

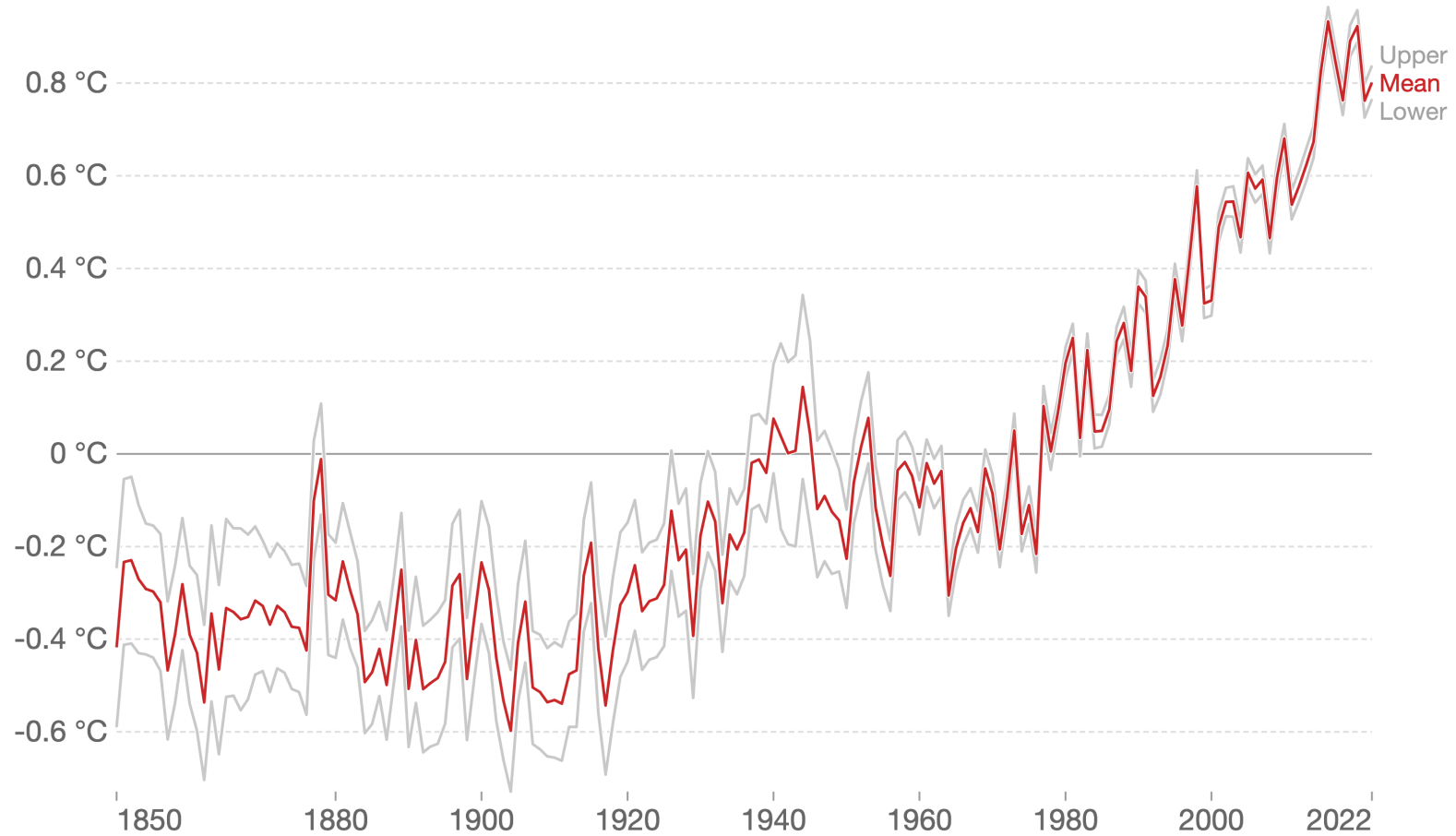
# **Energieversorgung Schweiz 2050**

27. Februar 2023, Bern

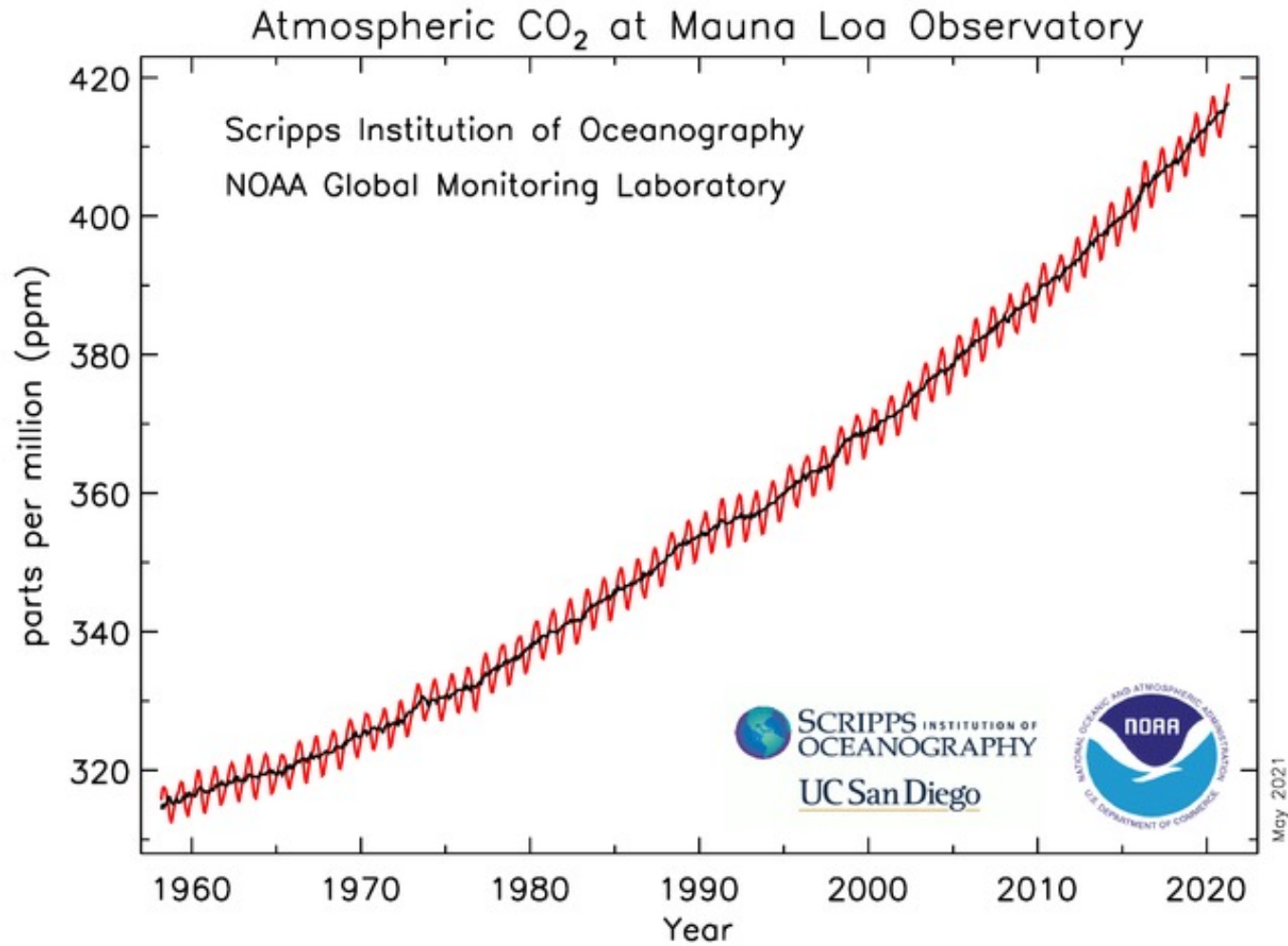
Lino Guzzella

# **Generelle Bemerkungen**

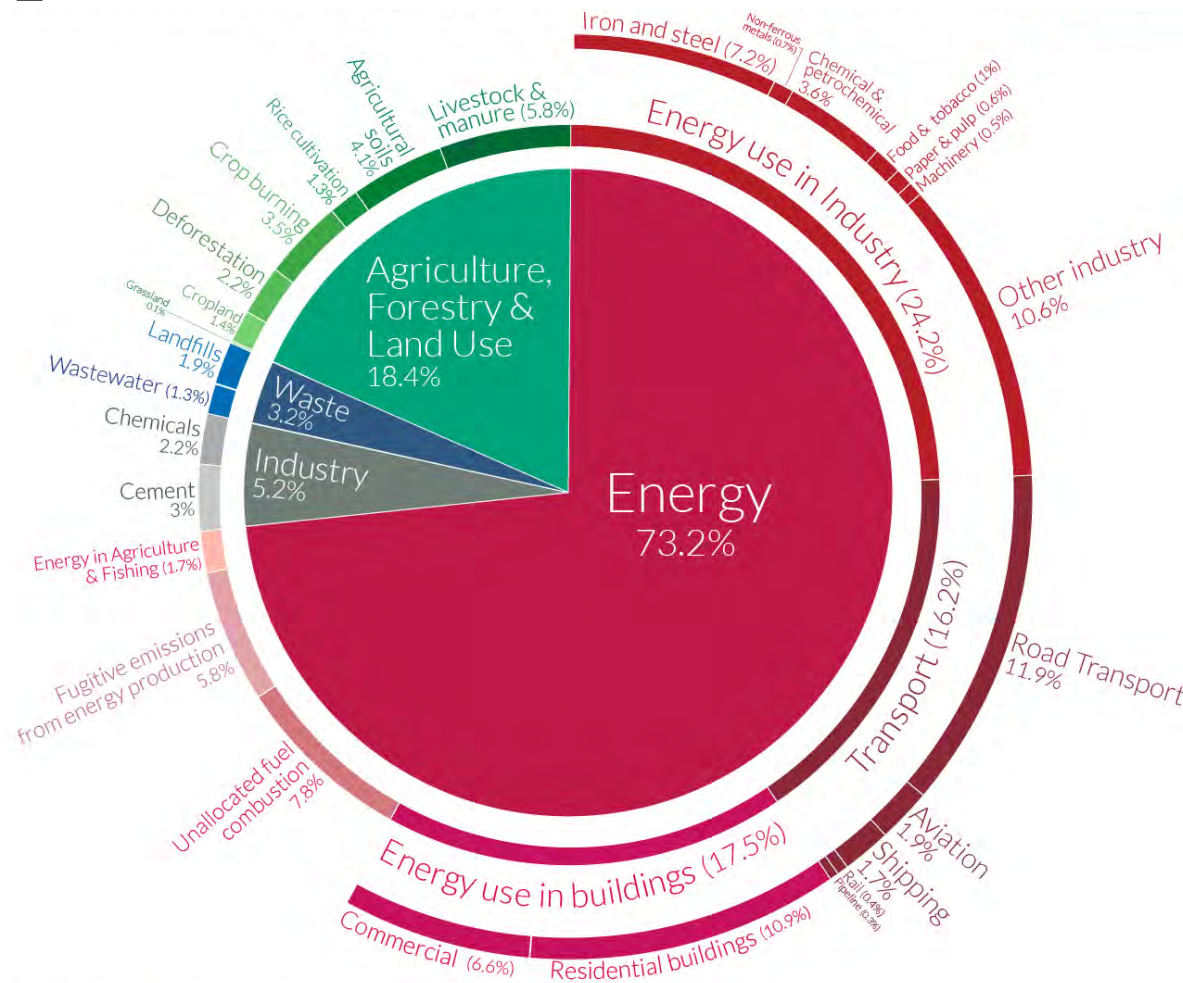
# Average Global Temperature Development



# Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration



# Welt – CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Sektoren (2020)



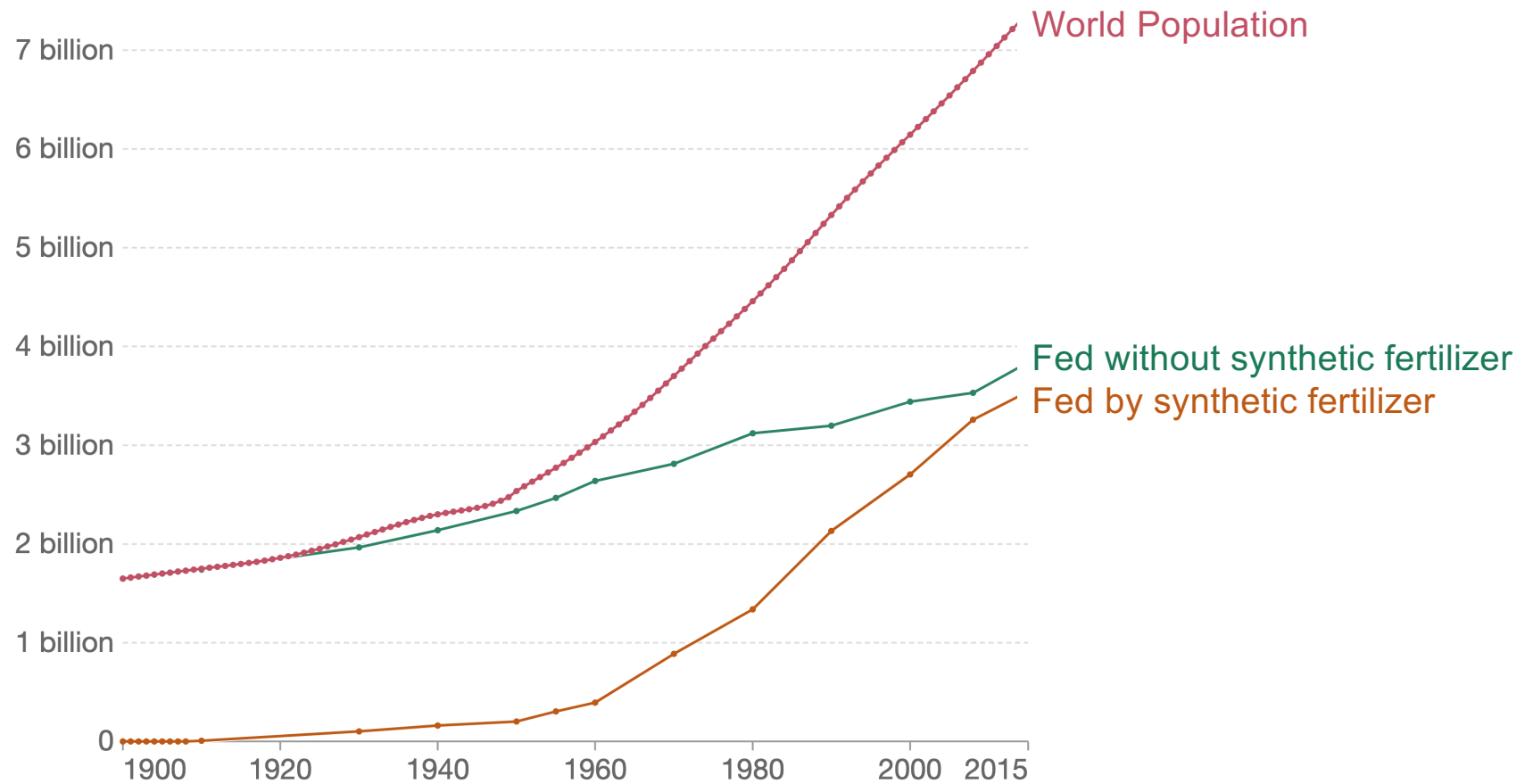
<https://ourworldindata.org/>

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

# What Feeds the World?



# How to Produce Synthetic Fertilizer?

Nitrogen  
(78% ambient air)



