

Die Zukunft des Energiesystems: Pfade zu Netto-Null CO₂ und Versorgungssicherheit

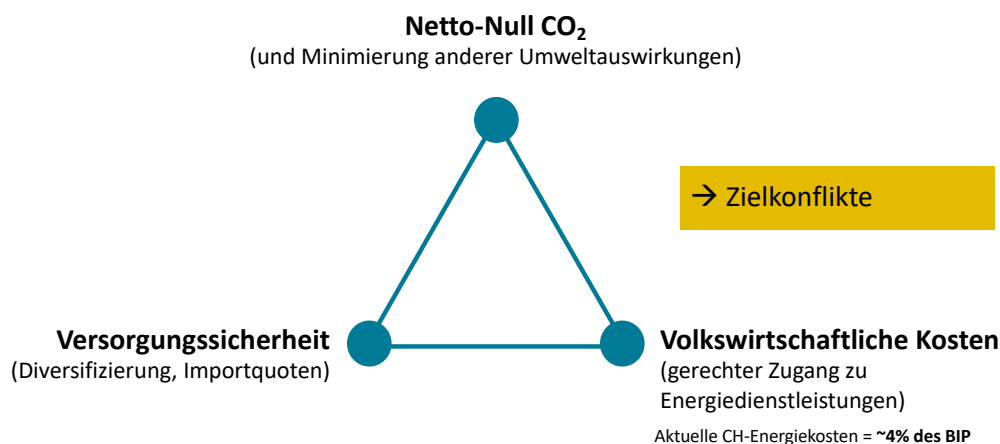
Prof. em. Konstantinos Boulouchos
ETH Zürich / Präsident Swiss Academies of Arts and Sciences

Forum für Universität und Gesellschaft

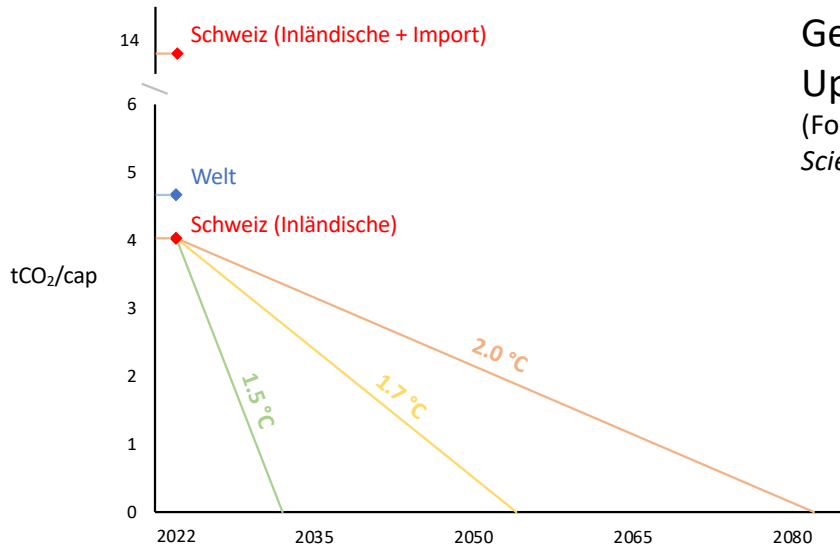
Bern, 20 Januar 2024

With contributions by G. Pareschi (ETH Zürich)

Das Energietrilemma



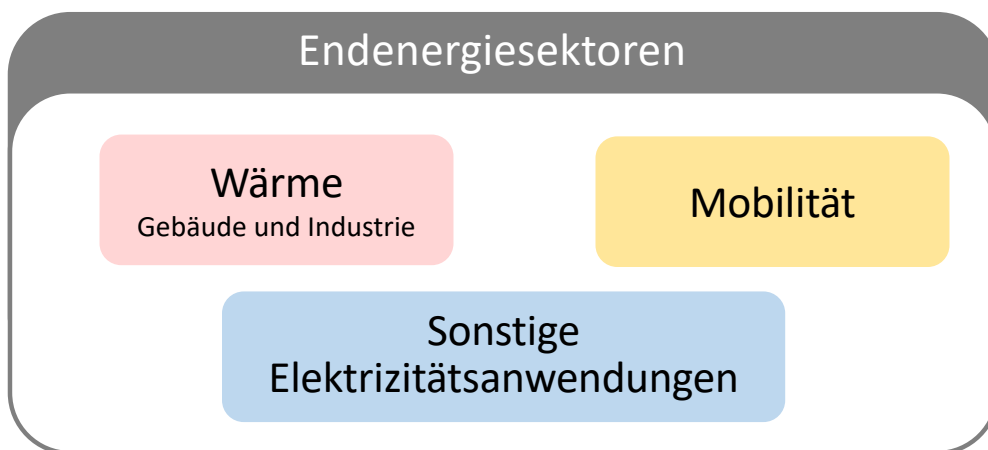
CO₂-Reduktionspfade



Gemäss Carbon Budget Update 2023
(Forster et al. (2023), *Earth System Science Data*)

