

sgv  *usam*

Energieversorgung Schweiz

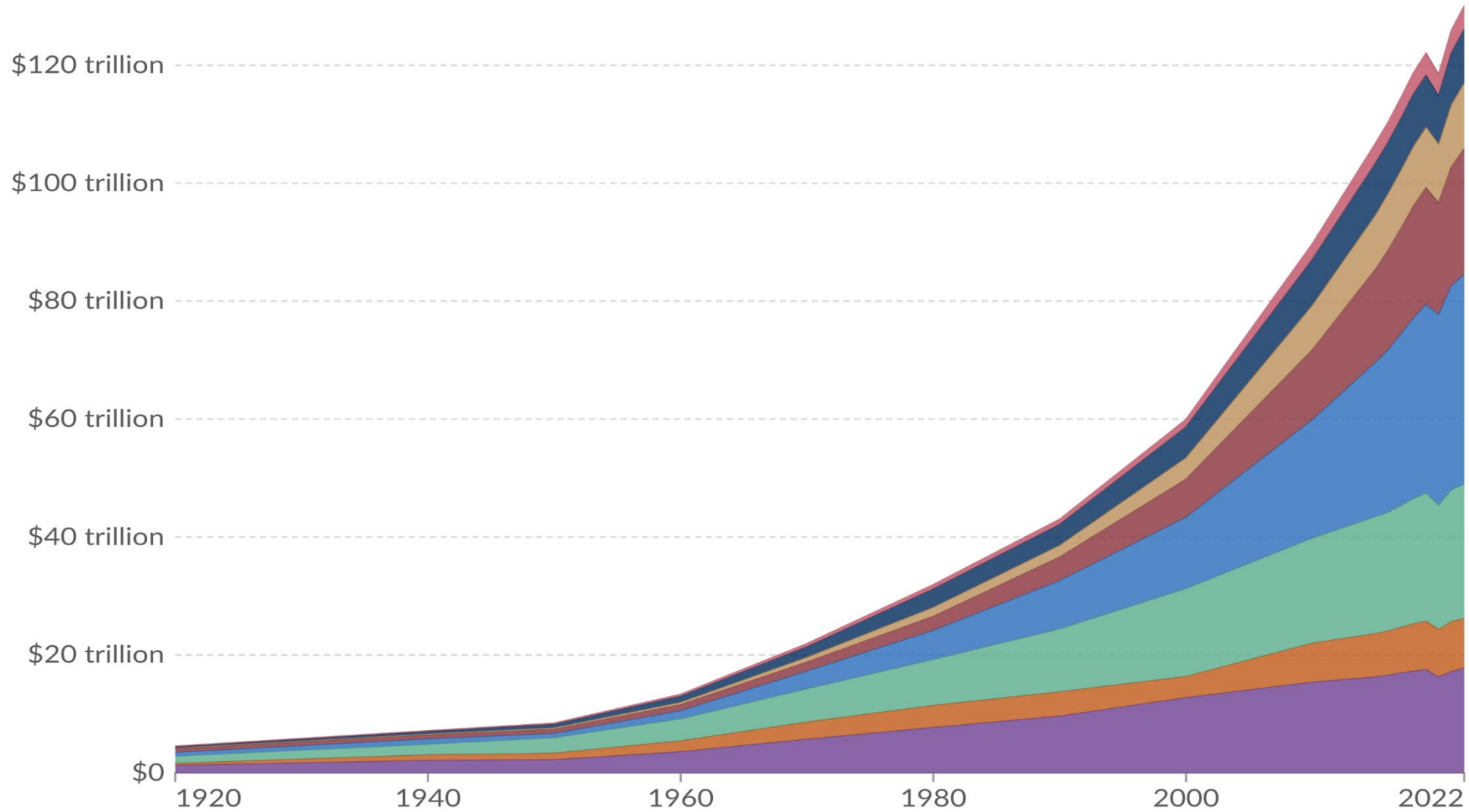
Der Versuch einer Auslegeordnung

16. Januar 2025, Klosters

Lino Guzzella, 50' + 10' Q&A

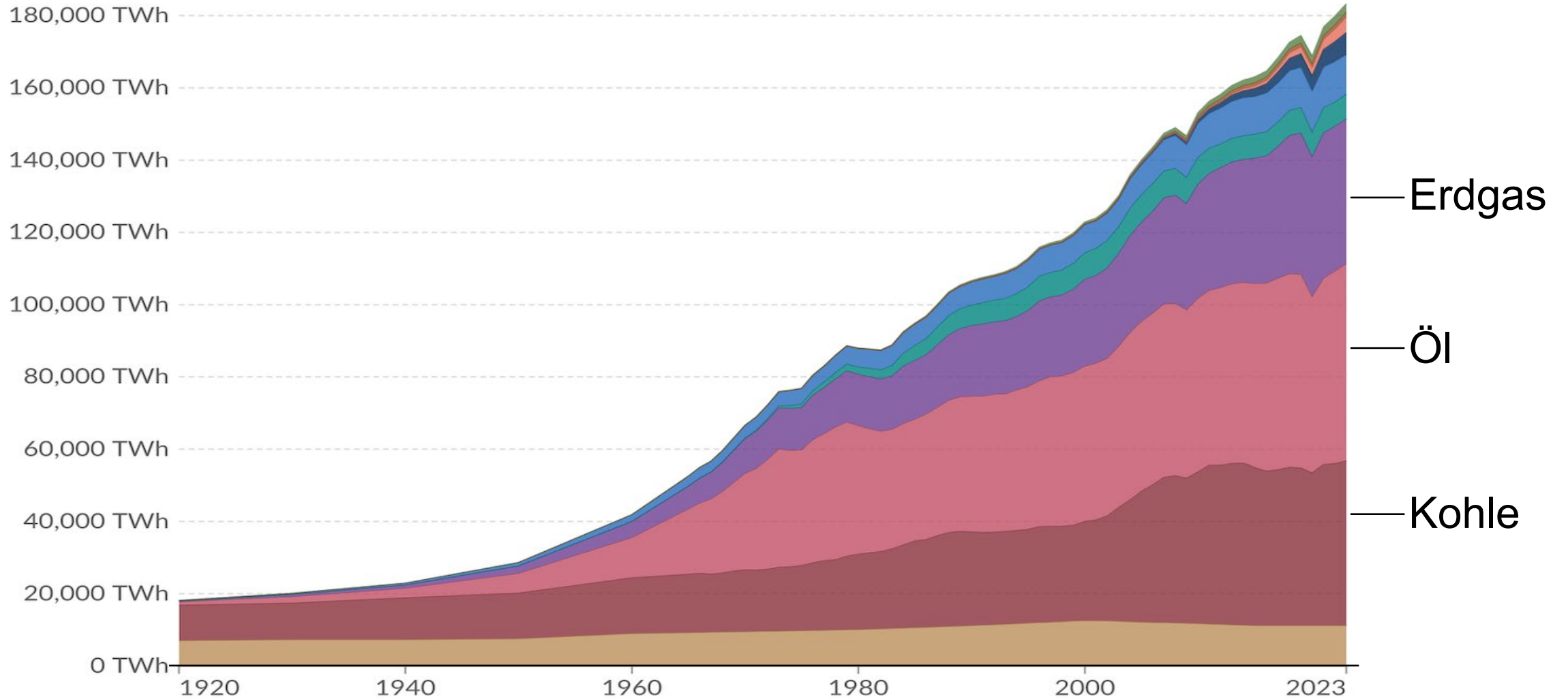
Ohne Energie kein Wohlstand

Globale Entwicklung BIP



<https://ourworldindata.org>

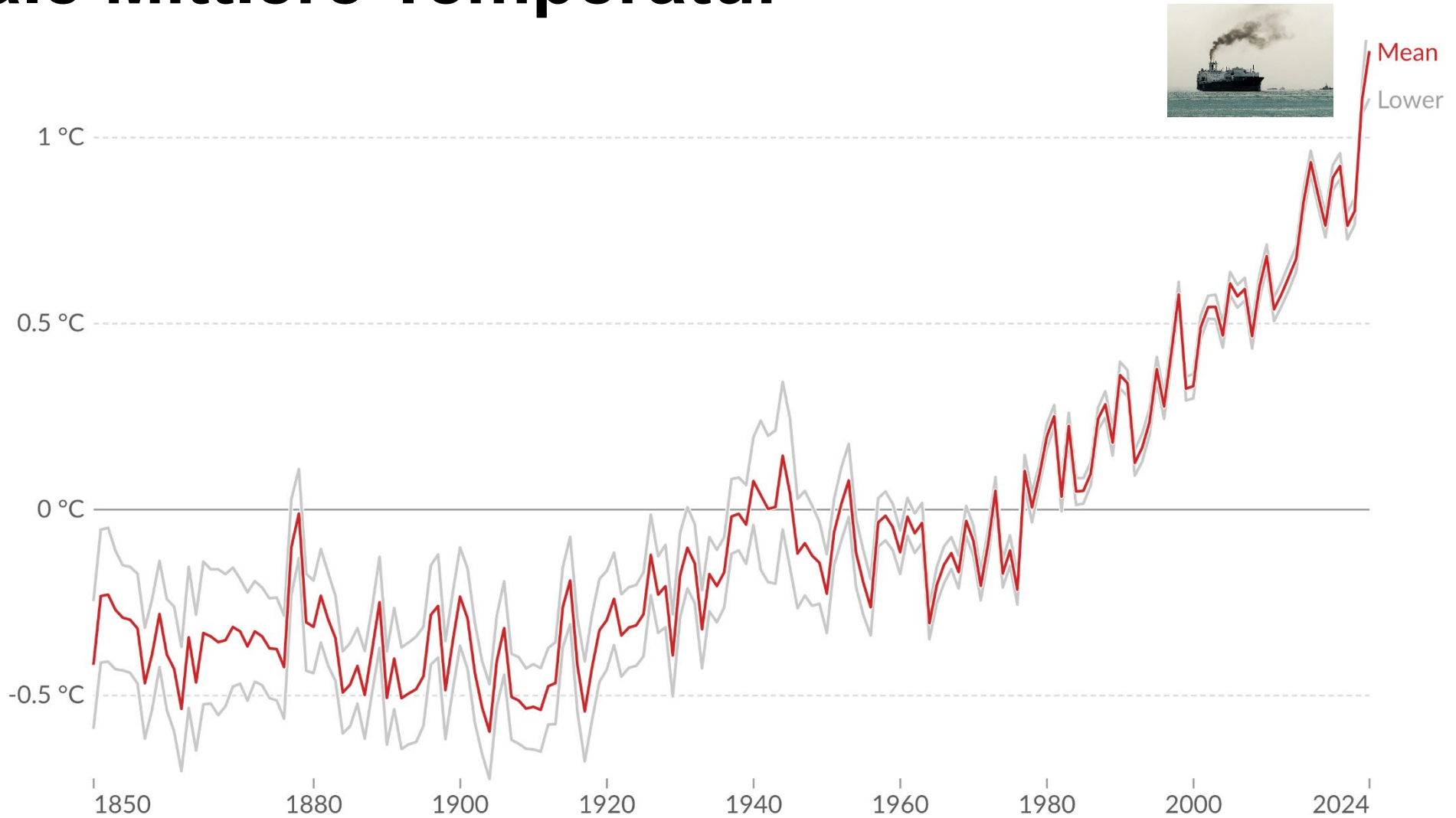
Globaler Verbrauch von Primärenergieträger



<https://ourworldindata.org>

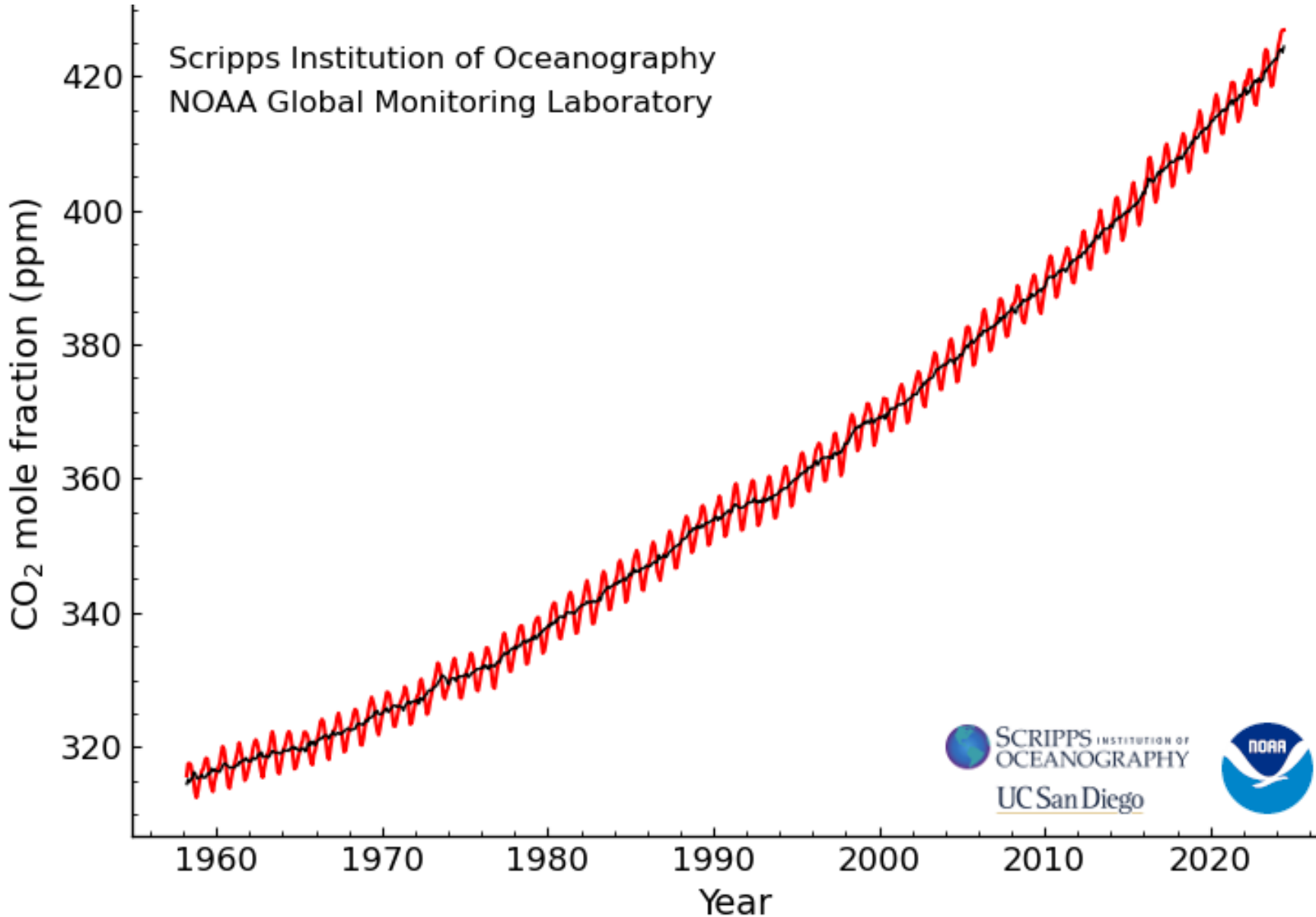
Das Klima verändert sich

Globale Mittlere Temperatur

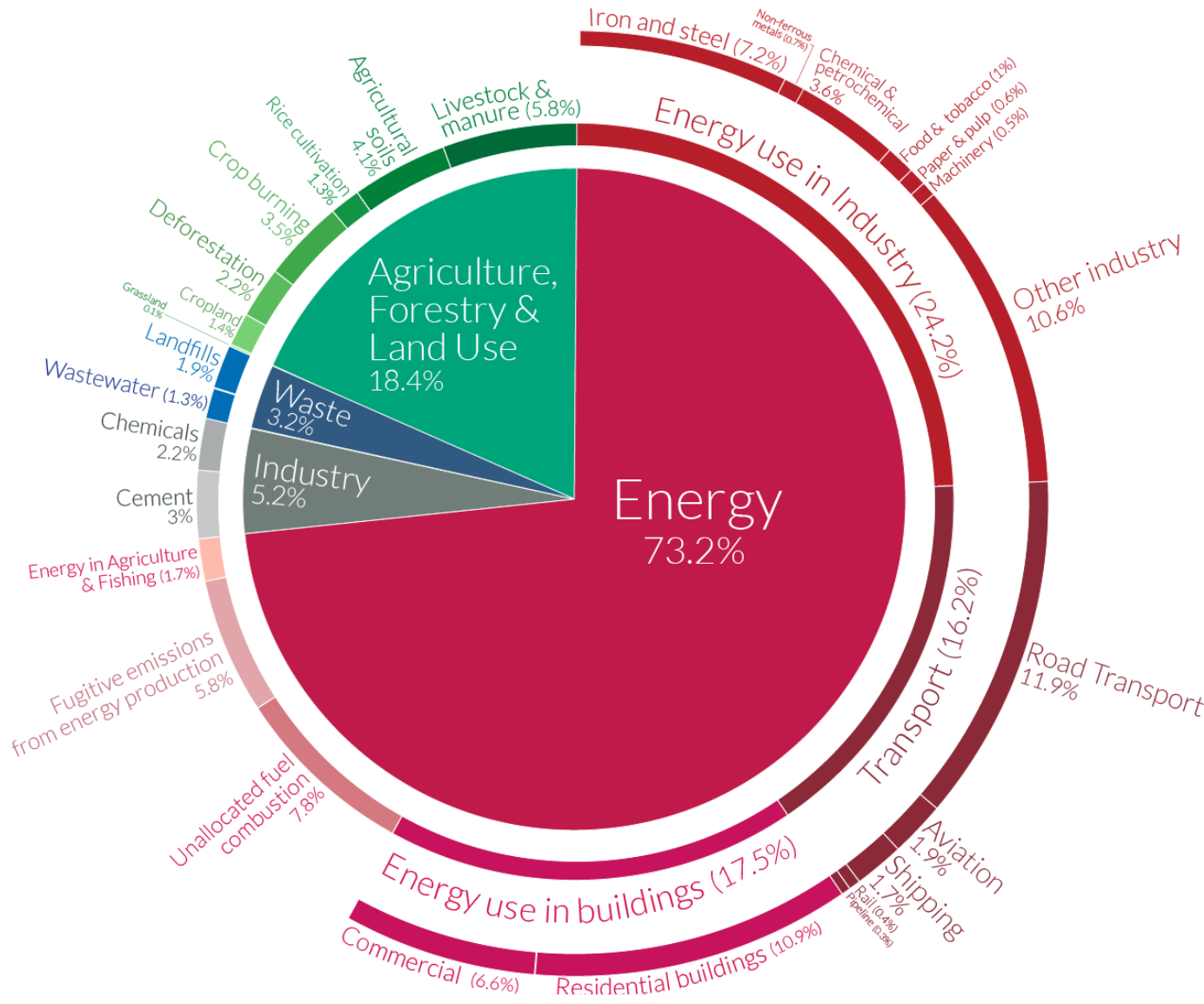


Source: <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01442-3>

CO₂ Konzentration in der Atmosphäre

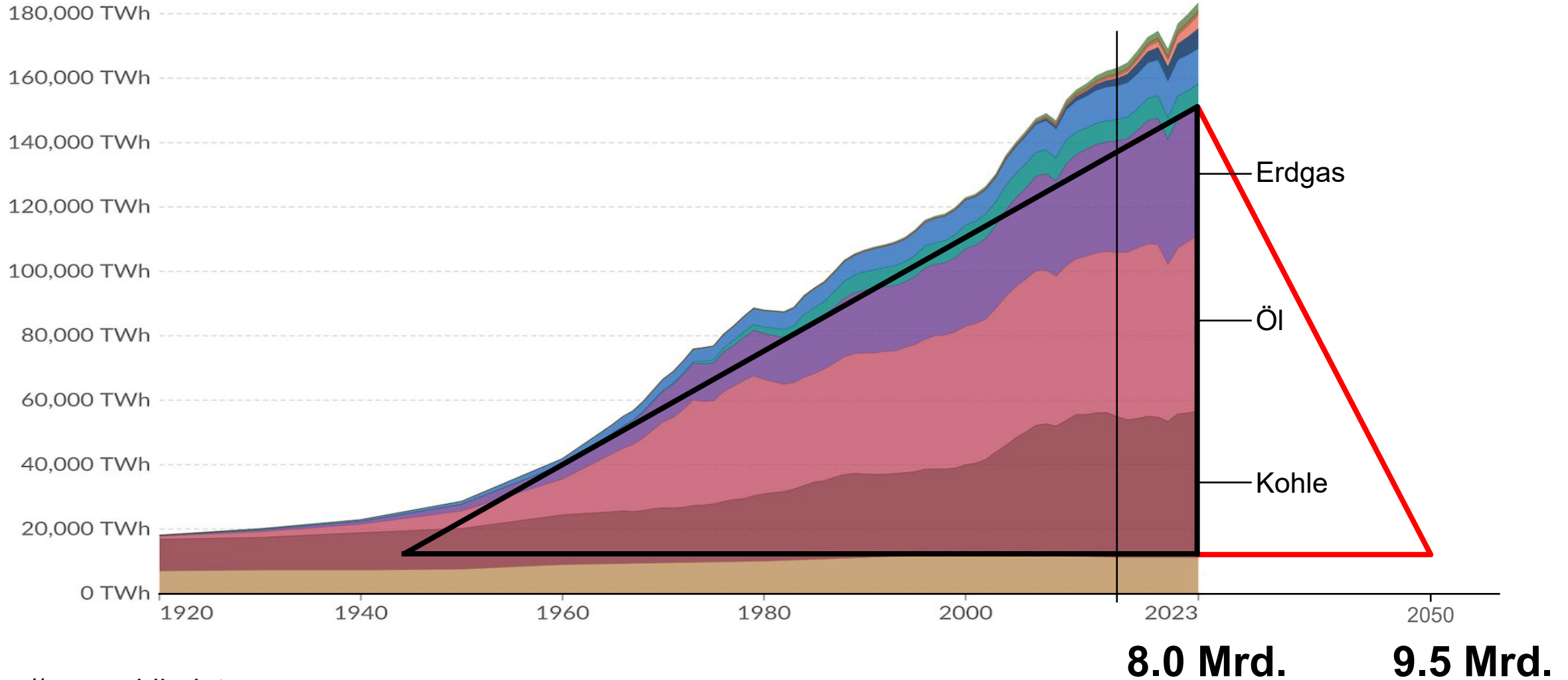


Anthropogene CO₂-Emissionen (2020)