Natural  
gas



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

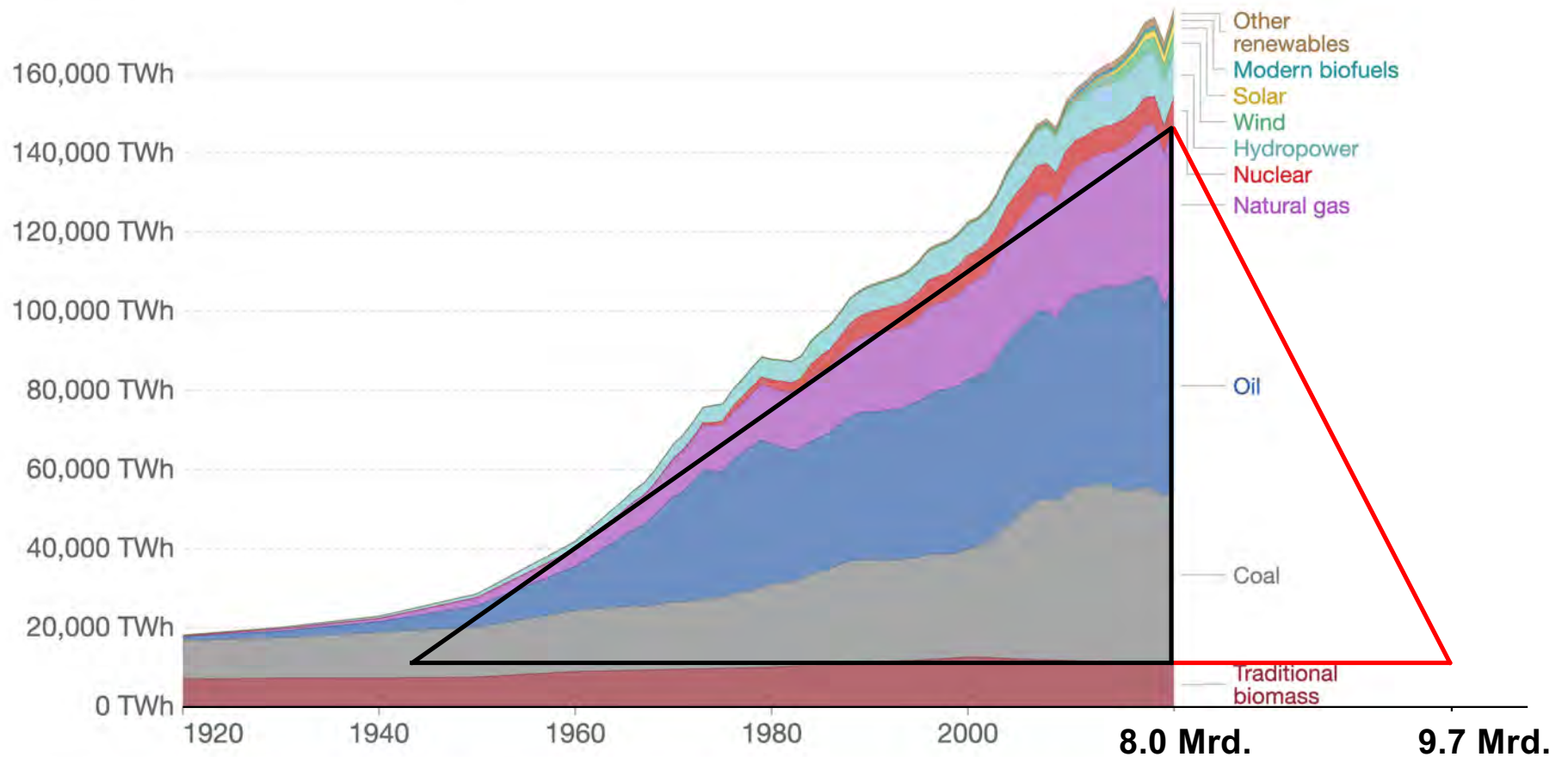


Ammoniumnitrate  
Urea

.....

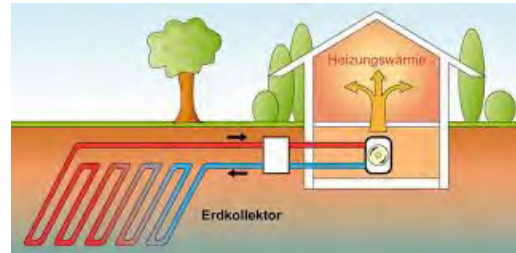
Total ca. 230 Mio. t per year, ca. 30 % China, ca. 10% Russia, ...

# Welt – Jahresverbrauch Primärenergieträger

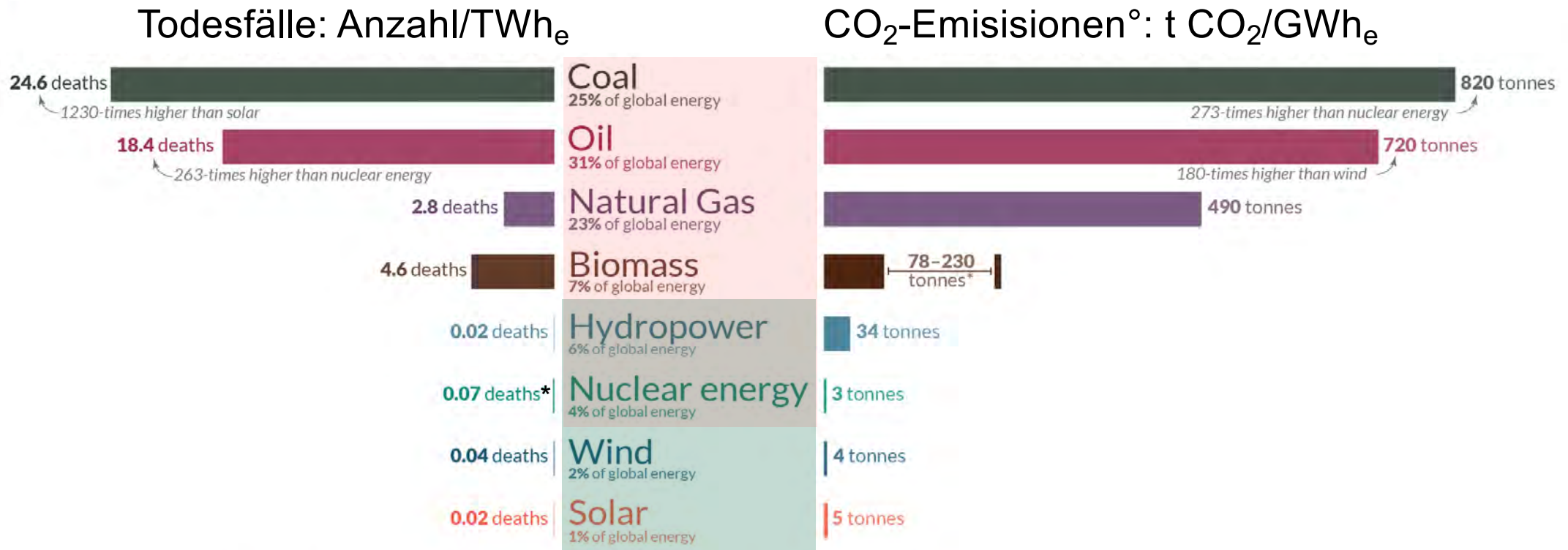




# Elektrifizierung als zentrales Element



# Vergleich diverser Stromerzeugungsarten



<https://ourworldindata.org/>,

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

° Einschliesslich aller Emissionen beim Bau, Betrieb, ... («graues» CO<sub>2</sub>)