3

“Netto-Null CO₂”



Elektrizität wird das Rückgrat, aber nicht die alleinige Quelle des zukünftigen Energiesystems

4

Eine integrale Betrachtung der Versorgungssicherheit

Elektrizität*



Chemische Energieträger



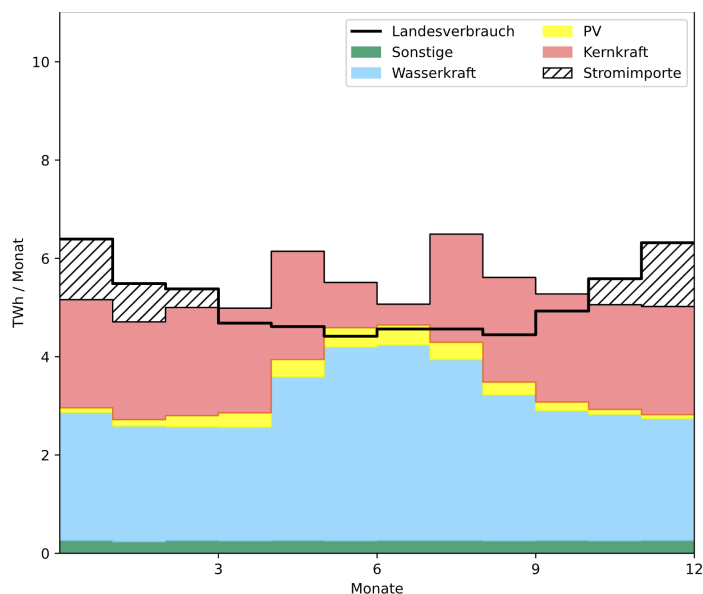
Kritische Materialien und Komponenten



*Erzeugung durch PV, Wind, Wasserkraft, Thermo-elektrochemisch, Kernbrennstoff

5

Die Lage in 2020



(TWh pro Jahr)

2020

Landesverbrauch

-61

Wasserkraft

35

Kernkraft

23

PV

2

Sonstige

3

Stromimporte

5

Sommer-Stromüberschuss

-7

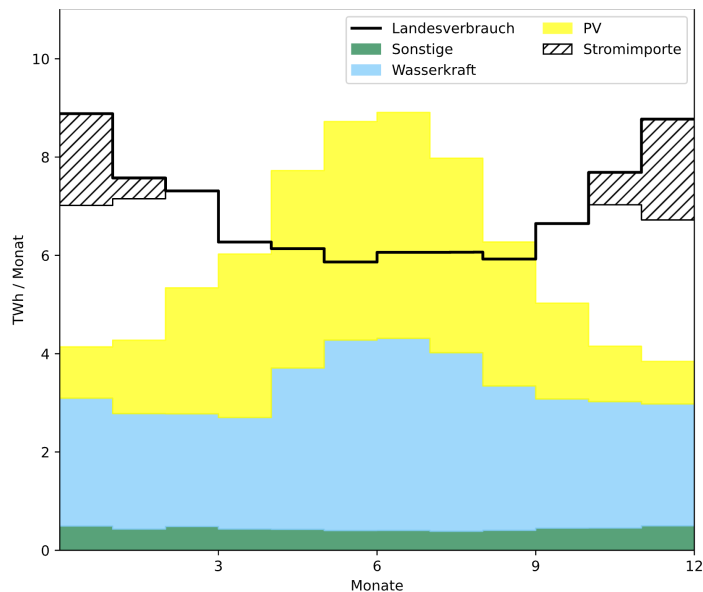
Winterstromlücke*

0

*summiert über alle Monate mit negativer Bilanz

6

Die Lage in 2050 (hohe Nachfrage)