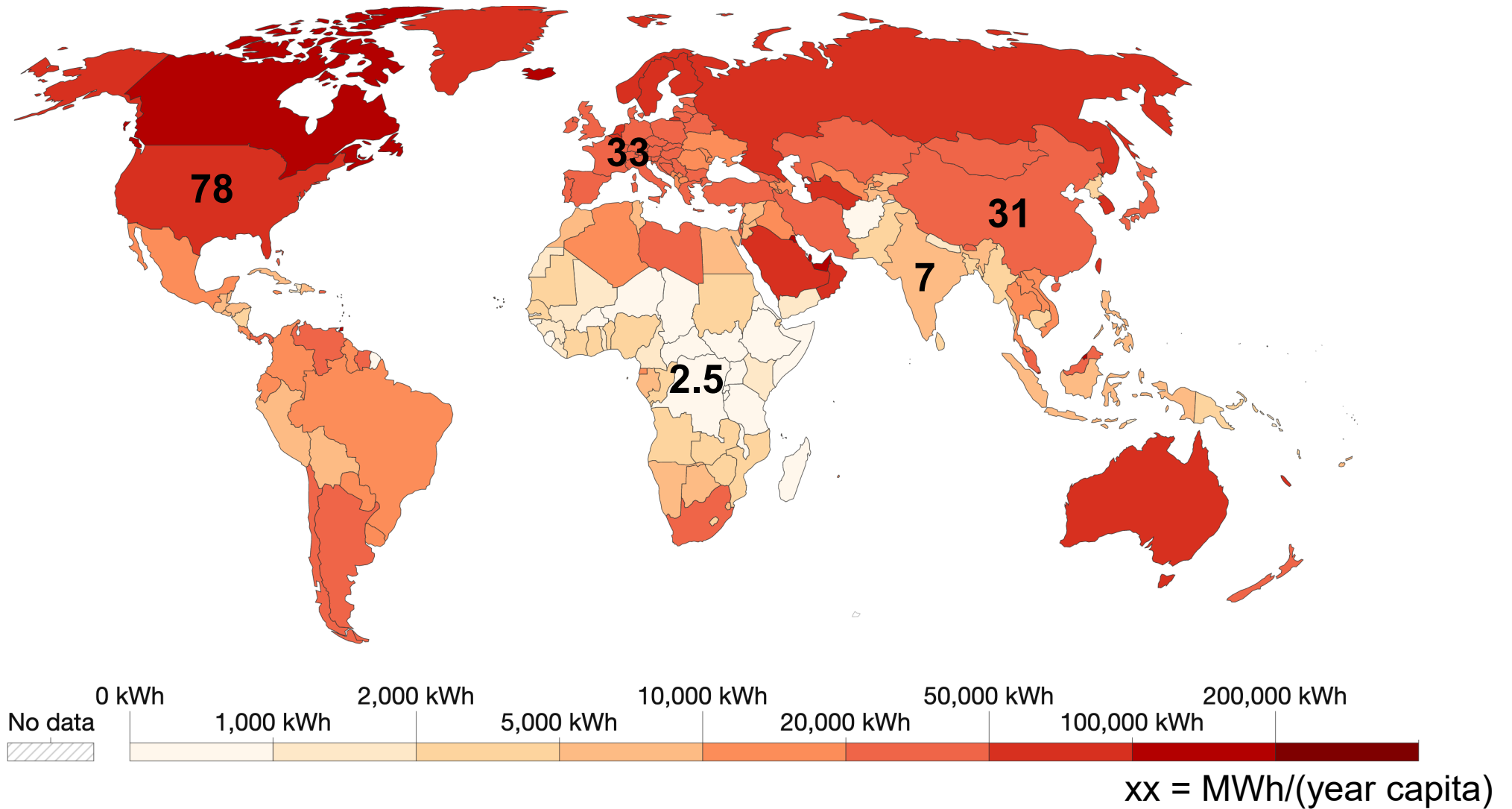
Die Ziele der COP 21 (Paris, 2015)

Weitgehende Defossilisierung bis 2050



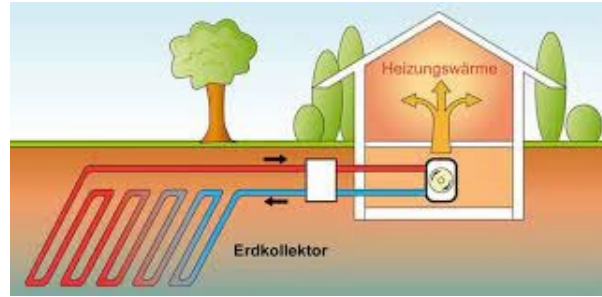
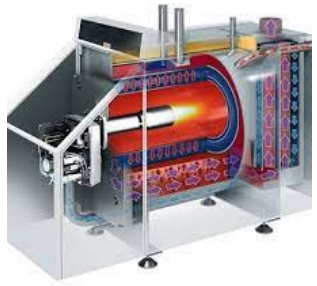
<https://ourworldindata.org>

Welt – Primärenergieverbrauch pro Kopf und Jahr

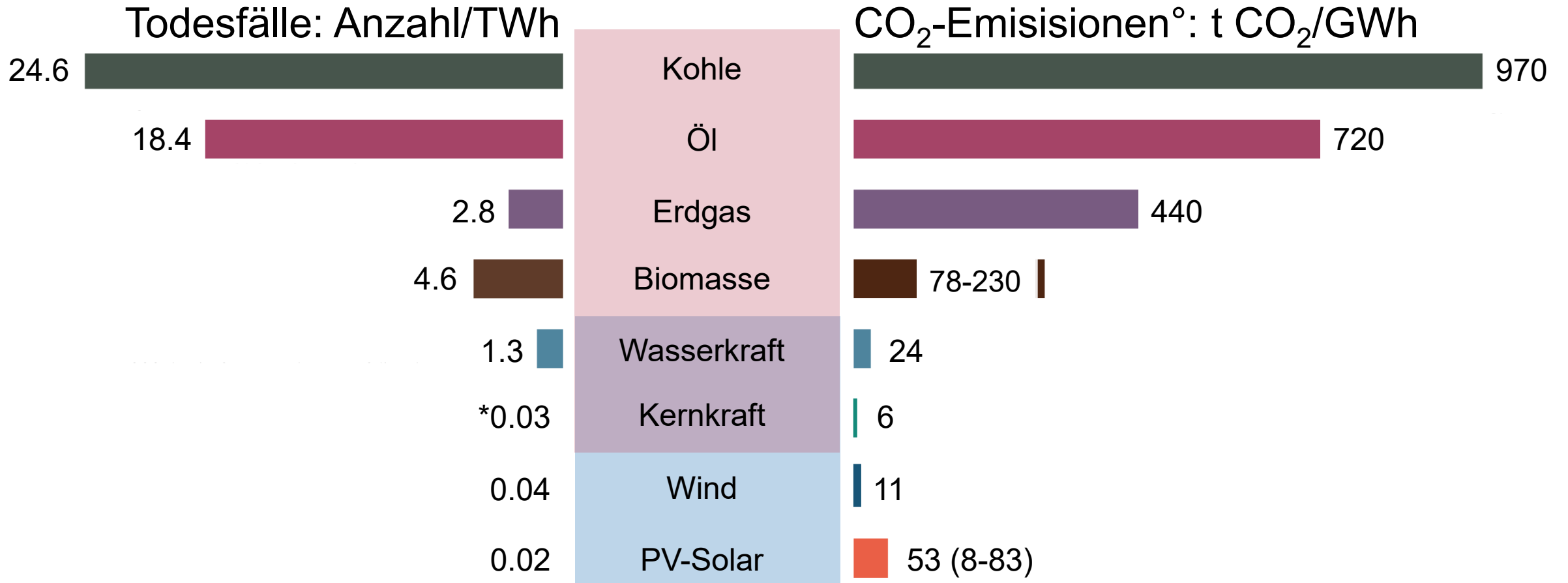


<https://ourworldindata.org>

Defossilisierung durch Elektrifizierung



Vergleich diverser Stromerzeugungsarten



<https://ourworldindata.org>

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

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

Leistung, Energie und Lastfaktoren

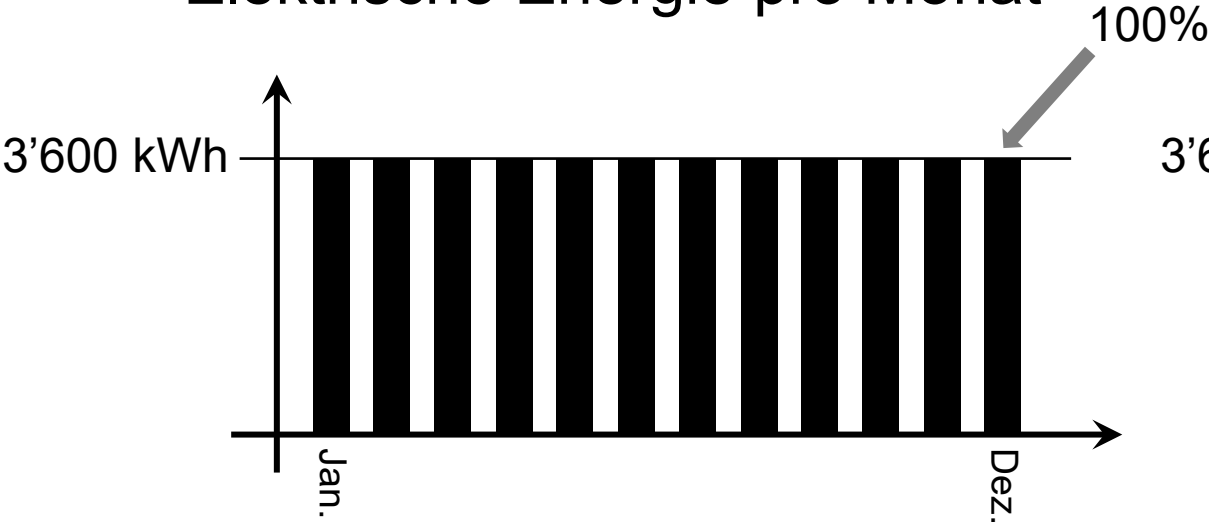
Maximale Leistung 5 kW



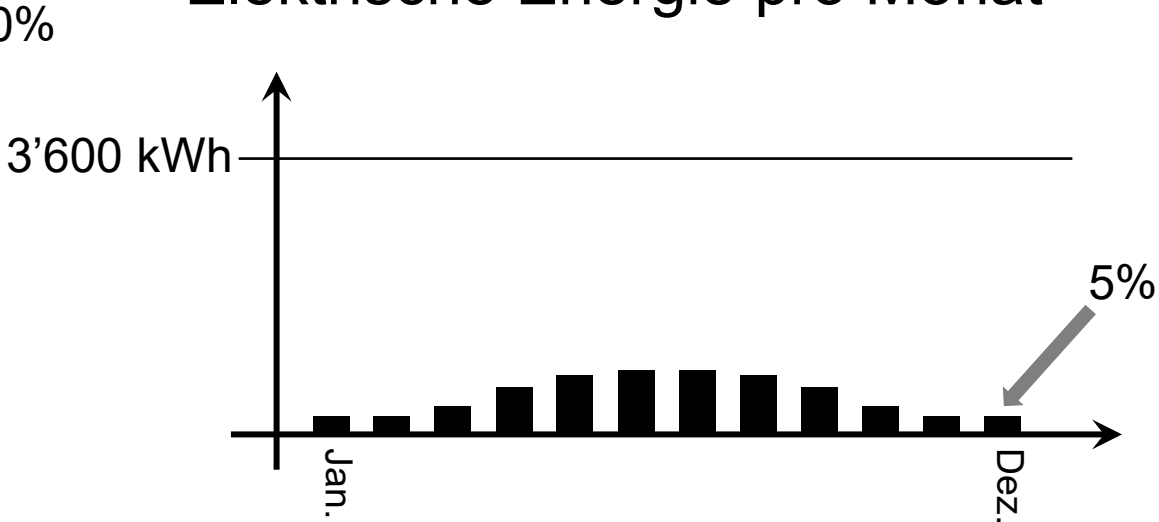
Maximale Leistung 5 kW



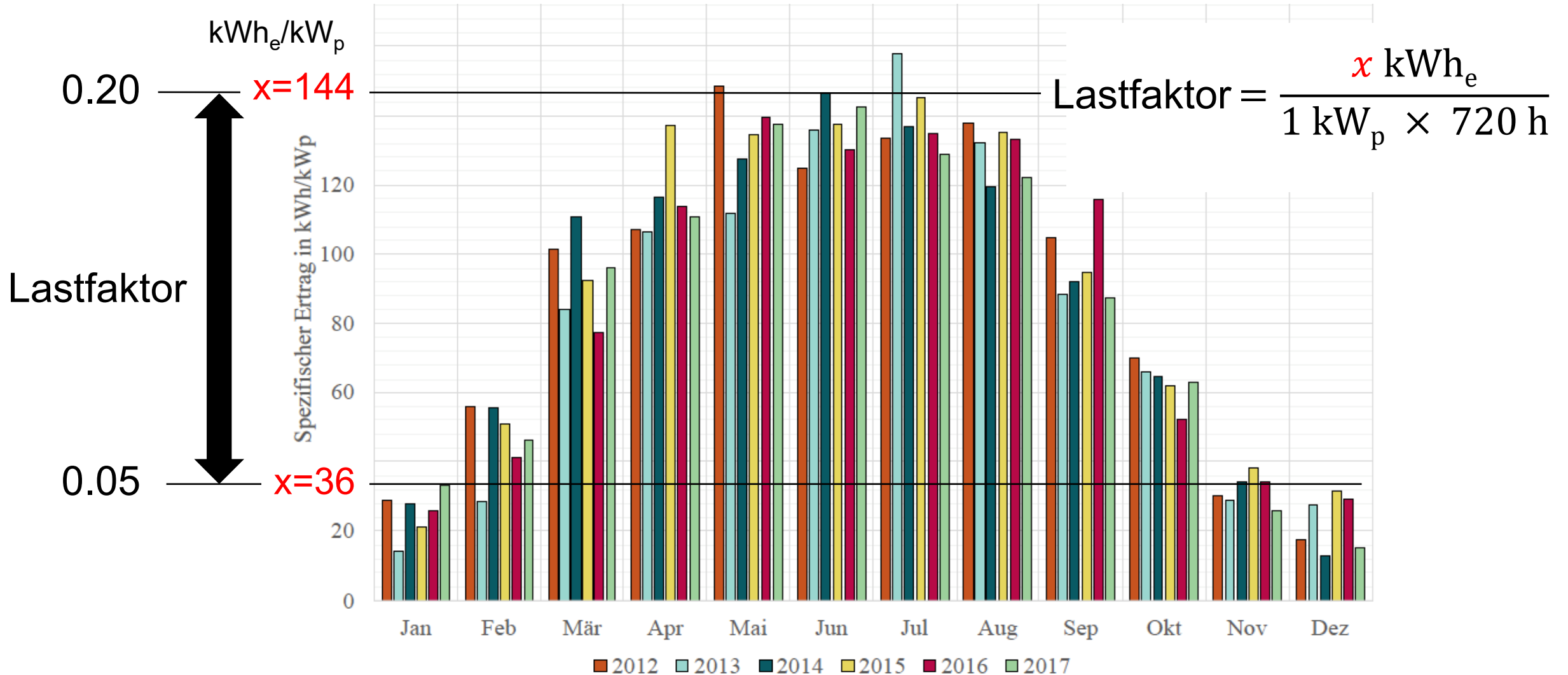
Elektrische Energie pro Monat



Elektrische Energie pro Monat

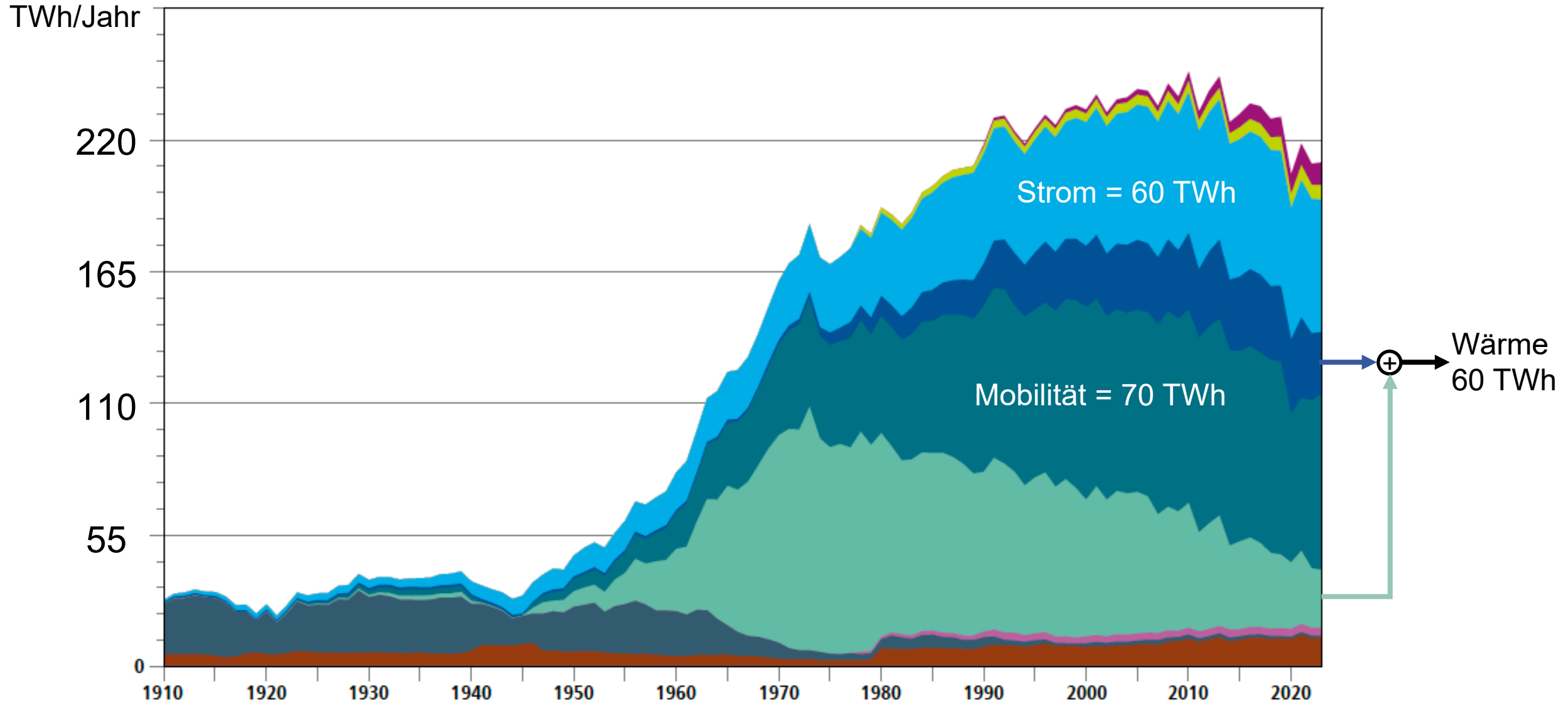


Lastfaktoren PV – Monatsdurchschnitt (Mittelland)



