

“Energiewende und die Rolle des Wasserstoffs”



Andreas ZÜTTEL, Prof. Dr.

Naturwissenschaftliche Gesellschaft
ZHAW TN, Winterthur
16. Januar 2026

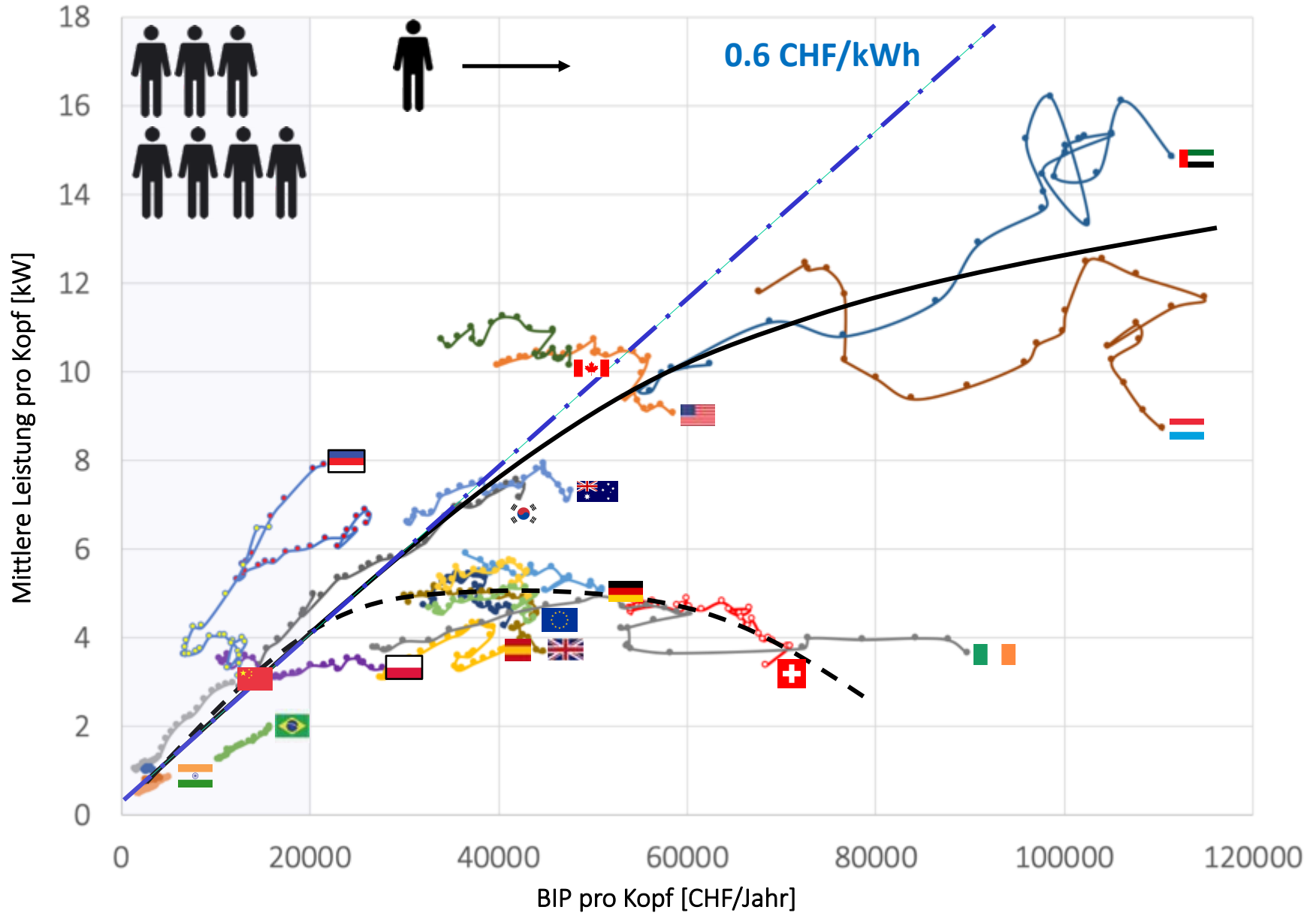
e: andreas.zuettel@epfl.ch
m: +41 79 484 2553
U: <http://lmer.epfl.ch>

1. KAPITEL Energie und Klimaveränderung





Energie und Wirtschaft

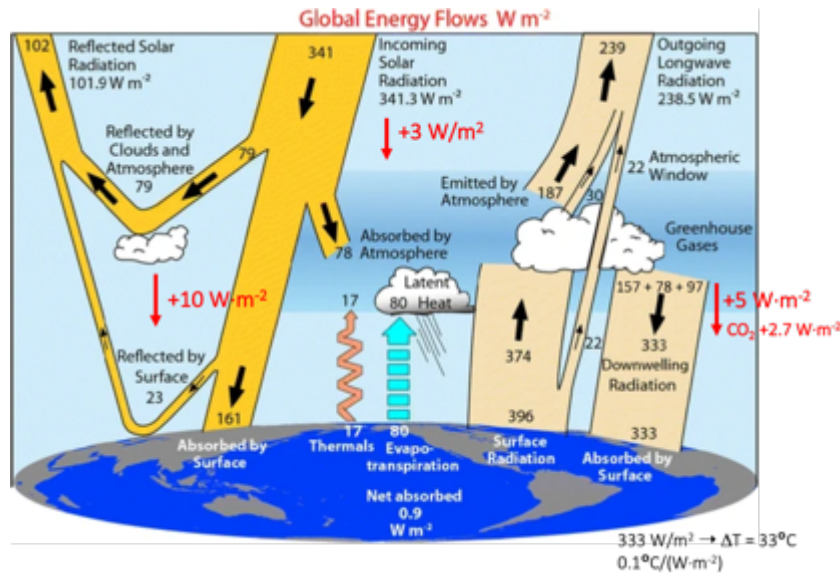
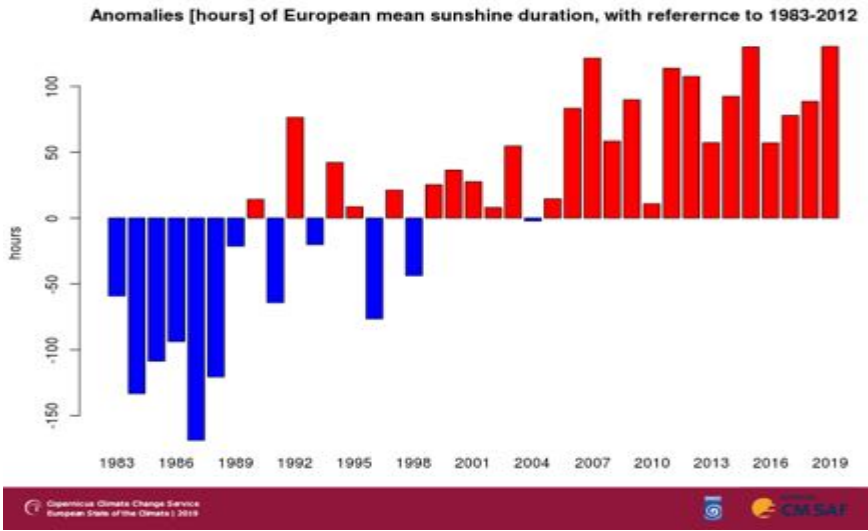
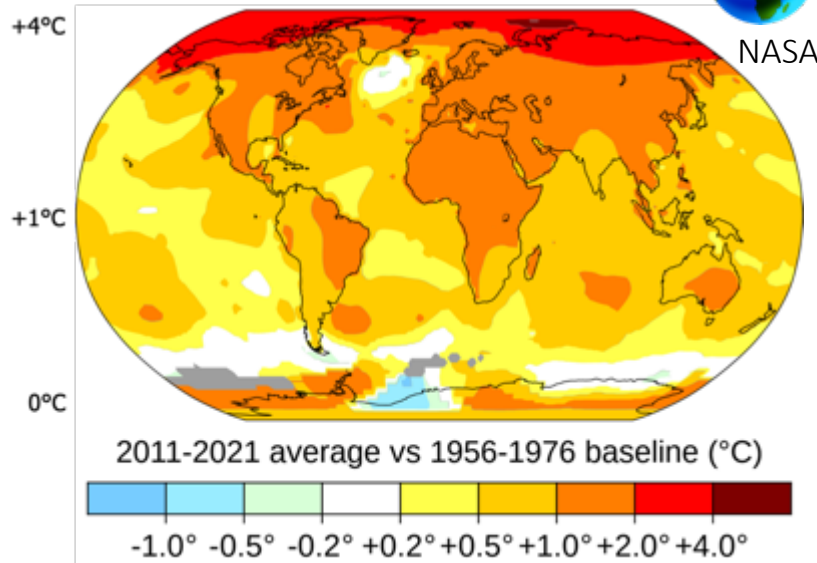
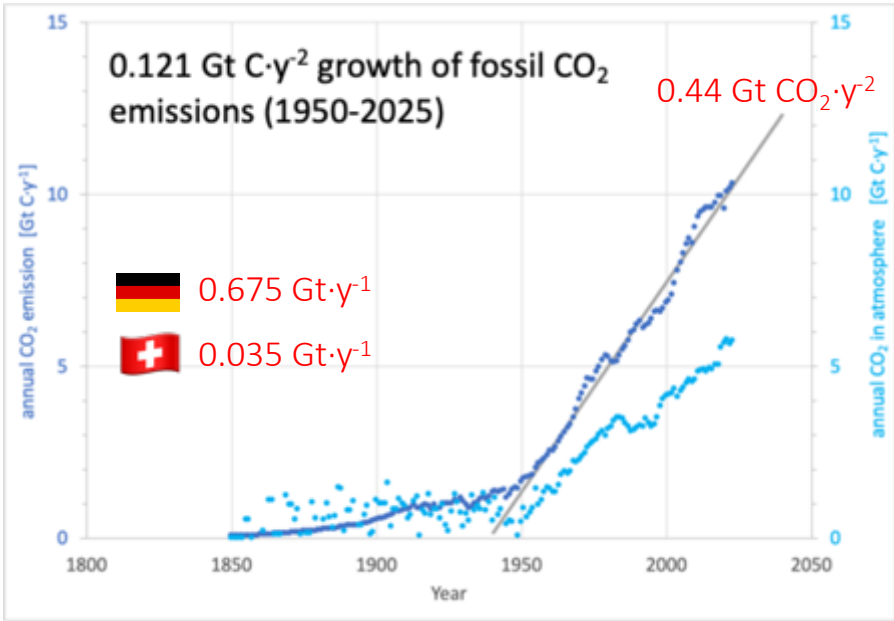


Ref.: <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-capita-vs-gdp-per-capita>

CO₂ Emissionen und Klimaveränderung

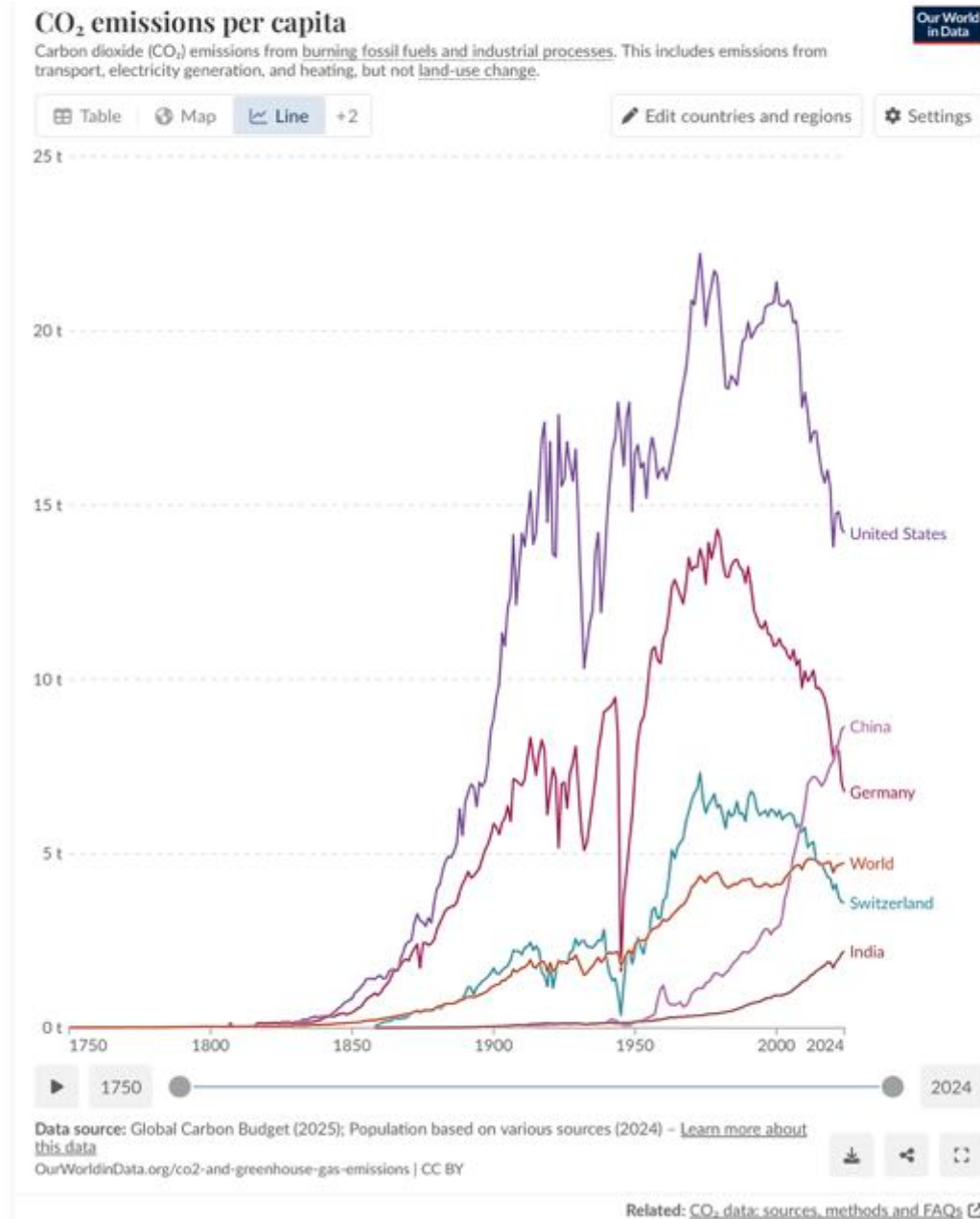


NASA





CO₂ Emissionen pro Kopf ausgewählter Länder



Pferdemist vor 130 Jahren



Pferdemist in 1894



Krise, die Anzahl der Pferde muss reduziert werden!