# Load Factors

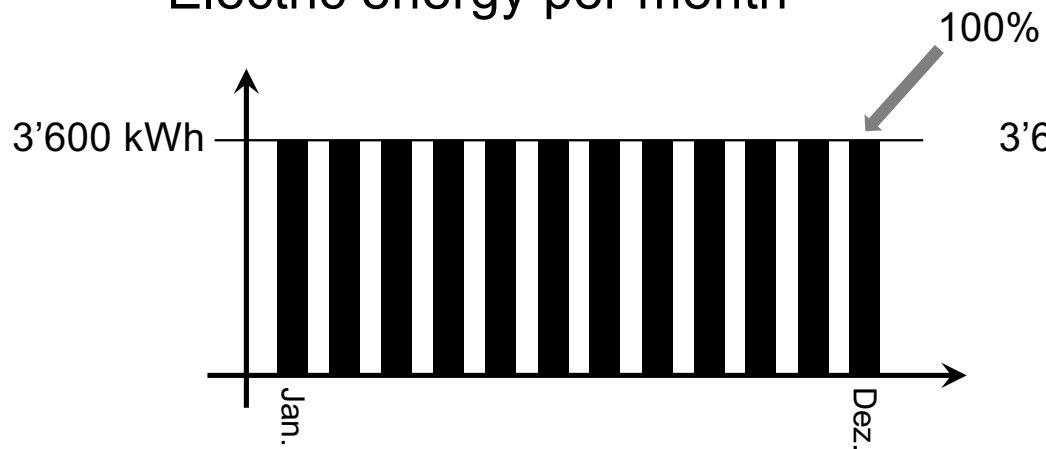
Rated power 5 kW



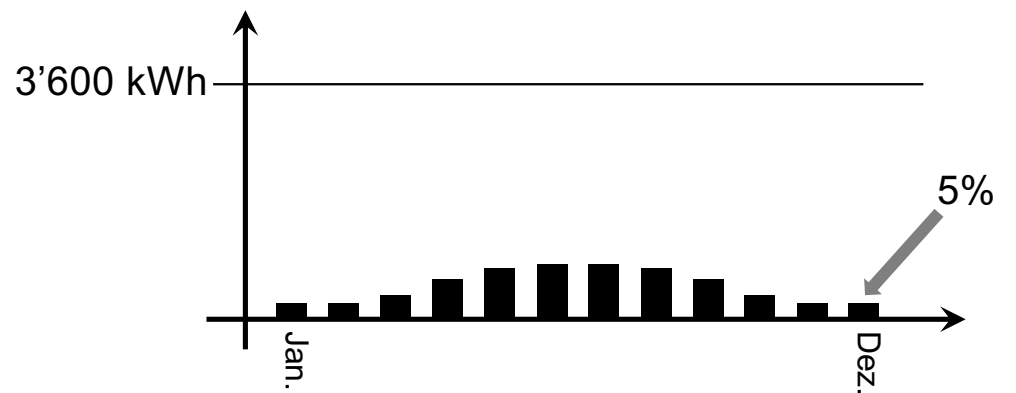
Rated power 5 kW



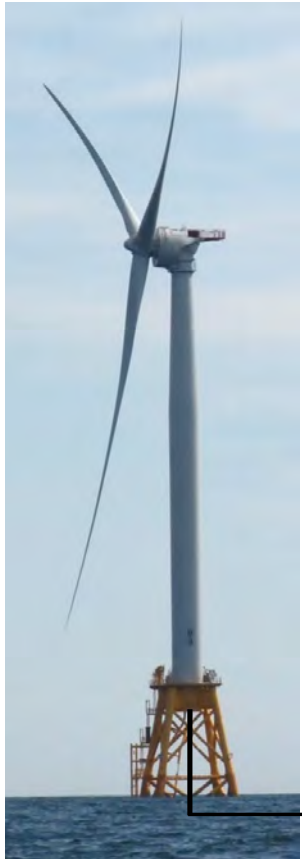
Electric energy per month



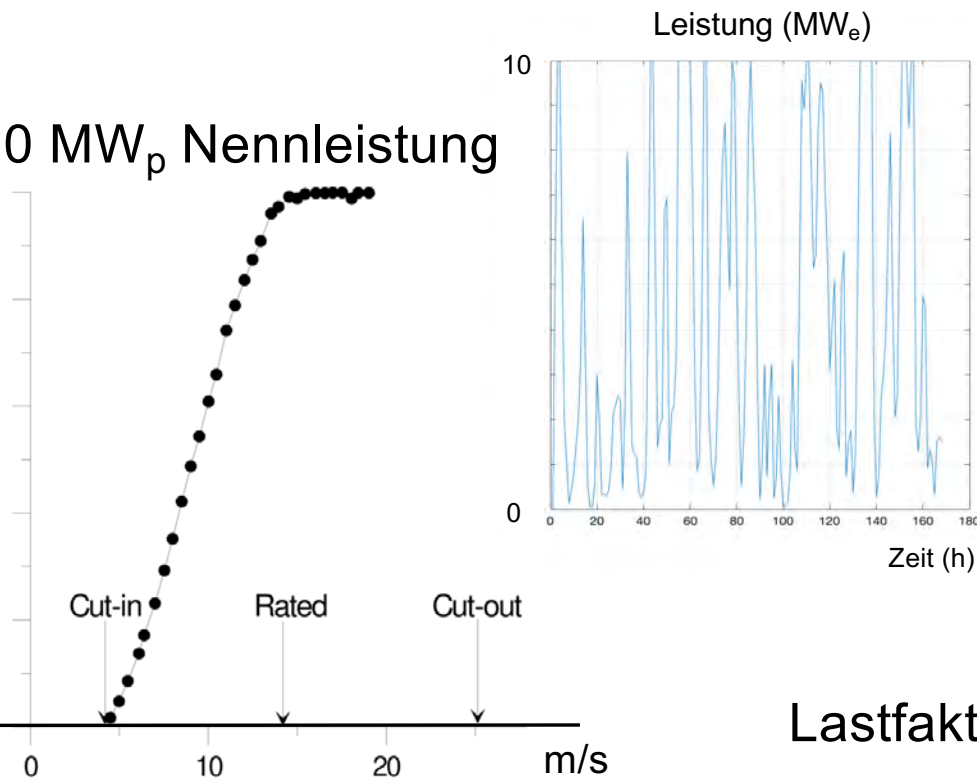
Electric energy per month



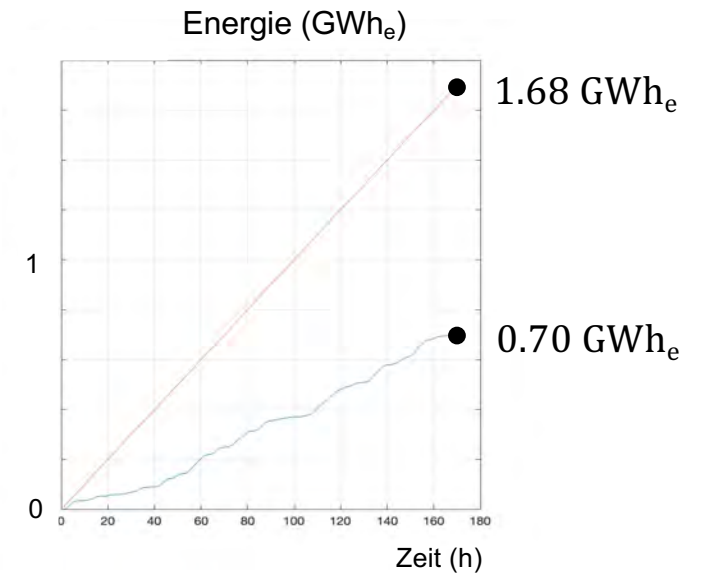
# Nennleistung und Energieertrag



10 MW<sub>p</sub> Nennleistung



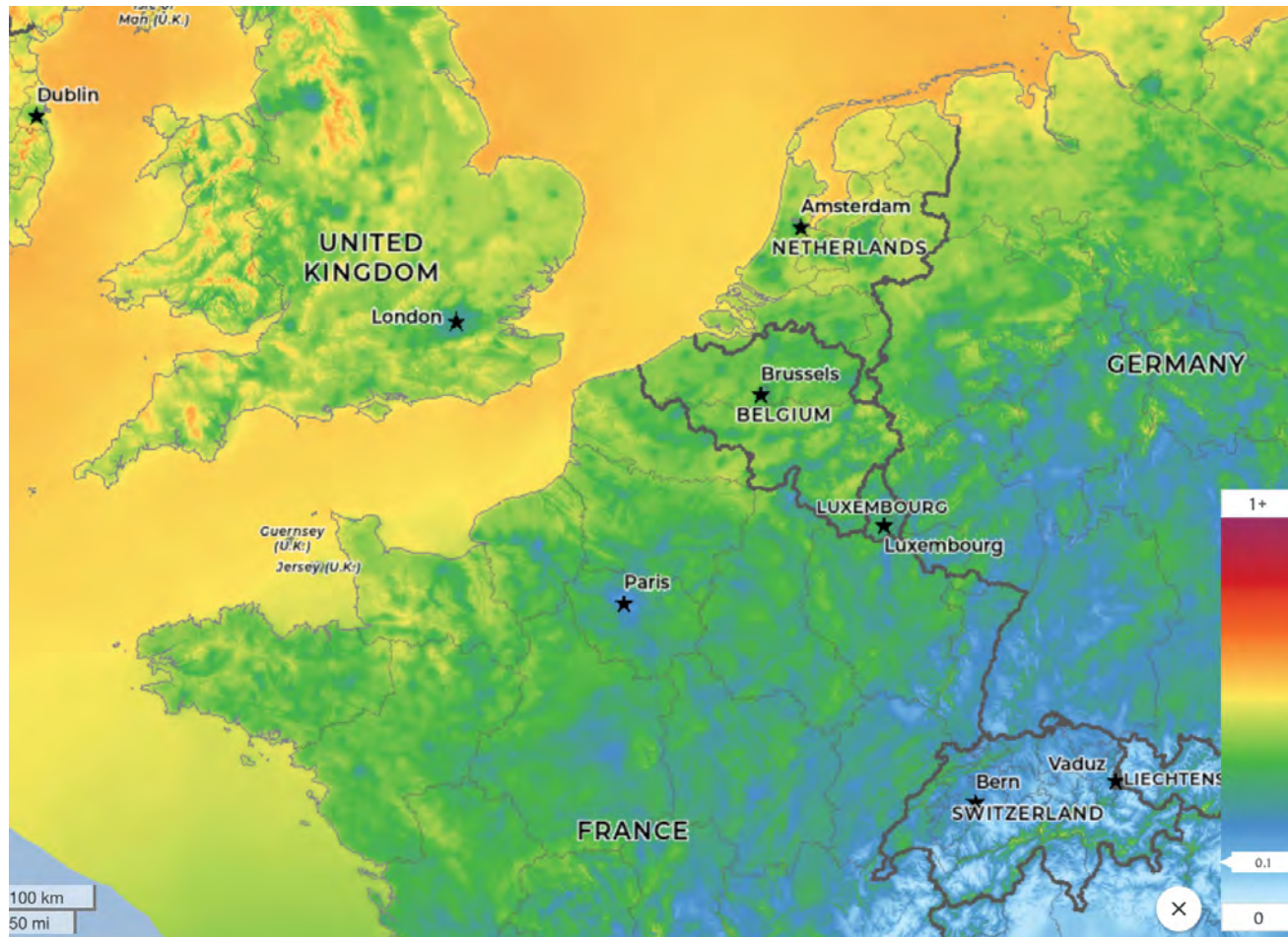
$$10 \text{ MW}_p \cdot 7 \text{ d} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 1.68 \text{ GWh}_e$$



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

Photo by Mark Harrington/Newsday RM via Getty Images

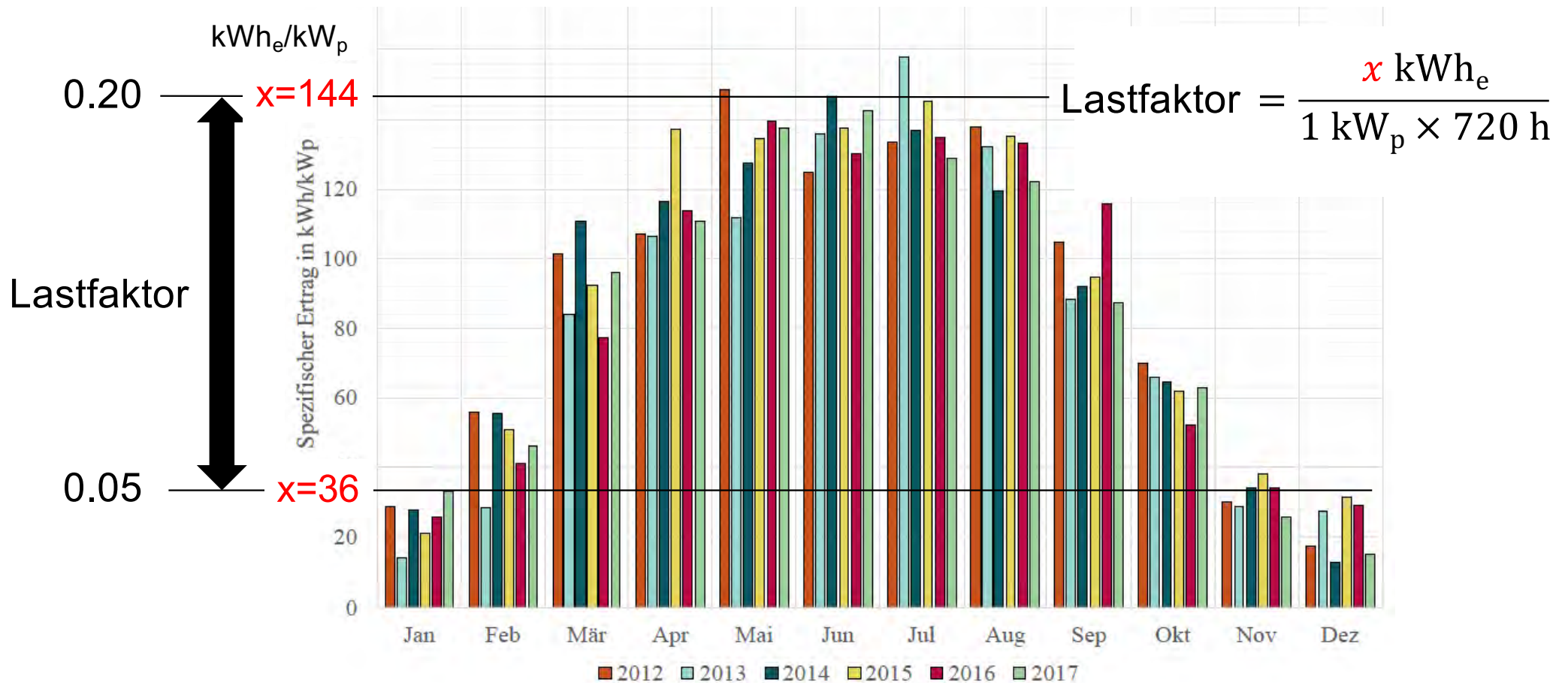
# Lastfaktor Windturbinen – Jahresdurchschnitt<sup>1)</sup>



