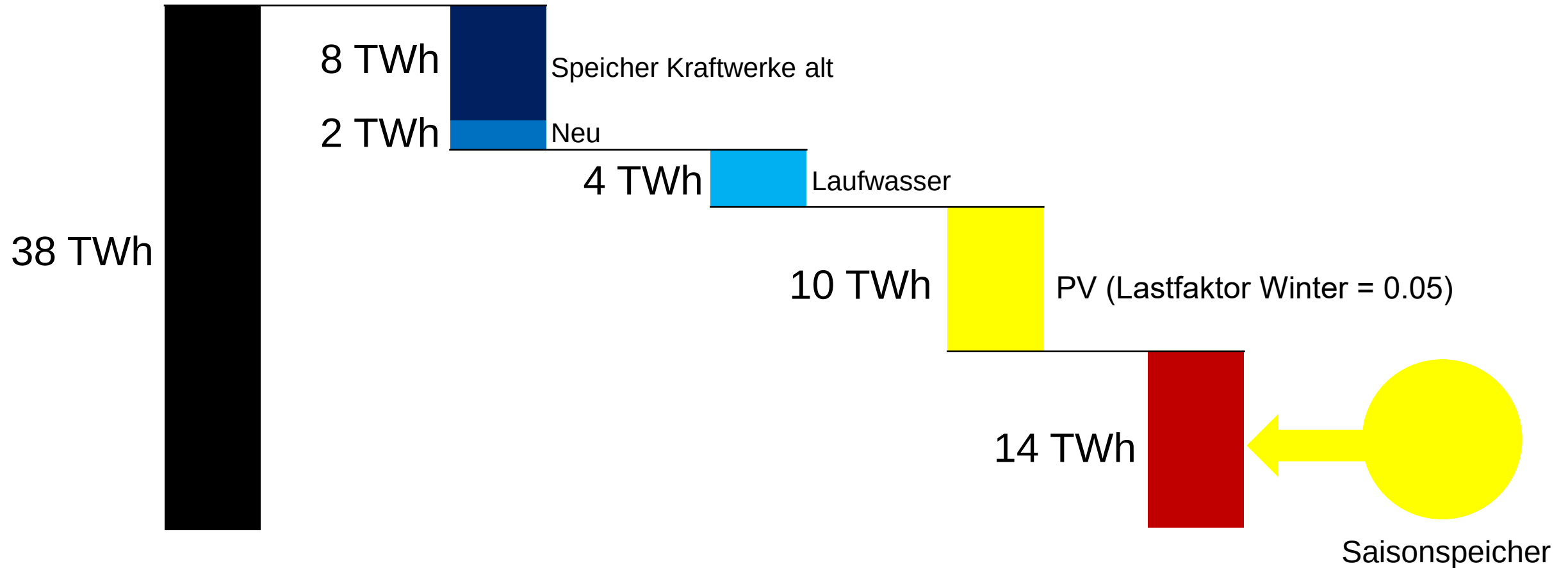
$$\frac{2.9 \text{ GW} \times 34 \text{ TWh}}{2.75 \text{ TWh}} = 36.0 \text{ GW}$$