Pferdemist einsammeln



Pferdemist an der Quelle sammeln

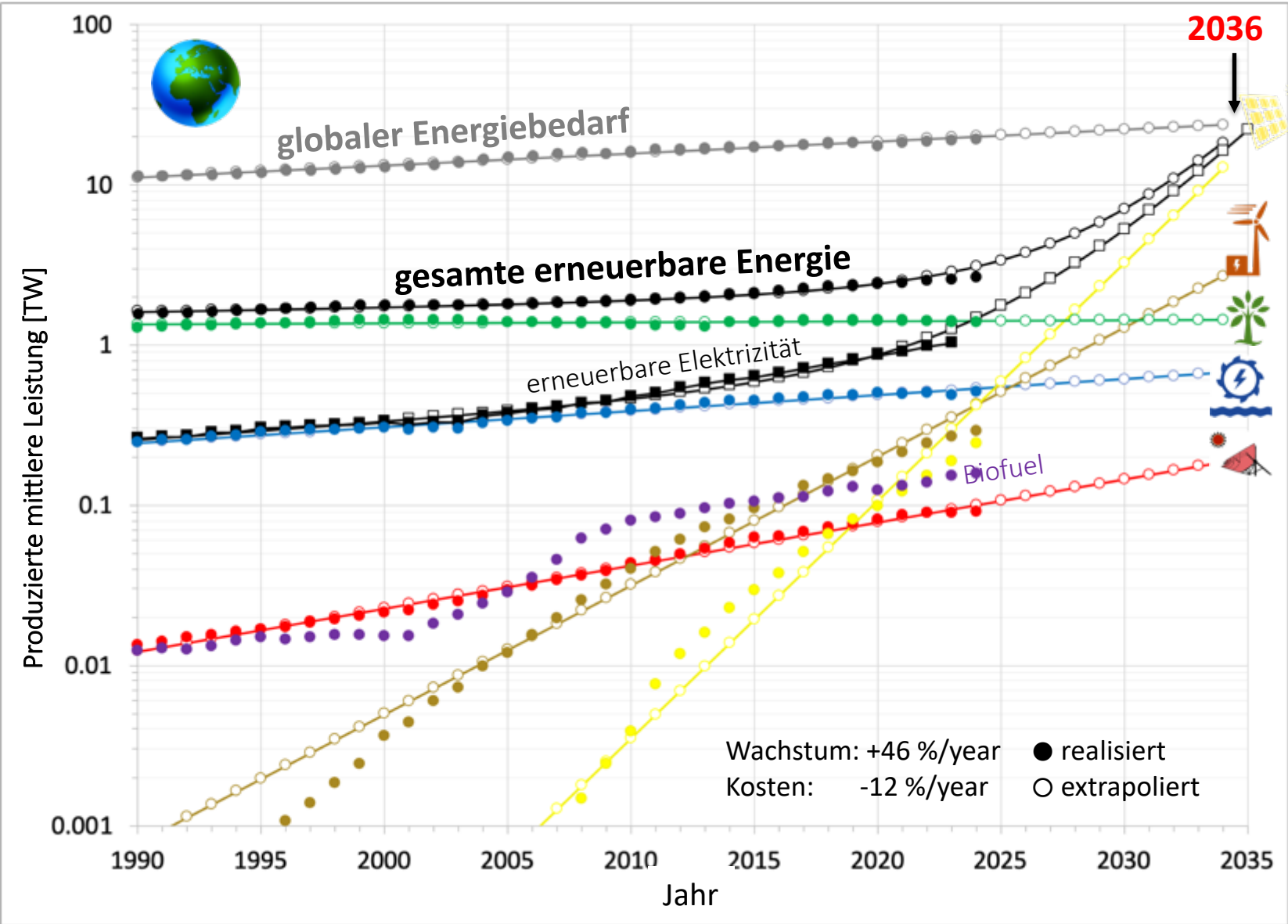


Lösung: neue Technologie!

2. KAPITEL Erneuerbare Energie

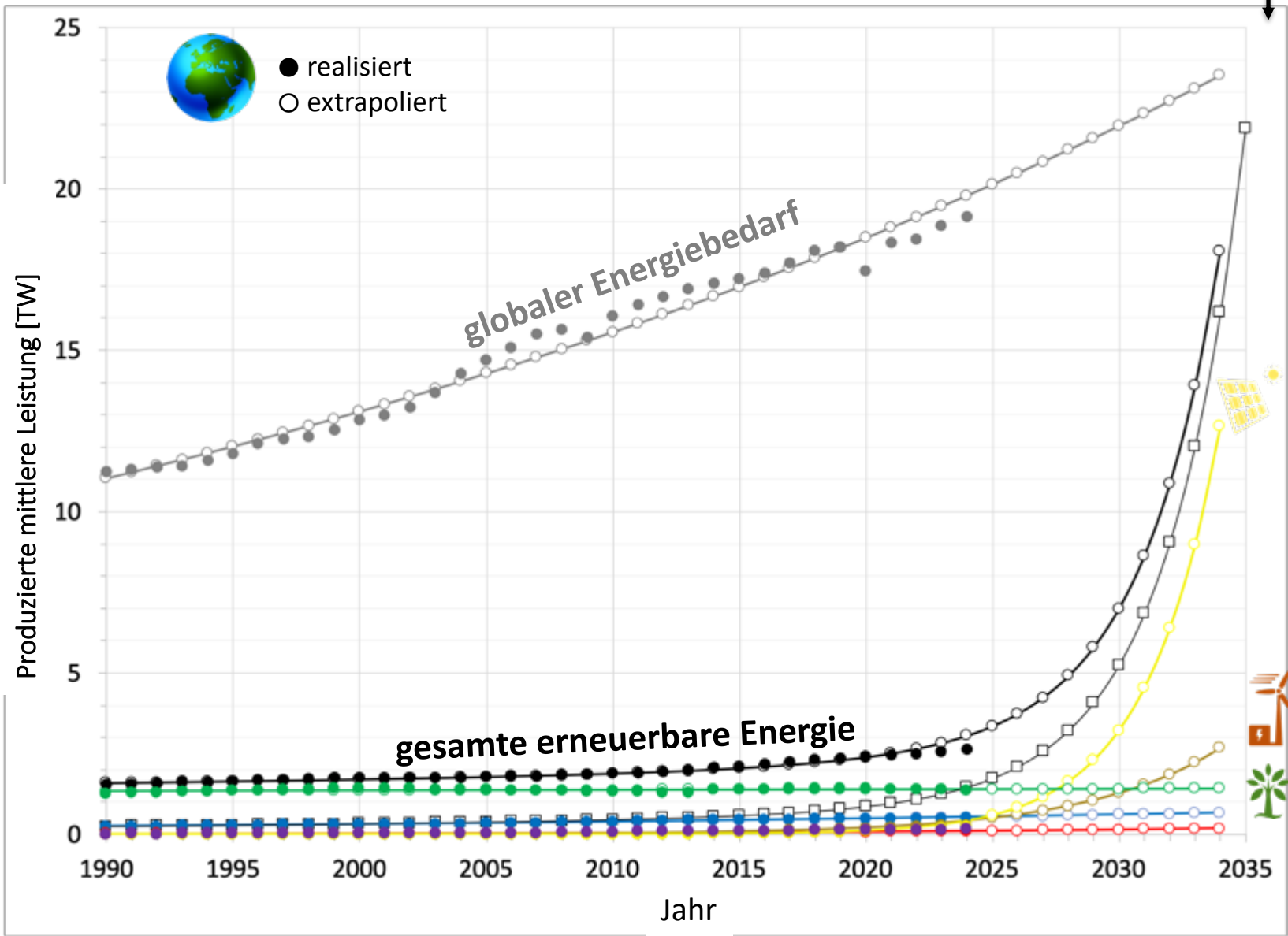


Globale erneuerbare Energieproduktion (logarithmisch)



Ref.: <https://ourworldindata.org/energy>, <https://www.pv-magazine.com/2023/02/16/global-solar-installations-may-hit-350-6-gw-in-2023-says-trendforce/#:~:text=2022,> and <https://ourworldindata.org/energy>

Globale erneuerbare Energieproduktion (linear)



Ref.: <https://ourworldindata.org/energy>, <https://www.pv-magazine.com/2023/02/16/global-solar-installations-may-hit-350-6-gw-in-2023-says-trendforce/#:~:text=2022>, and <https://ourworldindata.org/energy>

Landwirtschaft vor der Industrialisierung



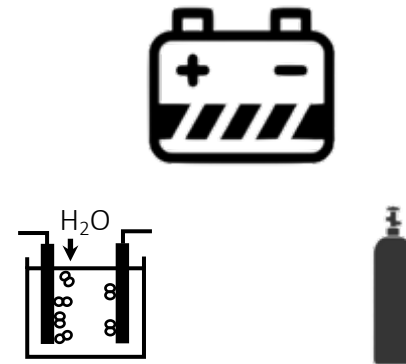
Lokale Landwirtschaft



PV auf den Dächern



Sauerkraut, Käse und Speck



Batterien, Wasserstoff Produktion und Speicherung

Landwirtschaft heute



Landwirtschaft (seasonal)



Treibhäuser (ganzjährig)



Landwirtschaft (global)