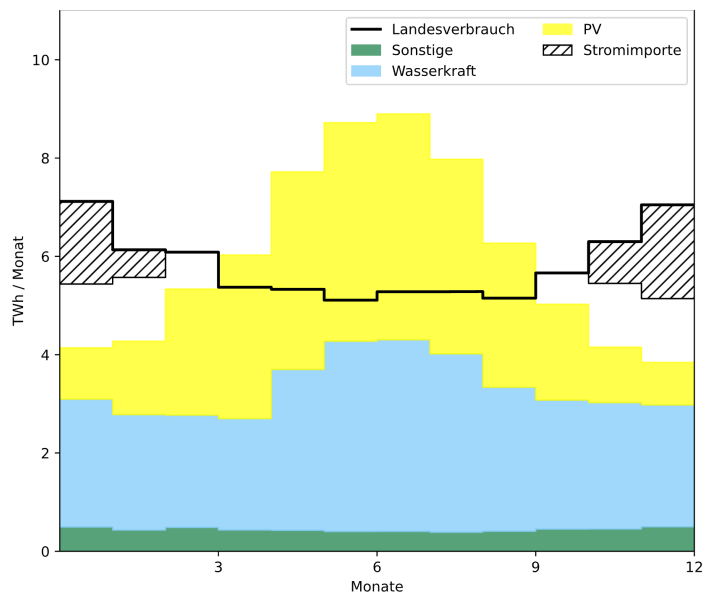


(TWh pro Jahr)	2020	2050 Hoch
Landesverbrauch	-61	-83
Wasserkraft	35	35
Kernkraft	23	-
PV	2	32
Sonstige	3	5
Stromimporte	5	5
Sommer-Stromüberschuss	-7	-10
Winterstromlücke*	0	16

*summiert über alle Monate mit negativer Bilanz

7

Die Lage in 2050 (niedrige Nachfrage)



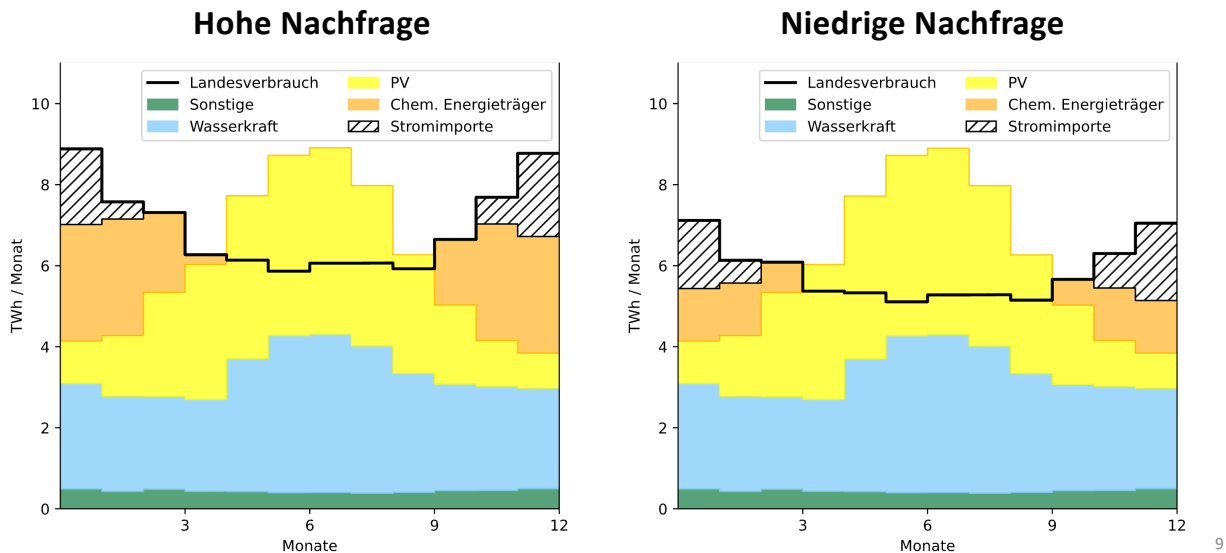
(TWh pro Jahr)	2020	2050 Hoch	2050 Niedrig
Landesverbrauch	-61	-83	-70
Wasserkraft	35	35	35
Kernkraft	23	-	-
PV	2	32	32
Sonstige	3	5	5
Stromimporte	5	5	5
Sommer-Stromüberschuss	-7	-10	-14
Winterstromlücke*	0	16	7

➔ Wie die Lücke schliessen?

*summiert über alle Monate mit negativer Bilanz

8

Beispiel zur Schliessung der Lücke in 2050: Gaskraftwerke mit erneuerbarem Brennstoff



Chemische Energieträger notwendig **nicht nur** für die Winterstromproduktion

Sondern auch für:

- Industrie-Prozesswärme
- Langstreckenmobilität (Luft- und Schifffahrt, schwere LKW)

Kandidaten:

- Wasserstoff (H₂)
- Synthetische Brenn- und Treibstoffe wie z.B. Methan, Methanol, Kerosin, Diesel, Ammoniak

Zusätzliche Kapazität für Stromerzeugung und Importbedarf für Brenn-/Treibstoffe in 2050