Schweiz 2050

Endenergieeinsatz – Vergangenheit und Gegenwart



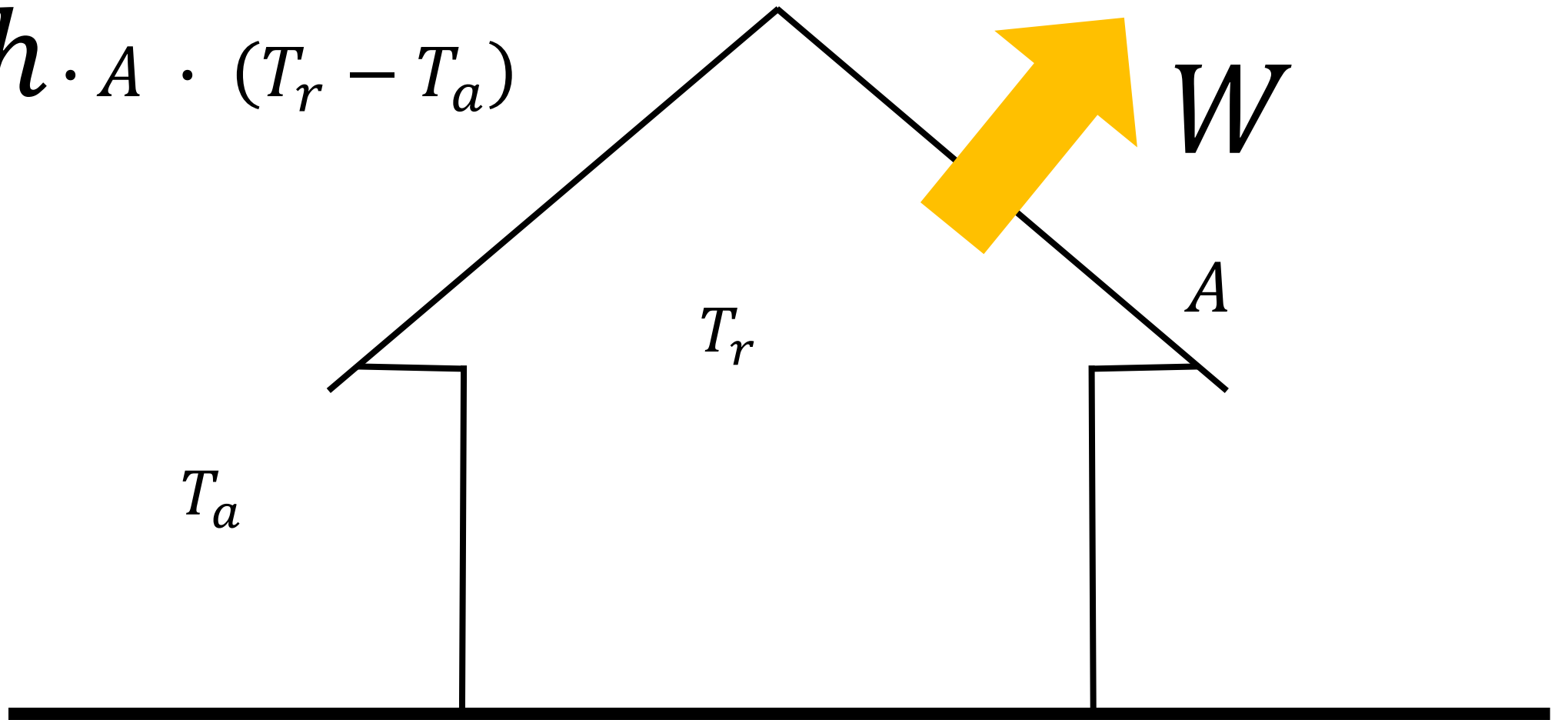
Abschätzung jährlicher Strombedarf CH – 2050

Annahmen: Gebäude werden so weit wie möglich isoliert, Wärmebedarf statt heute 60 TWh nur noch 30 TWh

.....

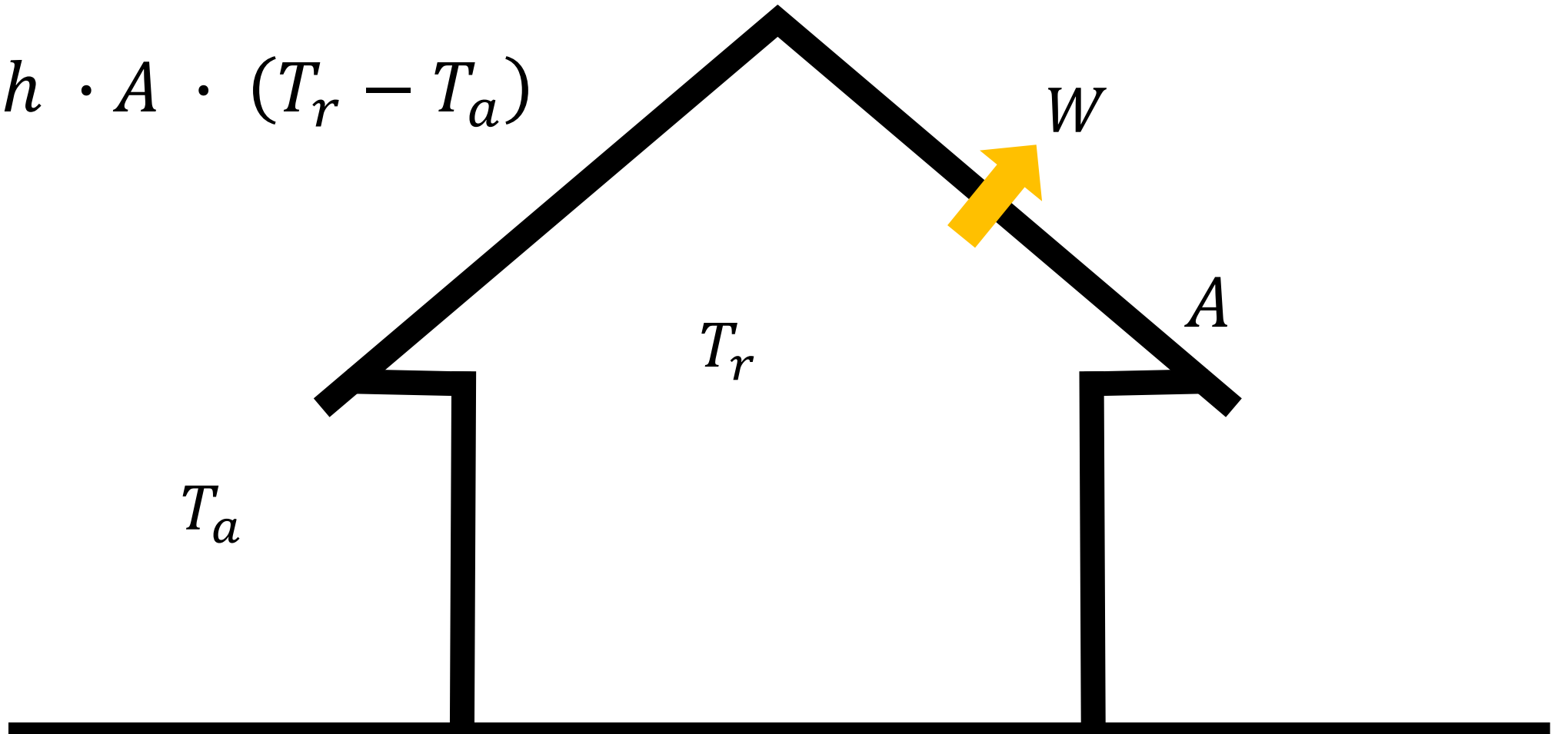
Wärmeverluste

$$W = h \cdot A \cdot (T_r - T_a)$$

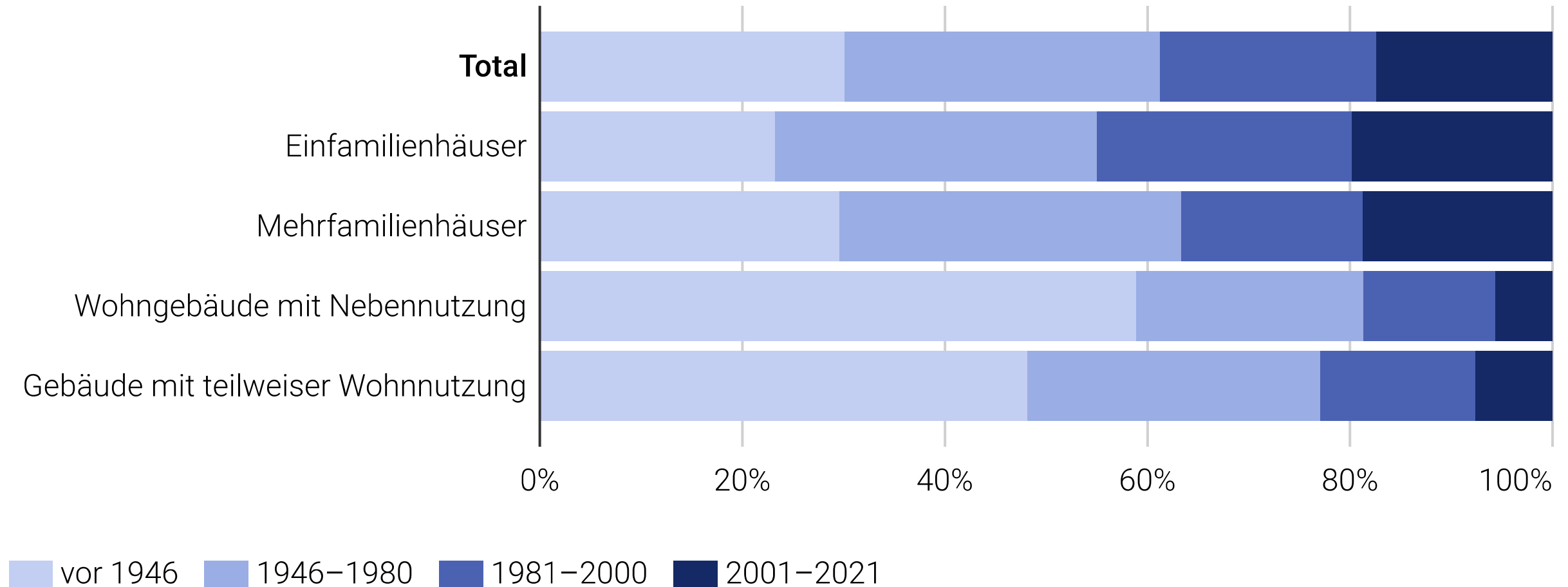


Wärmeverluste

$$W = h \cdot A \cdot (T_r - T_a)$$



Gebäude nach Kategorie und Bauperiode, 2021



Abschätzung jährlicher Strombedarf CH – 2050

Annahmen:

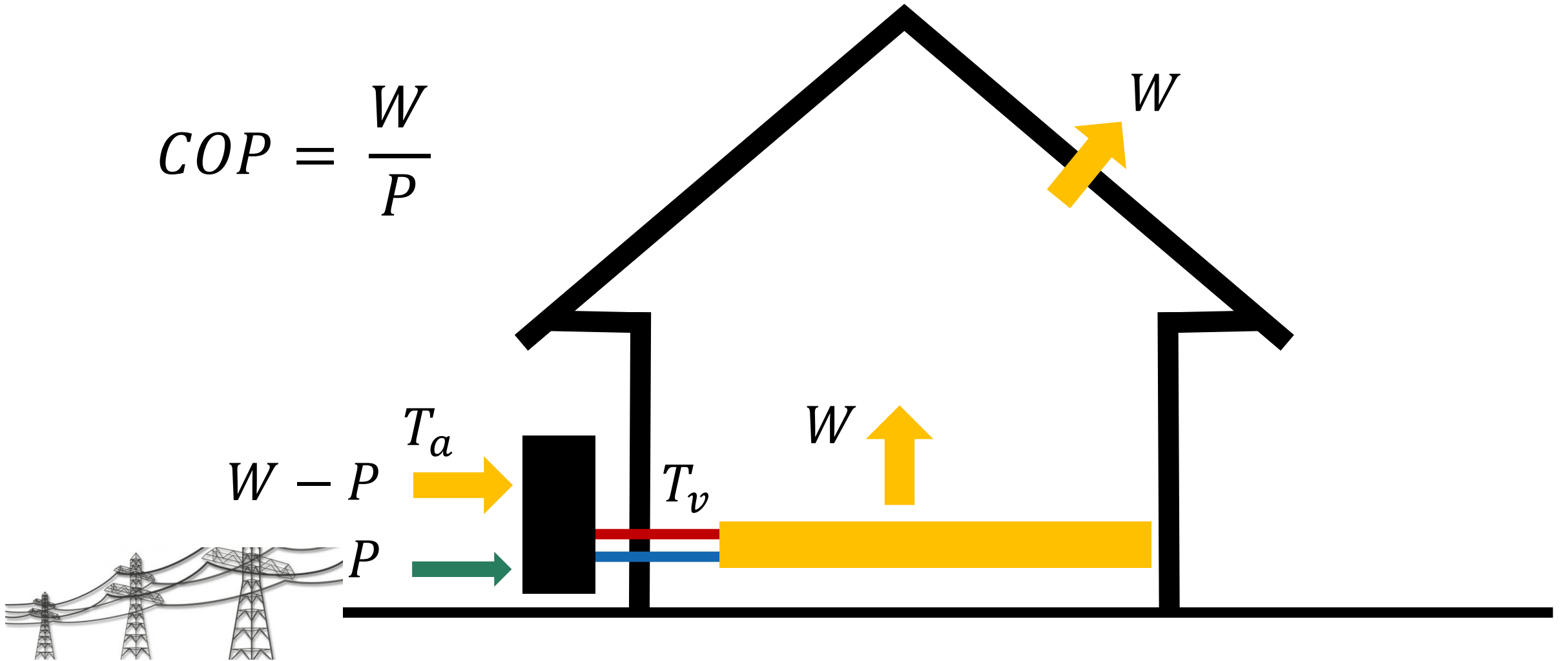
Gebäude werden so weit wie möglich isoliert, Wärmebedarf statt heute 60 TWh nur noch 30 TWh

Alle Raumwärme wird durch Wärmepumpen erzeugt mit COP von 3.5 (gewichtetes Jahresmittel), $30 \text{ TWh} / 3.5 \approx 9 \text{ TWh}$

.....

Wärmepumpen

$$COP = \frac{W}{P}$$



Abschätzung jährlicher Strombedarf CH – 2050

Annahmen:

Gebäude werden so weit wie möglich isoliert, Wärmebedarf statt heute 62 TWh nur noch 31 TWh

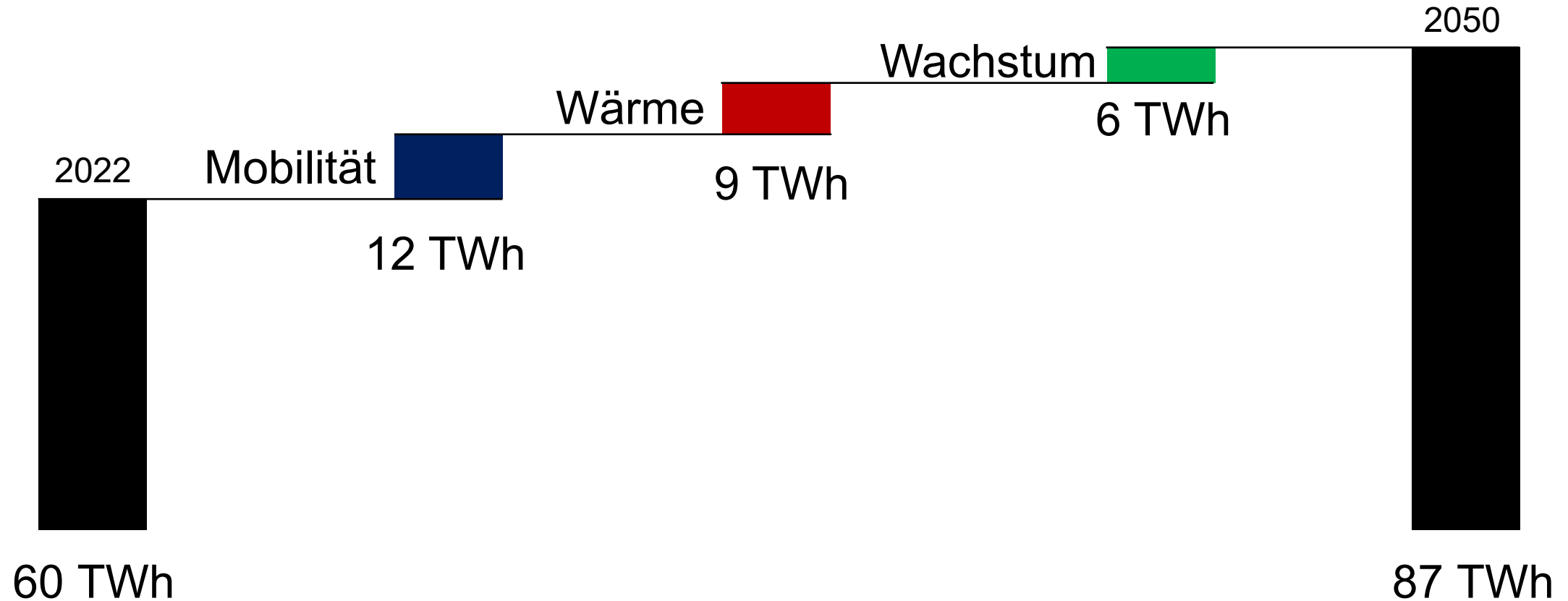
Alle Raumwärme wird durch Wärmepumpen erzeugt mit COP von 3.5 (gewichtetes Jahresmittel), $31 \text{ TWh} / 3.5 \approx 9 \text{ TWh}$

Mobilität rein elektrisch, 5 Mio. Autos, 20 kWh/100 km, 12'000 km/Jahr $\approx 12 \text{ TWh}$

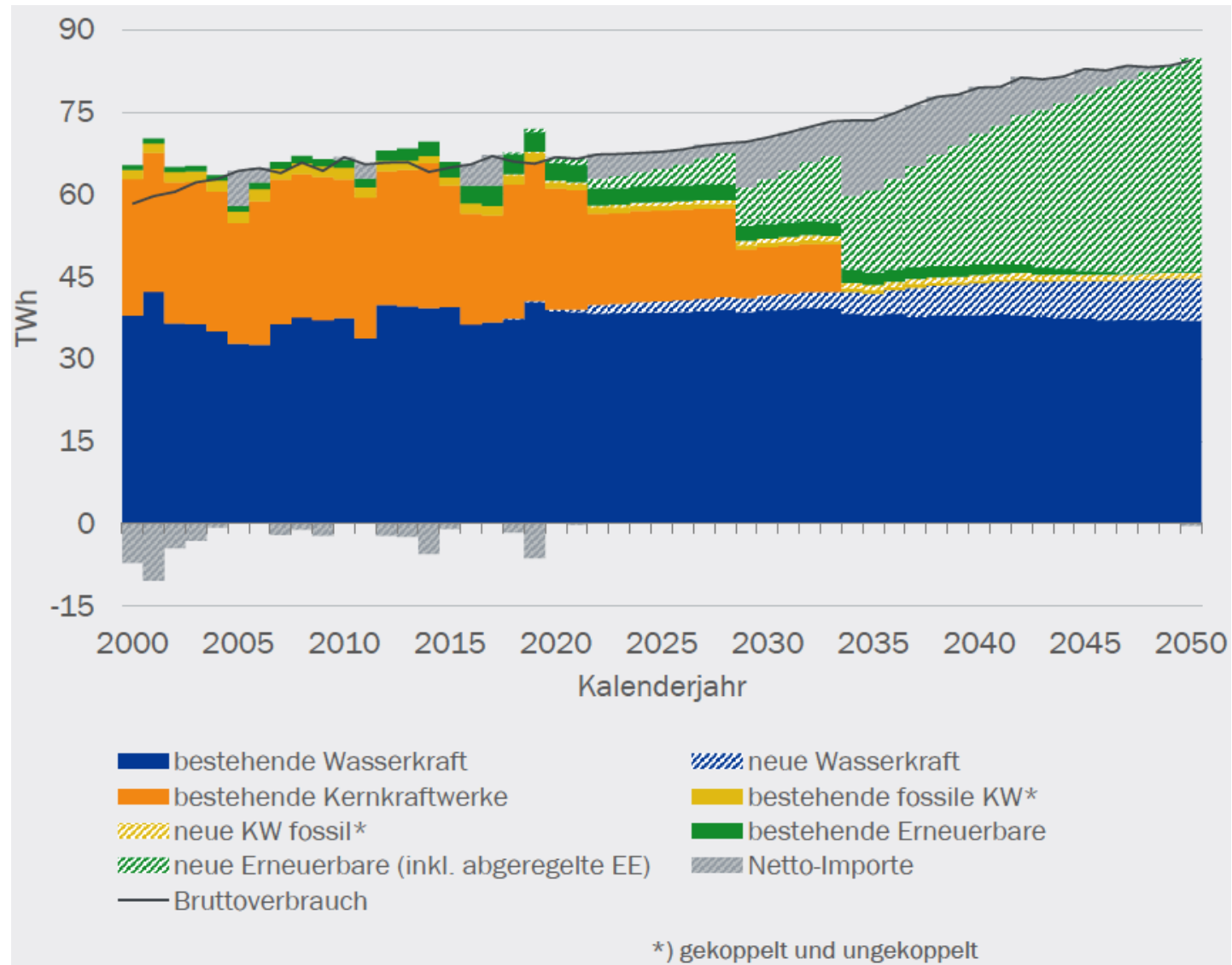
Bevölkerungswachstum, neue Anwendungen, ... führen zu Wachstum (CAGR) von 0.35% pro Jahr, bis 2050 $\approx 6 \text{ TWh}$