Transport / Distribution



Grossverteiler / Warenhaus



Konservierung / Kühlung



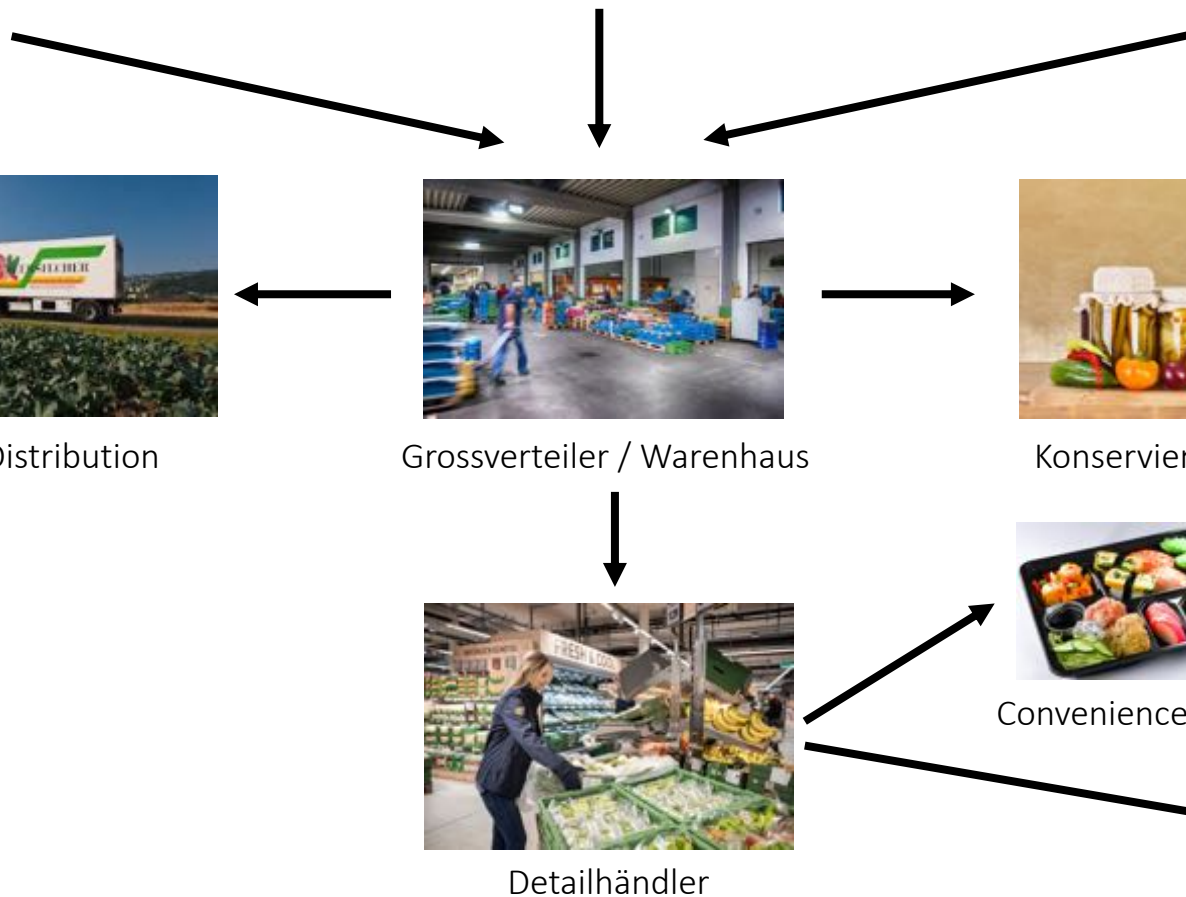
Detailhändler



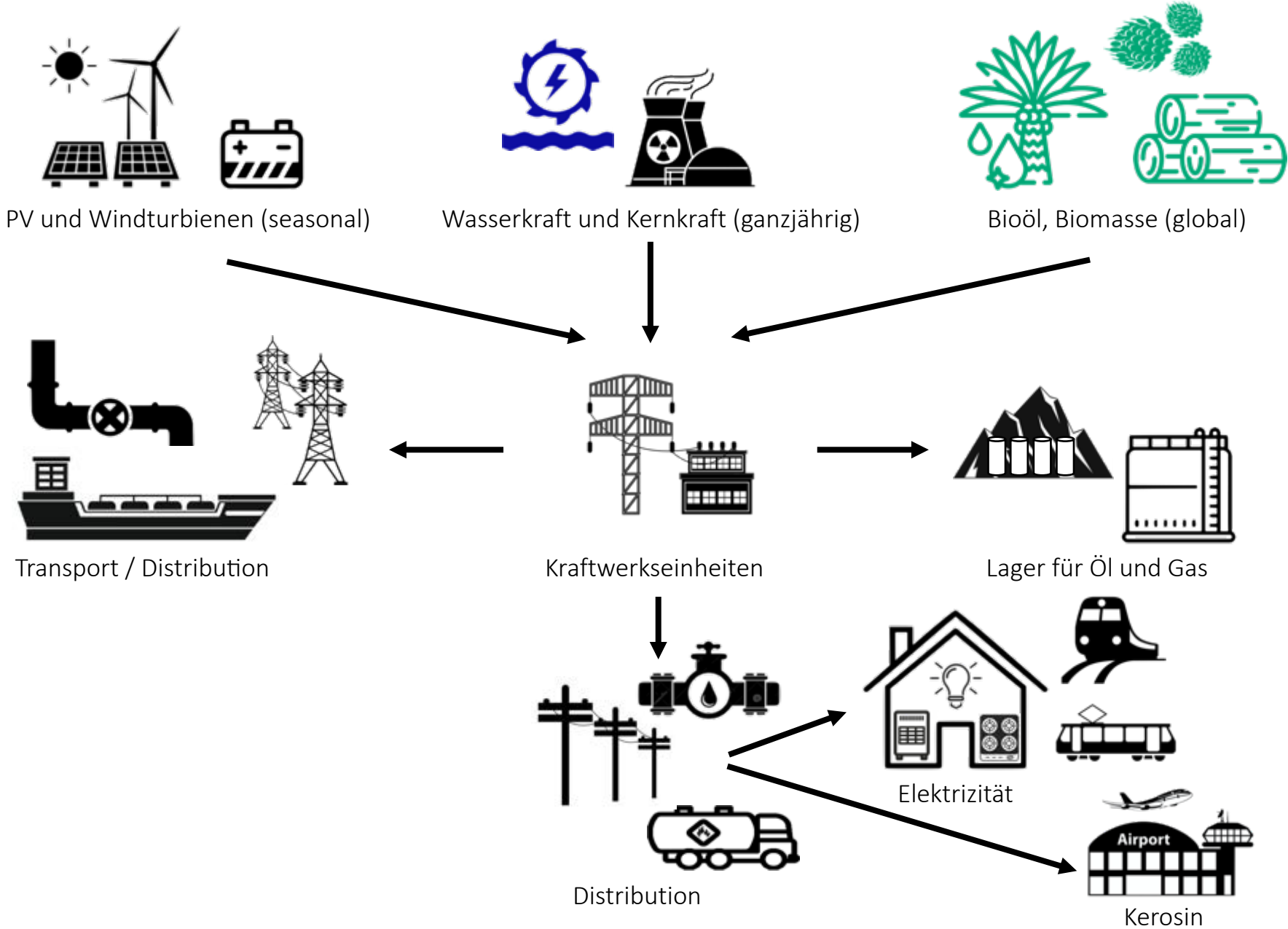
Convenience food



Küche

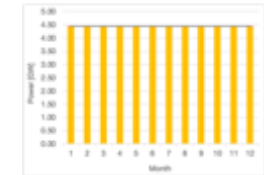
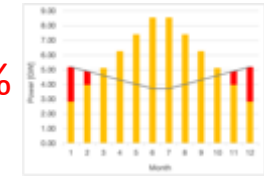
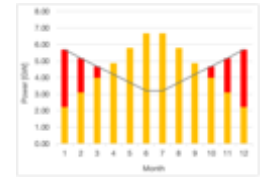
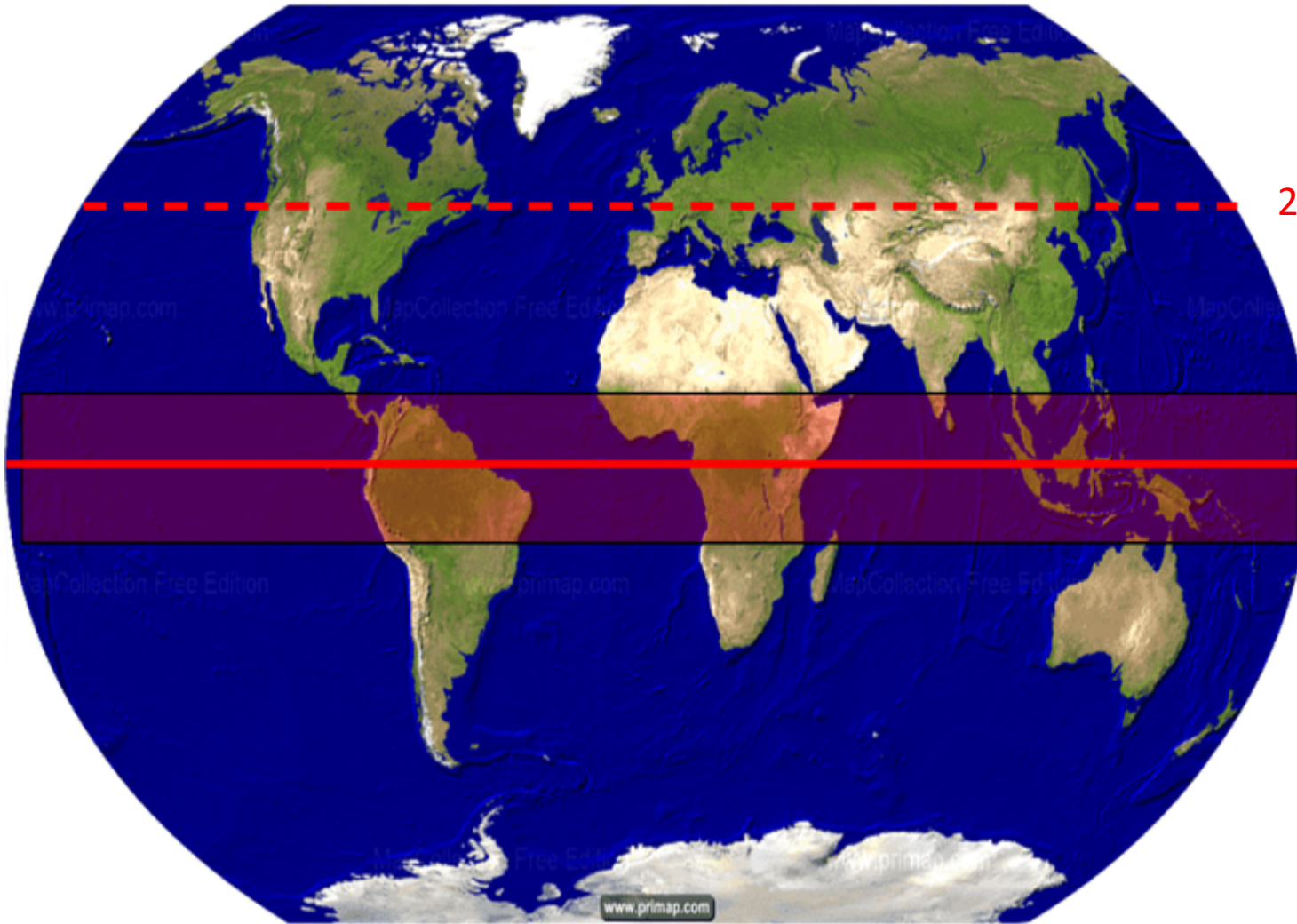