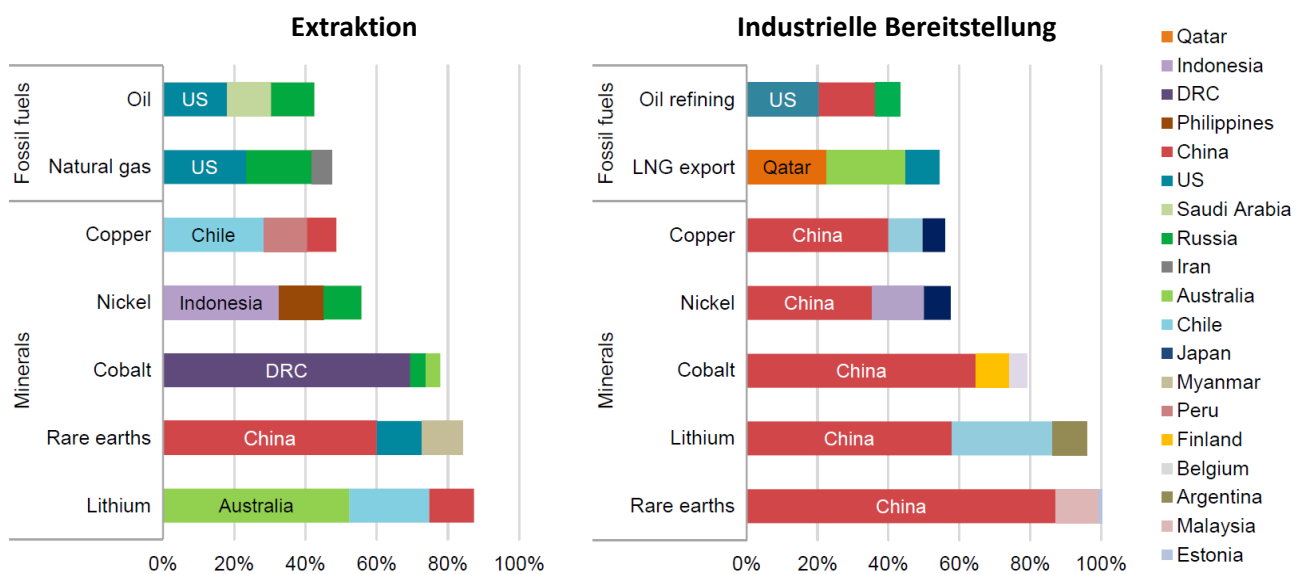
		Hoch	Niedrig
Elektrizität «Lücke»	TWh _{el}	16	7
Installierte elektrische Leistung	GW_{el}	4 (6 Kraftwerke)	1.9 (3 Kraftwerke)
H2 Nachfrage für Elektrizität Erzeugung	TWh _{chem}	+27	+12
Sonstigen Nachfrage für erneuerbare Brenn-/Treibstoffe	TWh _{chem}	+50	+33
Gesamtnachfrage für ern. Brenn-/Treibstoffe	TWh_{chem}	+77	+45
Inländische Verfügbarkeit von ern. Brenn-/Treibstoffen	TWh _{chem}	-13	-15
Elektrolyseur Leistung	GW _{el}	0.7	2.0
Verbleibender Importbedarf für ern. Brenn-/Treibstoffe	TWh_{chem}	-64	-30



Gegenwärtig betragen Fossileimporte etwa **155 TWh** und Nukleareimporte etwa **70 TWh**

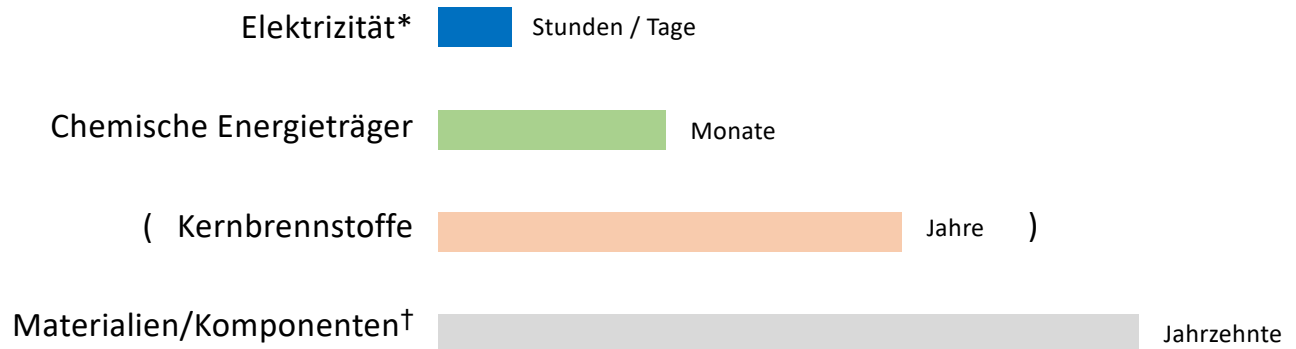
11

Kritische Materialien und Marktanteile nach Ländern



12

Speicherfähigkeit verschiedener Energieträger



*Batterien und Speicherkraftwerke

†Solarpanels, Batterien, Elektrolyseur, usw.