Durchschnittsleistung: Sommer $\approx 9 \text{ GW}$, Winter $\approx 13 \text{ GW}$

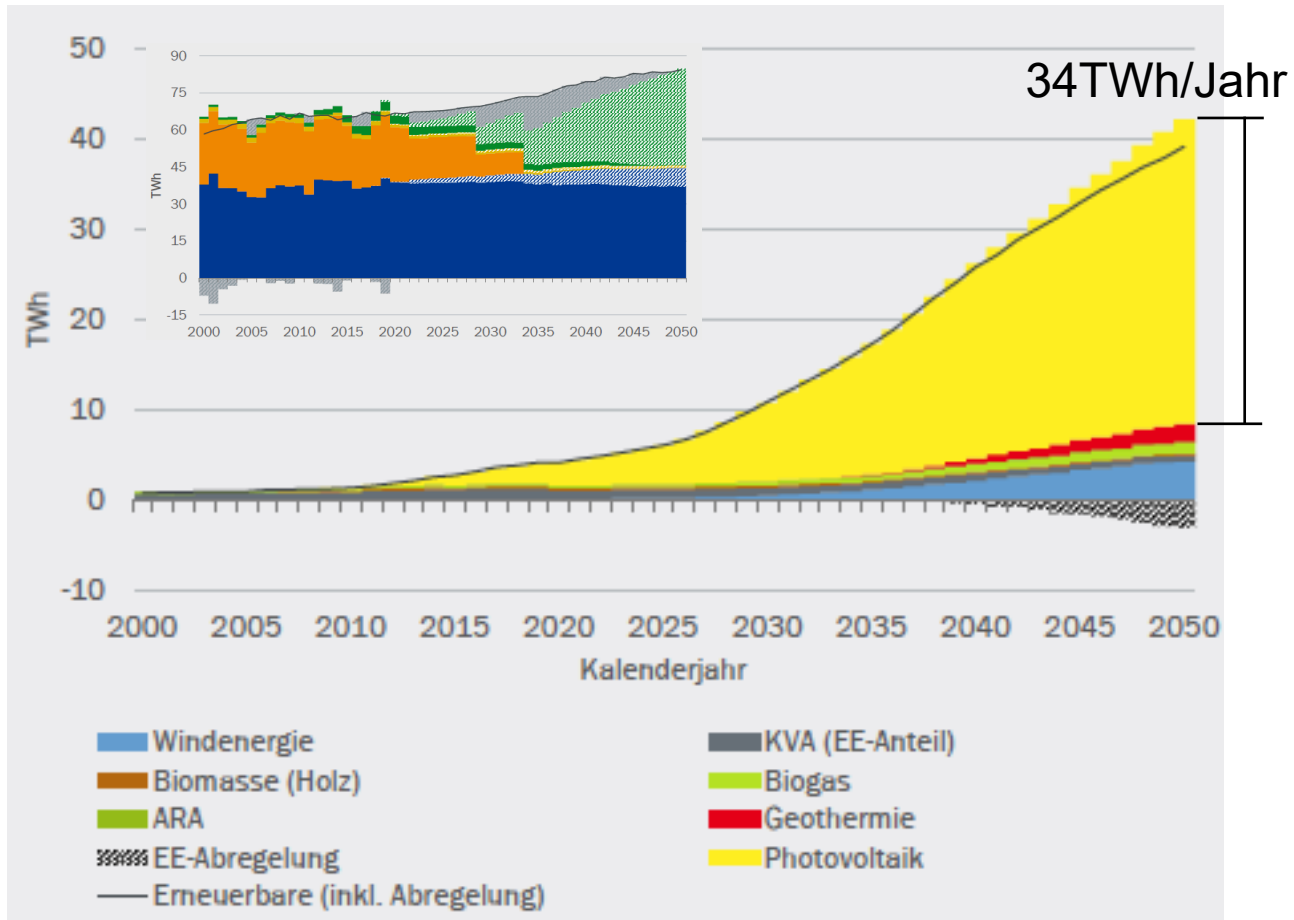
Abschätzung jährlicher Strombedarf CH – 2050



Energiestrategie 20250 – Jahresbetrachtung



Energie und Leistung von PV – Jahresbetrachtung



PV-Anlagen CH, Jahr 2020

Installierte Leistung: 2.9 GW

Generierte elektrische Energie: 2'750 GWh/Jahr

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

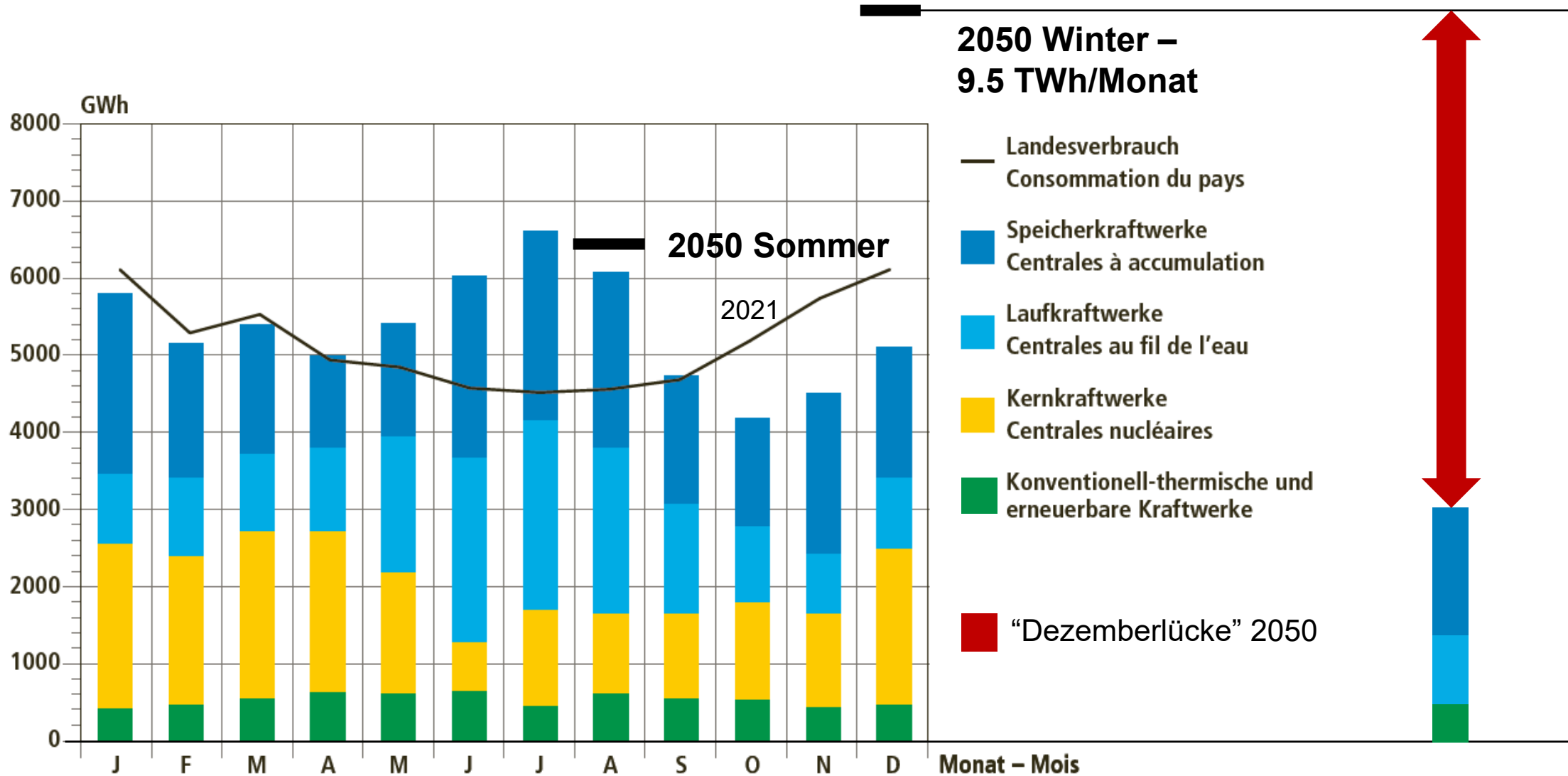
Quelle: Swissolar, Faktenblatt, 2021

PV-Anlagen CH, Prognosejahr 2050

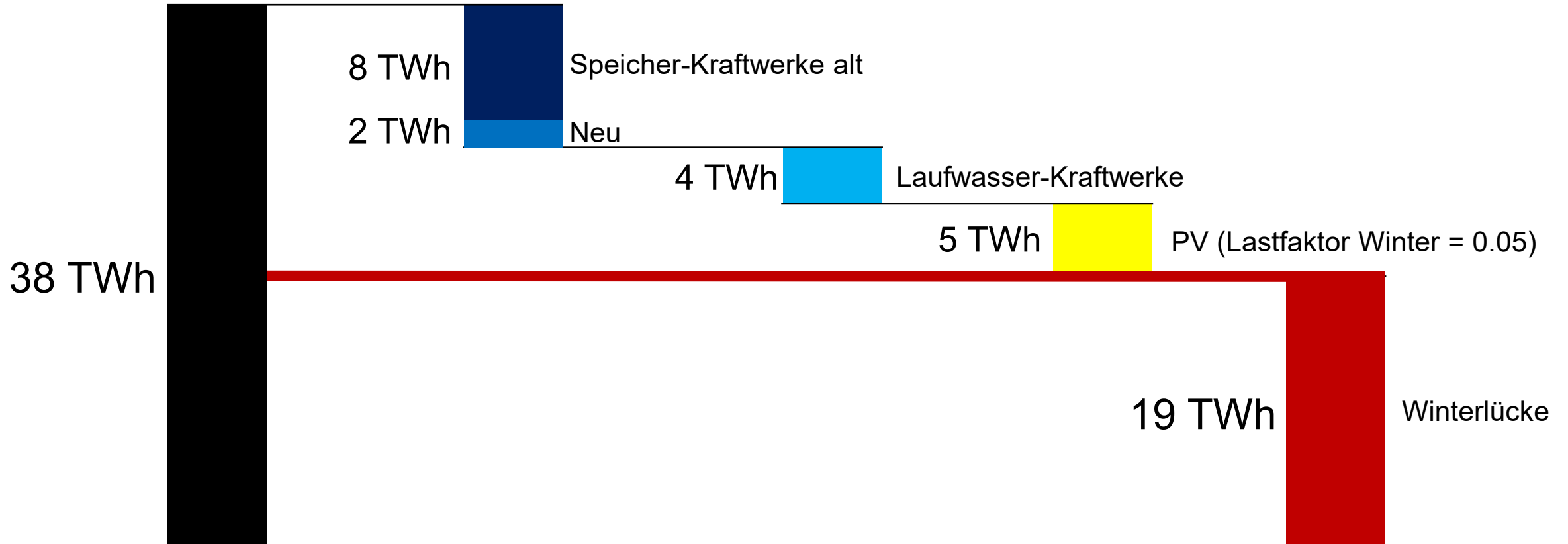
$$\frac{2.9 \text{ GW} \times 34 \text{ TWh}}{2.75 \text{ TWh}} = 36.0 \text{ GW}$$