Quelle: <https://globalwindatlas.info/en/>

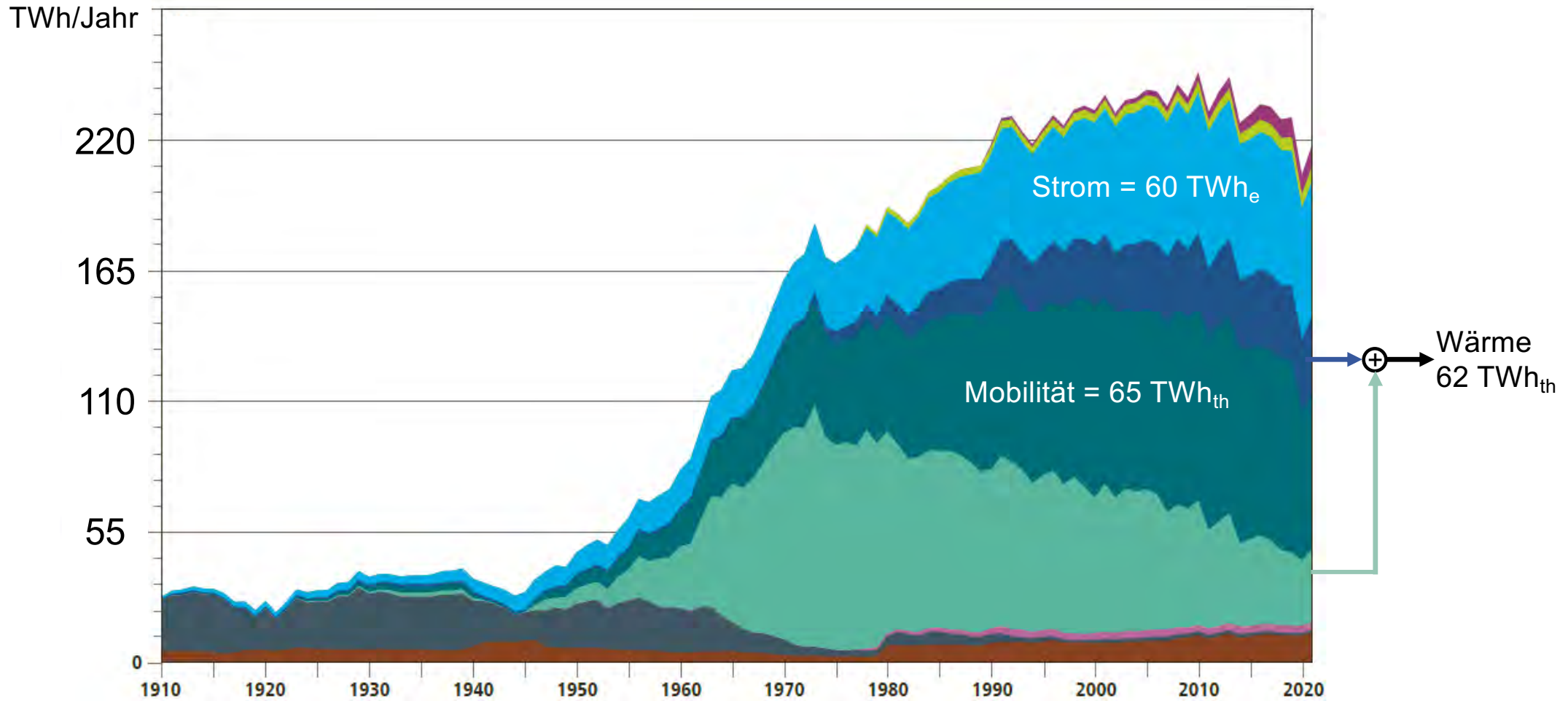
<sup>1)</sup> Nabenhöhe 150 m

# Lastfaktoren PV-Anlagen – Monatsdurchschnitt (Mittelland)



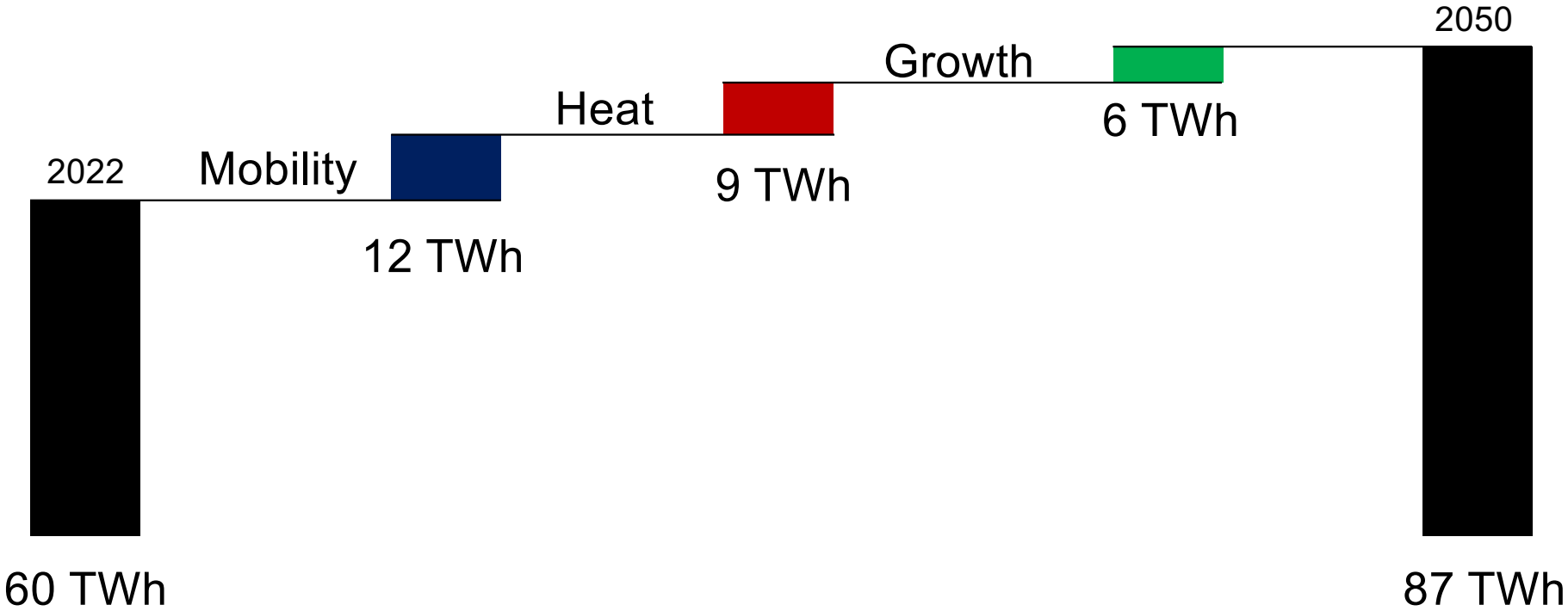
# Die Schweiz

# Endenergieverbrauch Schweiz





# Future Electricity Demand CH – 2050



Nota bene: Average power: Sommer  $\approx$  9 GW, Winter  $\approx$  13 GW

# Abschätzung jährlicher Strombedarf Schweiz im Jahr 2050

Annahmen: Gebäude werden isoliert, Wärmebedarf statt heute 62 TWh<sub>th</sub> nur noch 31 TWh<sub>th</sub>

Alle Raumwärme wird durch Wärmepumpen erzeugt mit COP von 3.5 (Jahresmittel), 31 TWh<sub>th</sub> / 3.5 ≈ 9 TWh<sub>e</sub>

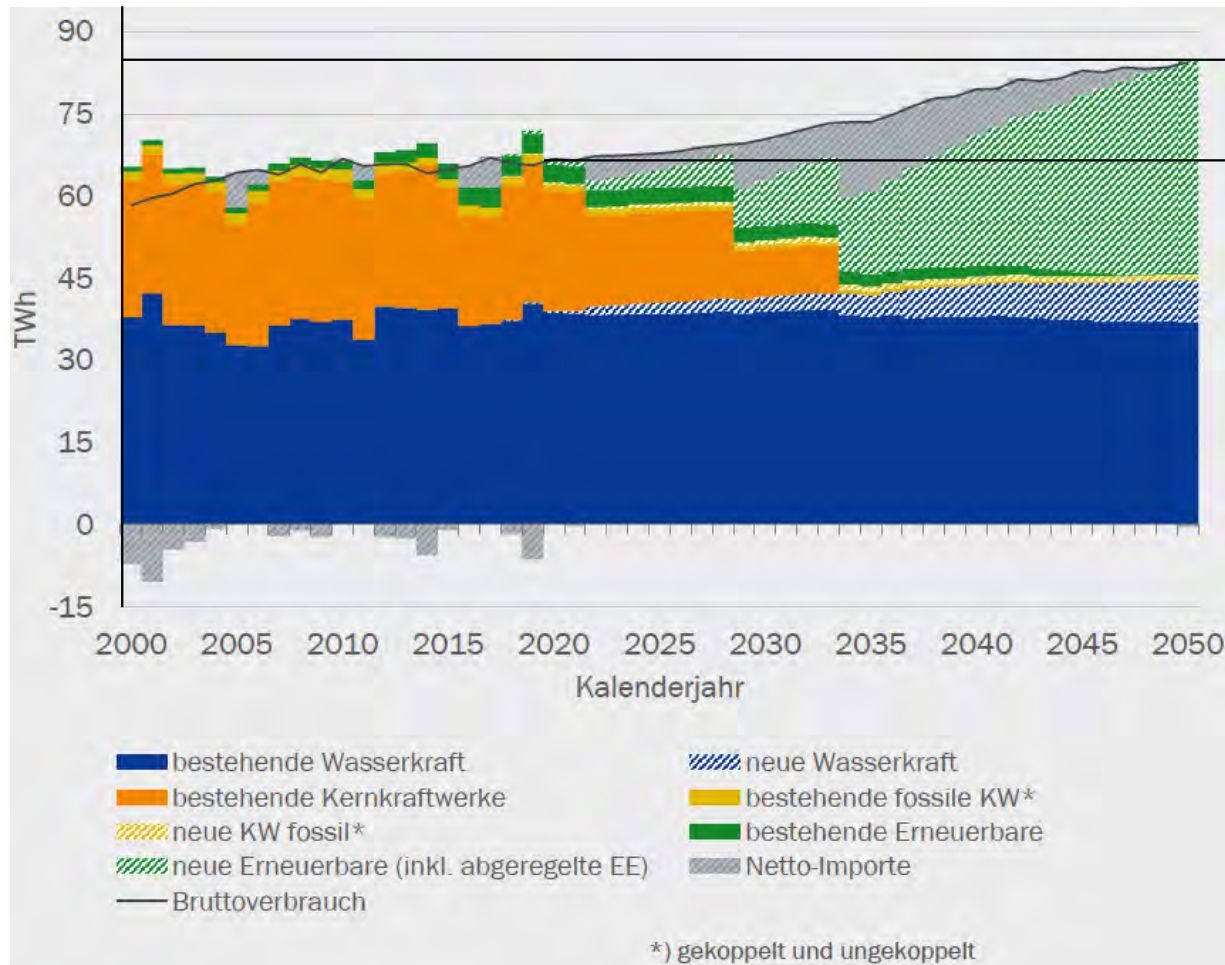
Mobilität rein elektrisch, 5 Mio. Autos, 20 kWh<sub>e</sub>/100 km, 12'000 km/Jahr ≈ 12 TWh<sub>e</sub>

Bevölkerungswachstum, neue Anwendungen, ... führen zu Wachstum (CAGR) von 0.35% pro Jahr, bis 2050 ≈ 6 TWh<sub>e</sub>

**Durchschnittsleistung: Sommer ≈ 9 GW<sub>e</sub>, Winter ≈ 13 GW<sub>e</sub>**

Abschätzung LGU, «Winter» hier die vier Monate 1. November bis 28. Februar, im Winter=9.4 TWh<sub>e</sub>/Monat, im Sommer=6.5 TWh<sub>e</sub>/Monat

# Zukünftige Stromversorgung Schweiz – Jahresbetrachtung



17 TWh<sub>e</sub>/Jahr

Abschätzung Zuwachs bis 2050:

+ 6 TWh<sub>e</sub> Bevölkerungswachstum

+ 9 TWh<sub>e</sub> für Wärmeversorgung

+12 TWh<sub>e</sub> für Elektromobilität

---

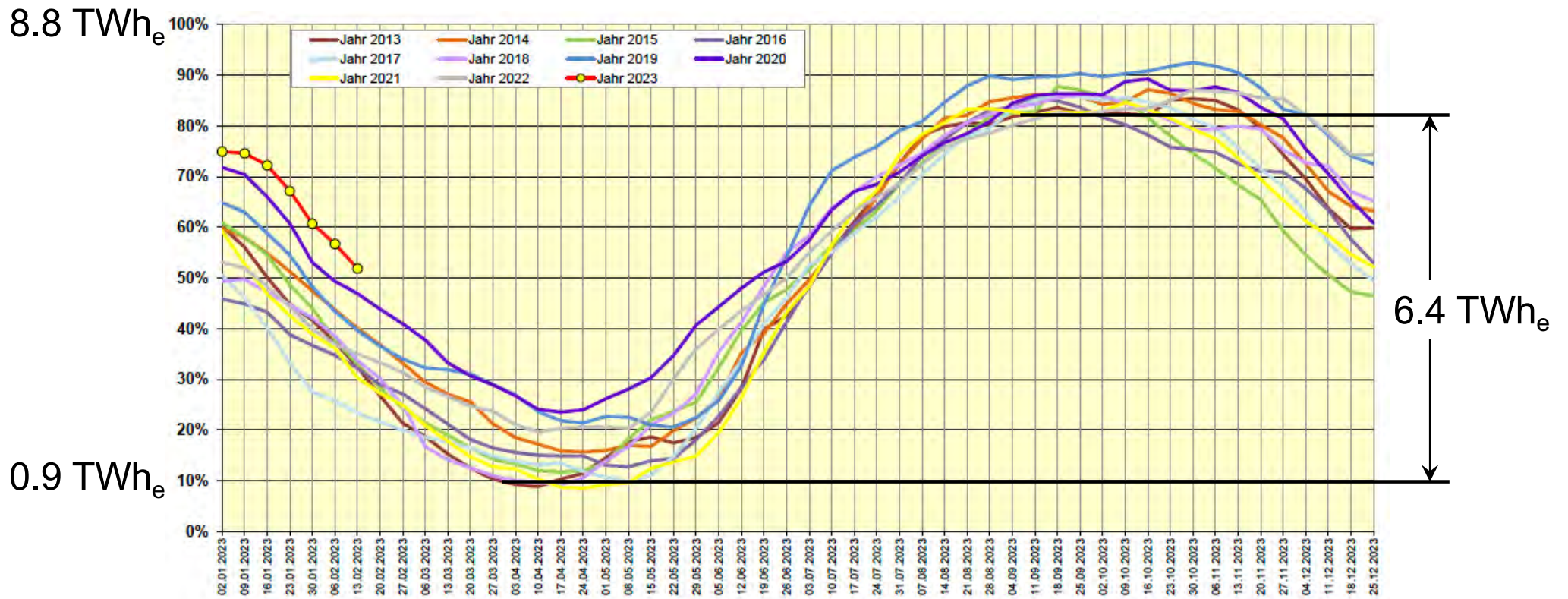
17 TWh<sub>e</sub> Geplante Steigerung

10 TWh<sub>e</sub> Nötige Einsparungen (?)

Abschätzung LGu

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

# Füllstände Schweizer Speicherseen



Quelle: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html/>

# Monatliche Erzeugungsanteile – 2021

— 2050 Winter

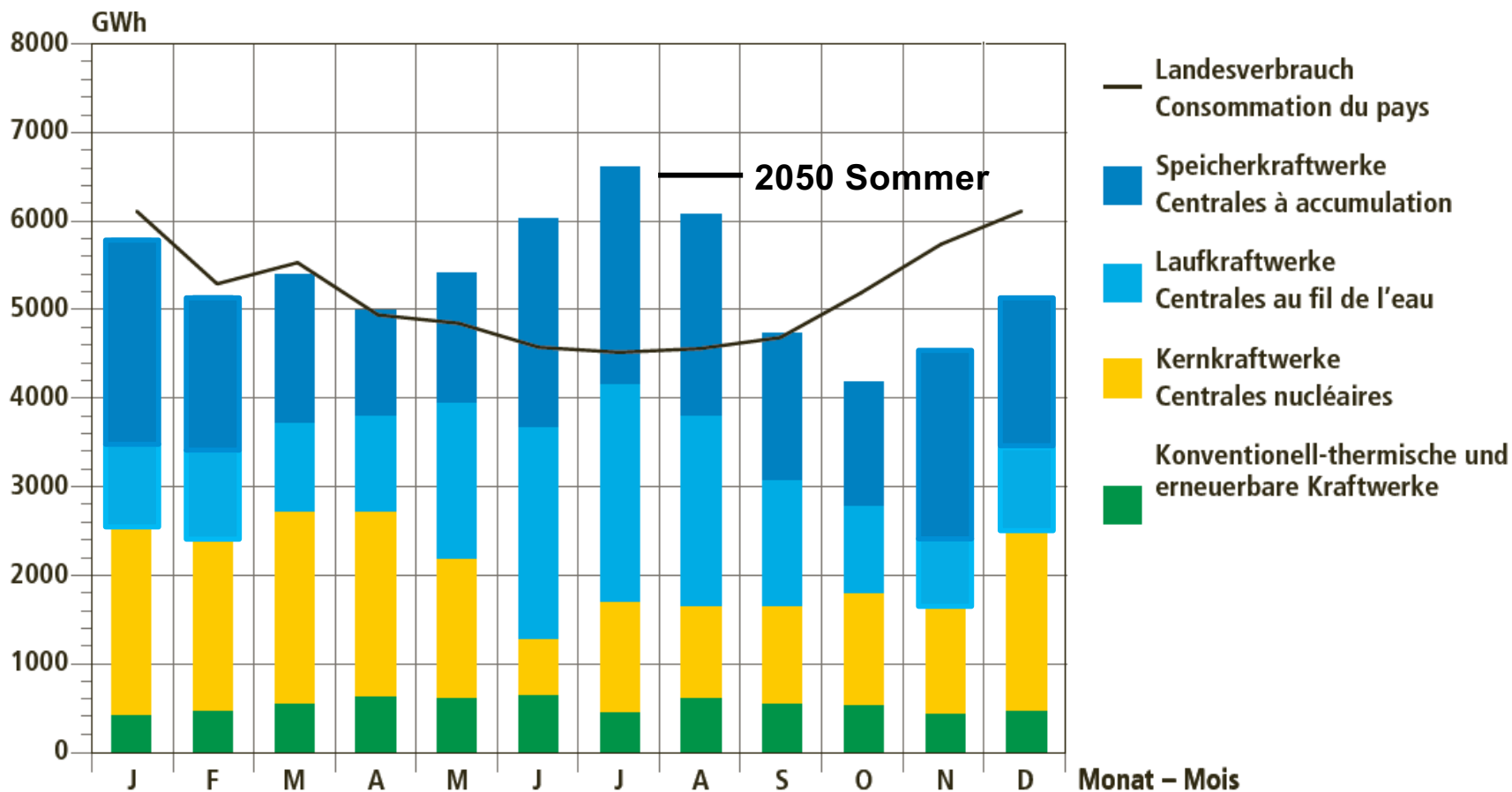
7.8 TWh<sub>e</sub>



3.7 TWh<sub>e</sub>

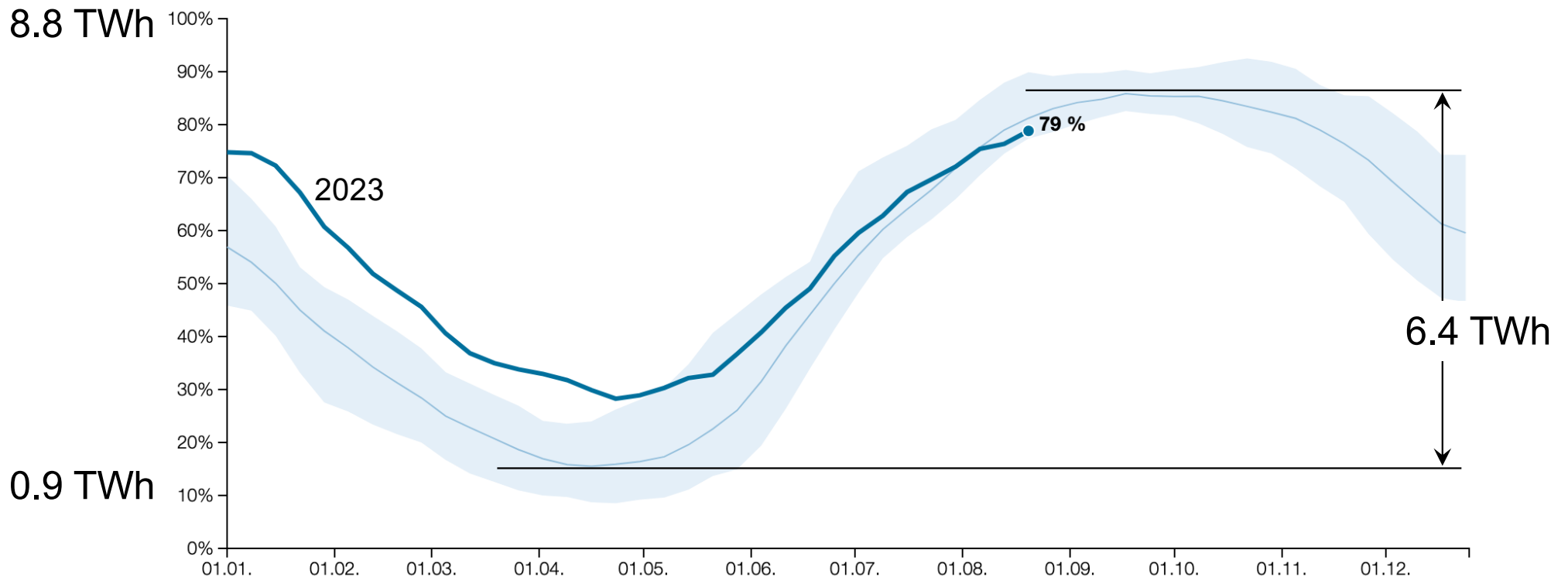


Speicher Lauf



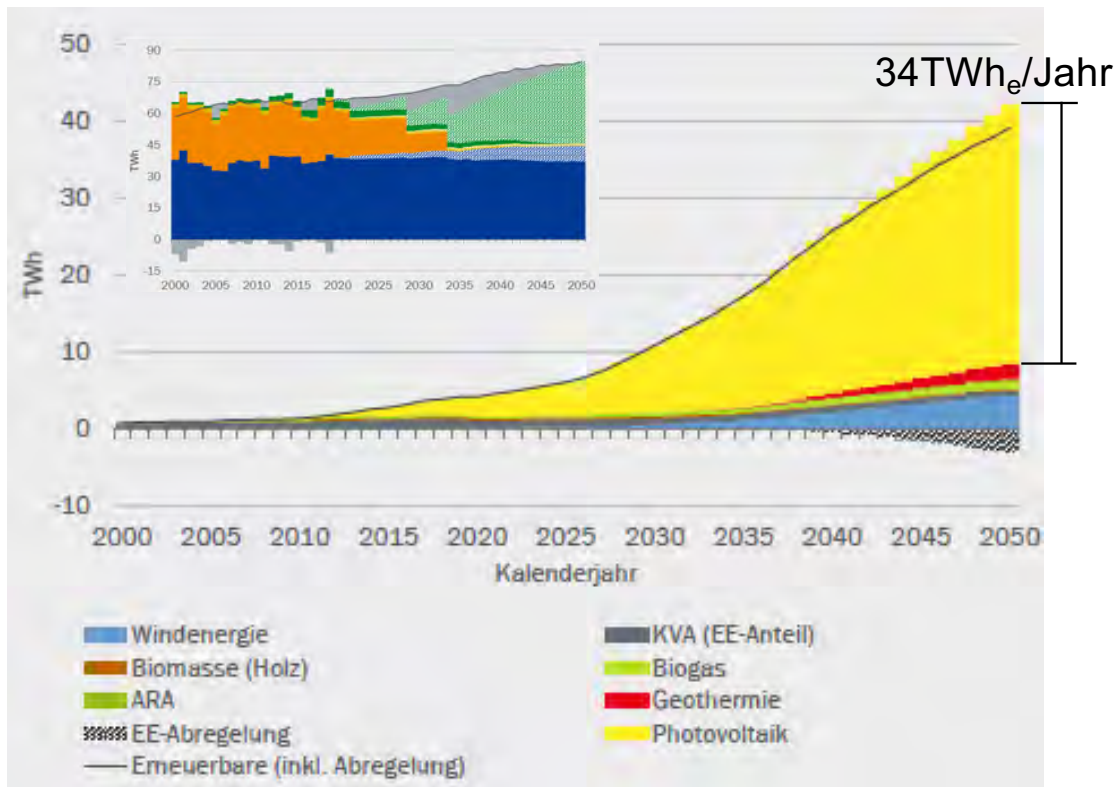
BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2021 (Fig. 10)  
OFEN, Statistique suisse de l'électricité 2021 (fig. 10)

# Historic and Actual Levels CH Hydro Storage



Quelle: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html/>

# Energie und Leistung von PV – Jahresbetrachtung



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

## PV-Anlagen CH, Jahr 2020

Installierte Leistung 2.9 GW<sub>p</sub>

Generierte elektrische Energie 2.75 TWh<sub>e</sub>/Jahr

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

Quelle: Swissolar, Faktenblatt, 2021

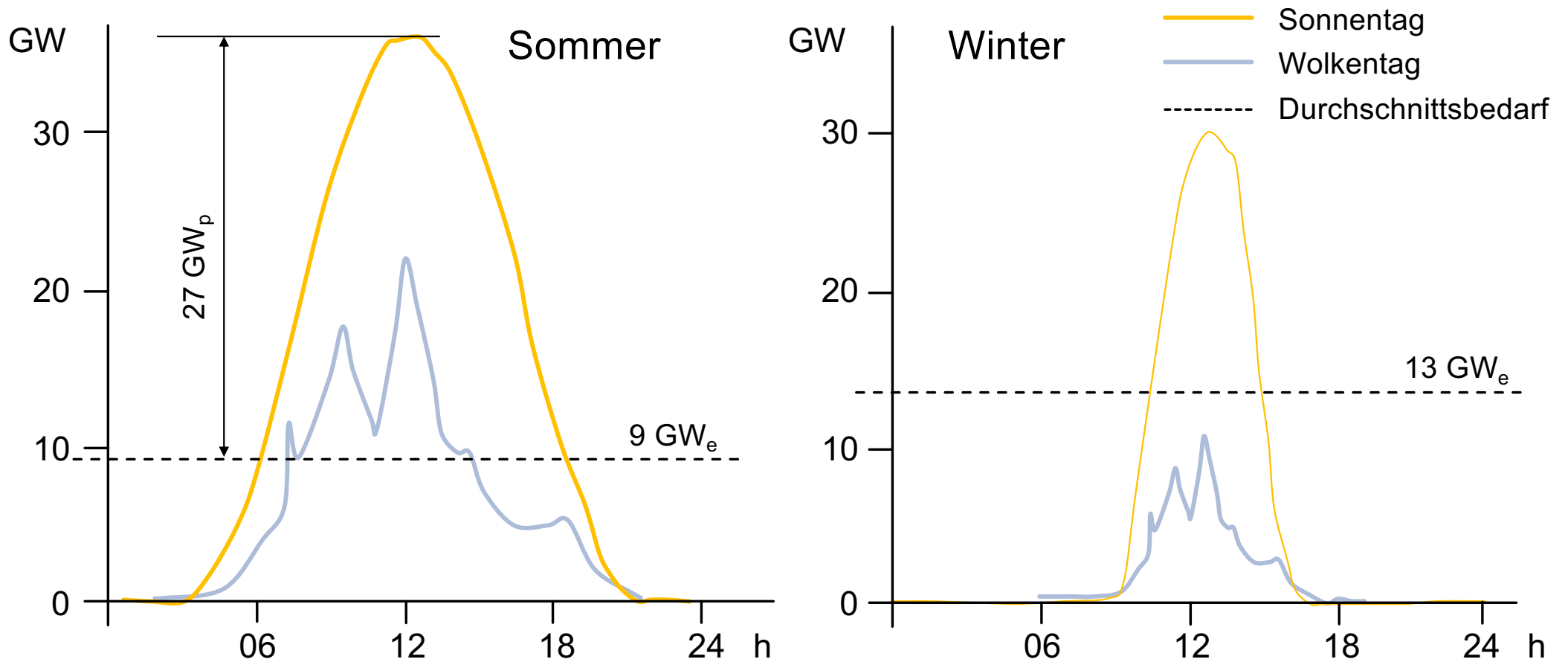
## PV-Anlagen CH, Prognosejahr 2050

$$\frac{2.9 \text{ GW}_p \times 34.00 \text{ TWh}_e}{2.75 \text{ TWh}_e} = 36.0 \text{ GW}_p$$

## Pro Memoria: Bedarf Prognosejahr 2050

Im Sommer  $\approx 9 \text{ GW}_e$ , im Winter  $\approx 13 \text{ GW}_e$

# Tagesschwankungen PV – 2050



Abschätzung LGU, Darstellung schematisch



## Wie gross müssen die Saisonspeicher für den Winter sein?

Bedarf	38 TWh <sub>e</sub>	(13 GW <sub>e</sub> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Speicherseen	10 TWh <sub>e</sub>	(8 TWh <sub>e</sub> + 2 TWh <sub>e</sub> Neubau bis 2050)
Laufwasser KW	4 TWh <sub>e</sub>	(Stand 2021, eher abnehmend)
Beitrag PV	5 TWh <sub>e</sub>	(36 GW <sub>p</sub> x <b>0.05</b> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Offen	19 TWh <sub>e</sub>	

# Wie gross müssen die Saisonspeicher für den Winter sein?

Bedarf	38 TWh <sub>e</sub>	(13 GW <sub>e</sub> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Speicherseen	10 TWh <sub>e</sub>	(8 TWh <sub>e</sub> + 2 TWh <sub>e</sub> Neubau bis 2050)
Laufwasser KW	4 TWh <sub>e</sub>	(Stand 2021, eher abnehmend)
Beitrag PV	6.5 TWh <sub>e</sub>	(45 GW <sub>p</sub> x <b>0.05</b> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Offen	17.5 TWh <sub>e</sub>	

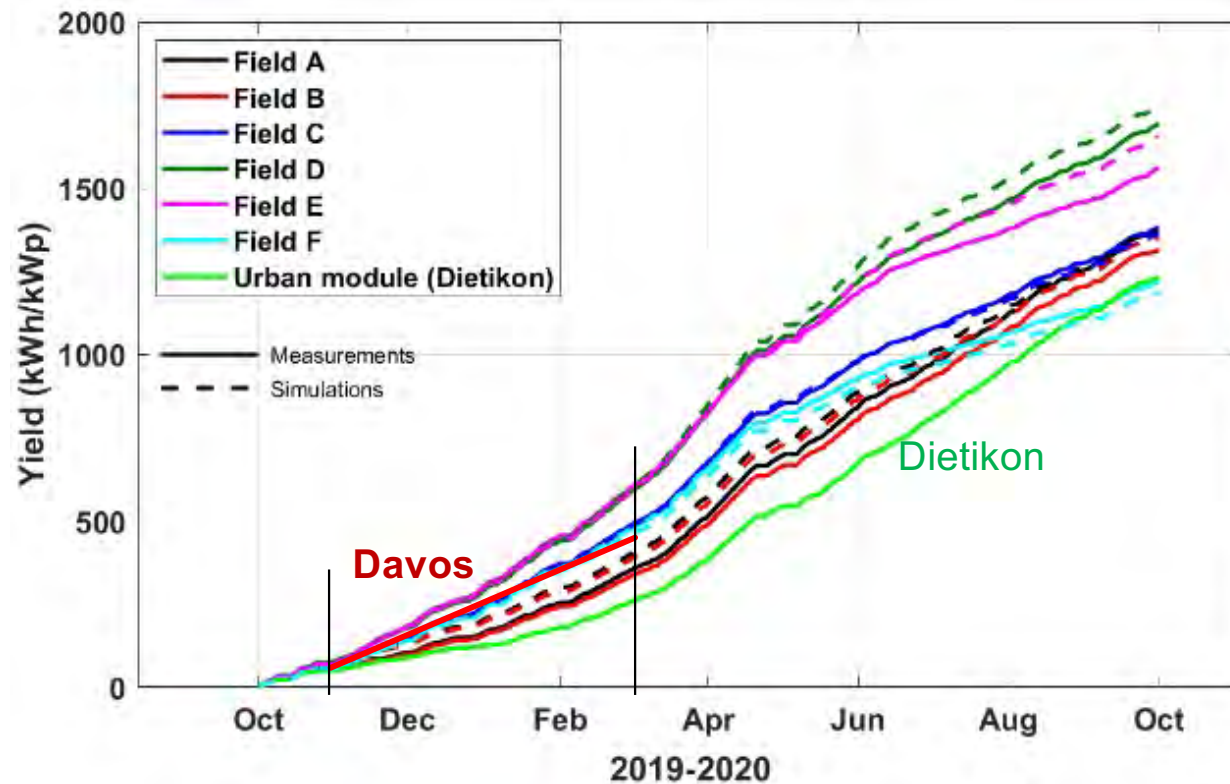
# Wie gross müssen die Saisonspeicher für den Winter sein?