13

Schlussfolgerungen

- Die Entschärfung des Zielkonfliktes zwischen “Netto-Null CO₂” und Versorgungssicherheit stellt eine grosse Herausforderung dar.
- Die Entwicklung der Energienachfrage (Effizienz und Suffizienz) wird einen grossen Einfluss haben, sowohl auf die erforderlichen Investitionen in neue Infrastruktur als auch auf den Importbedarf nach Energieträgern.
- Die Energieversorgungssicherheit betrifft nicht nur die Elektrizität an sich, sondern auch erneuerbare Brenn-/Treibstoffe für viele Energiesektoren sowie kritische Materialien und Komponenten.
- Nebst einer langfristig angelegten inländischen Innovations- und Energiepolitik muss die Schweiz rasch eine Strategie der weltweiten Zusammenarbeit entwickeln und umsetzen. Dies zur Sicherung intakter und diversifizierter energierelevanter Lieferketten.

14

Danksagung

- Giacomo Pareschi für die Erarbeitung von Schlüsseldaten
- Alle Mitglieder der Energiekommission der Akademien Schweiz
- KollegInnen des “Energy Steering Panel” der “European Academies of Sciences Advisory Council”
- SCCER Mobility (Innosuisse)
- Bundesamt für Energie (CH)

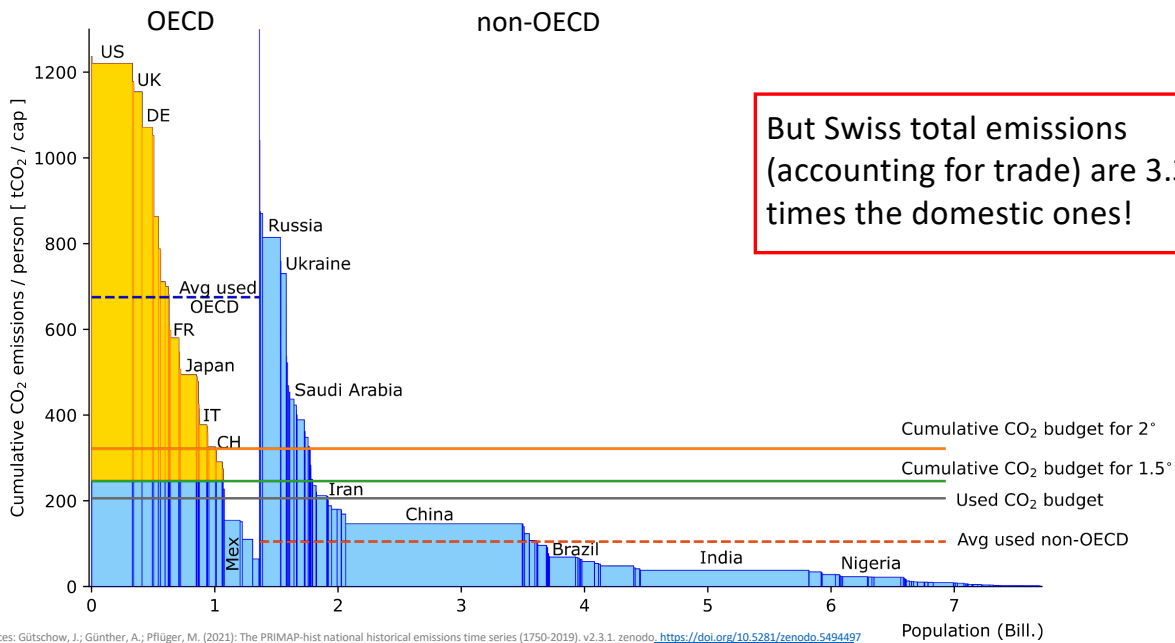
15

Danke!