Quelle: Szenarienrechnungen Ecoplan, TEP, Infrac und Prognos, 2021

Prognose Verbrauch 2050 – Monatsbetrachtung

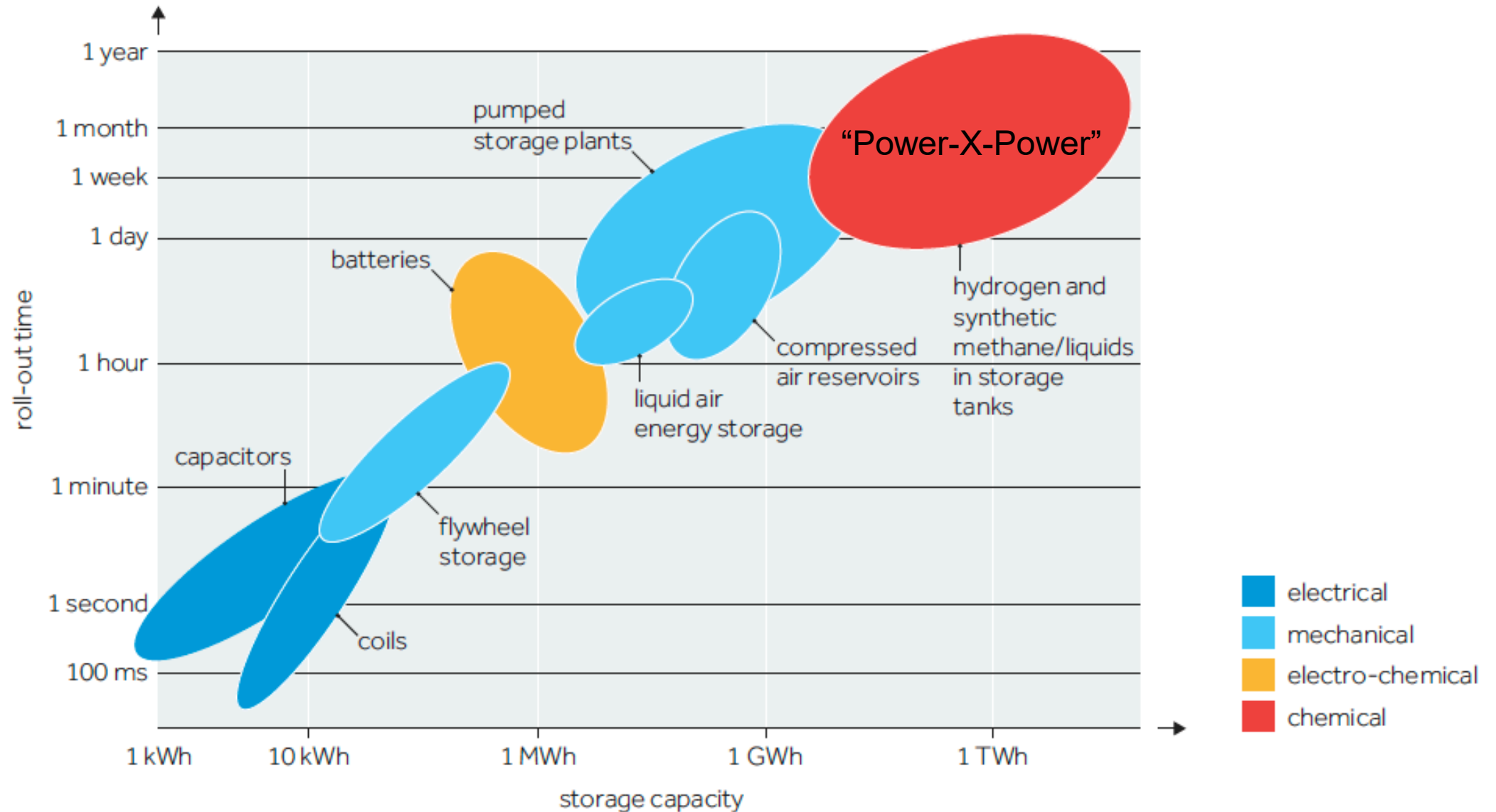


Auslegeordnung Winter[°] – 36 GW PV im Mittelland

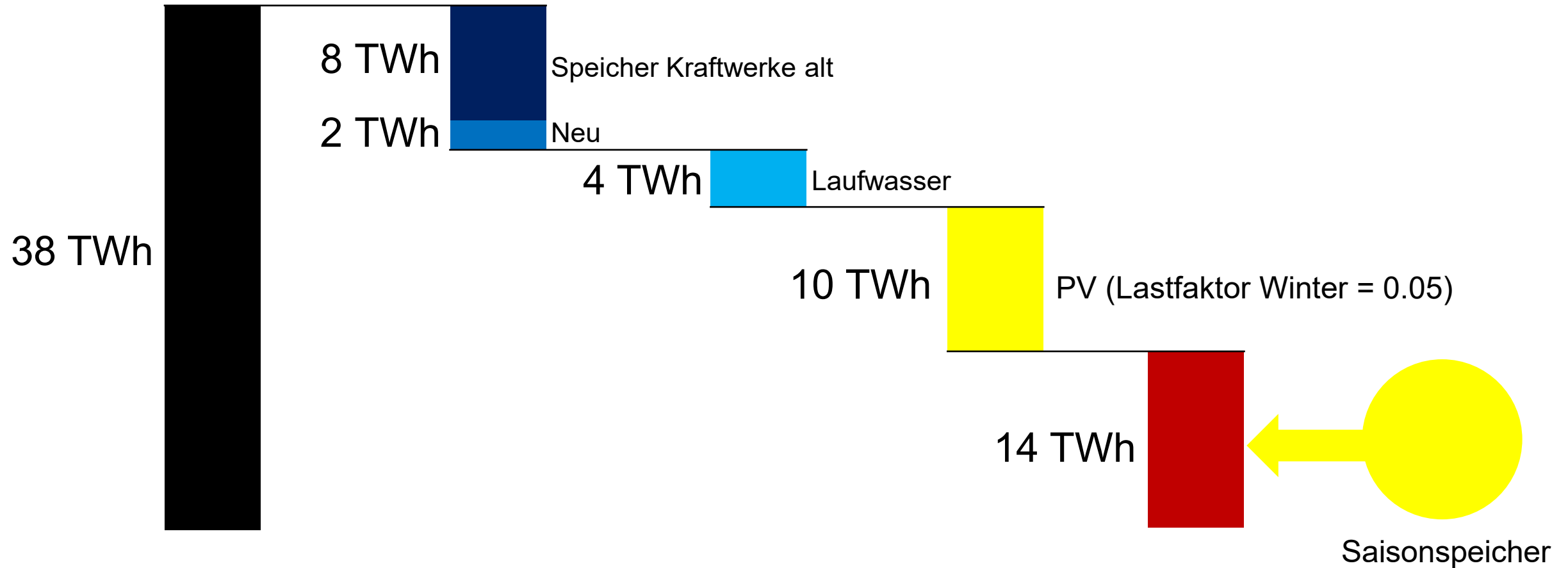


[°] Winter: 1. November - 28. Februar

Saisonale Speicherung elektrischer Energie



Auslegeordnung Winter – 70 GW PV im Mittelland



Saisonspeicher mit Wasserstoff H₂

Überschuss im Sommer 35 TWh

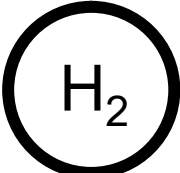
CO₂-neutraler Strom

Entspricht 70 GW PV

Elektrolyse

Verdichtung

Speicher 23 TWh



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

Brennstoffzelle

Deckung 14 TWh
Winterlücke

CO₂-neutraler Strom



Prognose Stromkosten Kalifornien

Clean-Air Task Force Report, 2018

Aktuell



50% Erneuerbar



80% Erneuerbar



100% Erneuerbar

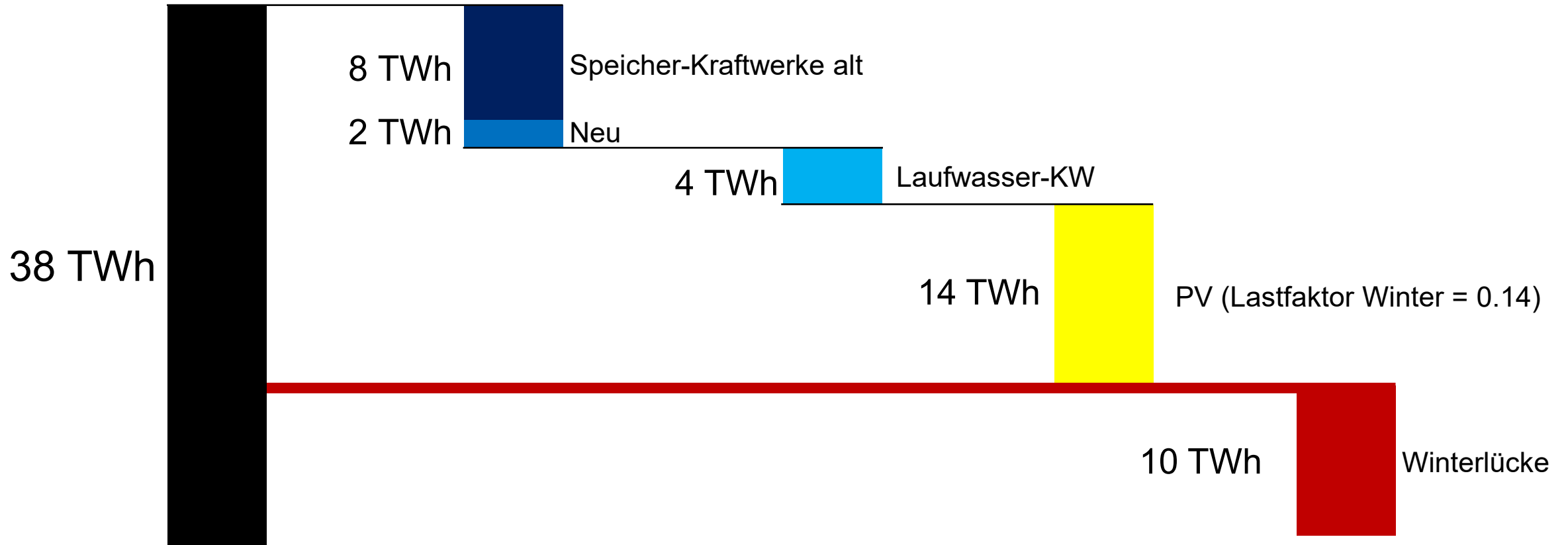


|
\$ 0/MWh_e

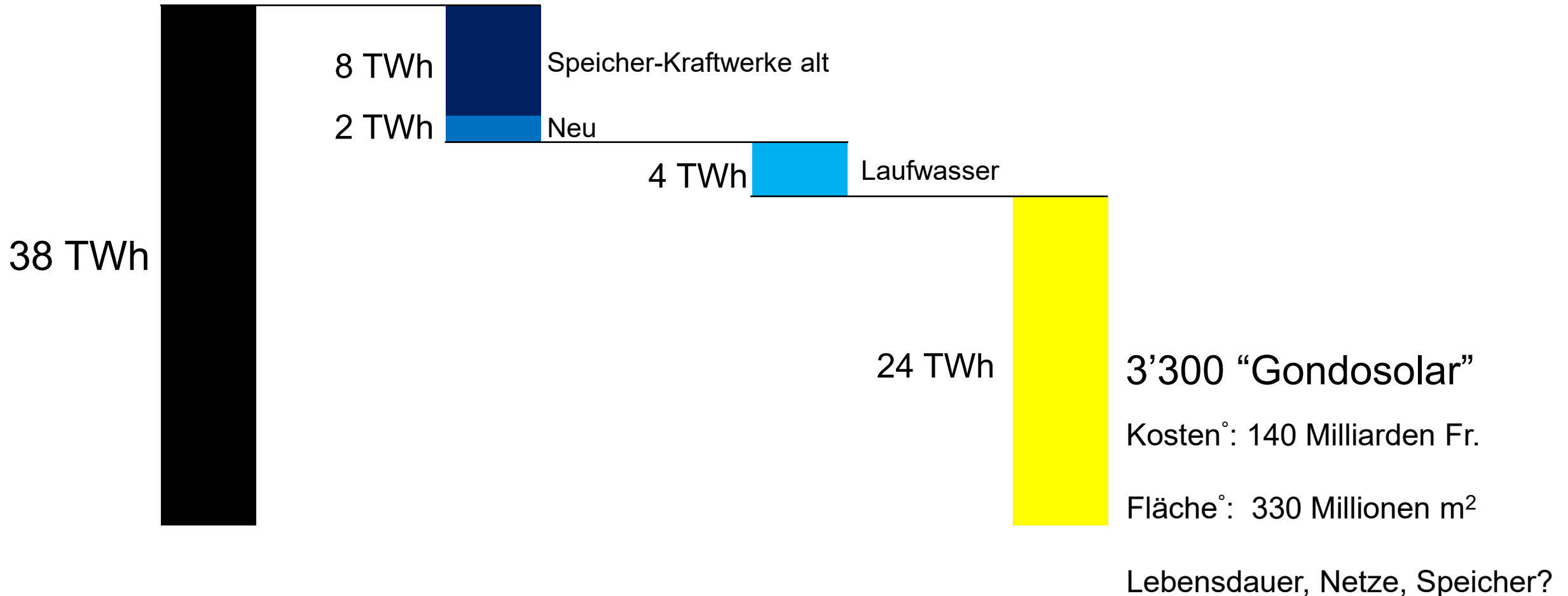
|
\$ 1'000/MWh_e



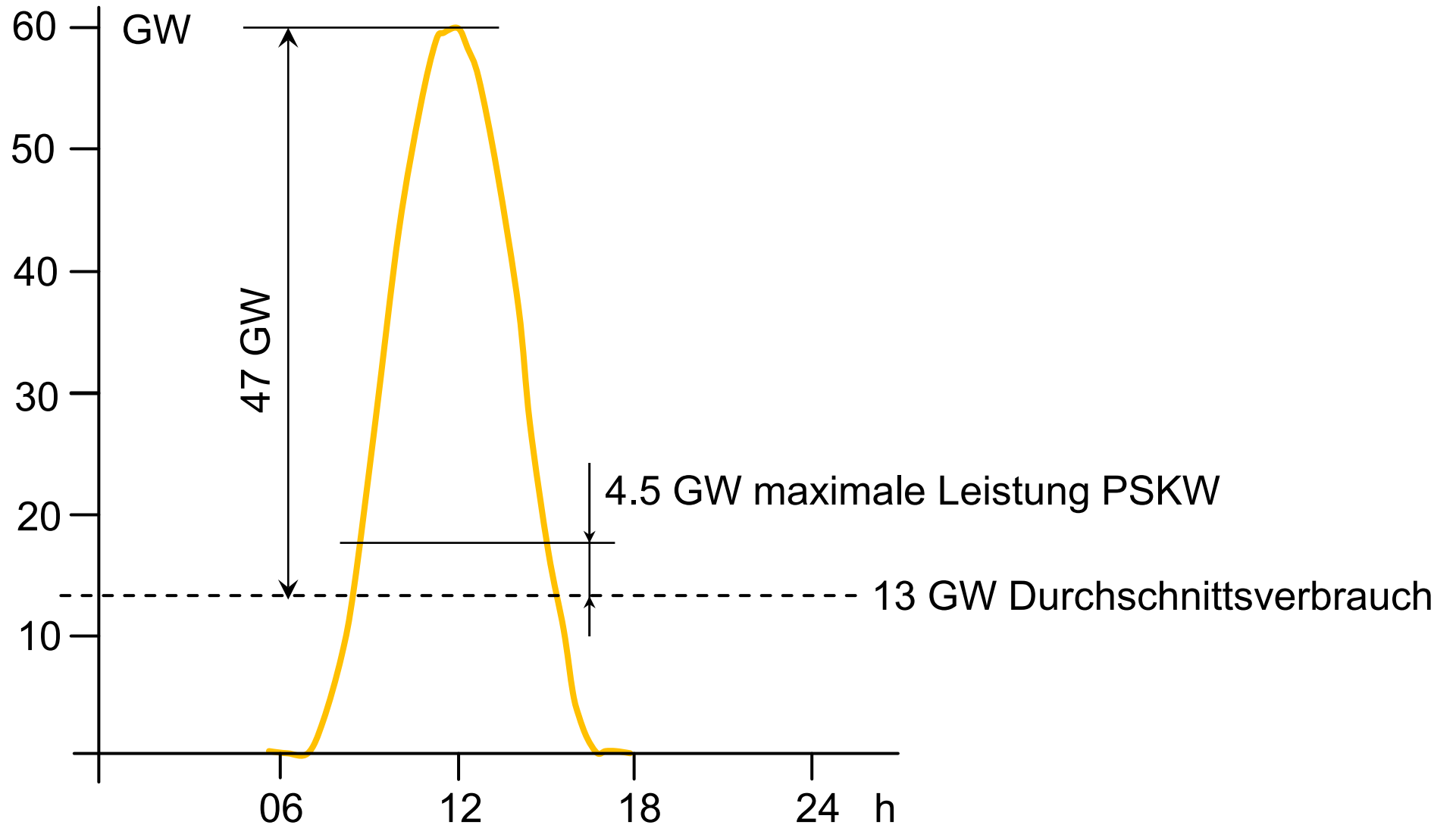
Auslegeordnung Winter – 36 GW PV in den Alpen



Auslegeordnung Winter – 60 GW PV in den Alpen

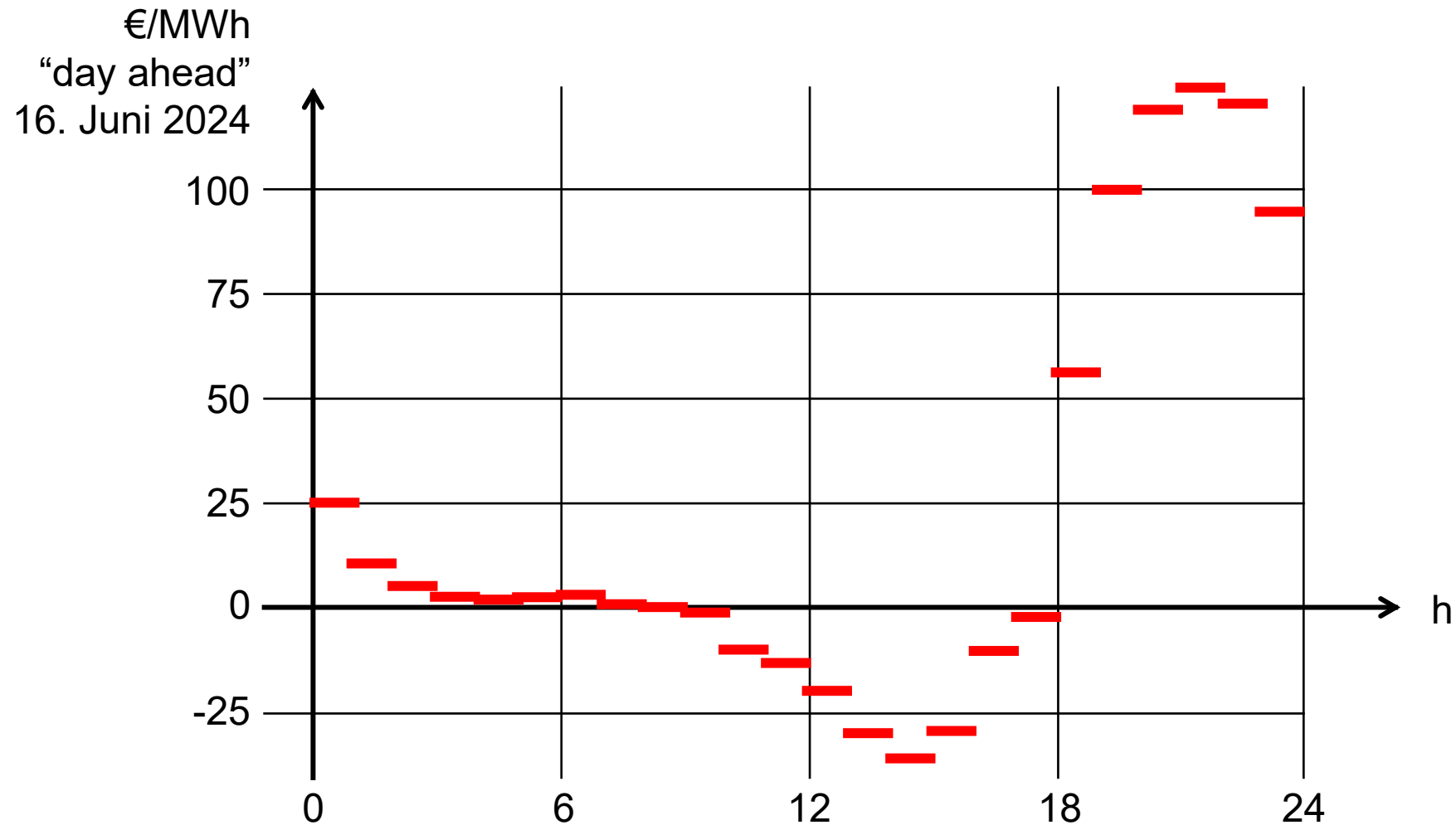


Tagesschwankungen – 60 GW PV in den Alpen

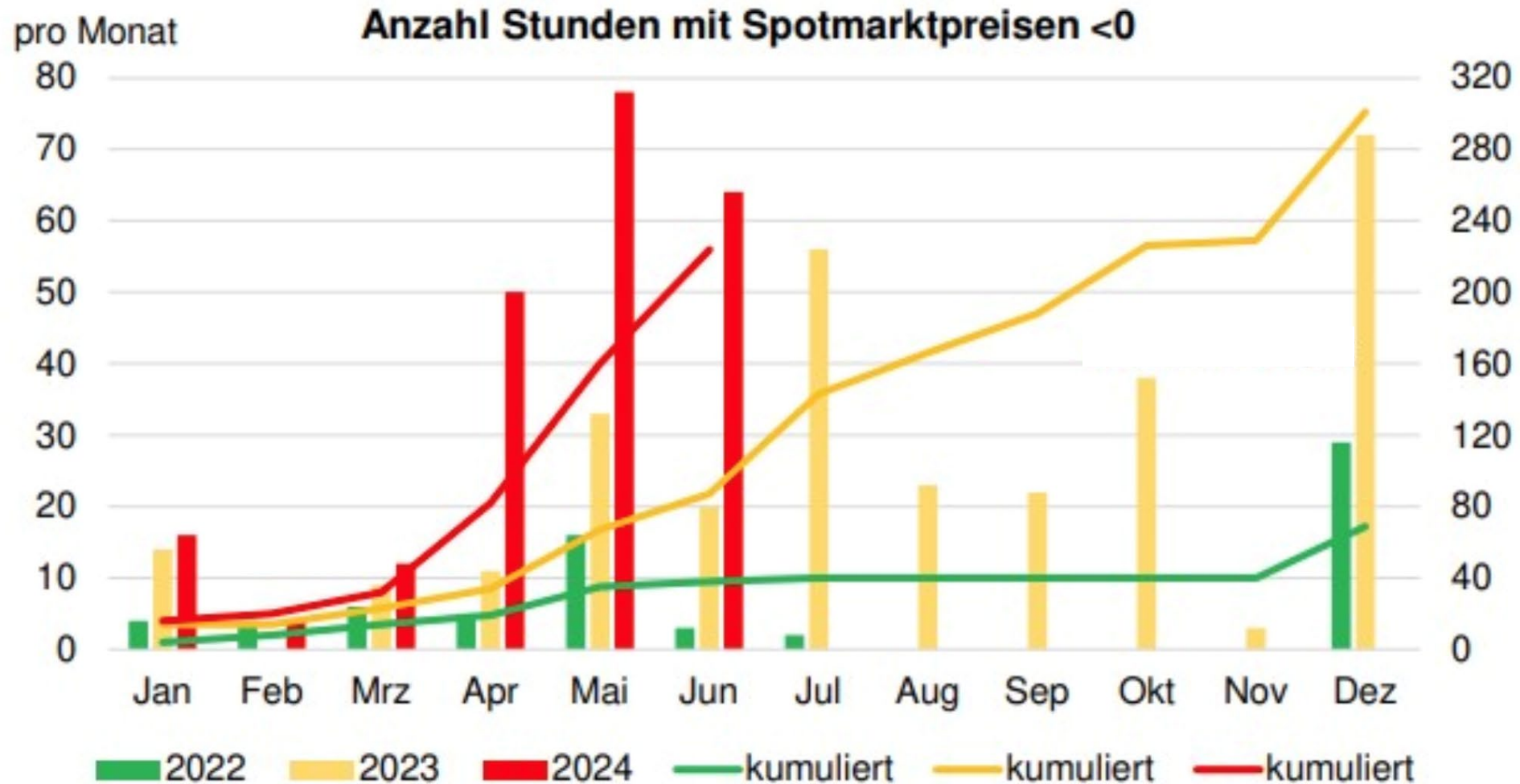


PSKW= Pump-Speicher-Kraft-Werke

Tagesschwankungen – Preisauswirkungen D 2024



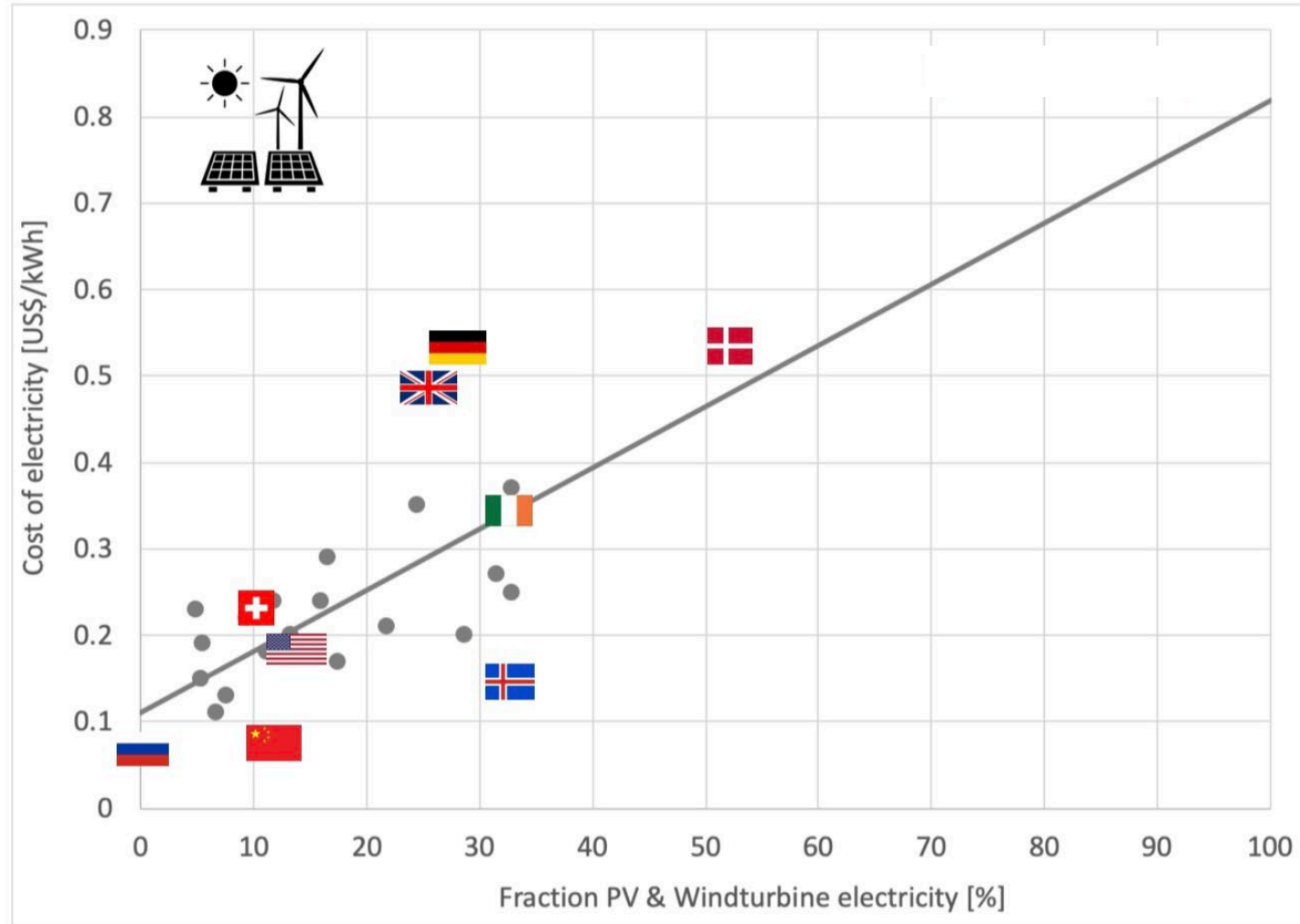
Anzahl Stunden mit negativen Strompreisen D



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

«Die Sonne schickt keine Rechnung ...»