Bedarf	38 TWh <sub>e</sub>	(13 GW <sub>e</sub> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Speicherseen	10 TWh <sub>e</sub>	(8 TWh <sub>e</sub> + 2 TWh <sub>e</sub> Neubau bis 2050)
Laufwasser KW	4 TWh <sub>e</sub>	(Stand 2021, eher abnehmend)
Beitrag PV	7.2 TWh <sub>e</sub>	(50 GW <sub>p</sub> x <b>0.05</b> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Offen	16.8 TWh <sub>e</sub>	

# PV in den Alpen




# PV Erträge in den Alpen – Pilotanlagen



Lastfaktor Davos:


$$390 \text{ kWh} / 2'880 \text{ kWh} = 0.14$$

## Was wenn *alle* PV-Anlagen in die Alpen kommen?

Bedarf	38 TWh <sub>e</sub>	(13 GW <sub>e</sub> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Speicherseen	10 TWh <sub>e</sub>	(8 TWh <sub>e</sub> + 2 TWh <sub>e</sub> Neubau bis 2050)
Laufwasser KW	4 TWh <sub>e</sub>	(Stand 2020, eher abnehmend)
Beitrag PV	14 TWh <sub>e</sub>	(36 GW <sub>p</sub> x <b>0.14</b> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Offen	10 TWh <sub>e</sub>	

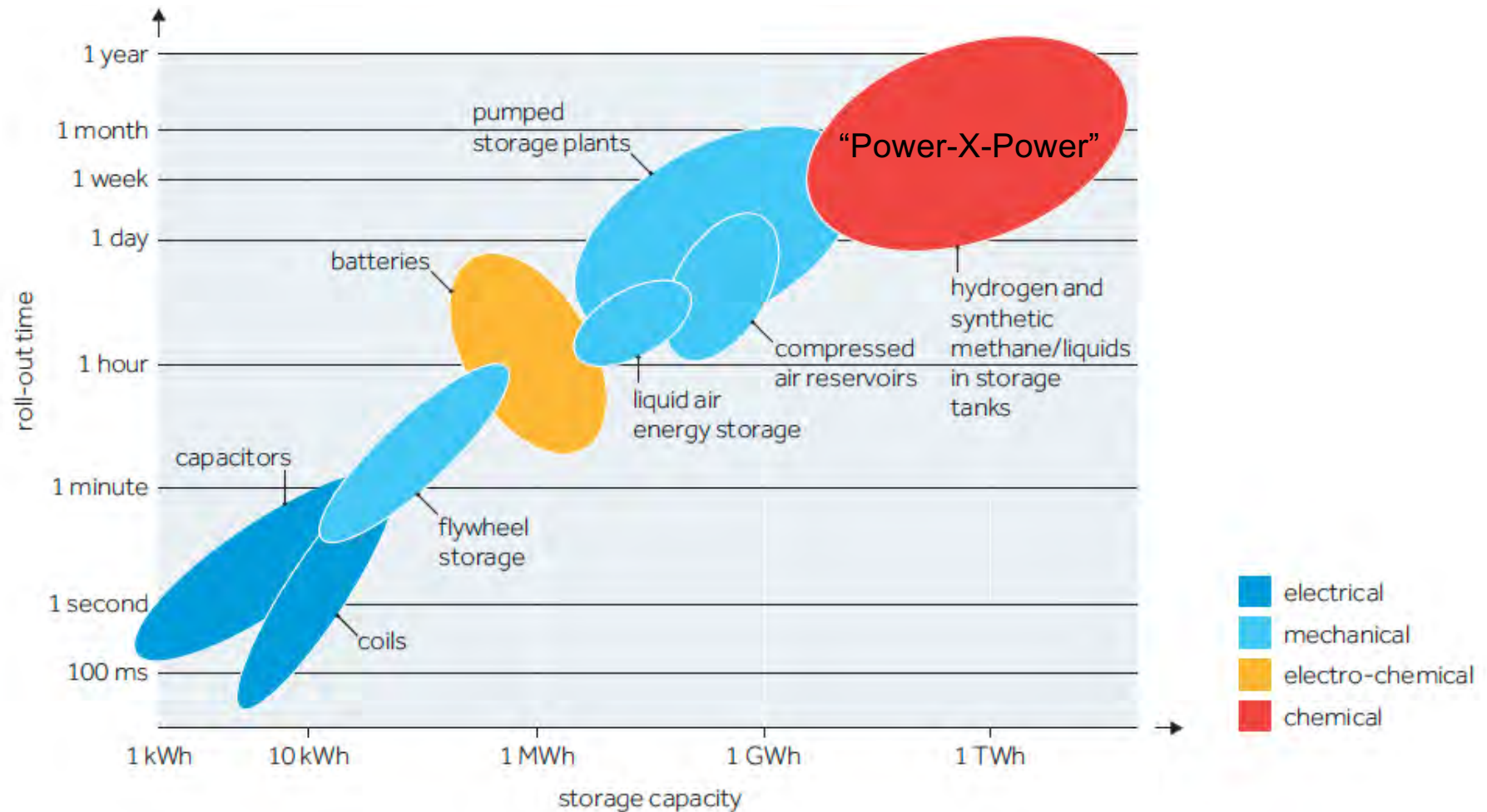
Abschätzung LGU, Winter hier wieder definiert als 1. November – 28. Februar, m=Monat, d=Tag, h=Stunde

## Was wenn *alle* PV-Anlagen in die Alpen kommen?

Bedarf	38 TWh <sub>e</sub>	(13 GW <sub>e</sub> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Speicherseen	10 TWh <sub>e</sub>	(8 TWh <sub>e</sub> + 2 TWh <sub>e</sub> Neubau bis 2050)
Laufwasser KW	4 TWh <sub>e</sub>	(Stand 2020, eher abnehmend)
Beitrag PV	18 TWh <sub>e</sub>	(45 GW <sub>p</sub> x <b>0.14</b> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Offen	6 TWh <sub>e</sub>	

Abschätzung LGU, Winter hier wieder definiert als 1. November – 28. Februar, m=Monat, d=Tag, h=Stunde

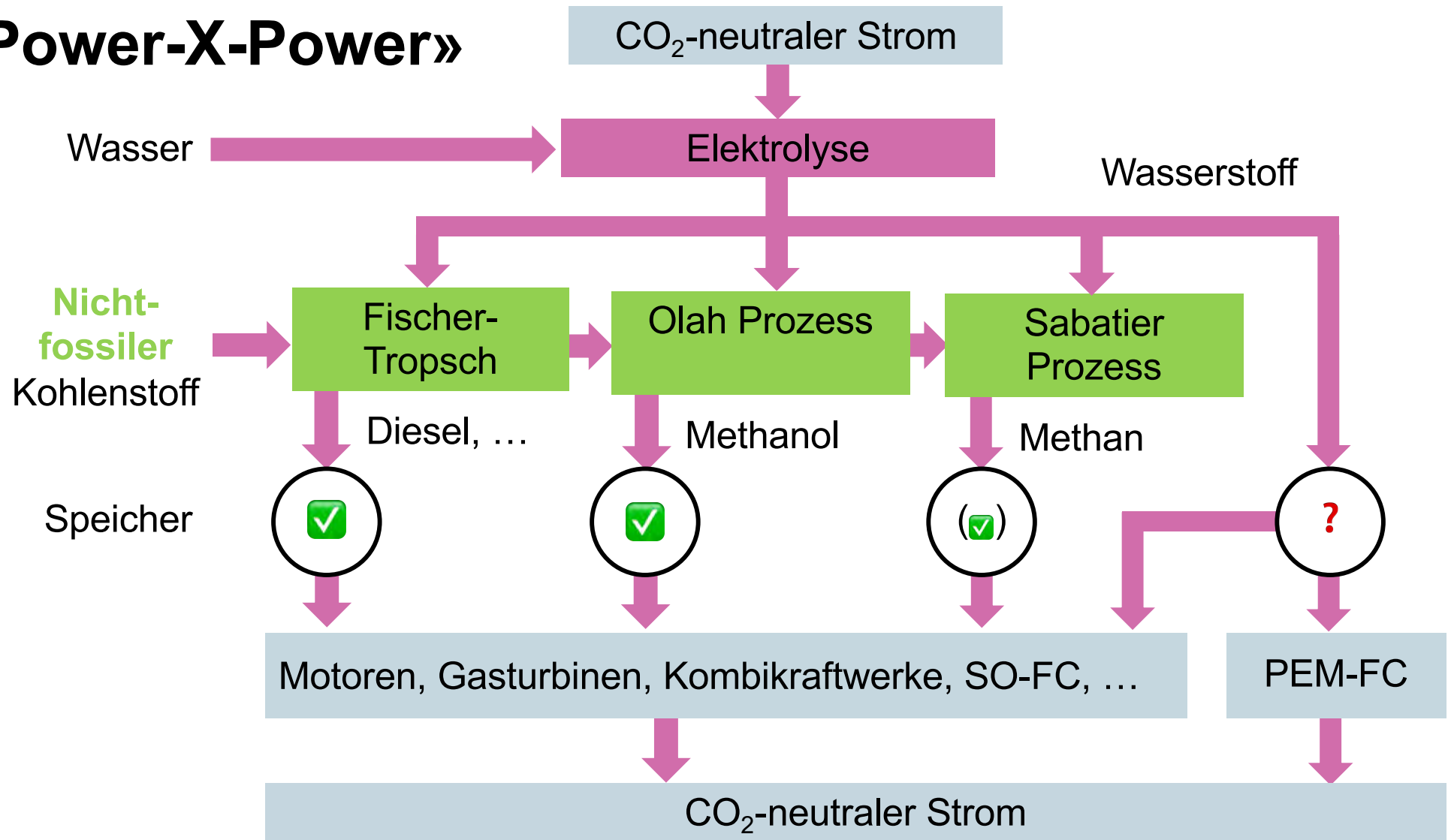
# Speicherung elektrischer Energie



M. Yugo, A. Soler. A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe. Concave Review, vol. 28, no.1.



# «Power-X-Power»



# «Power-H<sub>2</sub>-Power»

Wirkungsgrad  $\eta \approx 0.75 \cdot 0.90 \cdot 0.60 \cdot 0.98 \approx 0.40$

Annahme: Fehlbetrag im Winter 10 TWh<sub>e</sub>

Strombedarf im Sommer  $10 \text{ TWh}_e / 0.4 = 25 \text{ TWh}_e$

Wirkungsgrad H<sub>2</sub> → Strom:  $0.60 \cdot 0.98 \approx 0.59 \Rightarrow 10 \text{ TWh}_e / 0.59 = 17 \text{ TWh}_{\text{H}_2}$

Energie H<sub>2</sub> = 33 kWh/kg, Dichte H<sub>2</sub> (bei 250 bar) = 20 kg/m<sup>3</sup>

Resultierendes Speichervolumen:

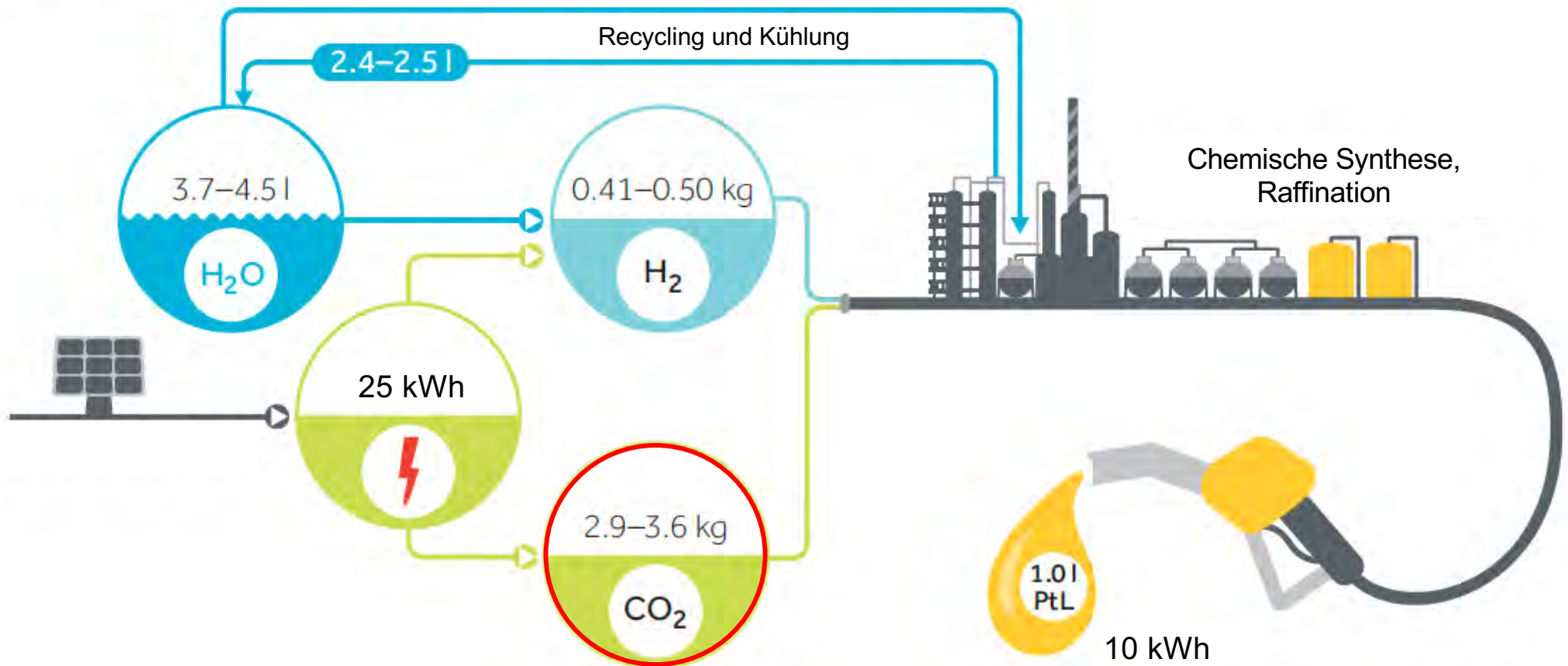
$$17 \cdot 10^{12} \text{ Wh}_{\text{H}_2} = 33 \cdot 10^3 \text{ Wh/kg} \cdot 20 \text{ kg/m}^3 \cdot 26 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