Erneuerbare Energiewirtschaft





Erneuerbare Energie und Speicherung



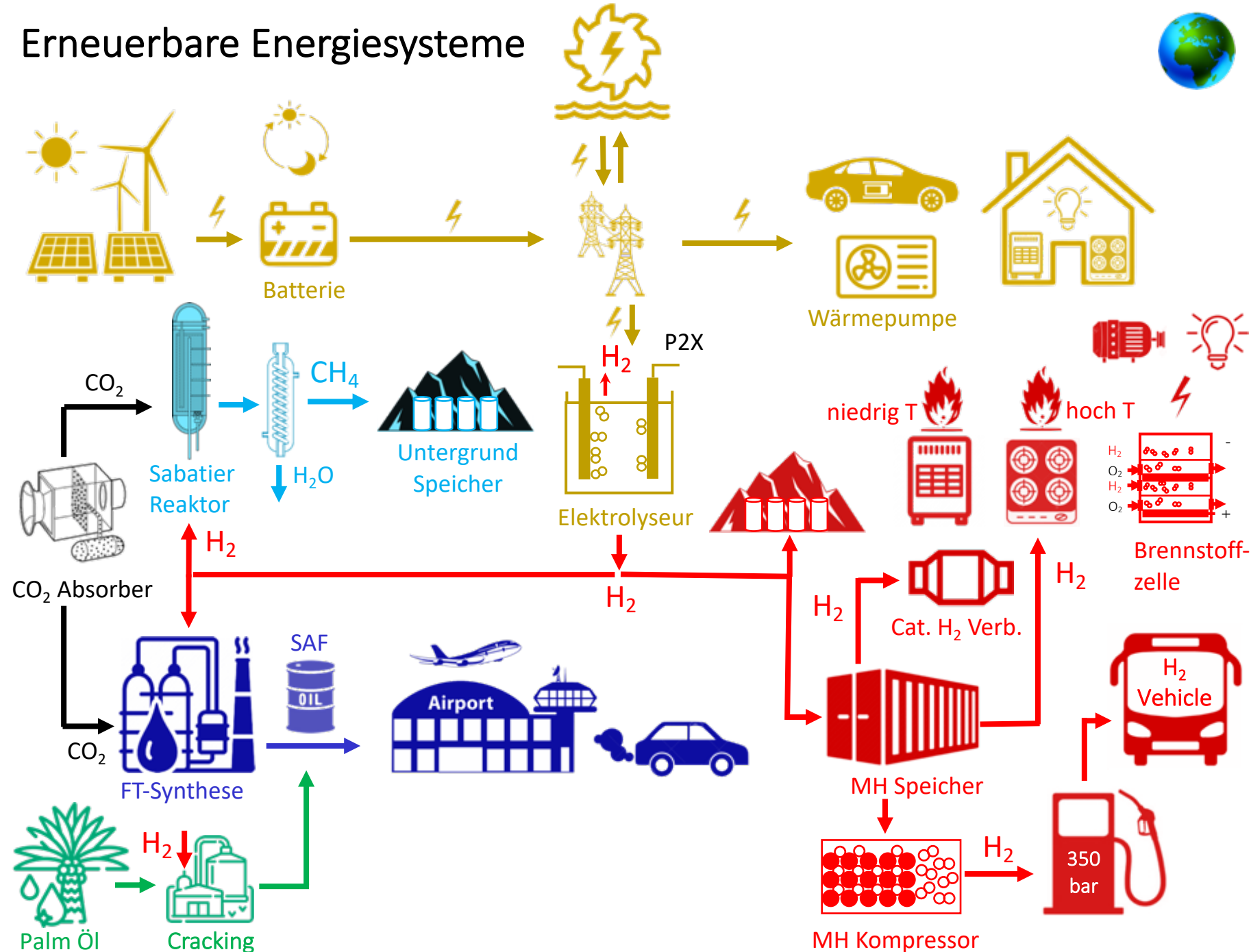
20%



3. KAPITEL Speicherung und Wasserstoff

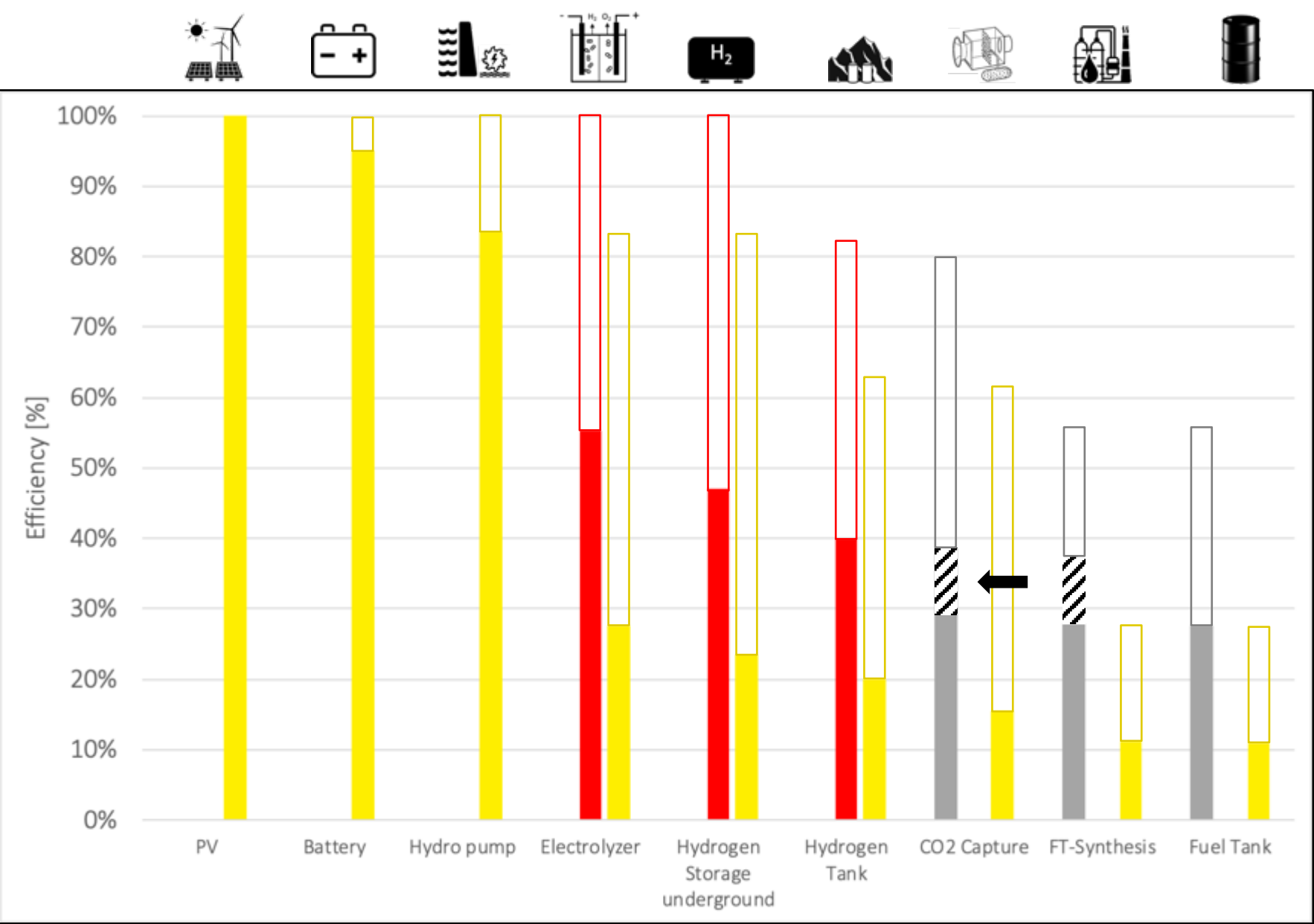


Erneuerbare Energiesysteme

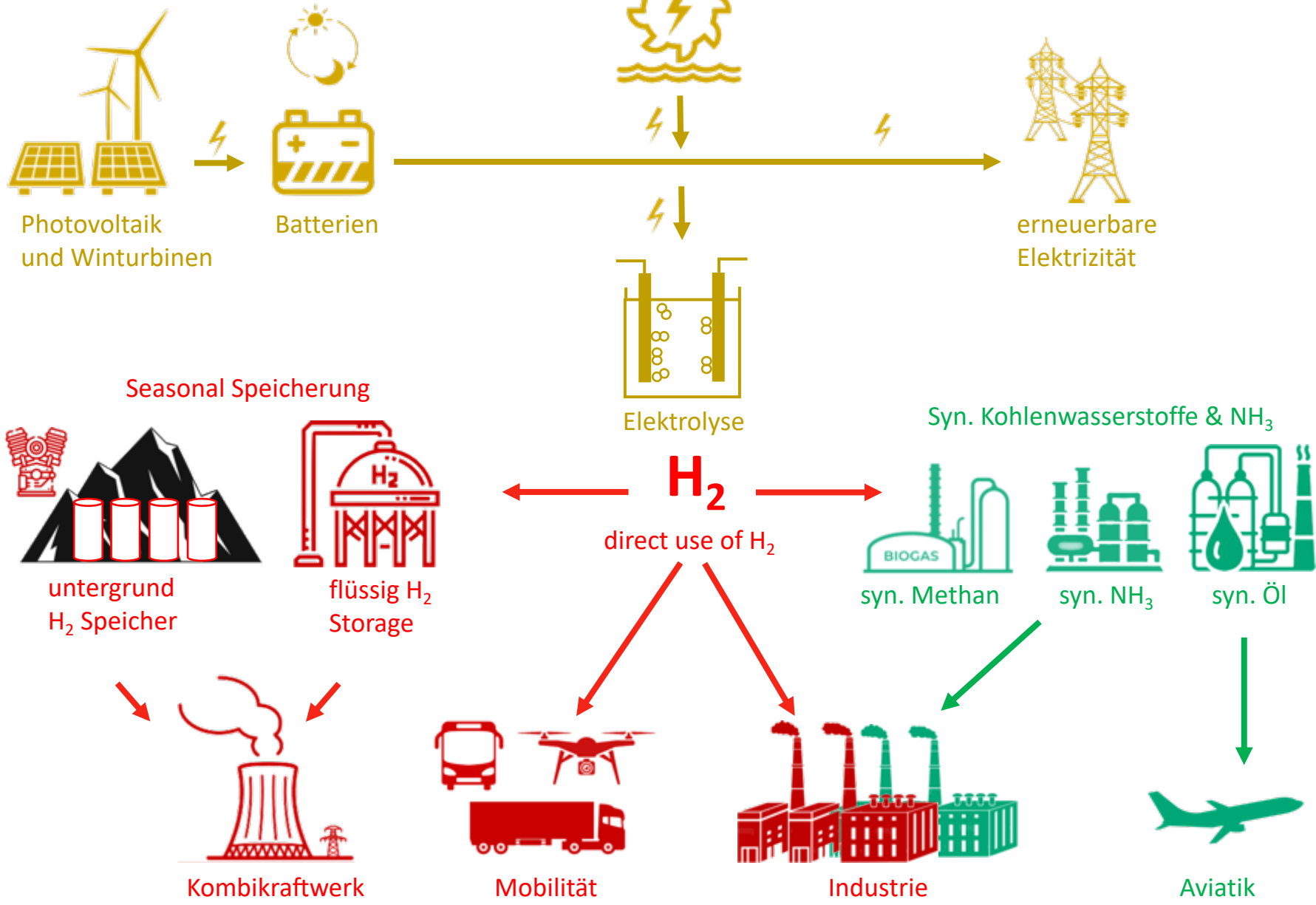


Effizienz entlang der Energiewandlung

Power to X (P2X)

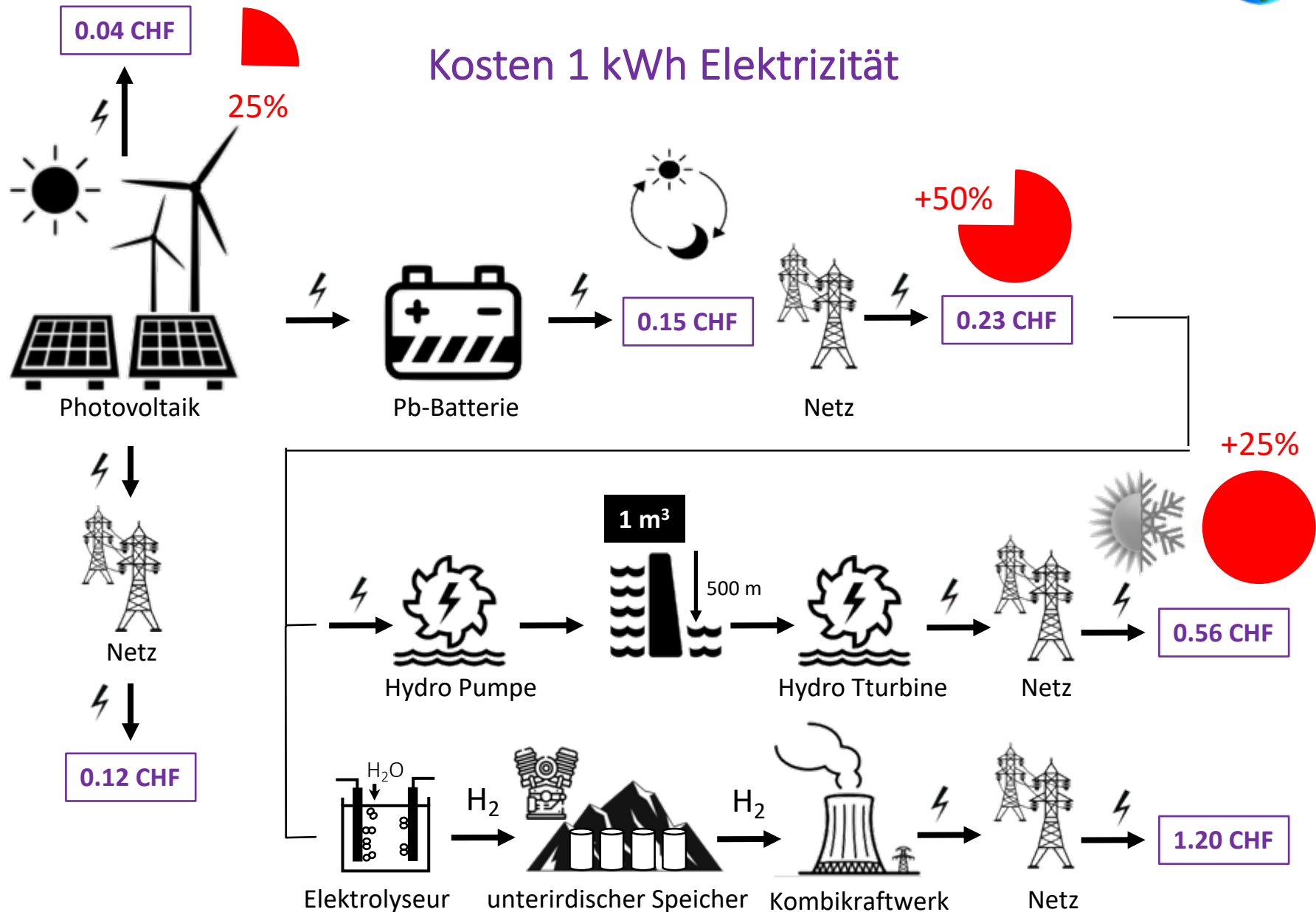


Grüne Wasserstoff Wirtschaft





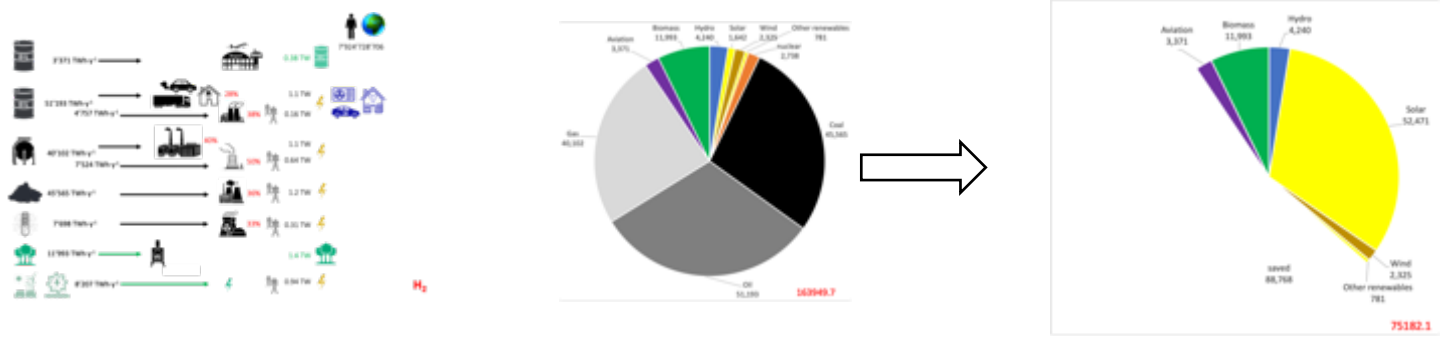
4. KAPITEL Heuristisches Modell



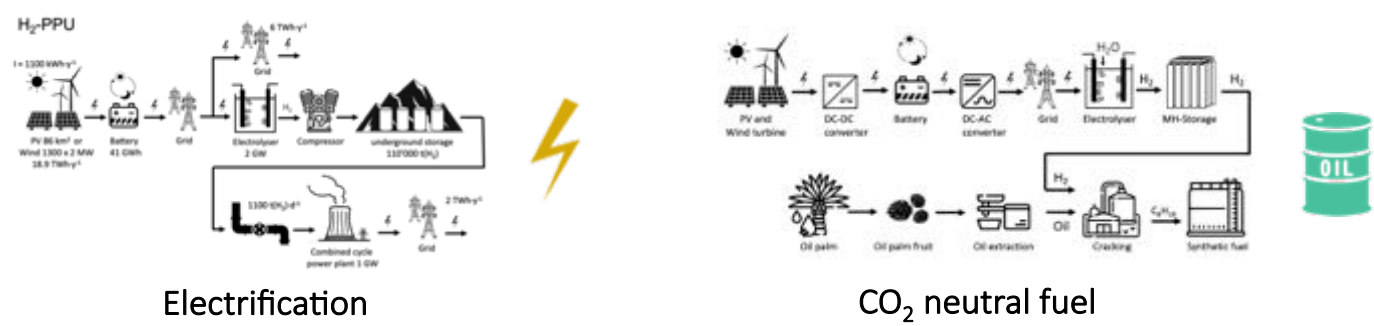


Heuristisches Modell für die Energiewende

Analyse der Energieproduktion und des Bedarfs

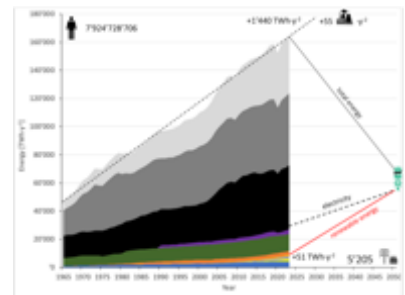


Verallgemeinerte Lösung mit Kraftwerkseinheiten (PPUs 1 GW)



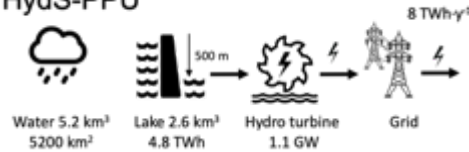
Optimierung der technischen Lösung und Minimierung des wirtschaftlichen Aufwands

KWE's	W _{el} + Q [TWh·y ⁻¹]	LCOE [€·kWh ⁻¹]	CAPEX [€·k]	OPEX [€·k·y ⁻¹]	TCS [G·y ⁻¹]	Fläche (PV) [km ²]	Bemerkungen
	8.7 + 17.4	0.05	5.5	0.3	0.4	1	Energie, Import U, kompakt, billig
	8.7 + 8.7	0.11	3	0.9	0.9	1	Import Erdgas, fossil, CCS
	8.7 (75%)	0.13	9.6 + 6	1	1.1	100	Energielücke, gross
	8.7 + 2.2	0.45	71	1	3.9	150	universal, sehr gross, teuer
	8.7 + 8.7	0.3	2	3.0	3.1	1	Import, billige Speicher
	8.7	0.05	2	0.1	0.1	10	local, dynamisch billig, Speicher
	8.7	0.16	2 + 6	0.5	1.4	850	Meeresbucht, Gezeiten

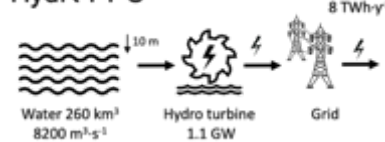


Kraftwerkseinheiten KWE 1/2)