Quelle: Szenarienrechnungen Ecoplan, TEP, Infras und Prognos

Saisonale Speicherung elektrischer Energie



Auslegeordnung Winter – 70 GW PV im Mittelland



Saisonspeicher mit Wasserstoff H₂

Überschuss im
Sommer 35 TWh

CO₂-neutraler Strom

Entspricht 70 GW PV

Elektrolyse

Verdichtung

H₂

Speicher 35 Millionen m³
(bei 250 bar), oder 700 Millionen
50 l Druckflaschen

Speicher 23 TWh

Brennstoffzelle

Deckung 14 TWh
Winterlücke

CO₂-neutraler Strom



Prognose Stromkosten Kalifornien

Clean-Air Task Force Report, 2018

Aktuell



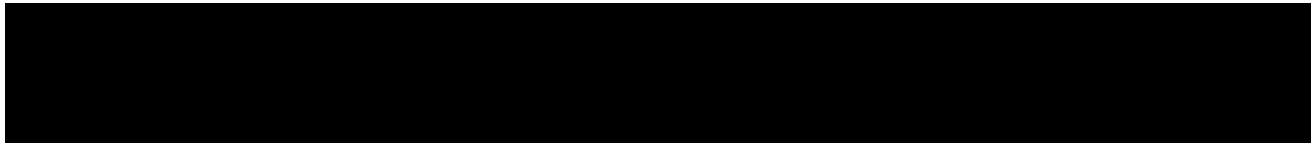
50% Erneuerbar



80% Erneuerbar



100% Erneuerbar

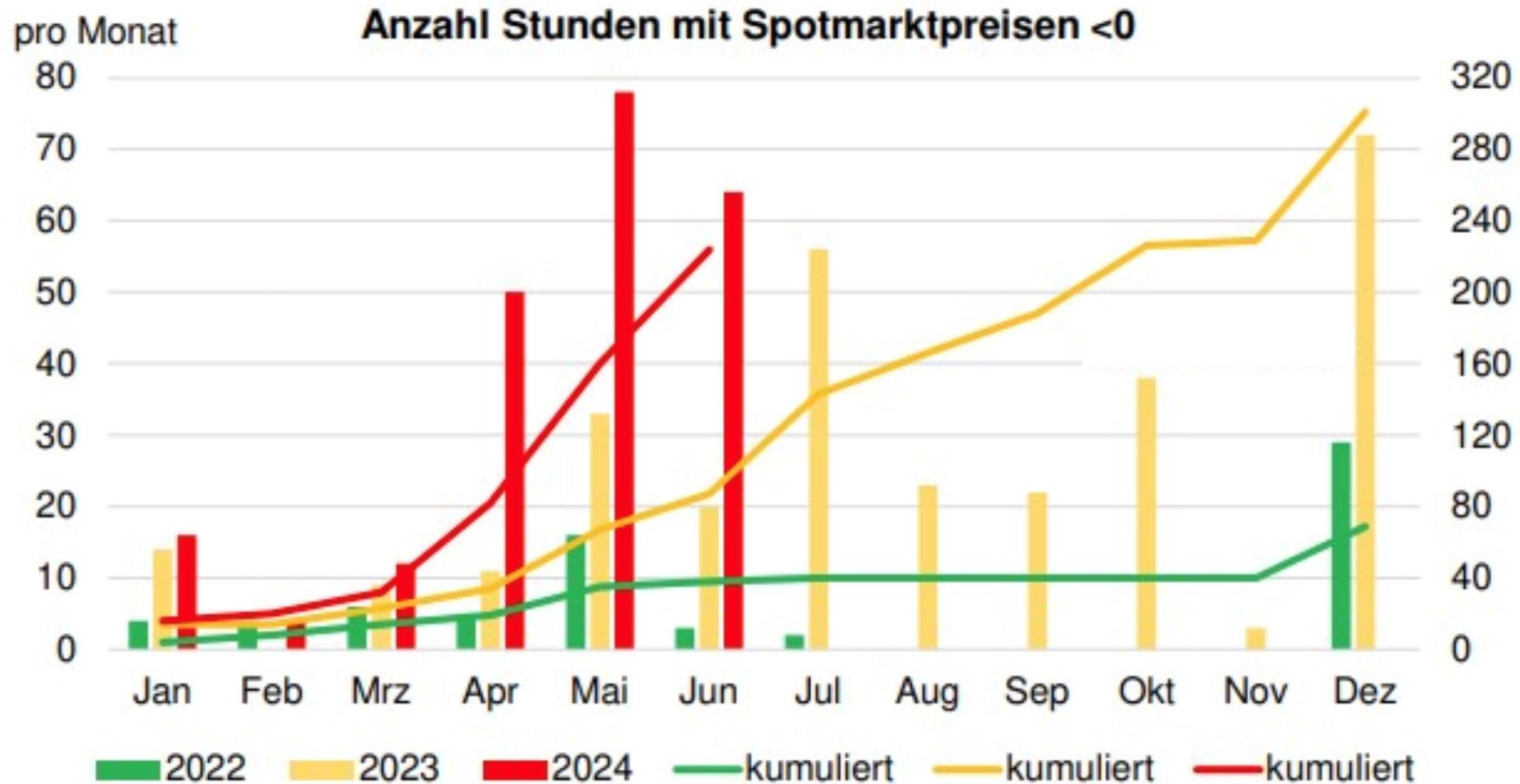


\$ 0/MWh_e



\$ 1'000/MWh_e

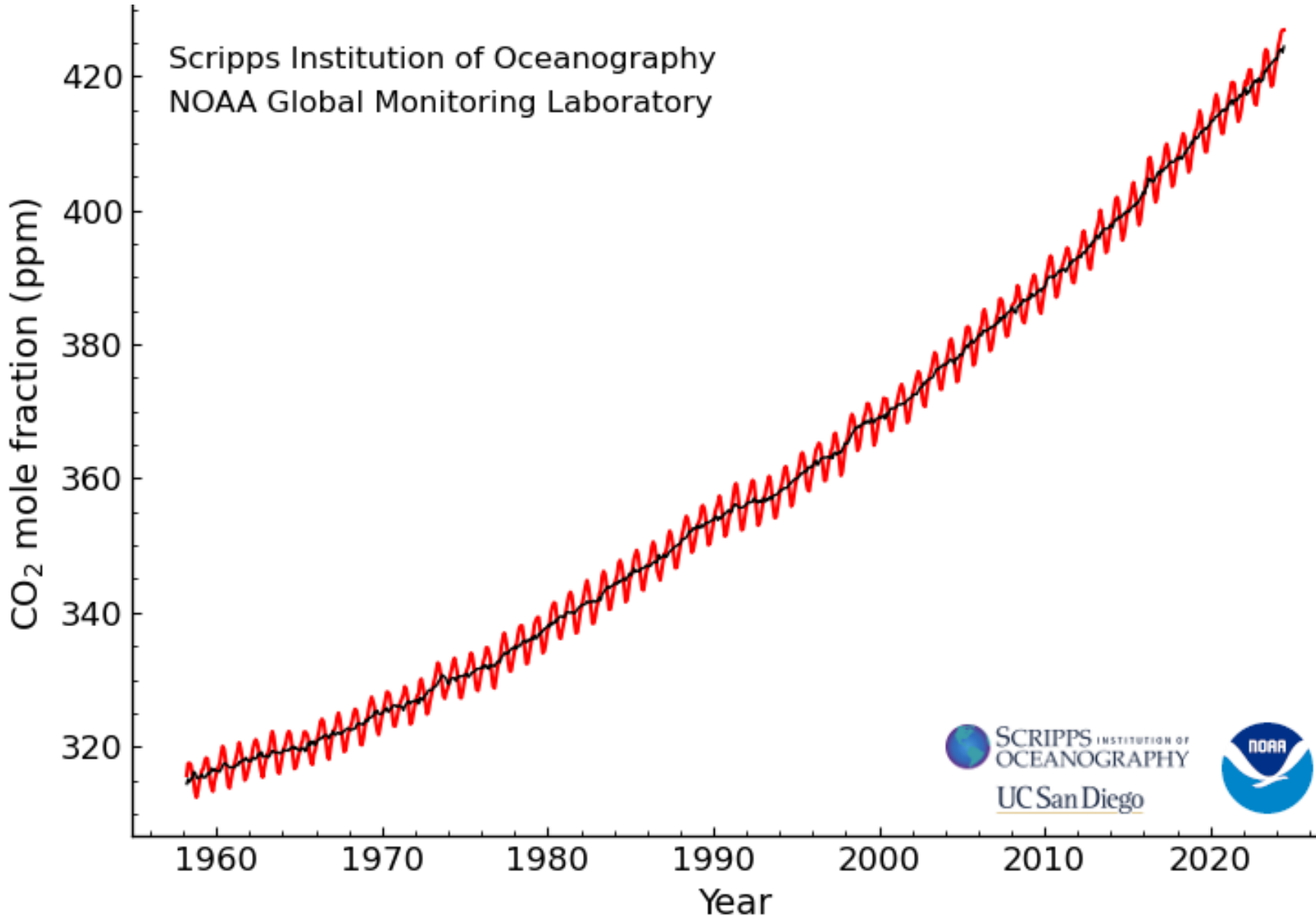
Anzahl Stunden mit negativen Strompreisen D



Quelle: Kurzstudie "Auswirkungen der Maßnahmen aus der 'Wachstumsinitiative' der Bundesregierung auf die Häufigkeit negativer Strompreise im deutschen Kurzfristmarkt" der TU Darmstadt, 2024

Pro memoria: Was ist das Problem?

CO₂ Konzentration in der Atmosphäre



It's the economy, stupid ...” (Bill Clinton, 1992)