# «Power-Diesel-Power»

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

$$\text{Strombedarf im Sommer } 10 \text{ TWh}_e / 0.24 = 42 \text{ TWh}_e$$

Source: Shell (2018a)

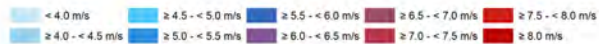
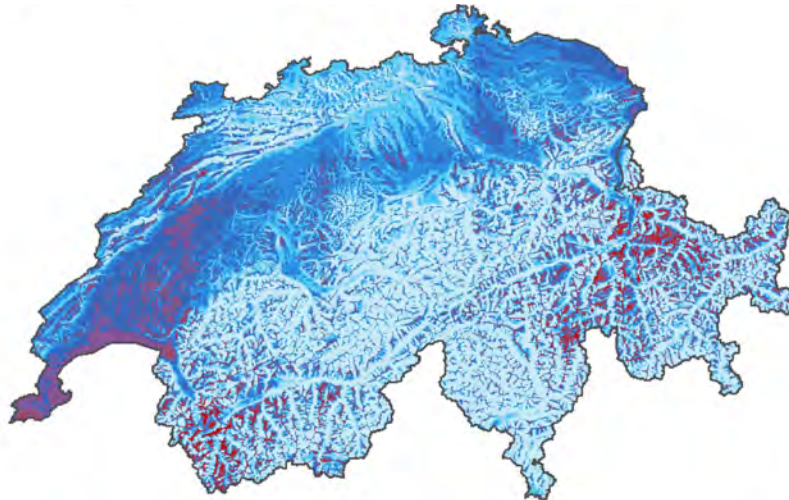


# Mittlere Windgeschwindigkeiten Schweiz

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Erneuerbare Energien

## Windatlas Schweiz 2016/2021

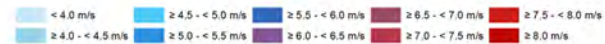


20  
Geodaten © swisstopo, BFE  
Erstellt durch BFE

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

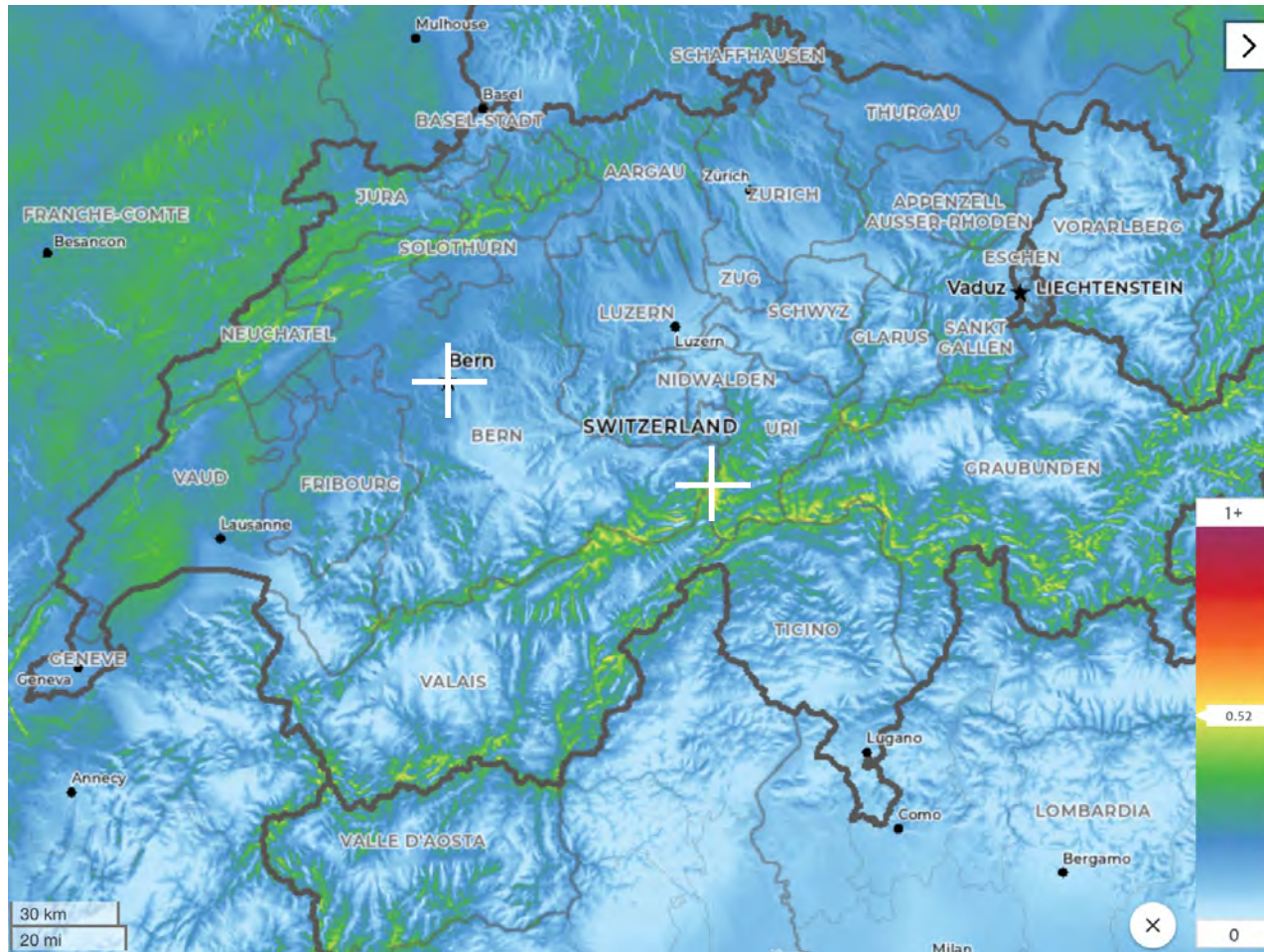
Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Erneuerbare Energien

## Windatlas Schweiz 2019



20 km  
N  
Geodaten © swisstopo, BFE  
Erstellt durch BFE am 09.01.2019

# Windenergie in der Schweiz – Lastfaktoren

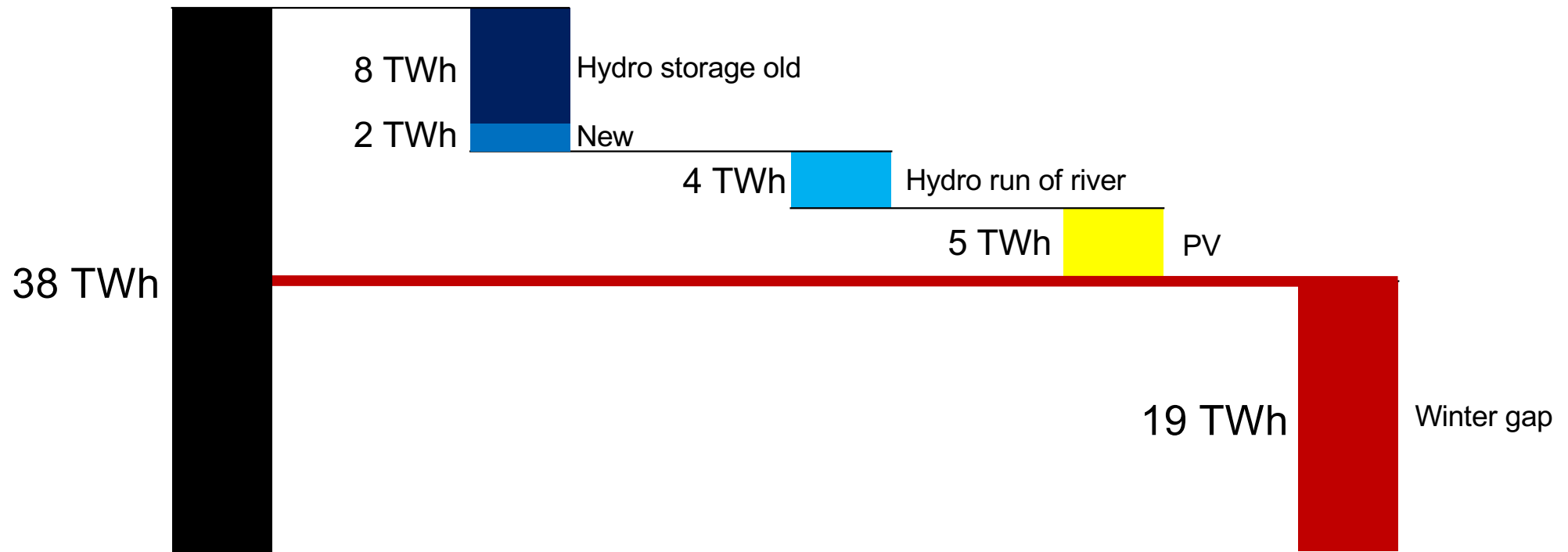


Quelle: <https://globalwindatlas.info/en/>

## Was wenn *alle* PV- und Wind-Anlagen in die Alpen kommen?

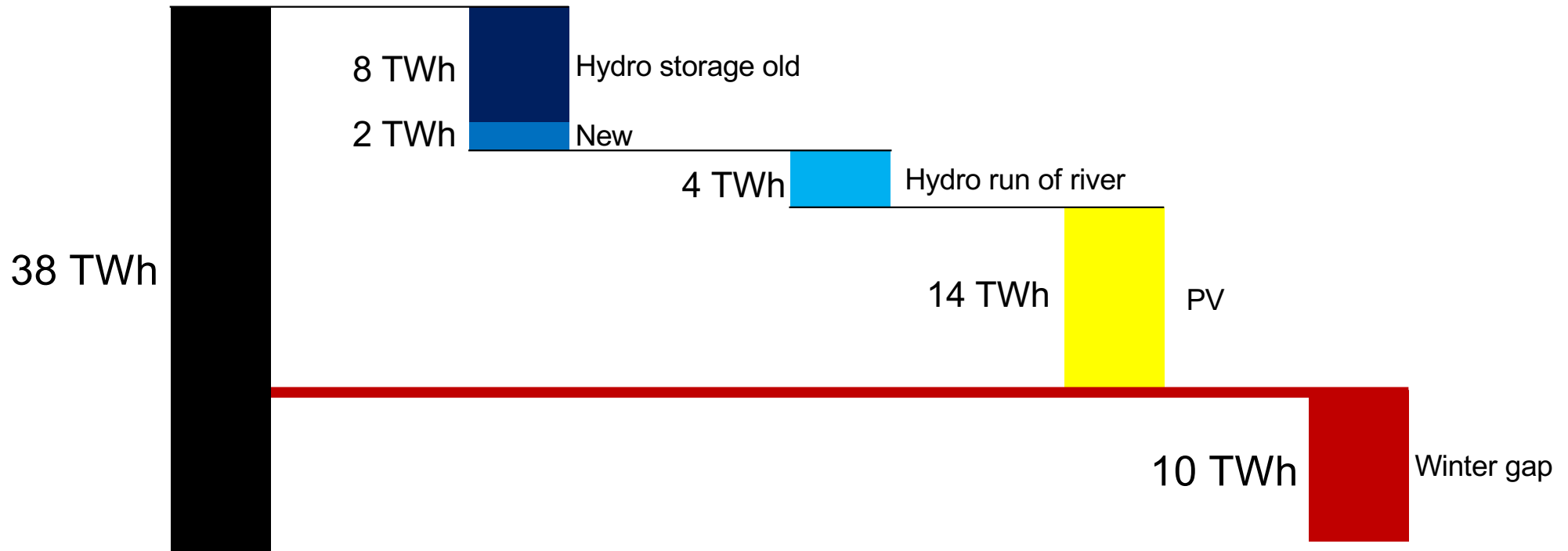
Bedarf	38 TWh <sub>e</sub>	(13 GW <sub>e</sub> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Speicherseen	10 TWh <sub>e</sub>	(8 TWh <sub>e</sub> + 2 TWh <sub>e</sub> Neubau bis 2050)
Laufwasser KW	4 TWh <sub>e</sub>	(Stand 2020, eher abnehmend)
Beitrag PV	14 TWh <sub>e</sub>	(36 GW <sub>p</sub> x <b>0.14</b> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)
Beitrag Wind	10 TWh <sub>e</sub>	( 7 GW <sub>p</sub> x <b>0.50</b> x 4 m x 30 d/m x 24 h/d)