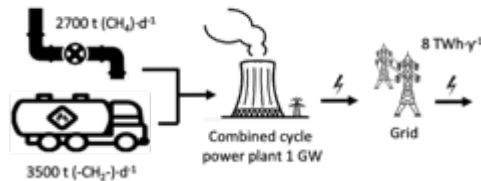
HydS-PPU



HydR-PPU



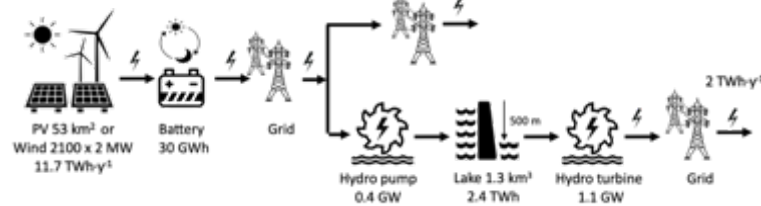
Therm-PPU



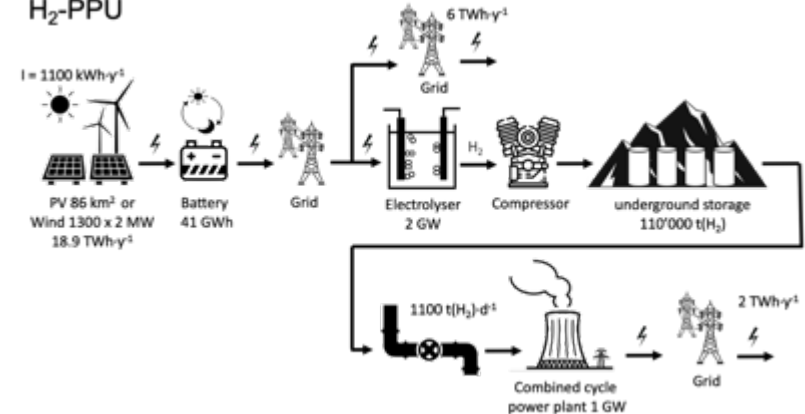
Nuc-PPU



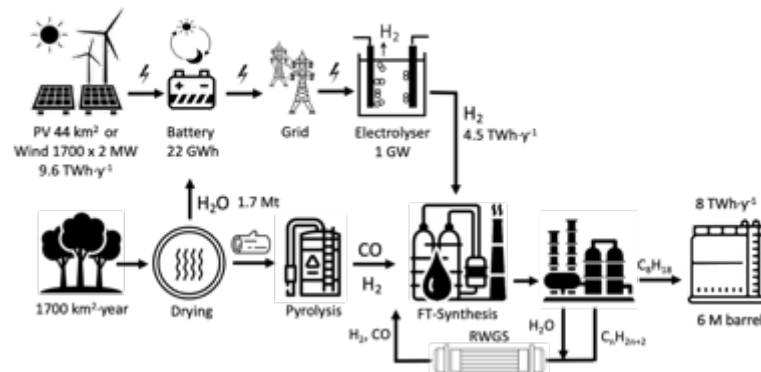
PV-HydS-PPU



H₂-PPU



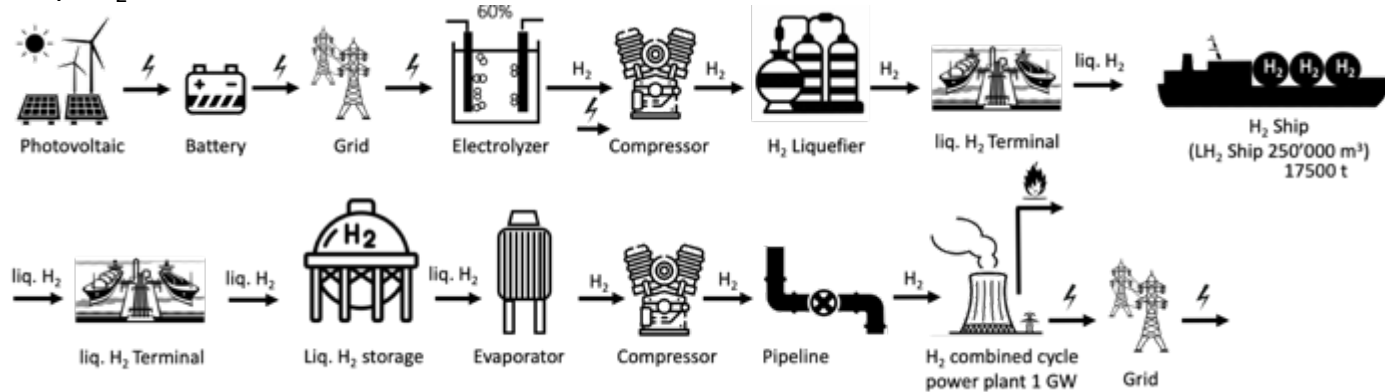
Syn fuel - PPU



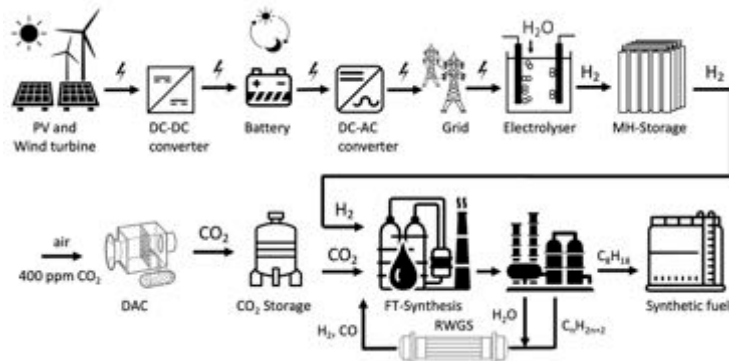
Ref.: Andreas ZÜTTEL, Christoph NÜTZENADEL, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN "Power plant units for CO₂ Neutral Energy Security in Switzerland", Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering, 12:1336016 (2024).

Kraftwerkseinheiten (KWE 2/2)

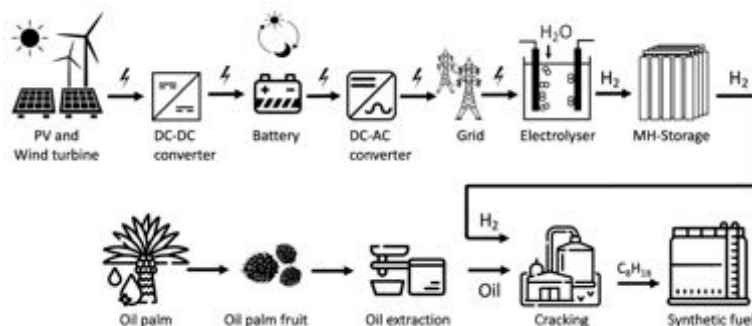
Imp. H₂



Imp. SF or CH₄



Imp. BSF



Ref.: Andreas ZÜTTEL, Christoph NÜTZENADEL, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN "Power plant units for CO₂ Neutral Energy Security in Switzerland", Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering, 12:1336016 (2024).



5. KAPITEL Energiewende in der Schweiz

Fukushima Dai-ichi Kernkraftwerk Desaster



11. March 2011



24. March 2011

11. March 2011 Erdbeben



25. Mai 2011 Der Bundesrat hat entschieden, künftig nicht mehr auf Atomkraft zu setzen. Die bestehenden Kernkraftwerke sollen so lange am Netz bleiben, wie sie sicher sind. Bestätigt durch das nationale Parlament am 8. Juni 2011.

Paris Klimaabkommen 2014

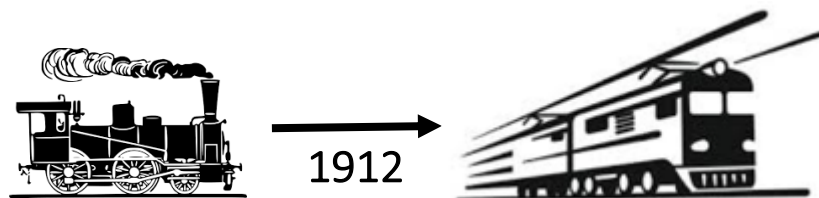
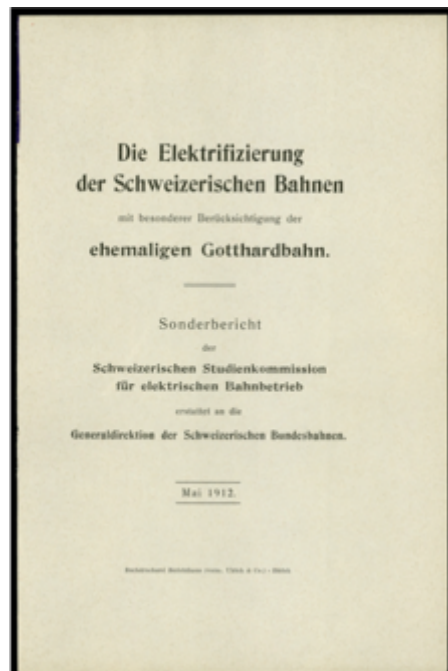


Energiestrategie Schweiz 2050



Am 21. Mai 2017 hat das Schweizer Stimmvolk das revidierte Bundesenergiegesetz angenommen. Die Ziele der Überarbeitung sind die Senkung des Energieverbrauchs, die Steigerung der Energieeffizienz und die Förderung der Nutzung erneuerbarer Energien. Zudem verbietet die überarbeitete Fassung den Bau neuer Kernkraftwerke.

Energiewende in der Schweiz 1912



Ref.: "Die Elektrifizierung der Schweizerischen Bahnen mit besonderer Berücksichtigung der ehemaligen Gotthardbahn.", Sonderbericht der Schweizerischen Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb erstattet an die Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen. Mai 1912.

1912

Elektrifizierung
1.23 – 2.6 Mio.€/km

alle 27m ein Mast,
35 – 70 k€ pro Mast

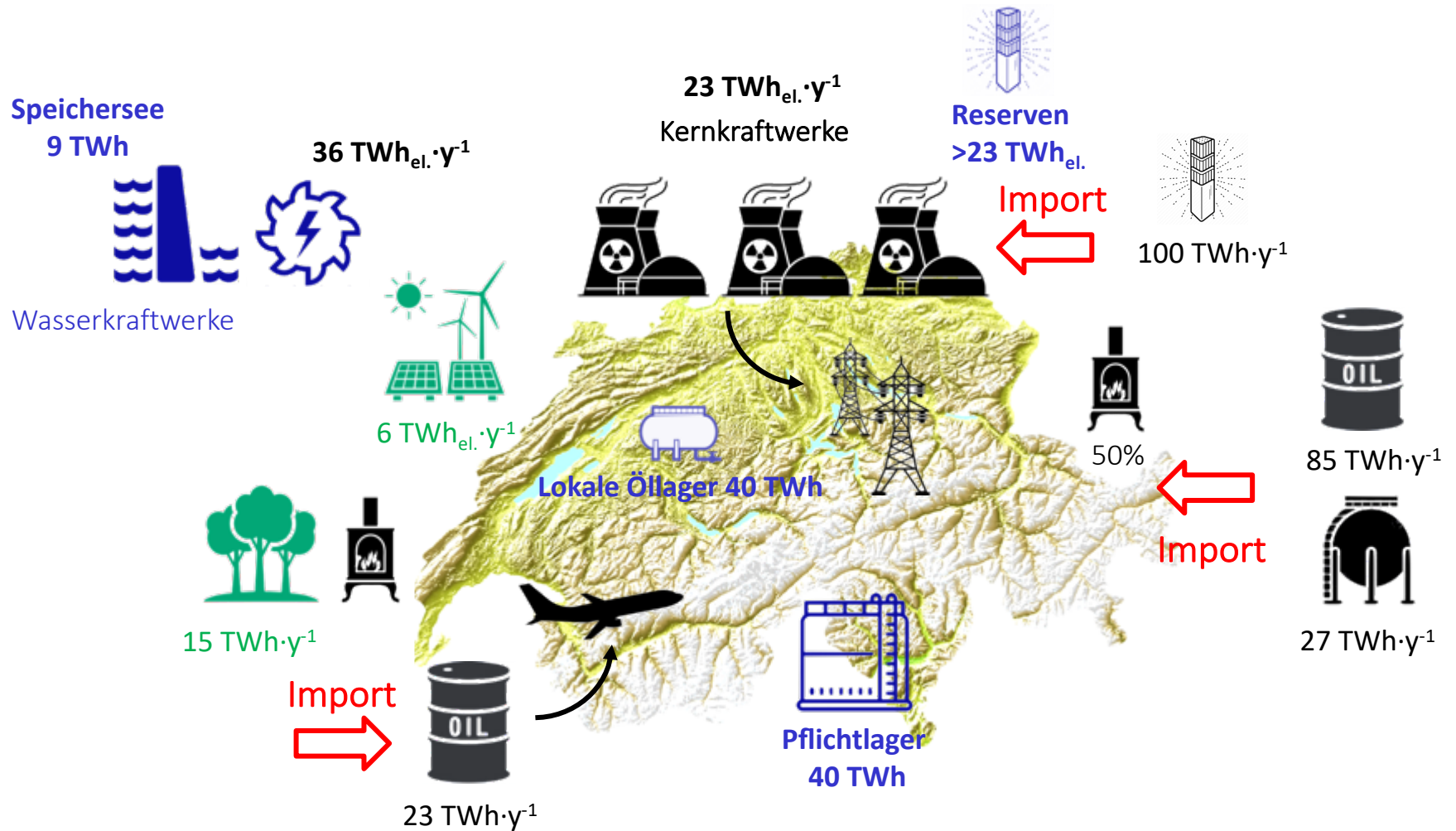
Schienennetz 62 Mio. €/km
(Autobahn 150 - 330 Mio.€/km)



Ref.: Deutschland: Lindau -München 500 Mio.€ für 189 km incl. Lärmschutz und neuem Bahnhof...
Dänemark: Gesamtes Schienennetz 1'600 Mio.€ für 1300 km

Schweizer Energiewirtschaft

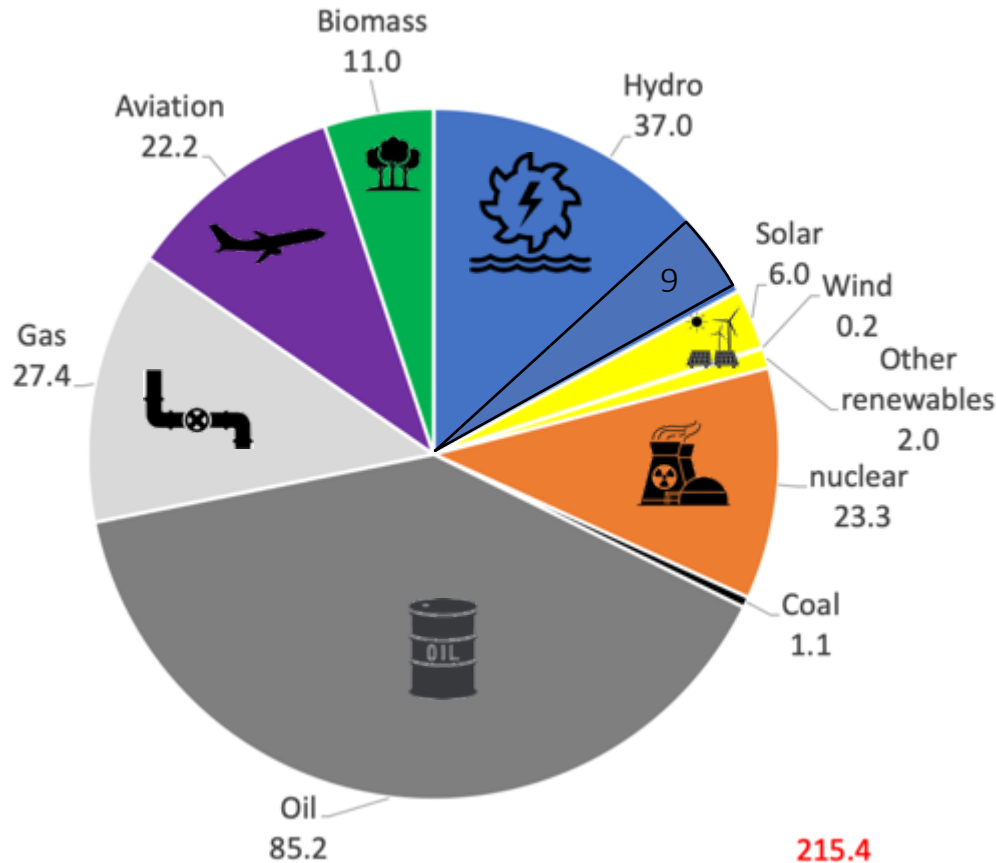
Importe, Reserven



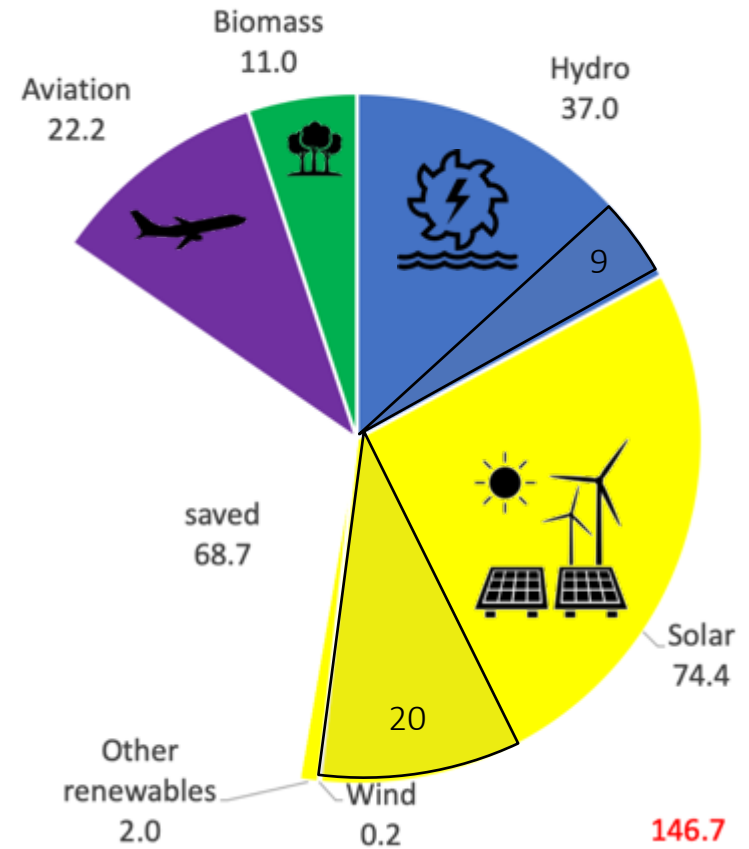
Energiebedarf nach Quellen (2023 and 2050)