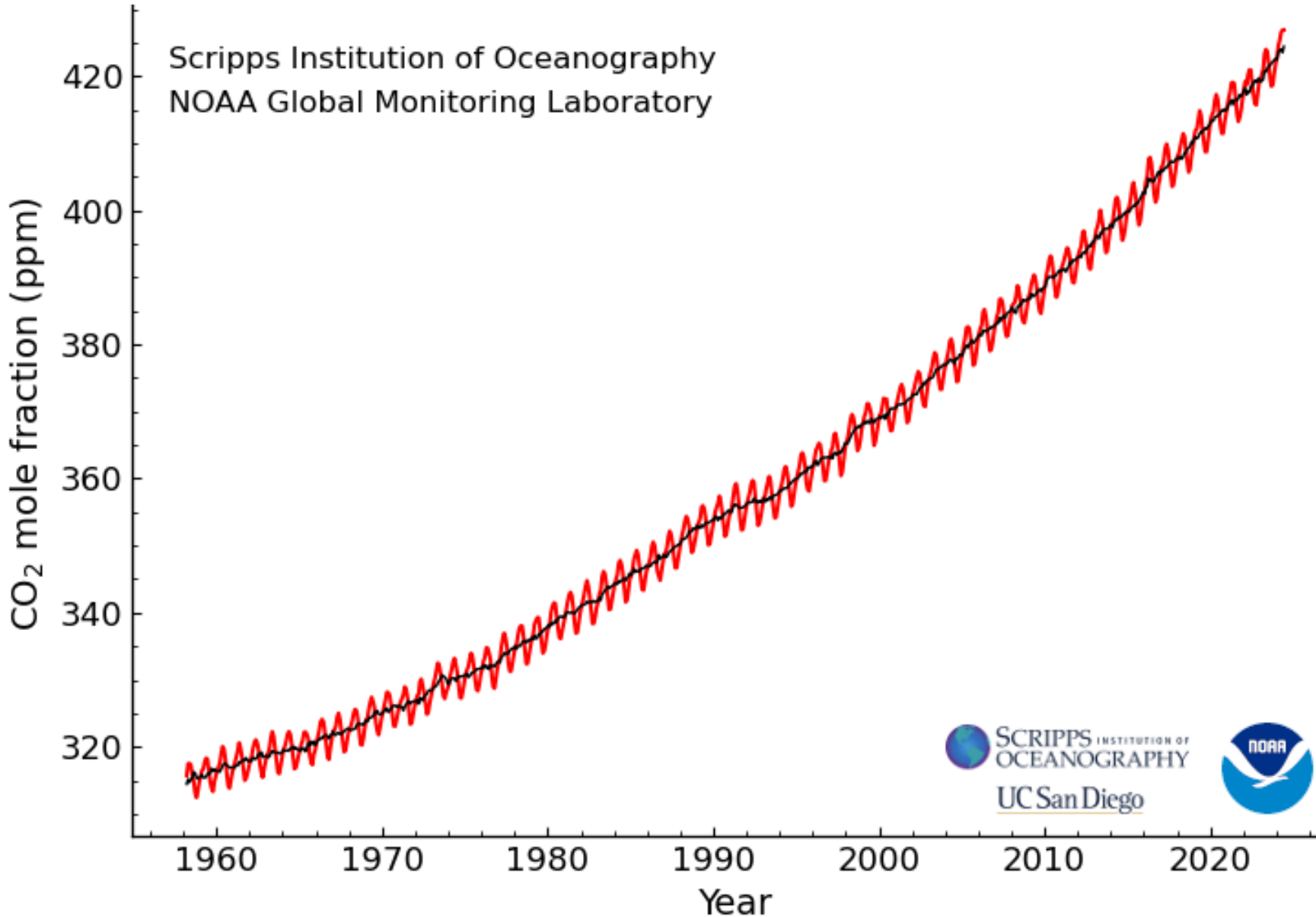
Average cost of electricity vs fraction of PV and wind



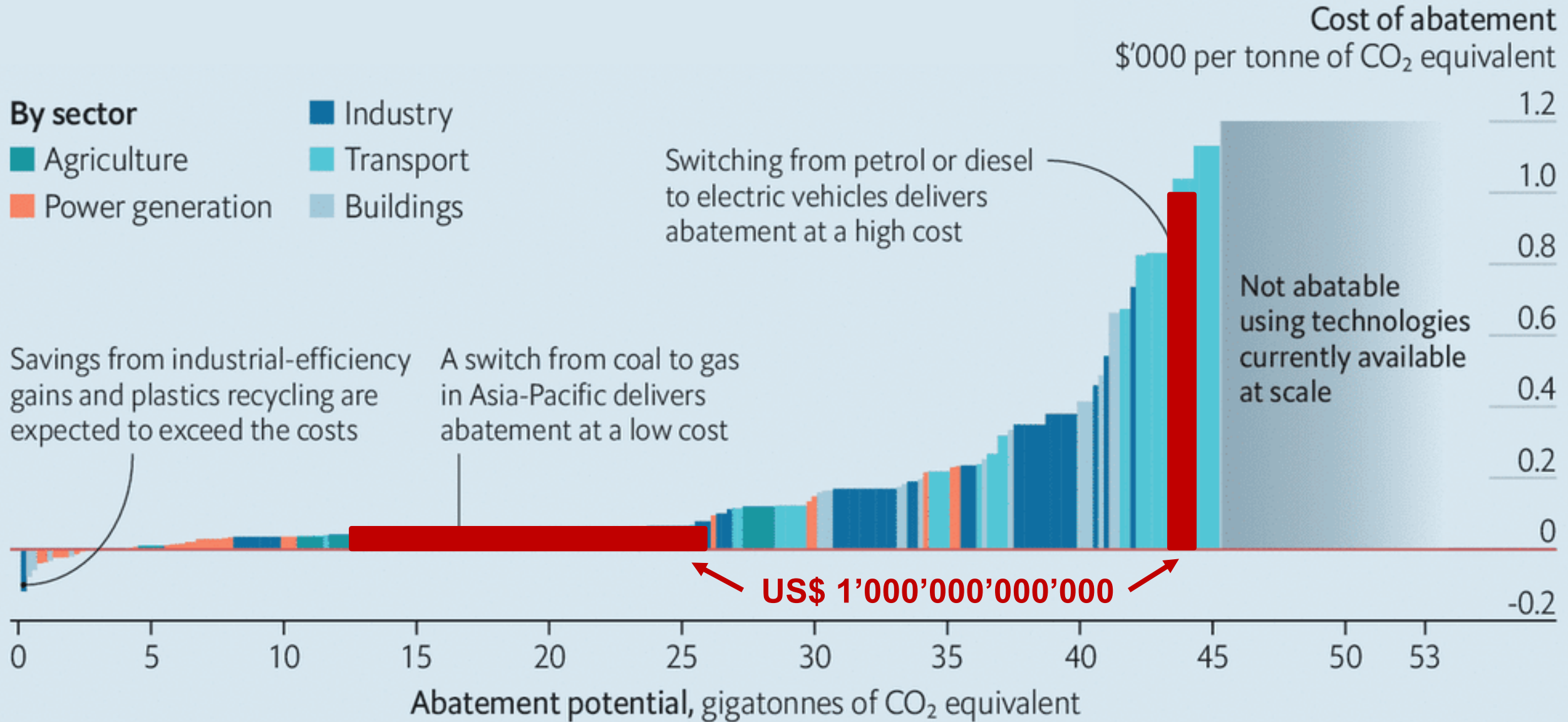
Ref.: <https://elements.visualcapitalist.com/mapped-solar-and-wind-power-by-country/>

Pro memoria: Was ist das Problem?

CO₂ Konzentration in der Atmosphäre



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



- 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

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”

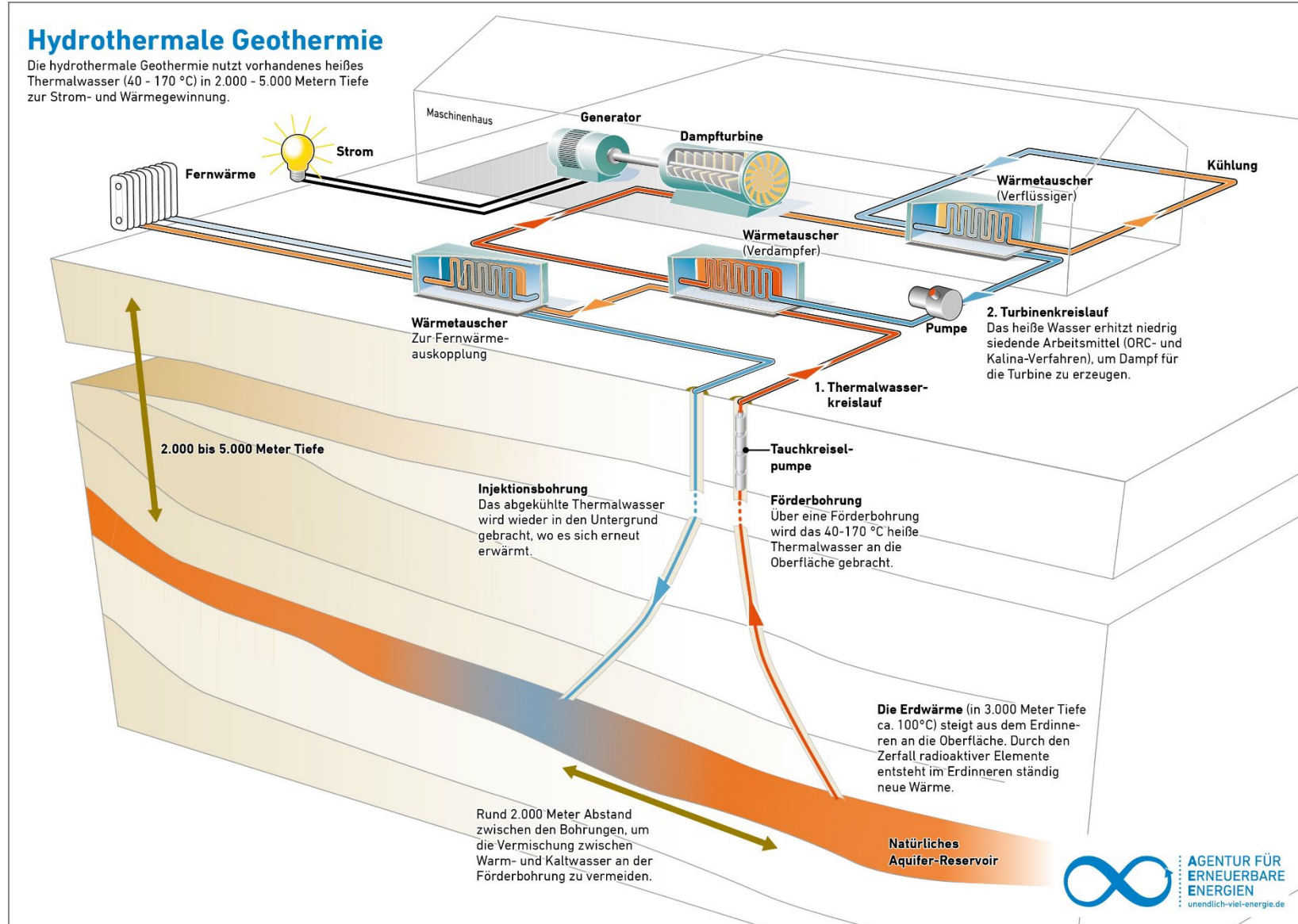
Mindestens 15°

“ORC”: Organic Rankine Cycle

Geothermie

Hydrothermal

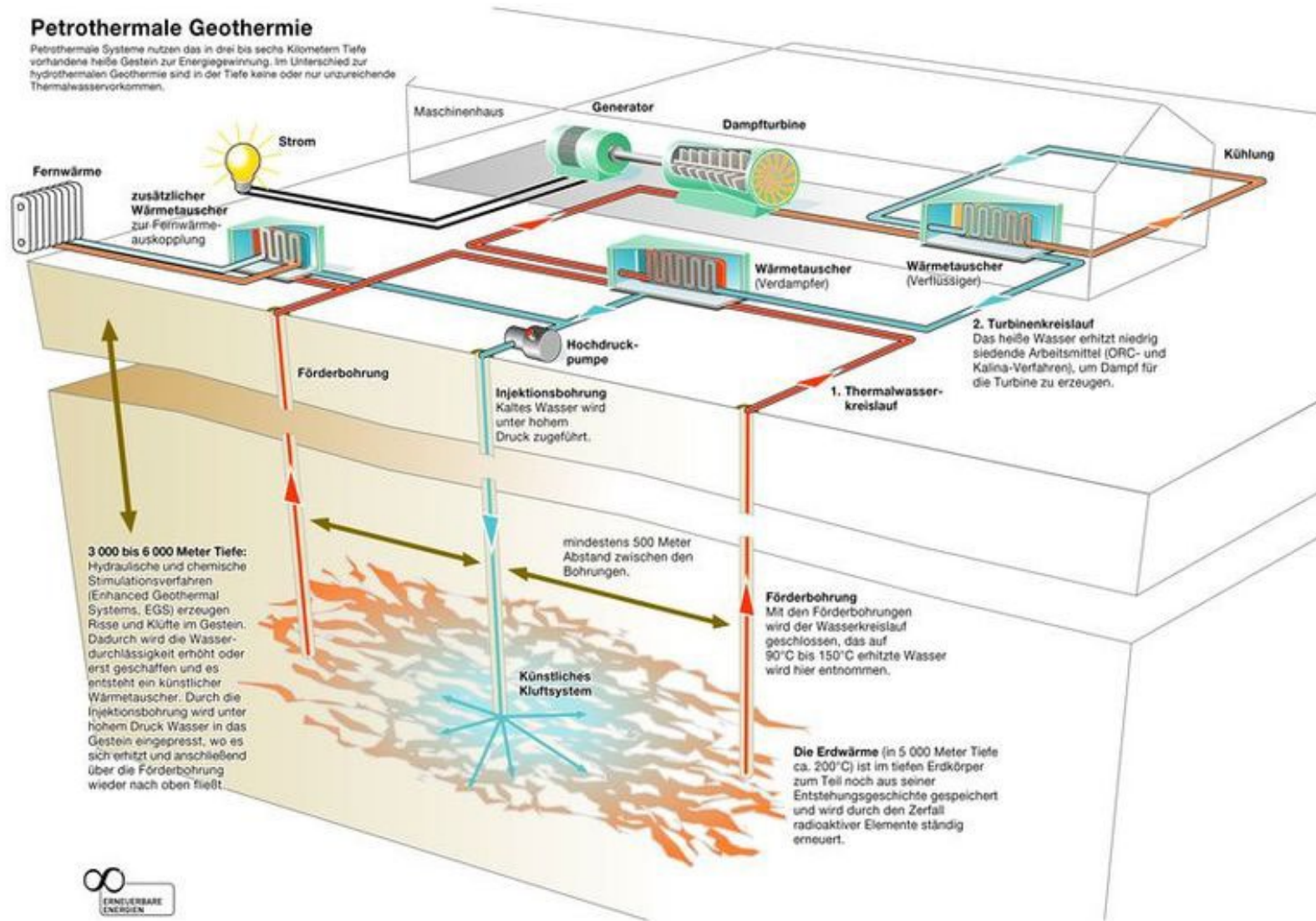
Stromerzeugung



Geothermie

Stromerzeugung

Petrothermal



Geothermieprojekte (Strom) in der Schweiz



Basel, 2011



St. Gallen, 2013

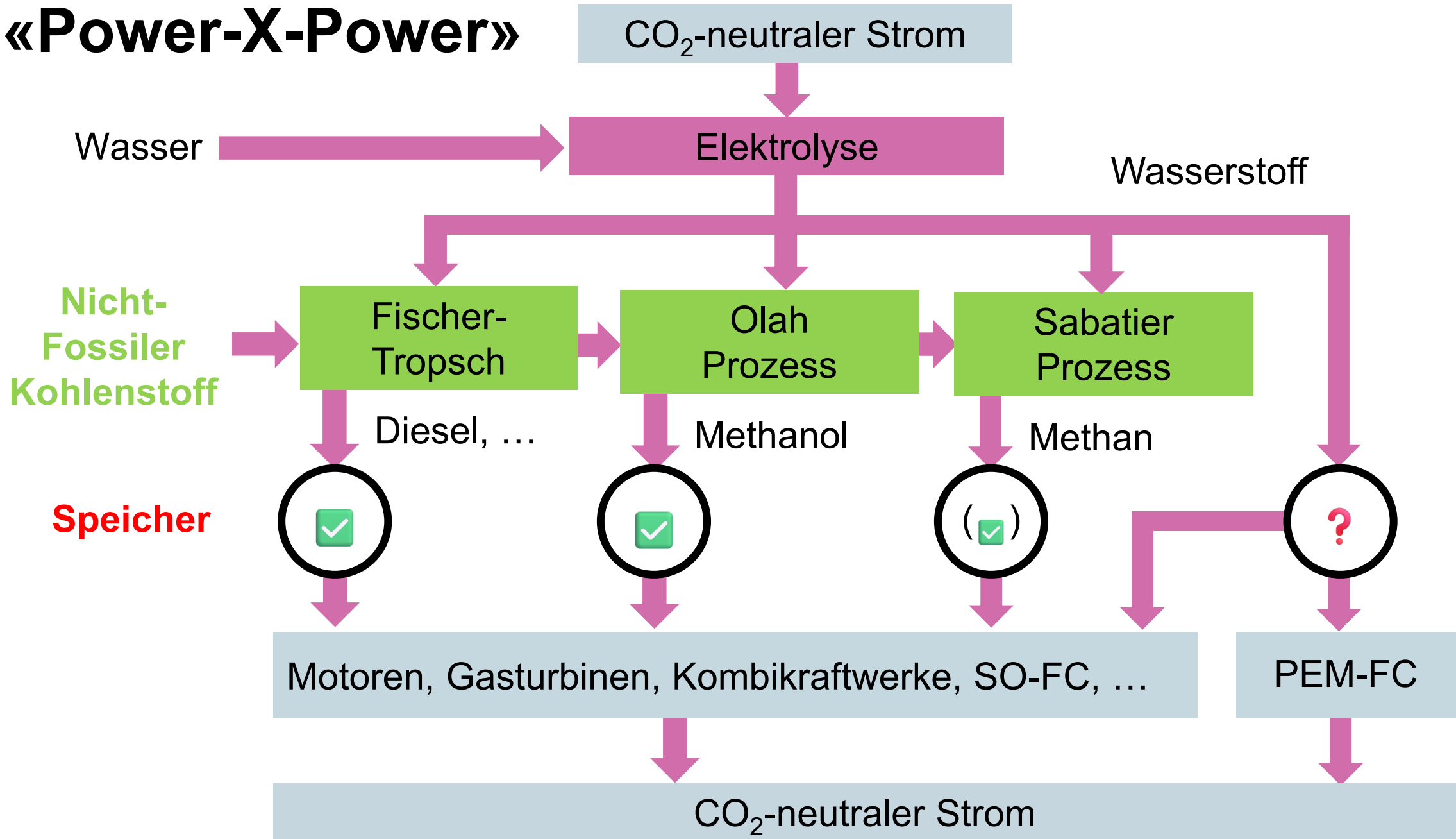


Lavey Les-Bains, 2022



Haute Sorne, ab 2024

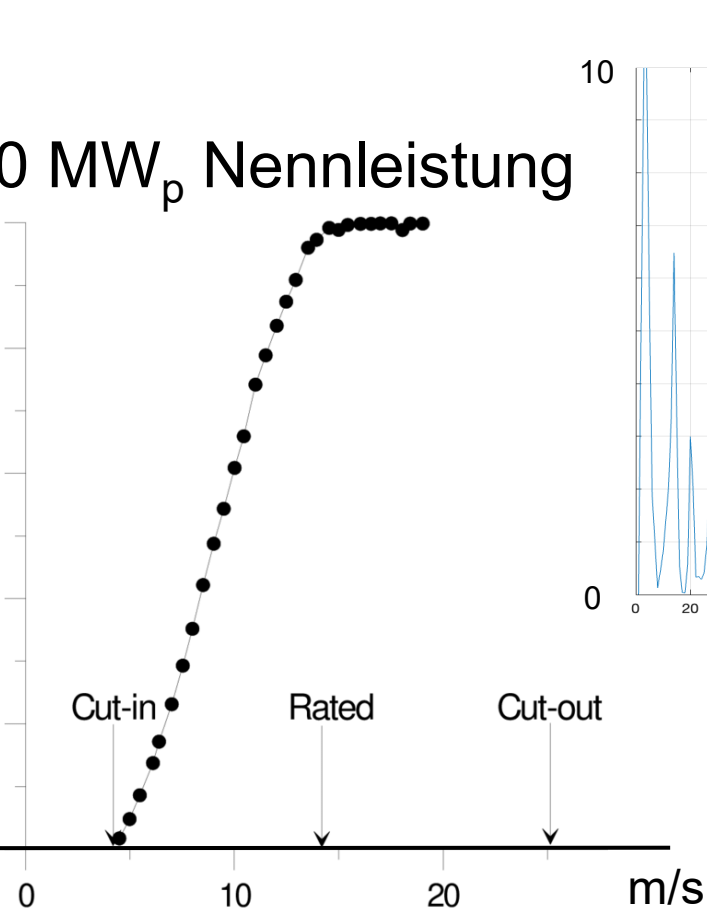
«Power-X-Power»