# CH 2050 Winter<sup>°</sup> – 36 GW PV



<sup>°</sup> Winter: November 1 – February 28

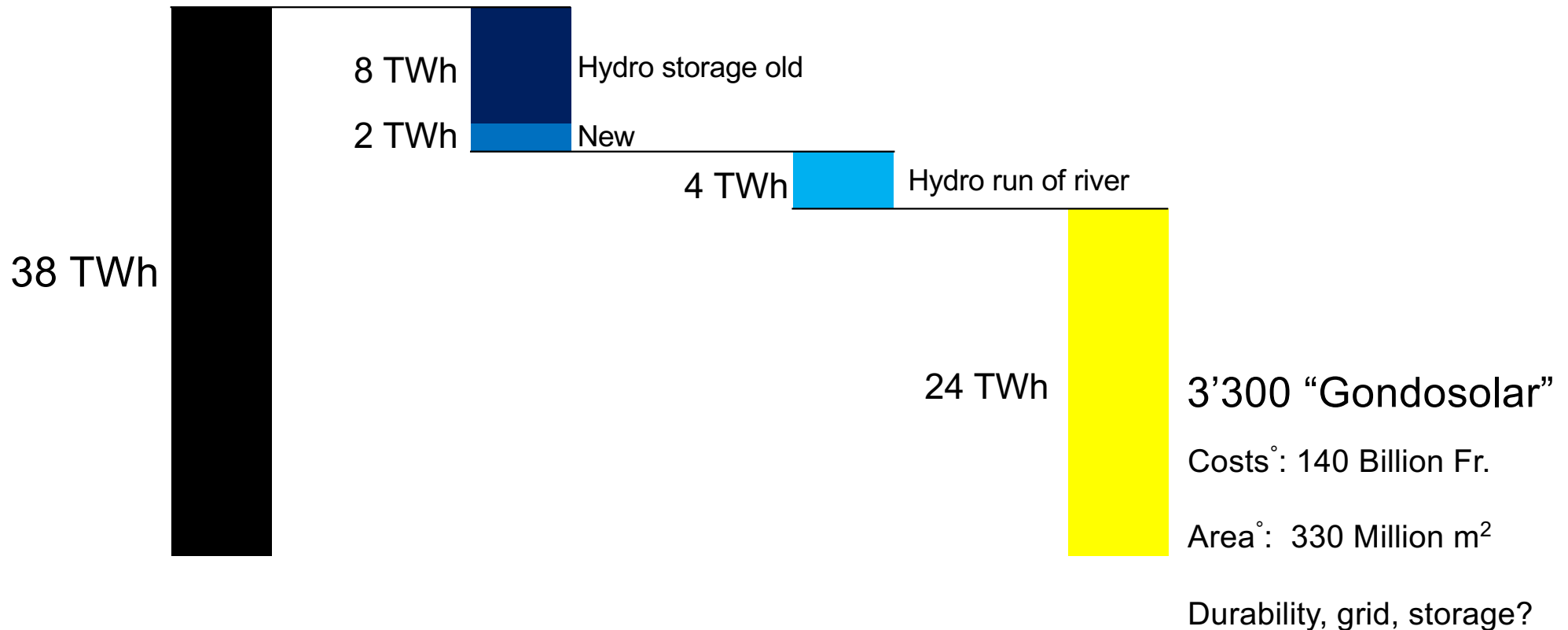
# CH 2050 Winter – 36 GW PV in the Alps



° Winter: November 1 – February 28

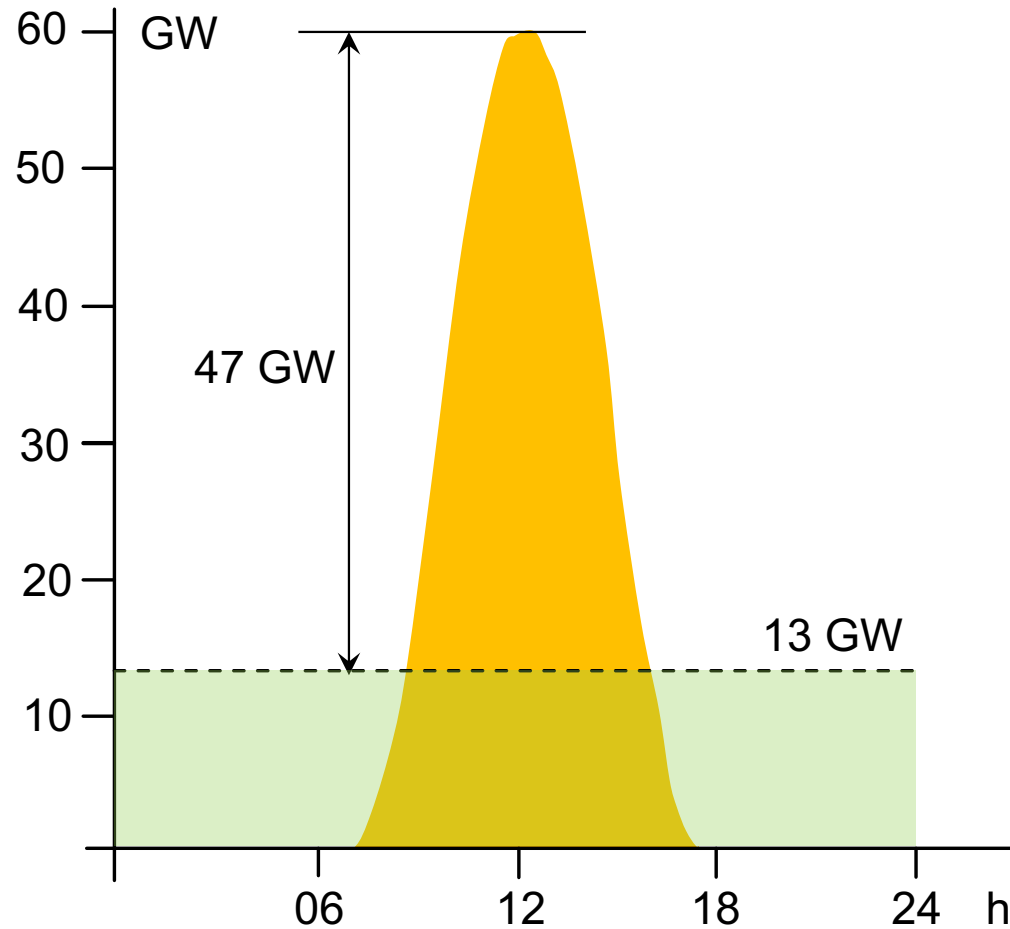


# CH 2050 Winter – 60 GW PV in the Alps



° <https://www.gondosolar.ch>

# Daily Variations – 60 GW PV in the Alps



22 kW

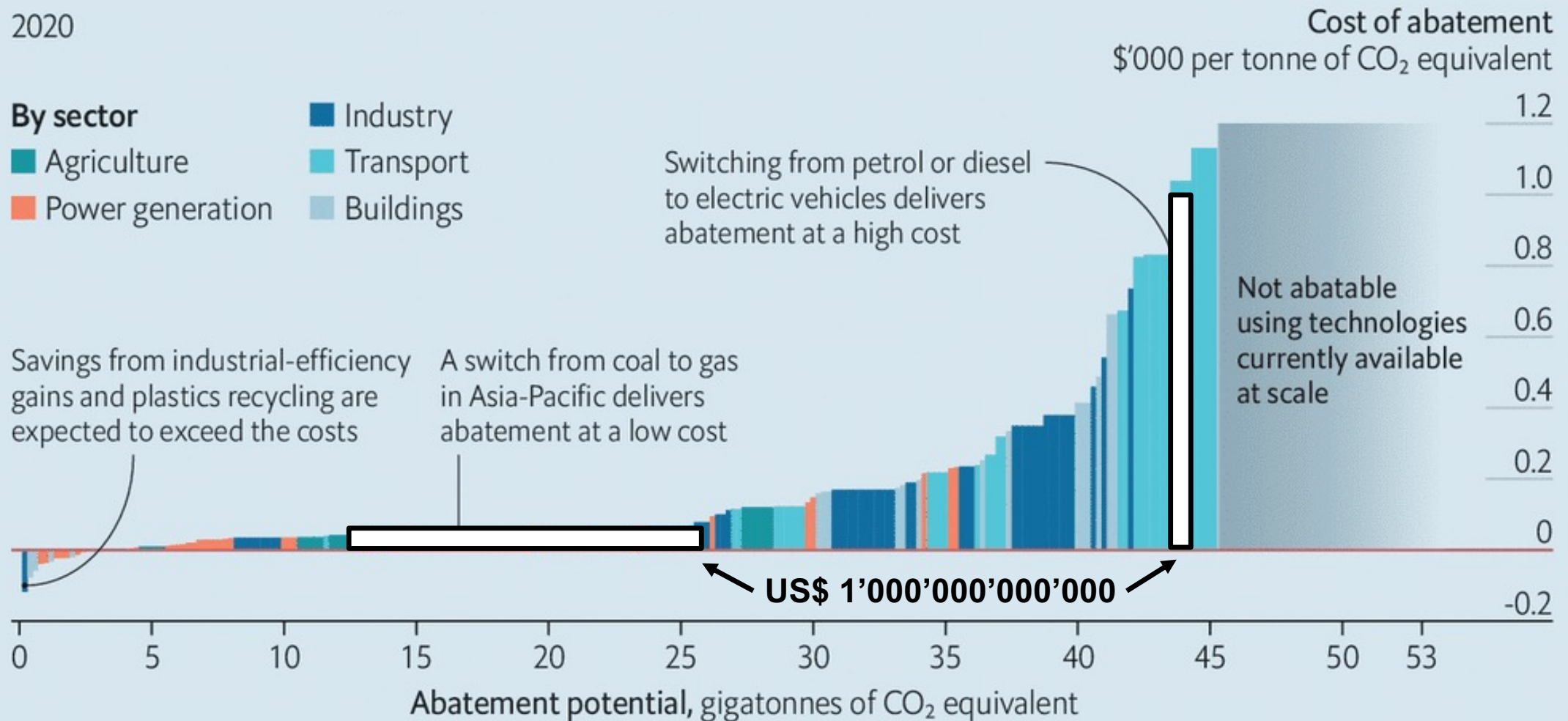


47 GW / 22 kW ca. 2.1 Mio.

2022: 7271 Charging points in CH  
Source: TCS

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

2020





## Gütsch (Andermatt) – 4 Anlagen mit Gesamtleistung 3.3 MW<sub>p</sub>



Bild zur Verfügung gestellt von wind-data.ch

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

# 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°

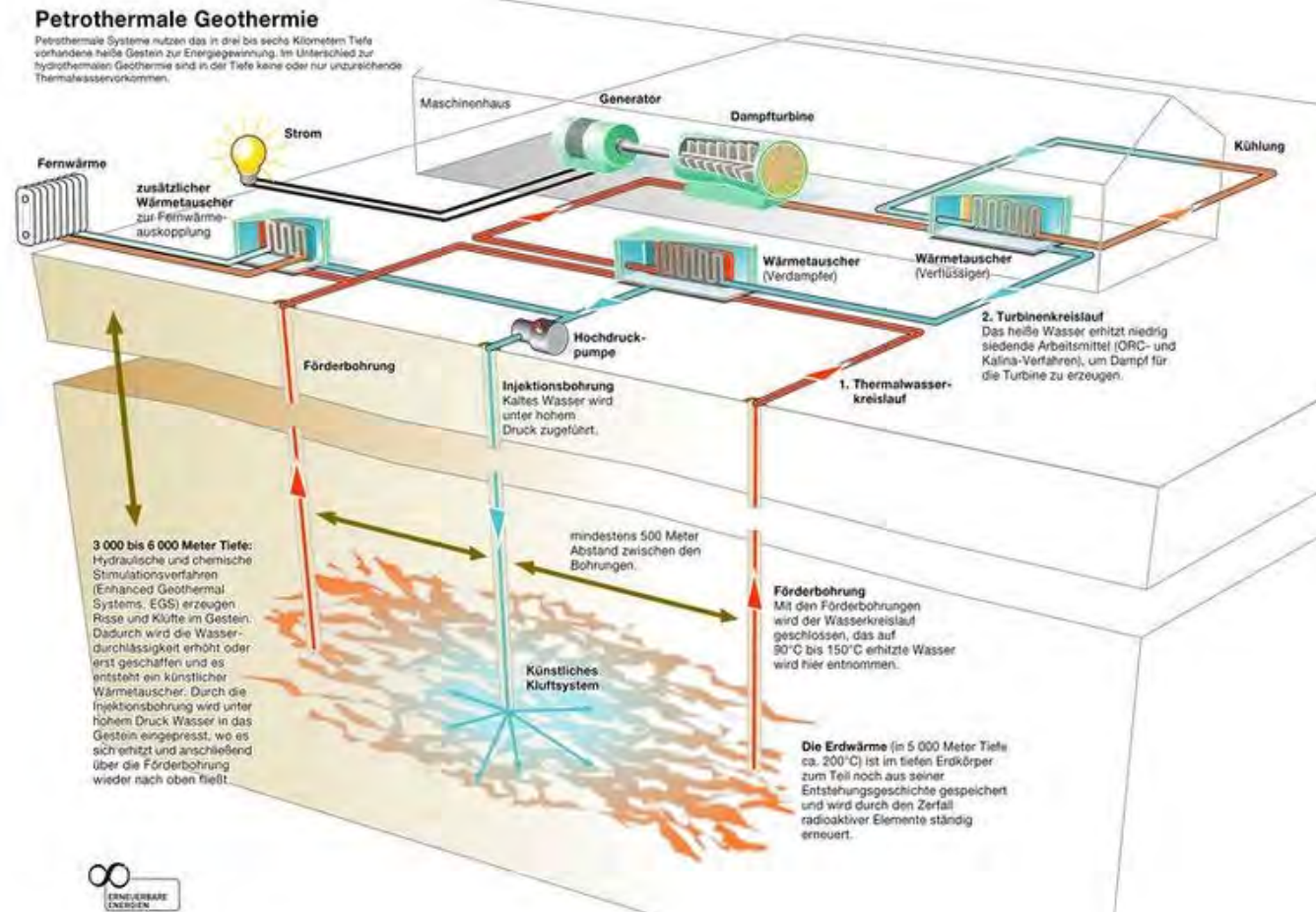
“ORC”: Organic Rankine Cycle



# Geothermie

## Petrothermal

### Stromerzeugung





# Geothermieprojekte (Strom) in der Schweiz



Basel, 2011



St. Gallen, 2013



Lavey Les-Bains, 2022



Haute Sorne, ab 2024

- The world needs much more energy
- The emission of greenhouse gases must be priced
- Ambitious goals are good, concrete improvements are better, technology taboos are bad
- It's the economy that decides
- Research yields the best return of investment
- Attract talented people to science, engineering, and economics

# Nützliche Websites

<https://ourworldindata.org/>

Allgemeine Datensammlung, viele Daten über Energie und CO<sub>2</sub>

<https://app.electricitymaps.com/map>

Aktuelle Situation der Stromerzeugung in der EU, den USA, ...

<https://globalwindatlas.info/en/>

Mittlere Geschwindigkeiten und Lastfaktoren für Windenergie, weltweit

<https://www.windy.com/>

Aktuelle Winddaten, weltweit