2023

[TWh·y⁻¹]

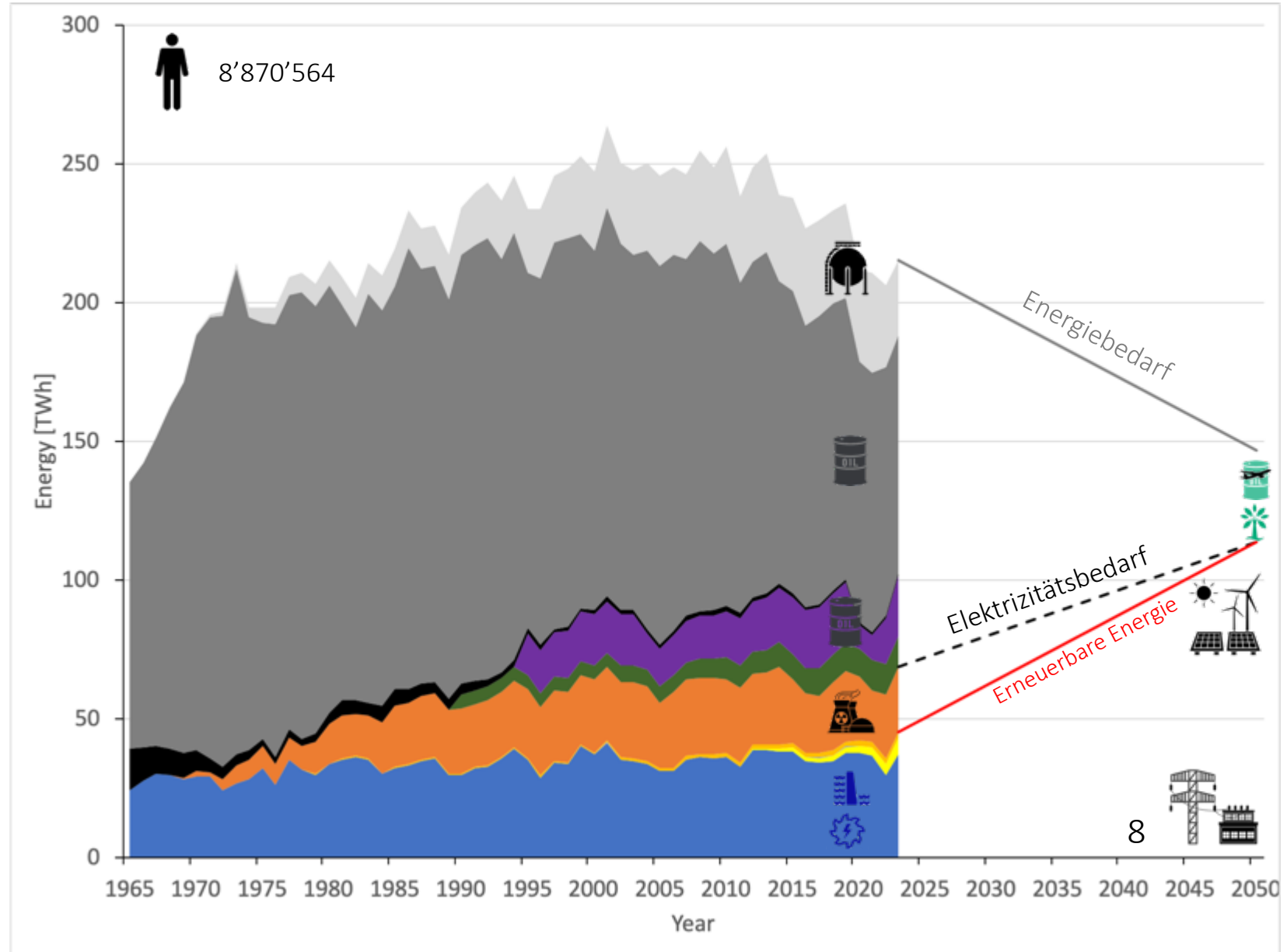


2050



Ref.: Andreas ZÜTTEL, Noris GALLANDAT, Paul J. DYSON, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN, Shin-Ichi ORIMO, "Future Swiss Energy Economy: the challenge of storing renewable energy", Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering, 9 (2022)

Energiewende (1965 – 2050)

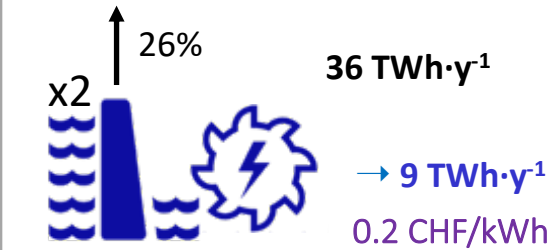


Eigenschaften der Kraftwerkseinheiten

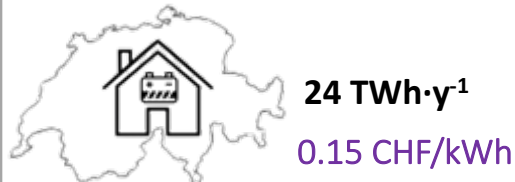


		Gesetz		H ₂	
K [CHF·kWh ⁻¹]	0.05	0.08	0.25	0.45	0.48
CAPEX [BCHF]	4	8-12	38	71 ^{Speicher}	64
Area PV [km ²]	0	0	78	112	82
Area Bio [km ²]		(1'033)	(1'033)	(1'033)	4'900 (1'033)
(...) Import	H ₂ →		→		→
K [CHF·kWh ⁻¹]	1.00 ^{Kosten}		2.20 ^{Kosten}		0.35
CAPEX [BCHF]	7 (120)		5 (117)		4 (117)
Area PV [km ²]	0 (120)		0 (1380)		0 (6)
Area Bio [km ²]	0 (1'033)		0 (1'033 + CO ₂ 2.3 Mt·y ⁻¹)		(7230)

Erneuerbare Energie Lösung (Beispiel)



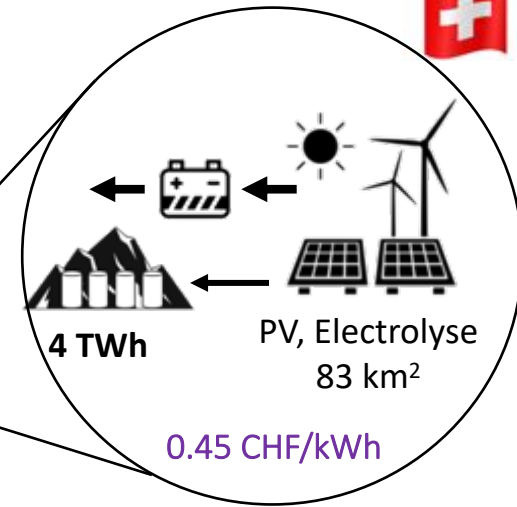
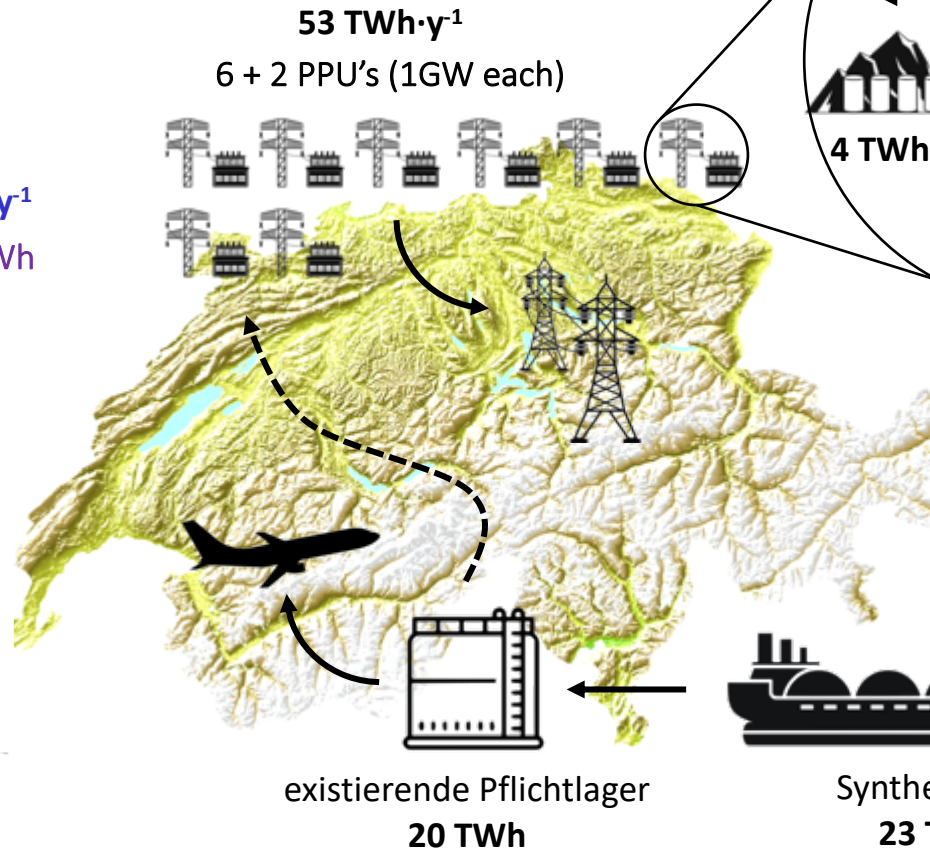
Erhöhung der Staumauern



150 km² PV auf Dächern



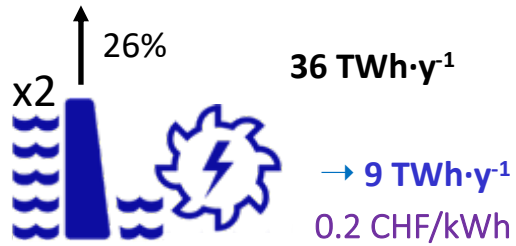
Biomasse für Wärmeproduktion



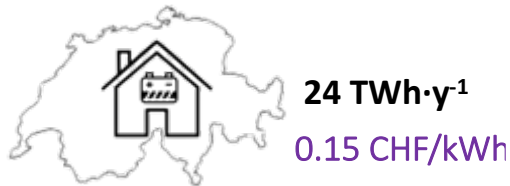
Senken des Energieverbrauchs durch Isolation, Nutzung der Abwärme aus den Kraftwerken zum Heizen.

Ref.: Andreas ZÜTTEL, Christoph NÜTZENADEL, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN "Power plant units for CO₂ Neutral Energy Security in Switzerland", Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering, 12:1336016 (2024).

CO₂ neutrale Energie Lösung (Beispiel)