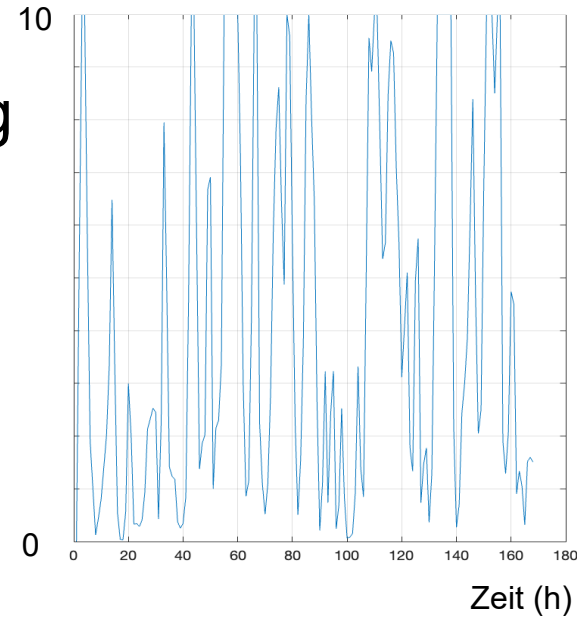
Nennleistung und Energieertrag



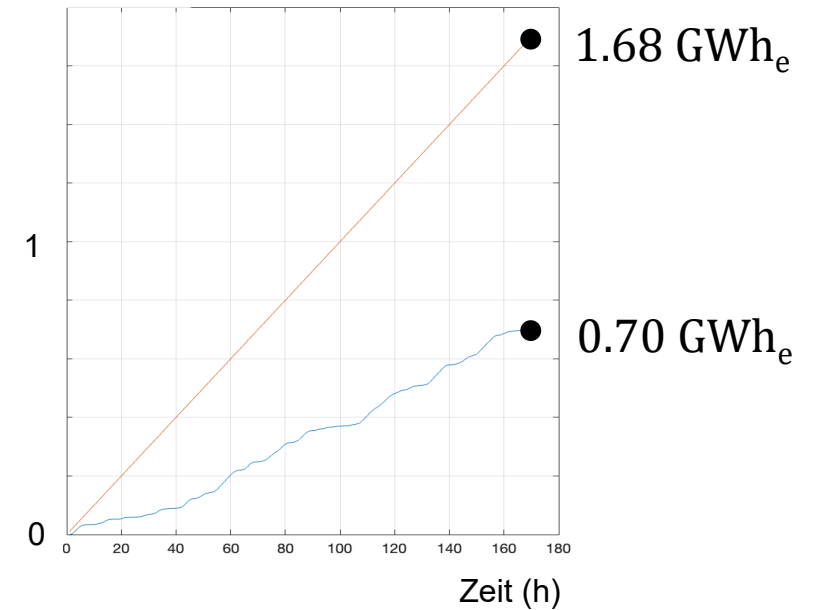
10 MW_p Nennleistung



Leistung (MW_e)



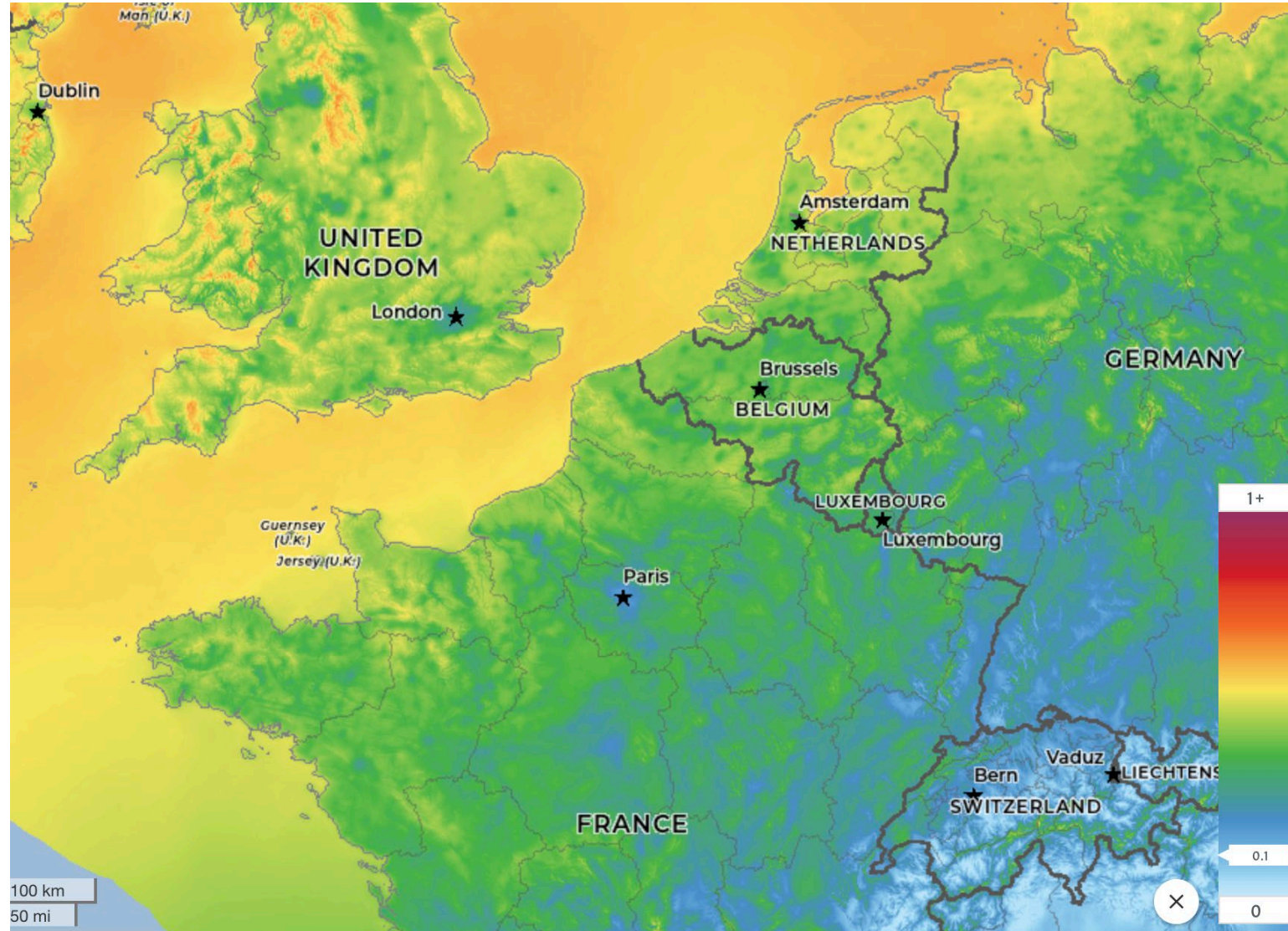
Energie (GWh_e)



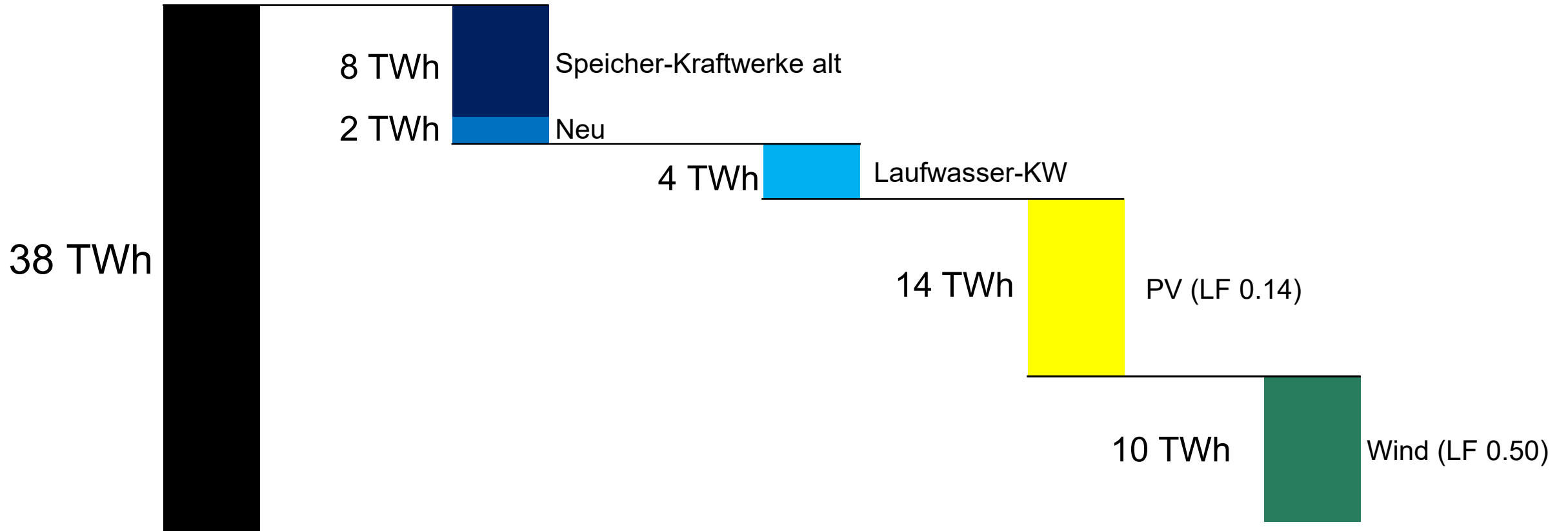
$$\text{Lastfaktor} = \frac{0.70 \text{ GWh}_e}{1.68 \text{ GWh}_e} = 0.42$$

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

Lastfaktor Windturbinen – Jahresdurchschnitt¹⁾



Winter – 36 GW PV und 7 GW Wind in den Alpen



Gütsch (Andermatt) – 4 Anlagen mit Gesamtleistung 3.3 MW_p



Bild zur Verfügung gestellt von wind-data.ch

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

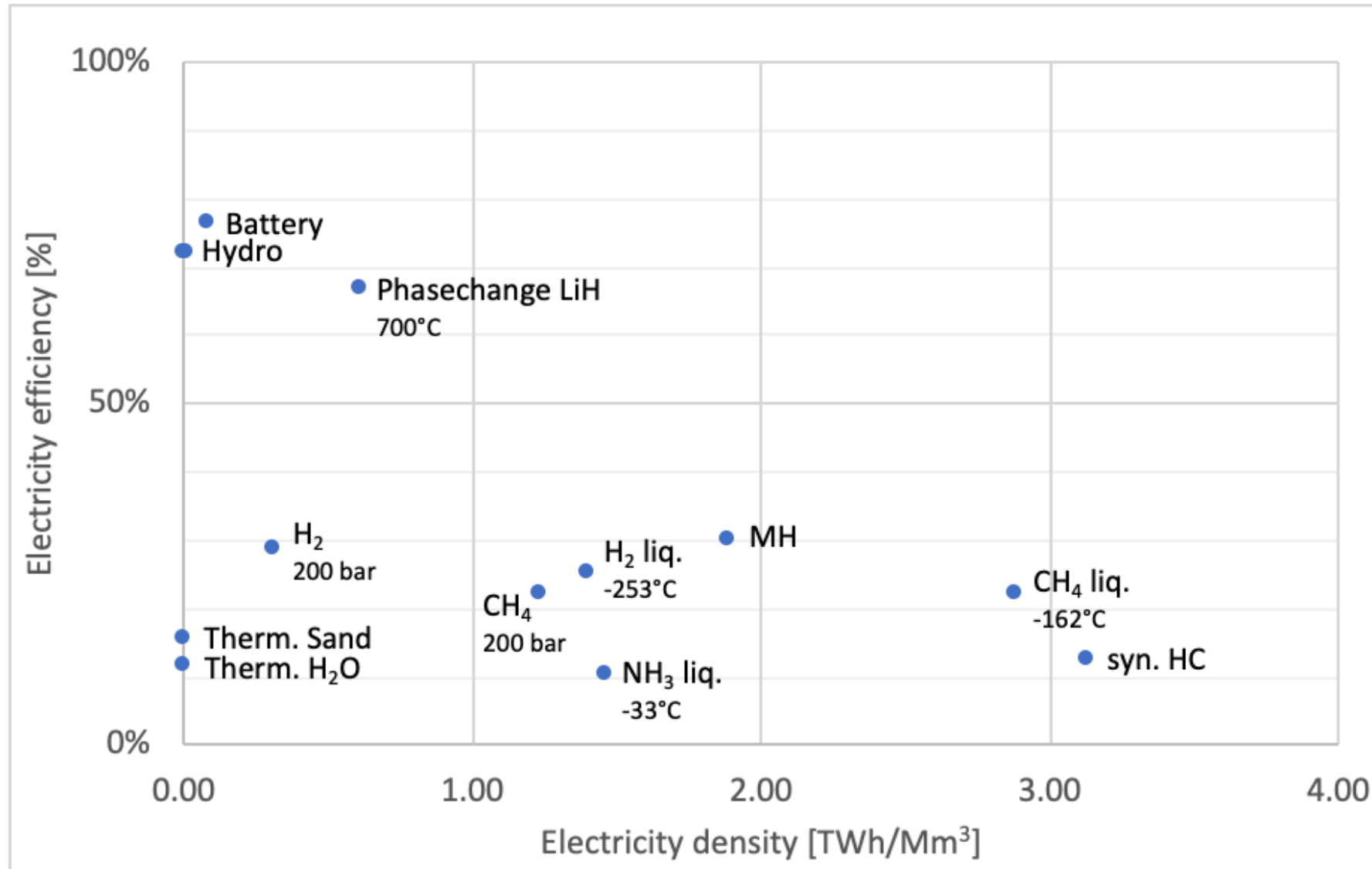
Batteriespeicher



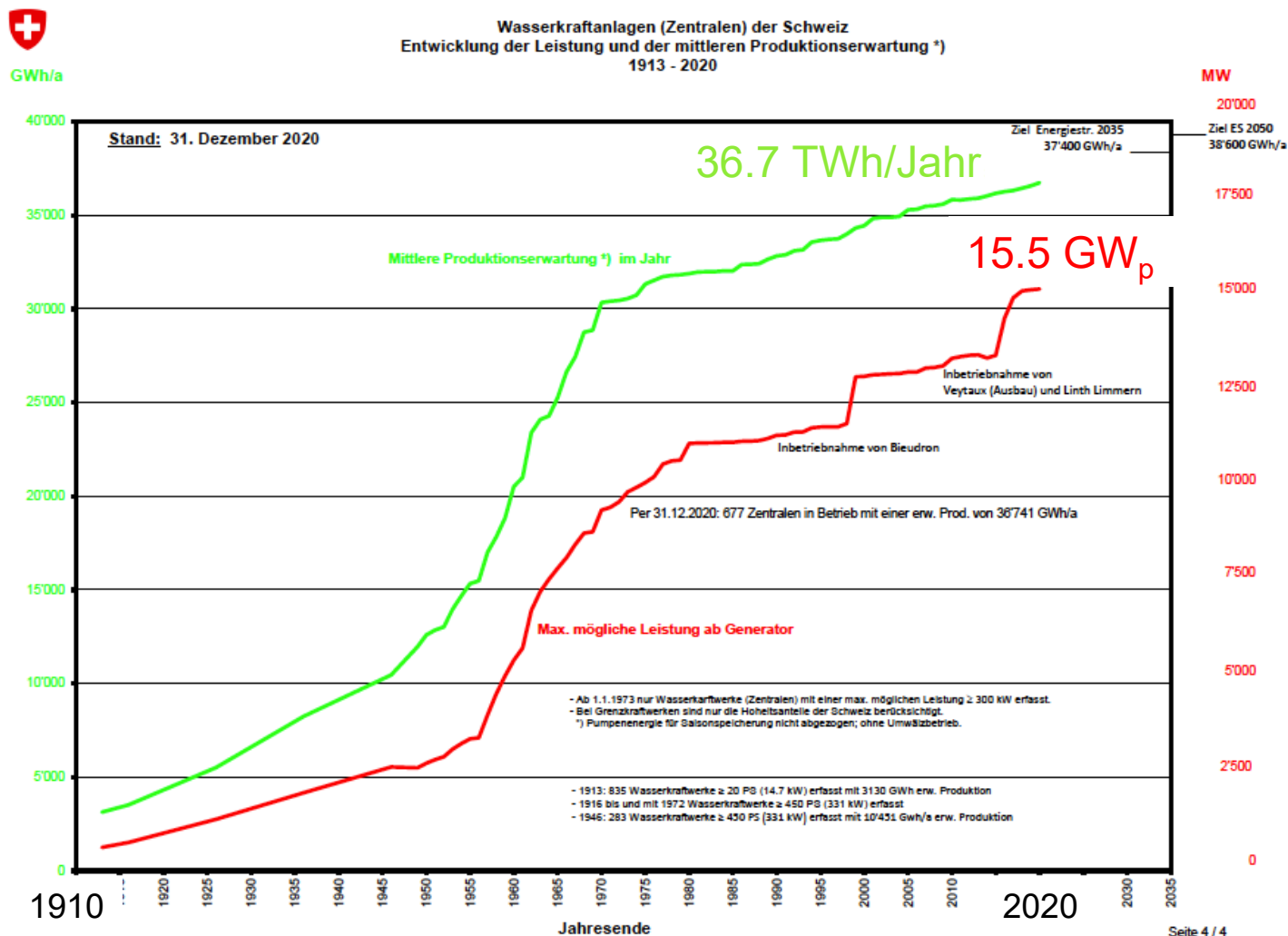
Kosten Batteriespeicher Tagesausgleich Sommer