The Historical Responsibility

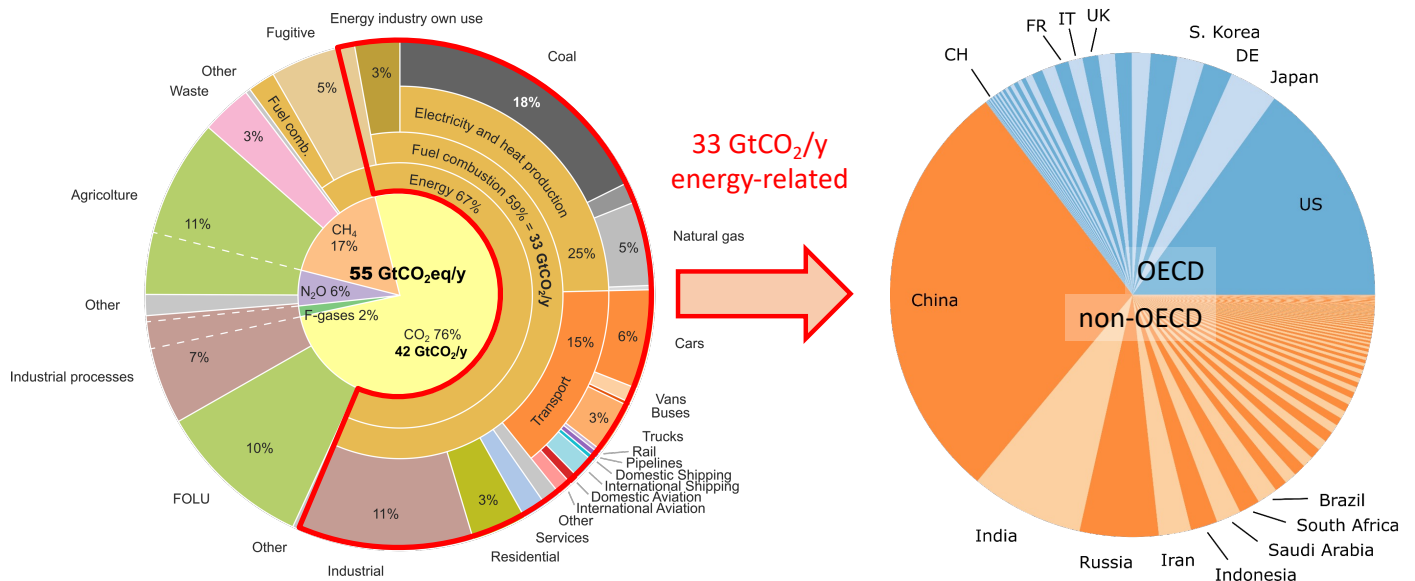
Cumulative energy-related CO₂ emissions per capita



Sources: Gütschow, J.; Günther, A.; Pflüger, M. (2021): The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1750-2019). v2.3.3.1. zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5494497>

17

Distribution of today's GHG emissions by sector and country



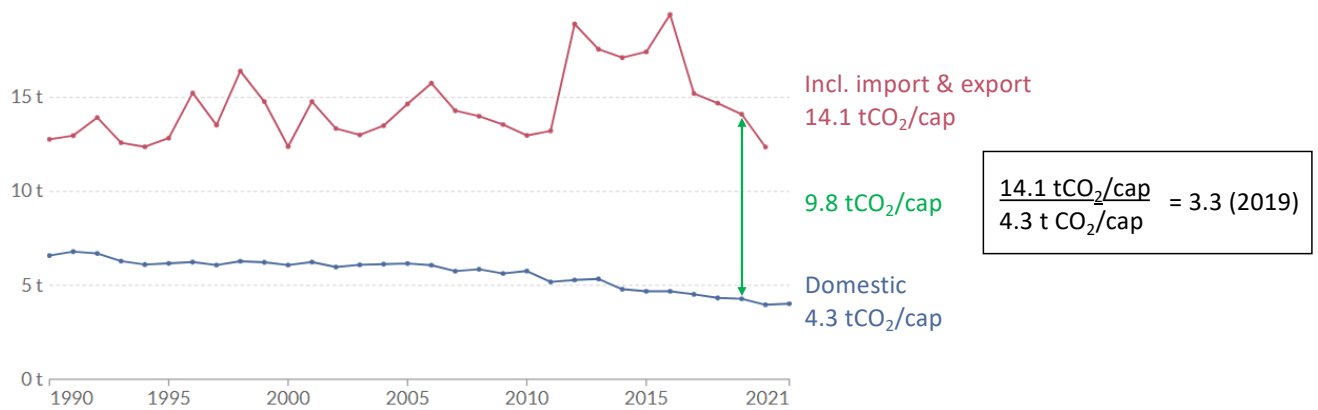
*FOLU = Forestry and Other Land Use

Sources: IEA 2019; IPCC AR5; IPCC SR1.5; aggregated by G. Pareschi. Gütschow, J.; Günther, A.; Pflüger, M. (2021): The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1750-2019). v2.3.3.1. zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5494497>

18

Are domestic CO₂ emissions the whole story?