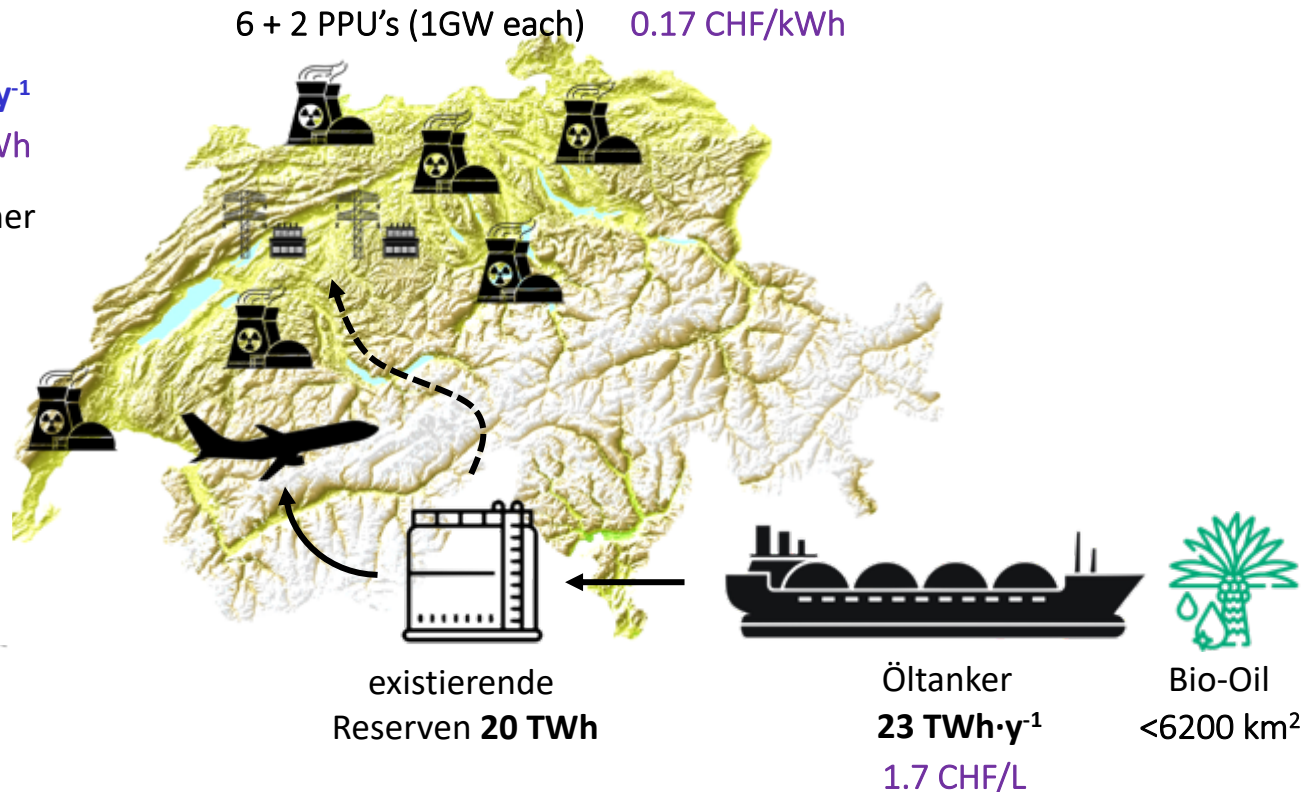
Vergrößerung der Wasserspeicher



150 km² PV auf Dächern

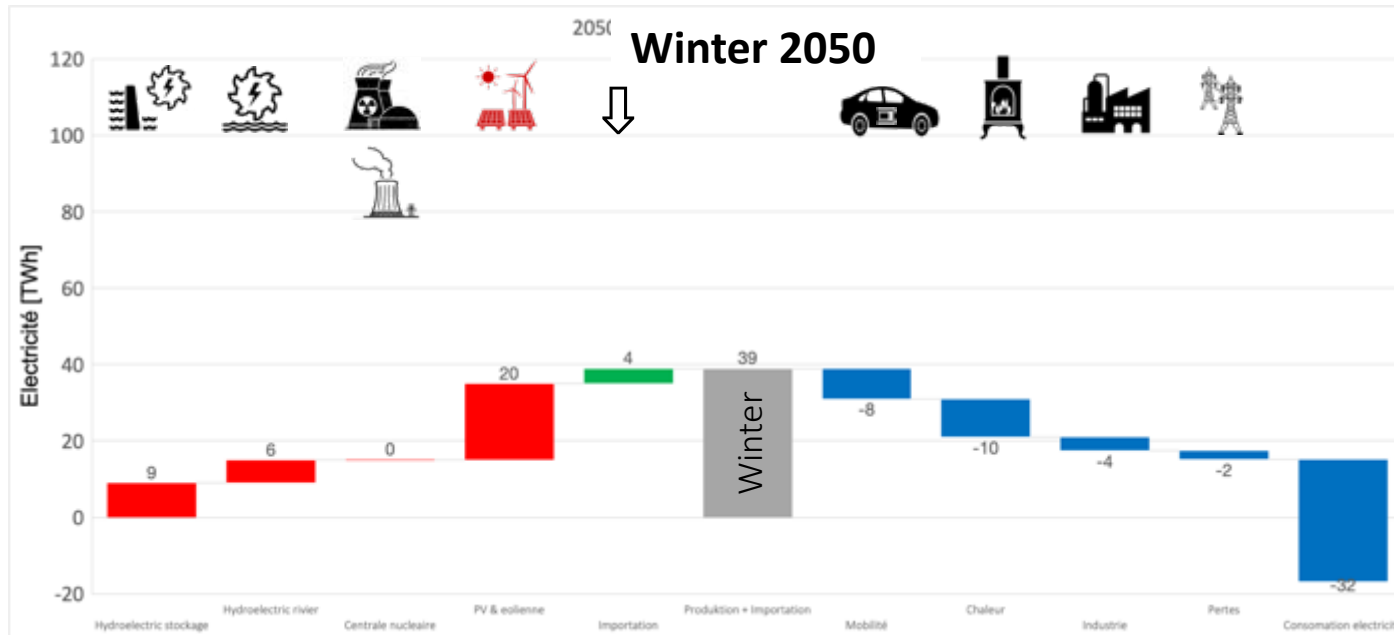
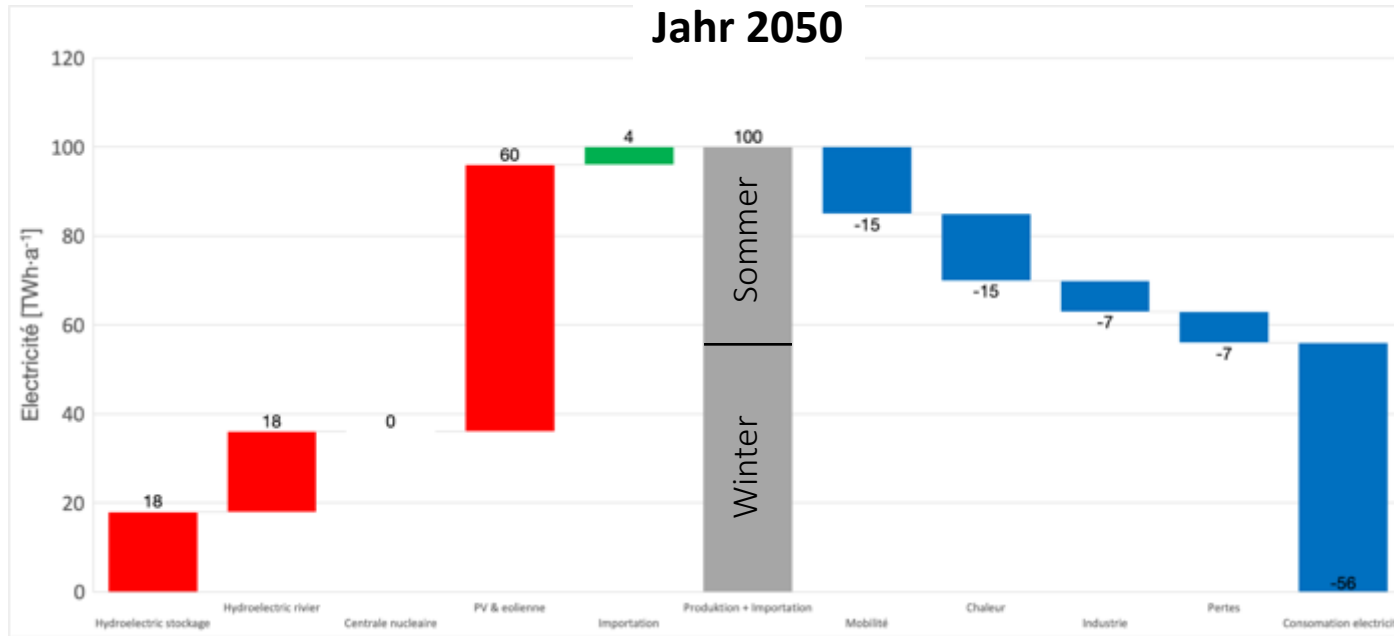


Biomasse zum Heizen





“Winterstromlücke”



-17 TWh

3 Optionen für die “Winterstromlücke”

Energiesystem	Speicherung	Import	Kern- oder GuD-Kraftwerk
Ausbau PV Windturbinen [TWh]	61	37	1
Ausbau Kern- oder GuD	0	0	6 + 2 ou 8
Speicherung/Import [TWh]	17	24	0
CAPEX initial [GCHF]	302	66	37
Gesamtkosten [GCHF·y ⁻¹]	16.8	4.4	3.2
LCOE [CHF/MWh]	560	>300	50
Bemerkungen	Keine Redundanz und Reserven	Keine Redundanz und Reserven	Redundanz, >0.5 Jahre Reserven

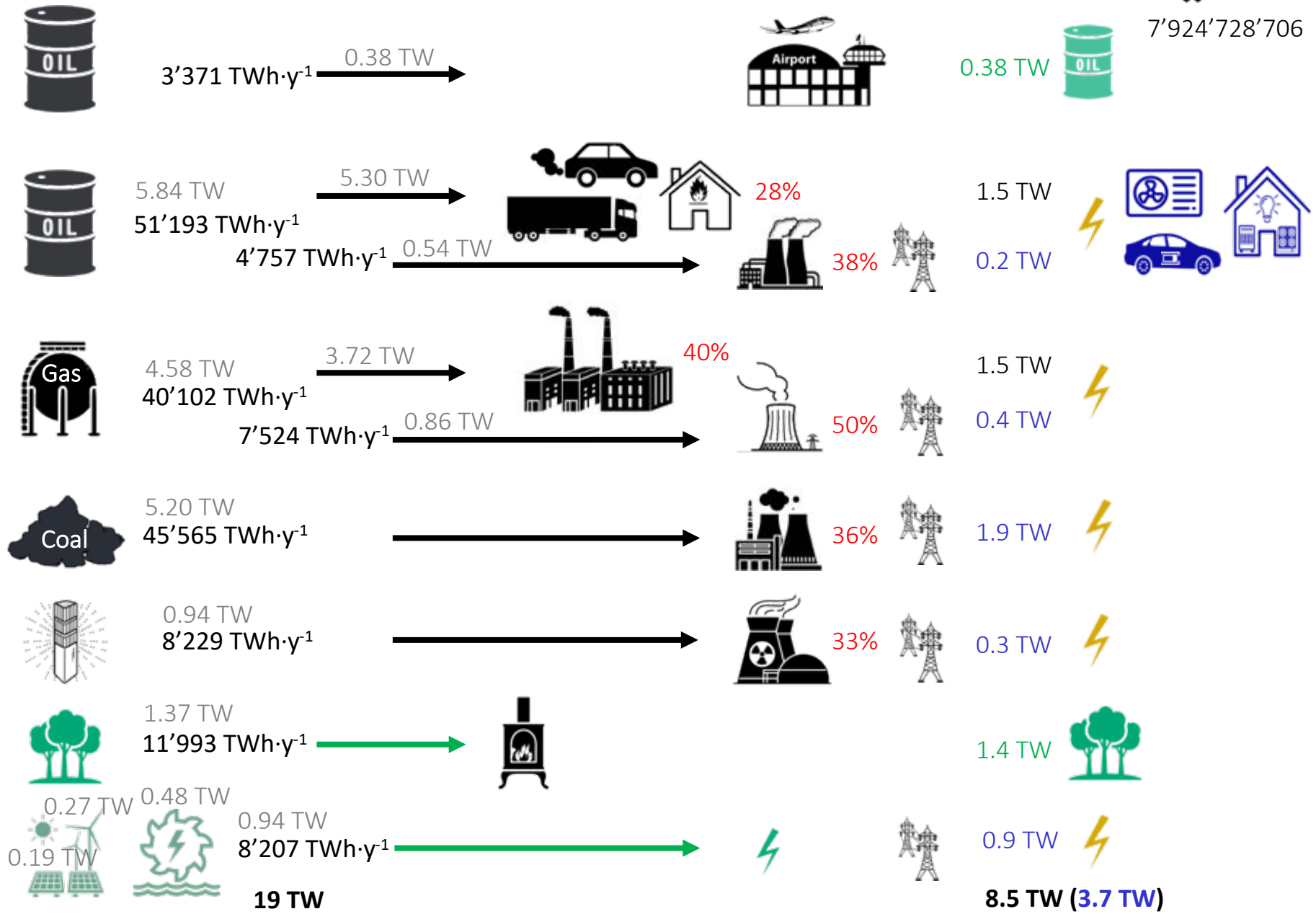
6. KAPITEL Globale Energiewende



Globale Energieversorgung (2023)



7'924'728'706



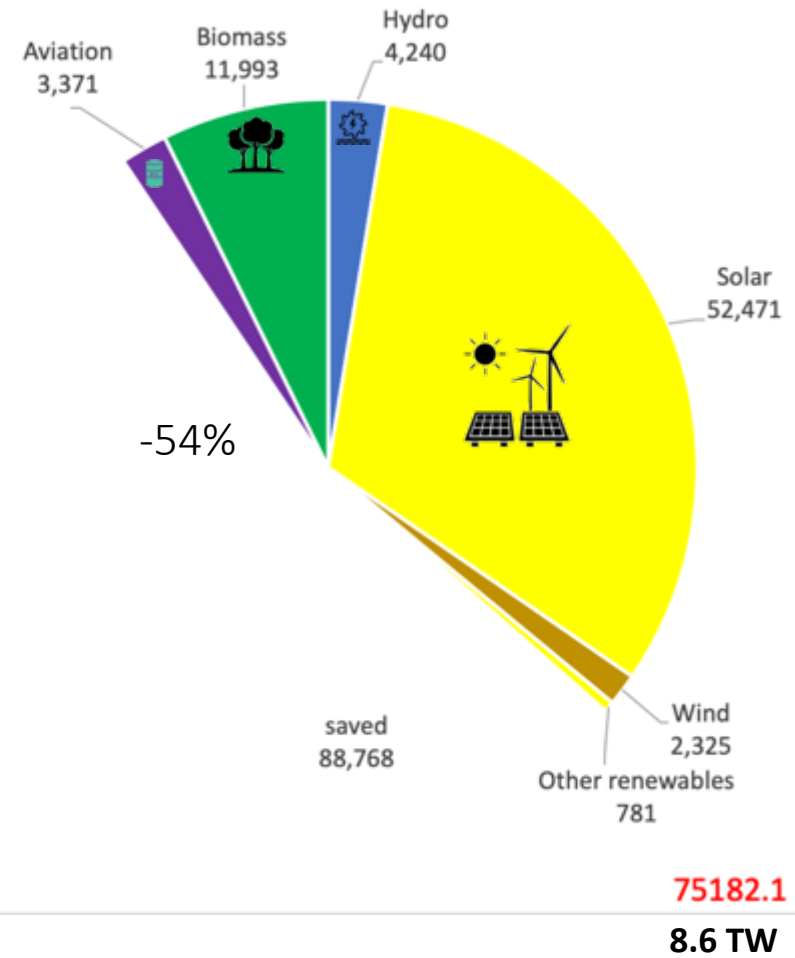
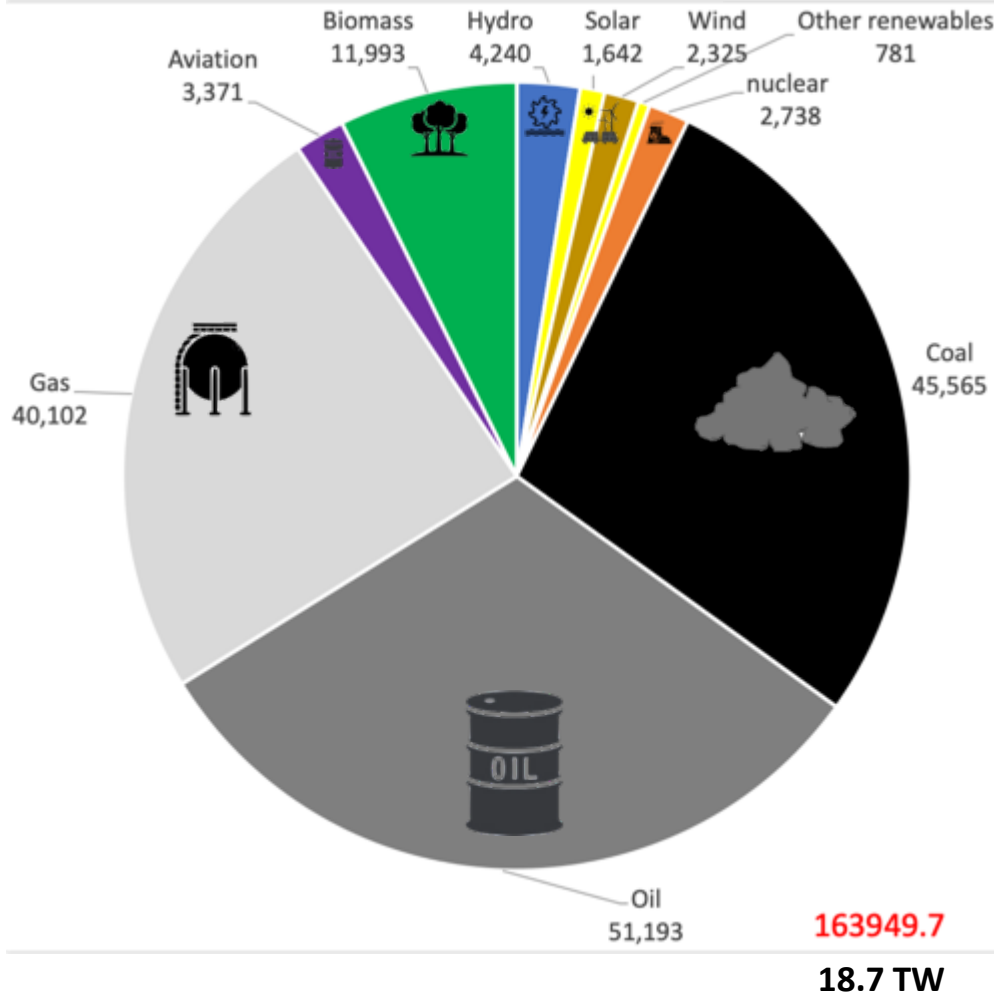