- 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

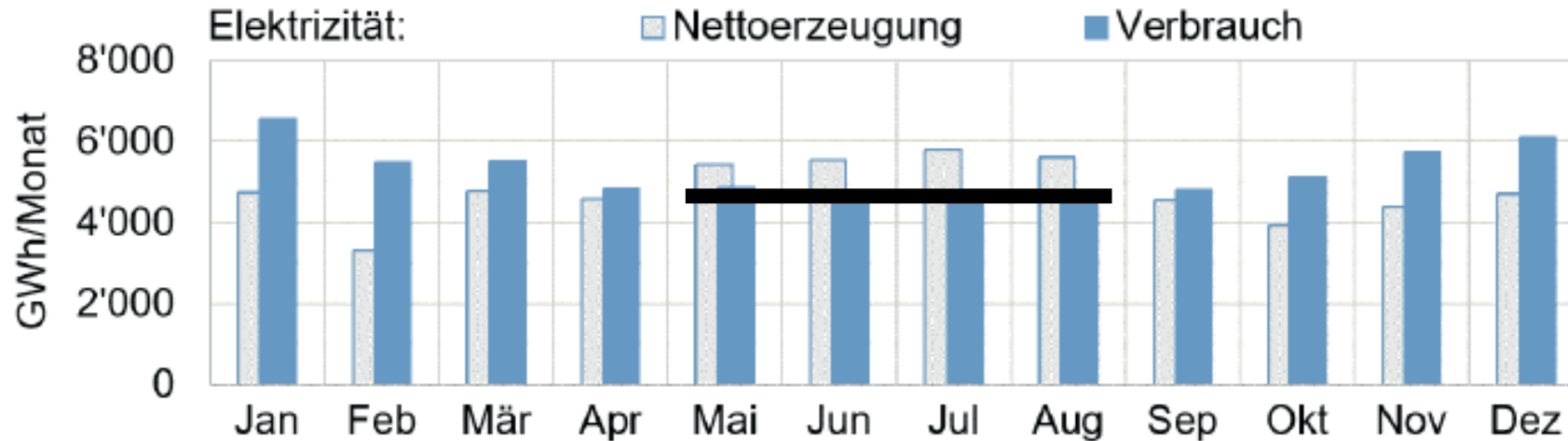
Davon 3.5 GW_p PSP-KW

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



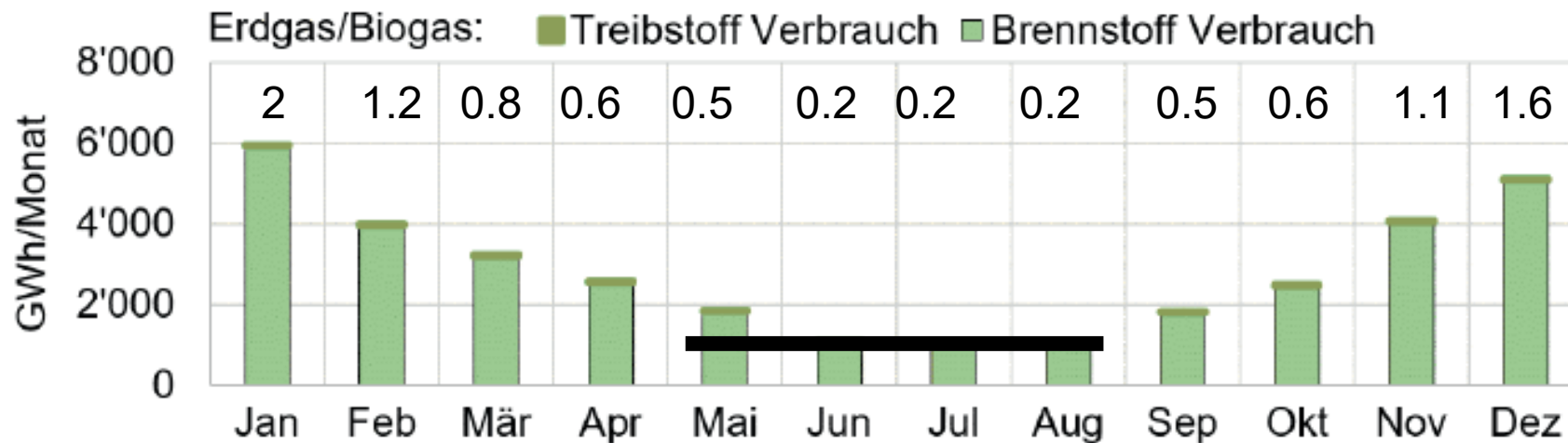
4'500 GWh/Monat entspricht
ca. 6.3 GW_e Dauerleistung

Zusätzlich:

1.40 GW_e für Mobilität
0.35 GW_e für Gasersatz
0.35 GW_e für Ölersatz

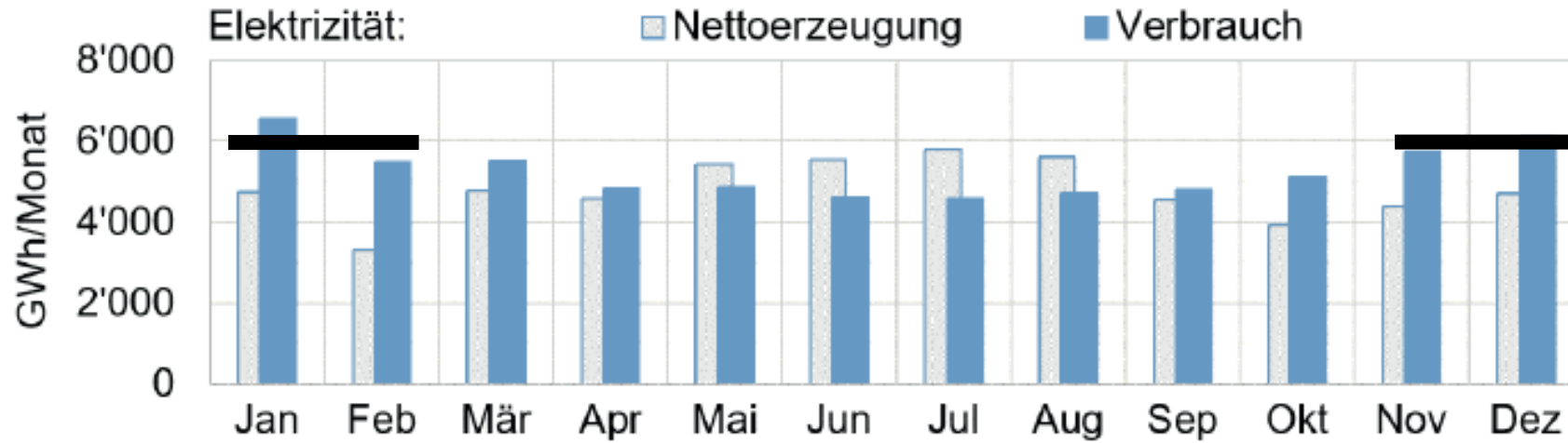
Sommer 2018 ≈ 8.4 GW_e

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



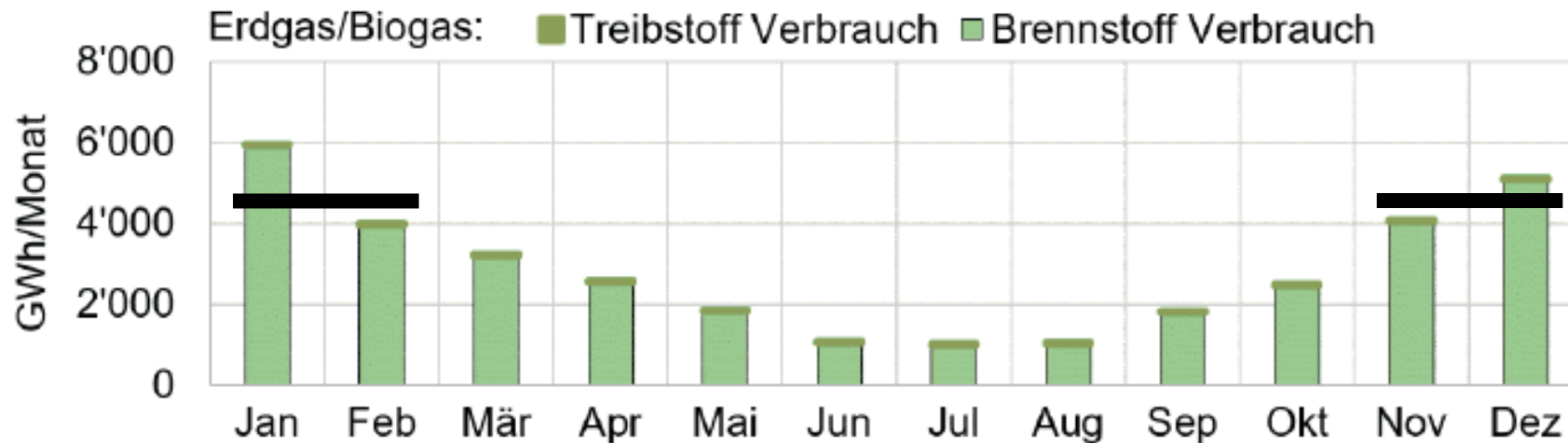
6'000 GWh/Monat entspricht
ca. 8.0 GW_e Dauerleistung

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

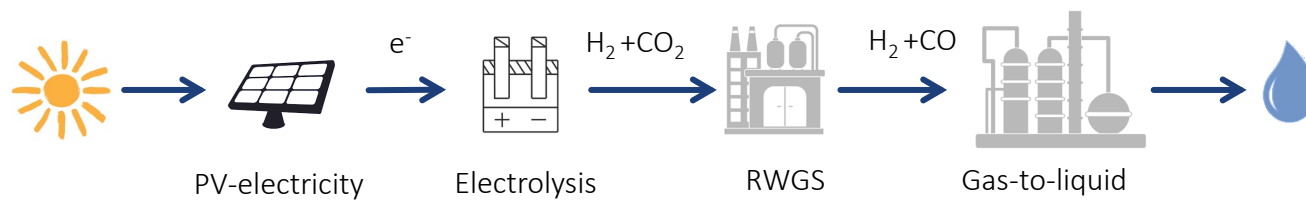
SynFuels – Viele Wege führen nach Rom

Major Pathways

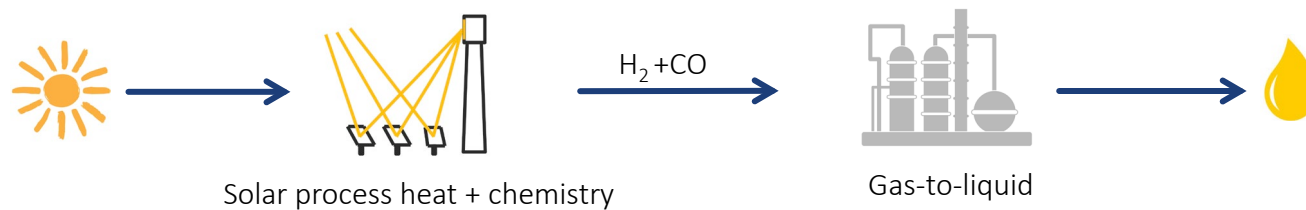
Bio-fuels



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”

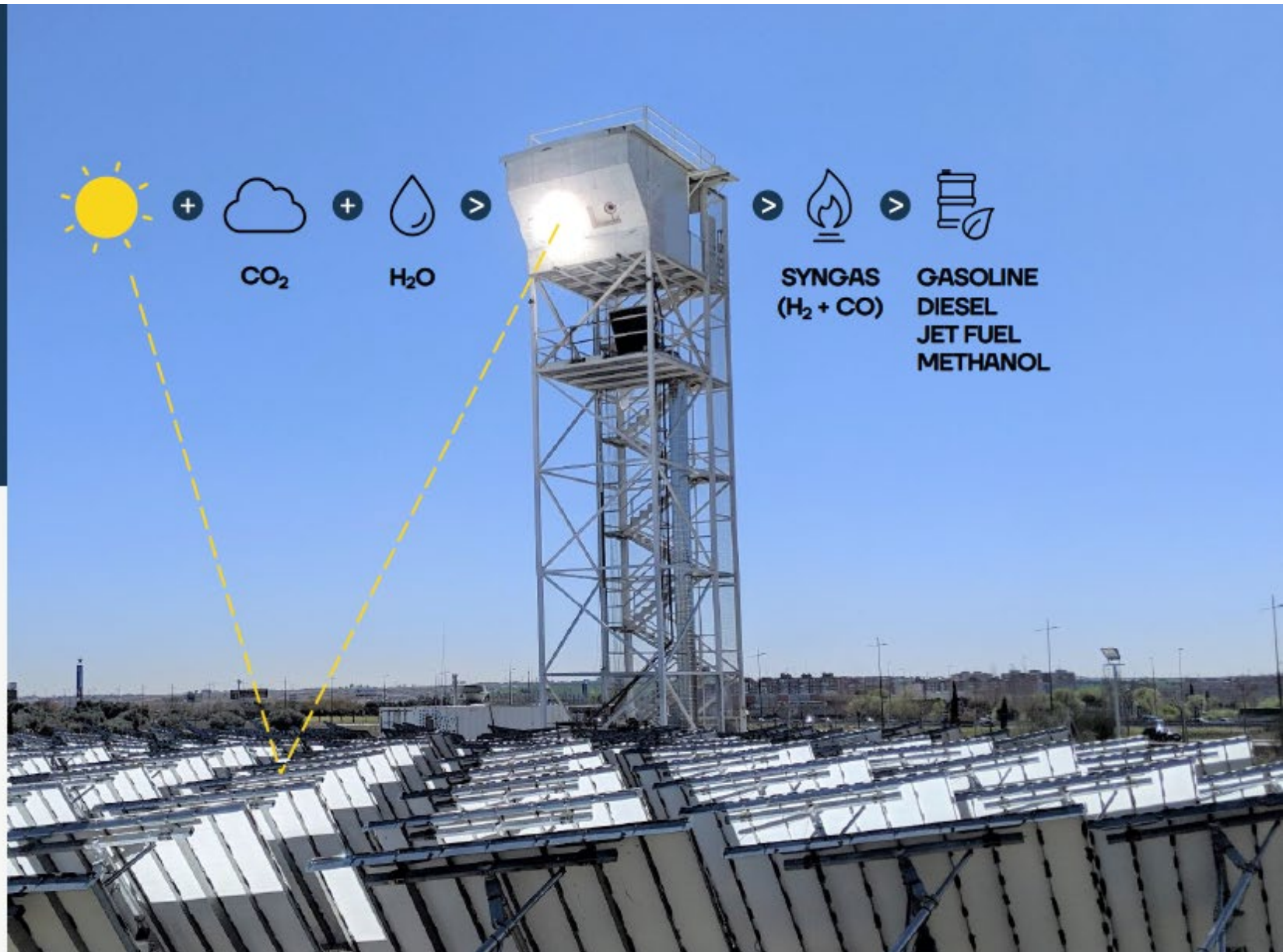
H₂-Quelle: Hydrolyse
mit CO₂-freiem Strom
(Geothermie)



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?

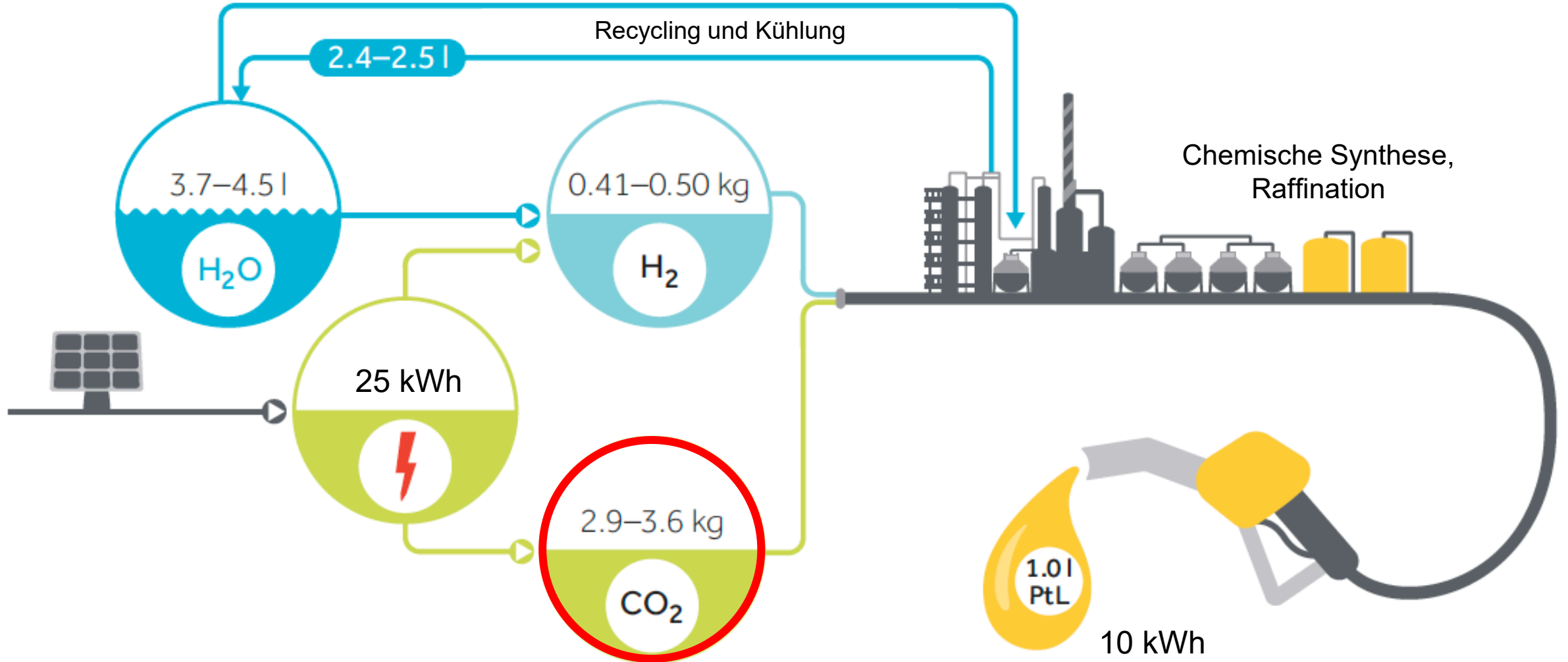


«Power-Diesel-Power»

Source: Shell (2018a)

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

Strombedarf im Sommer $14 \text{ TWh}_e / 0.24 = 58 \text{ TWh}_e$



Widerstandsheizungen Schweiz

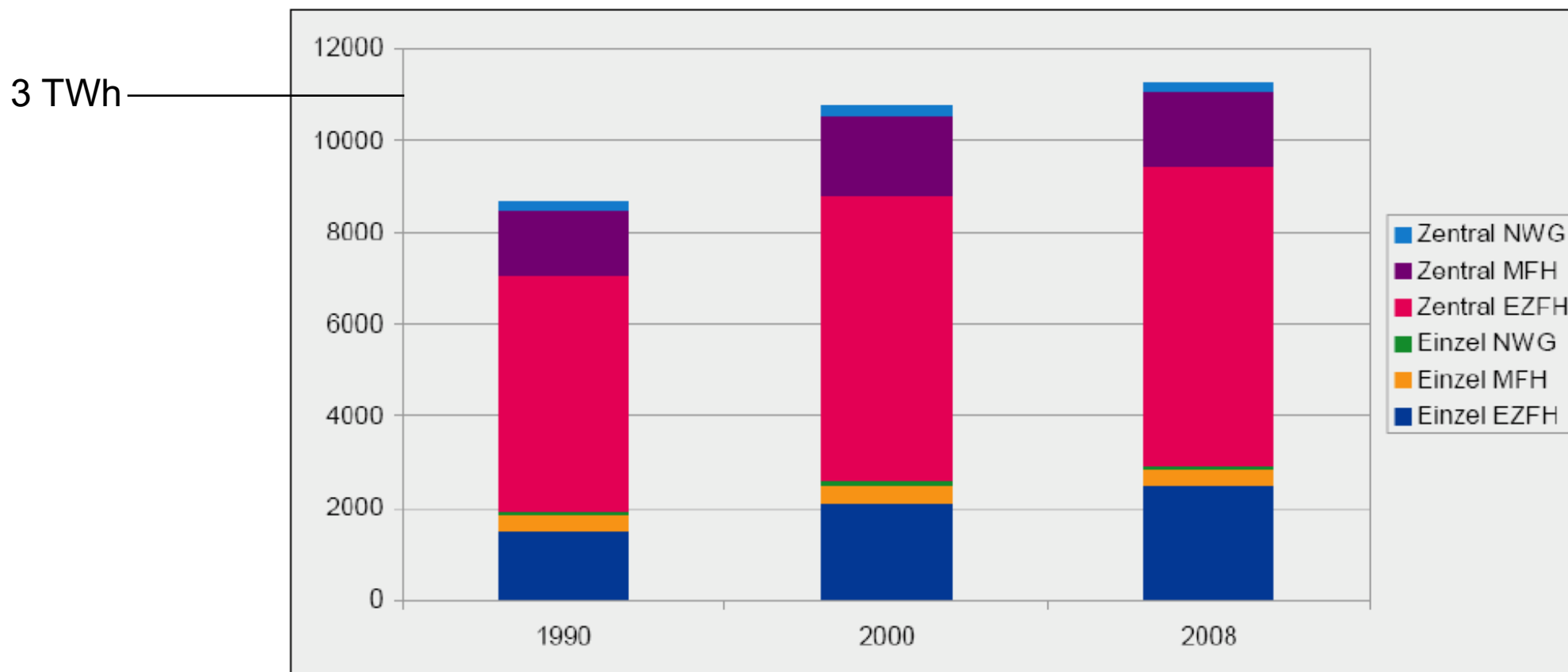


Fig. 16 Endenergieverbrauch durch elektrische Widerstandsheizungen, nach Heizungssystem und Gebäudetyp (in TJ) . NWG = Nichtwohngebäude. Quelle: Prognos [2]