Evolution of Swiss CO₂ emissions per capita: domestic vs total



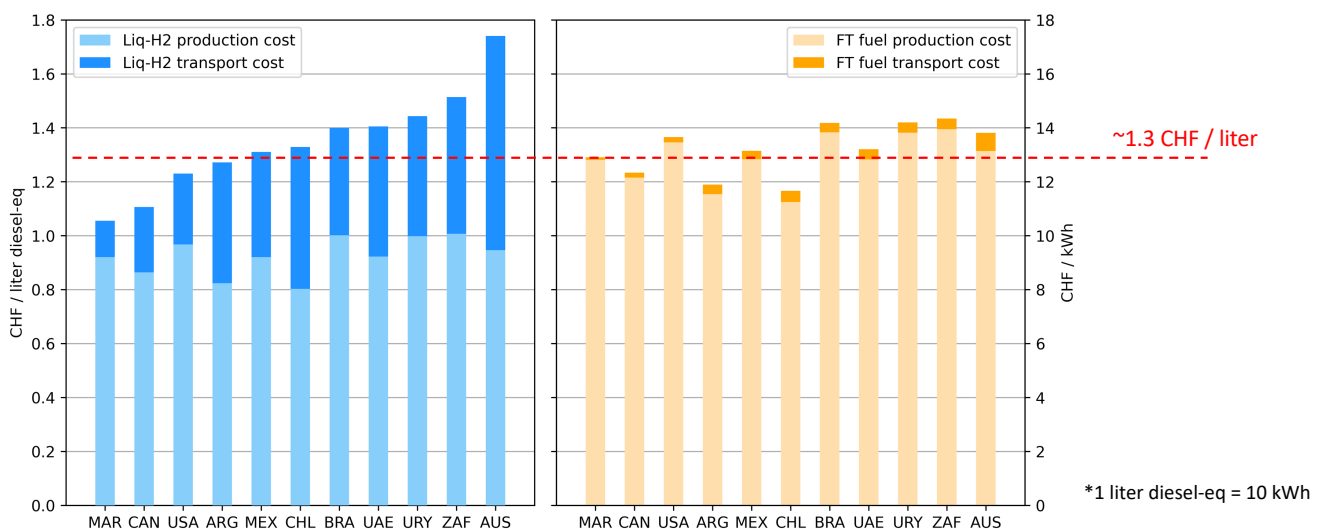
But during the same period the GDP/cap also increased by 26%!

Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project (2022)

K. Boulouchos

19

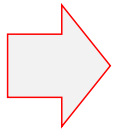
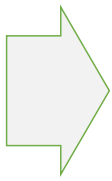
Projected costs in 2050 for production and transportation of e-fuels



Source: PDX-Atlas: Weltweite Potenziale für die Erzeugung von grünem Wasserstoff und klimaneutralen synthetischen Kraft- und Brennstoffen

20

A fair cost-comparison of fuel imports* to Switzerland

(2017 CHF)	2020	2050	
Avg. fuel cost at wholesale	~ 0.48 CHF / l	~ 1.3 CHF / l	 Individual hard-to-decarbonize sectors may suffer
Fuel imports	154 TWh	46 TWh	
Expenditure for importing chemical fuels	~ 7.4 bill. CHF	~ 6.0 bill. CHF	 Macroeconomically affordable
GDP	713 bill. CHF	969 bill. CHF	
% of GDP	~ 1.0 %	~ 0.6 %	

But keep in mind that hard-to-decarbonize sectors will be hit anyhow by CO₂ prices, if they remain based on fossil fuels.

→ Let's start investing in e-fuels immediately to accelerate learning and reach cost parity!

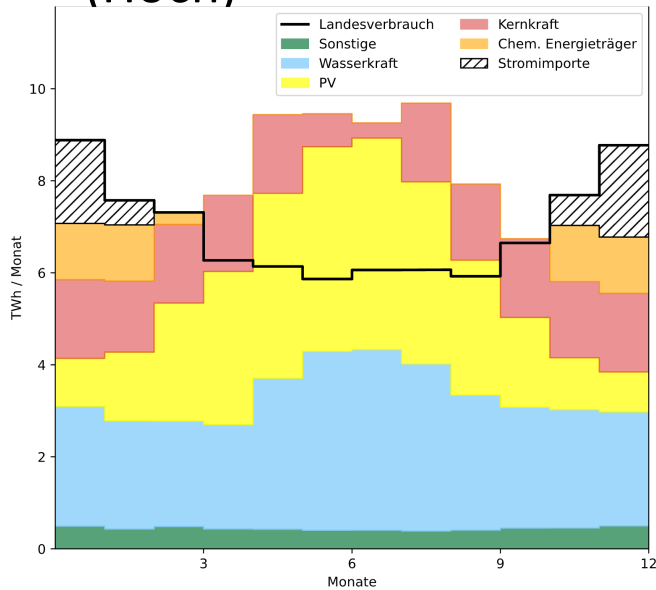
* Neglecting imports of nuclear fuel and biomass

Would nuclear energy be a long-term option?

Advantages	Challenges
Very low LCA-based CO ₂ emissions	Low-probability high-impact accident risk
Baseload and partial load-following capabilities	Very low volume of waste but with extremely long survival time
Very small space and material requirements per kWh	So far, no demonstration of Gen. III+ reactors at acceptable cost and time

Plausible Swiss Path for Nuclear Energy Option	
Early 2030s	Earliest successful demonstrator at scale and time/cost in the world
Mid 2030s	Assessment of successful expansion of renewable electricity and fuels
Mid-late 2030s	Final decision in the Swiss system via public vote
Early 2040s	End of operation of existing KKW with extended lifetime
Early-mid 2040s	Possible first installation of the new generation in Switzerland

Elektrizität durch chem. Energieträger und Kernenergie (Hoch)

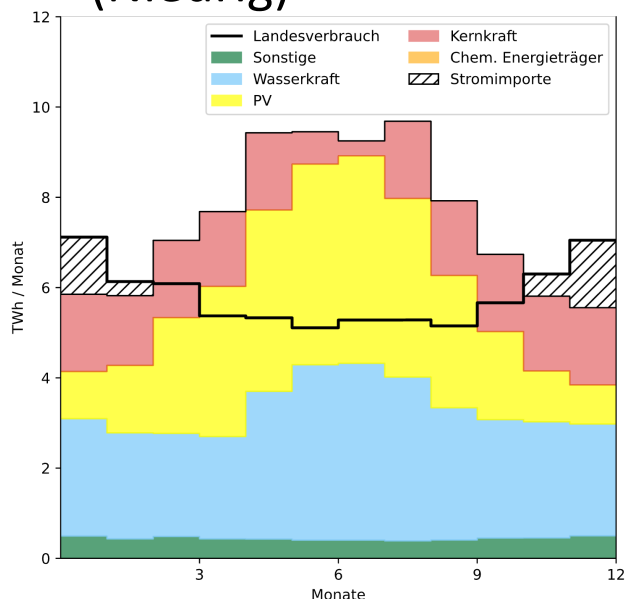


*summiert über alle Monate mit negative Bilanz

(TWh pro Jahr)

	2020	2050 Hoch
Landesverbrauch	-61	-83
Wasserkraft	35	35
Kernkraft	23	-
PV	2	32
Sonstige	3	5
Stromimporte	5	5
Sommer-Stromüberschuss	-7	-17
Winterstromlücke*	0	16
Chem. Energieträger (1.7 GW)	-	5
Kernkraft (2.3 GW)	-	18

Elektrizität durch chem. Energieträger und Kernenergie (Niedrig)



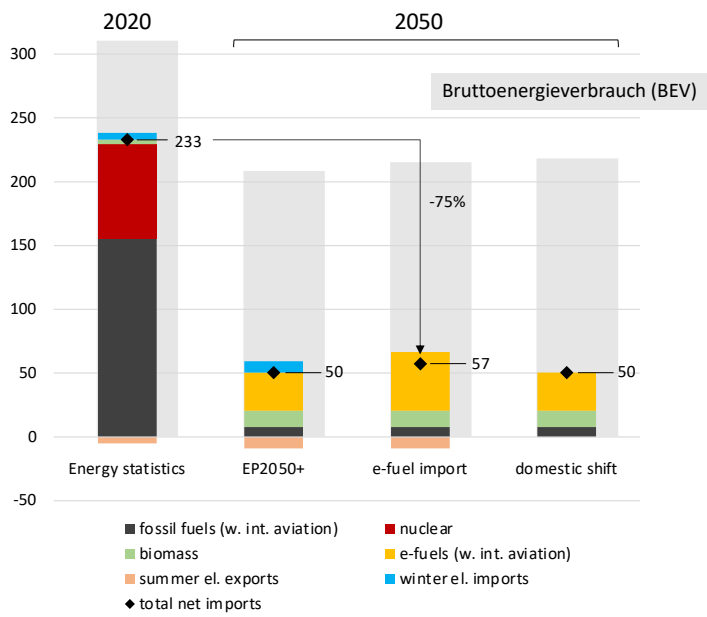
*summiert über alle Monate mit negative Bilanz

(TWh pro Jahr)

	2020	2050 Hoch	2050 Niedrig
Landesverbrauch	-61	-83	-70
Wasserkraft	35	35	35
Kernkraft	23	-	-
PV	2	32	32
Sonstige	3	5	5
Stromimporte	5	5	4
Sommer-Stromüberschuss	-7	-17	-24
Winterstromlücke*	0	16	7
Chem. Energieträger (0 GW)	-	5	-
Kernkraft (2.3 GW)	-	18	18

Importabhängigkeit in 2050 vs 2019

Energy Imports [TWh / y]



Source: EP2050+, Szenario ZERO Basis