Globale Energiewende

Energy in [TWh·y⁻¹]

current
2023

electrification
2050





Kraftwerkseinheiten (PPU), Energie, Kosten, Platzbedarf

PPU's 	$W_{el.} + Q$ [TWh·y ⁻¹]	LCOE [€·kWh ⁻¹]	CAPEX [G€]	OPEX [G€·y ⁻¹]	TCS [G€·y ⁻¹]	Area (PV) [km ²]	Bemerkungen
	8.7	0.05	2	0.1	0.4	5	lokal, dynamisch, Speicher
	8.7 + 17.4	0.08	5.5	0.3	0.4	1	Energie, Import U, kompakt, billig
	8.7 + 8.7	0.11	3	0.9	0.9	1	Import Erdgas, fossile, CCS
	8.7 (75%)	0.13	9.6 + 6	1	1.1	100	nicht ausreichend, gross
	8.7	0.16	2 + 6	0.5	1.4	850	Ozean, Gezeiten
	8.7 + 8.7	0.34	2	1.2	3.5	30 (4800)	Import, speicherbar
	8.7 + 2.2	0.45	84	1	4.6	150	universell, sehr gross, teuer

Uran: 200 t Natururan (0,7%) ergeben 20 Tonnen Uran (5%), Natururan kostet 130 €/kg

Batterie kostet 100 €/kWh, Lebensdauer 8 Jahre

PV kostet 1200 €/kWp, produziert 220 kWh·m⁻²·y⁻¹, Spitzenleistung 1 kW·m⁻²

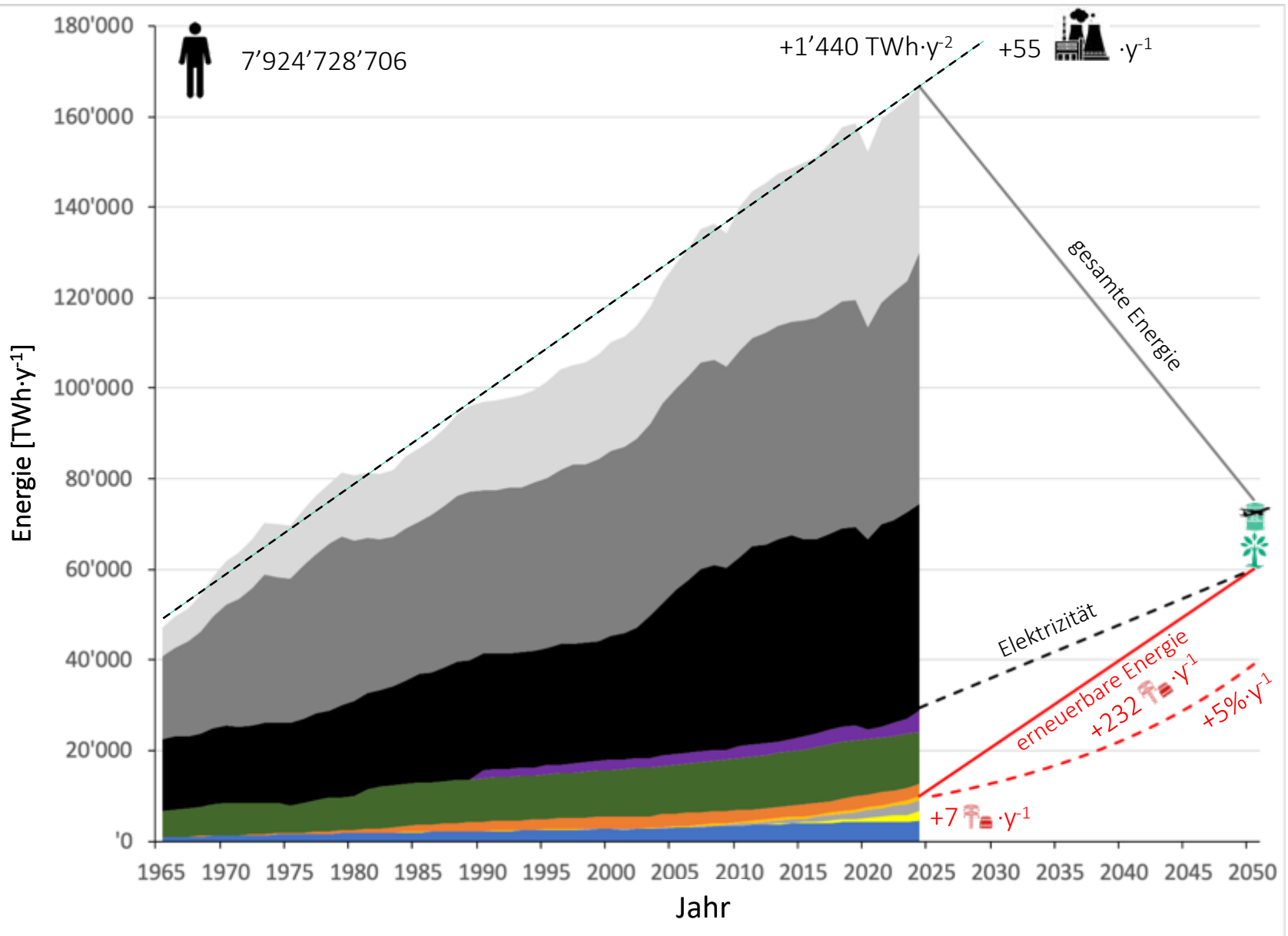
Palmöl kostet 0,7 €/L, Energiegehalt syn. Öl 10 kWh/L, Kosten 1.7 €/L

Wasserstoff ist weniger als 6.7 €/kg billiger als Palmölimport und Hydrierung und weniger als 2 €/kg billiger als Wasserkraft.

Wasserkraft braucht Täler und Höhenunterschiede, Kernkraft braucht eine Änderung der Gesetzgebung, PV mit Batterie deckt nur 75% ab, PV mit Batterie und Wasserstoff ist am teuersten, aber am universellsten, Palmöl mit Hydrierung ist ein Import eines umstrittenen Produkts, aber einfach und billig zu speichern.

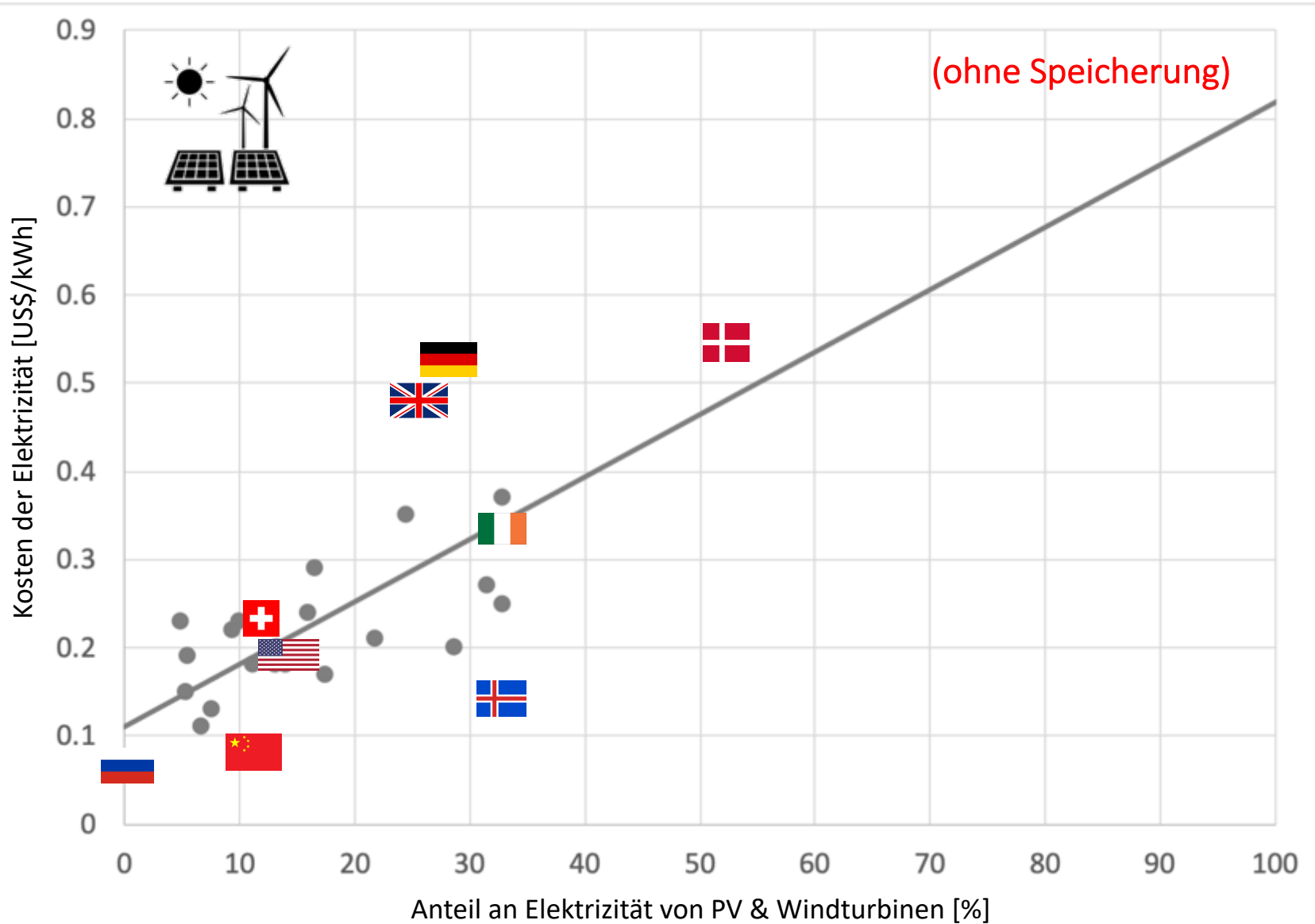


Globale Energie Entwicklung





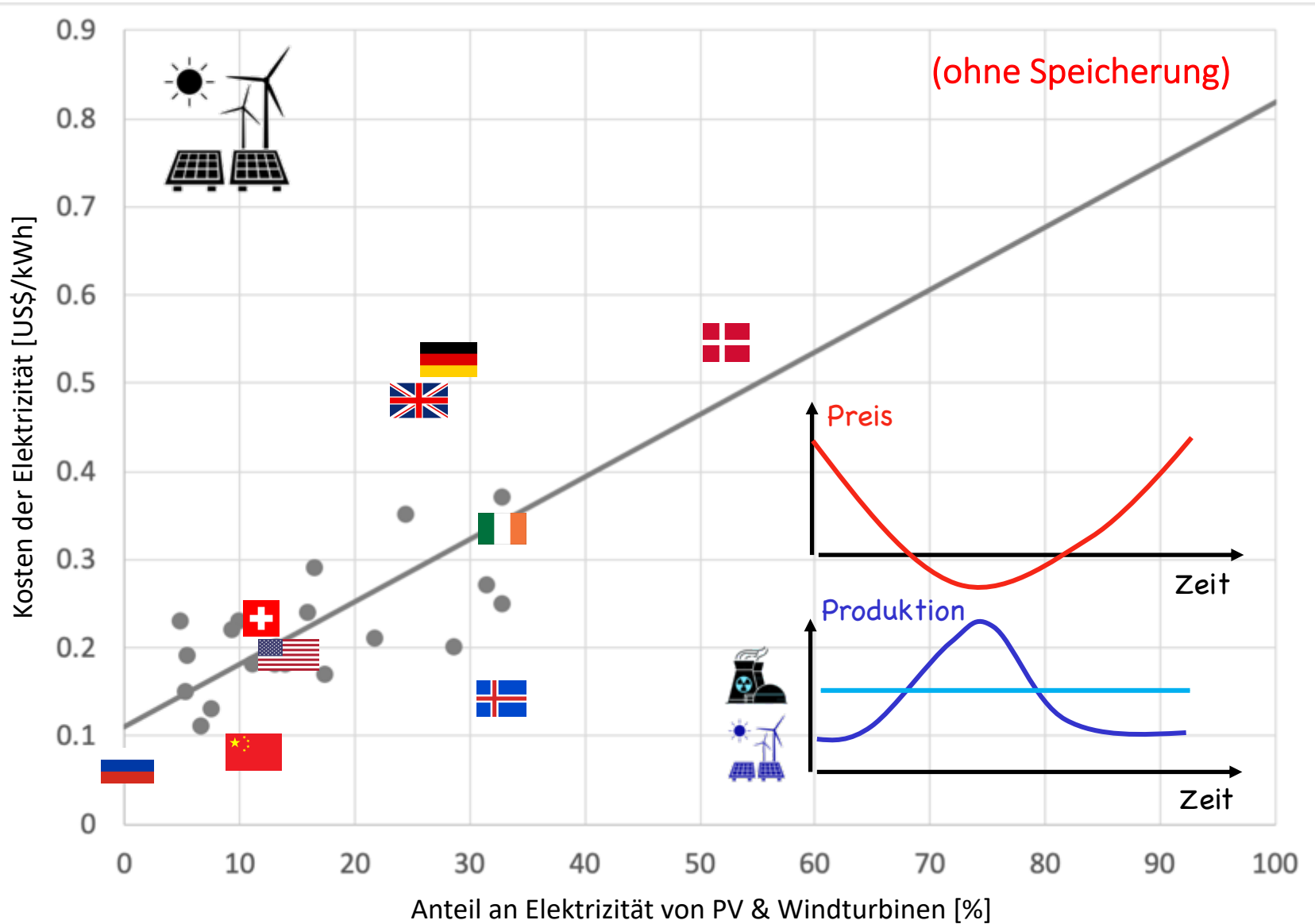
Kosten der Elektrizität (2023)



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



Kosten der Elektrizität (2023)

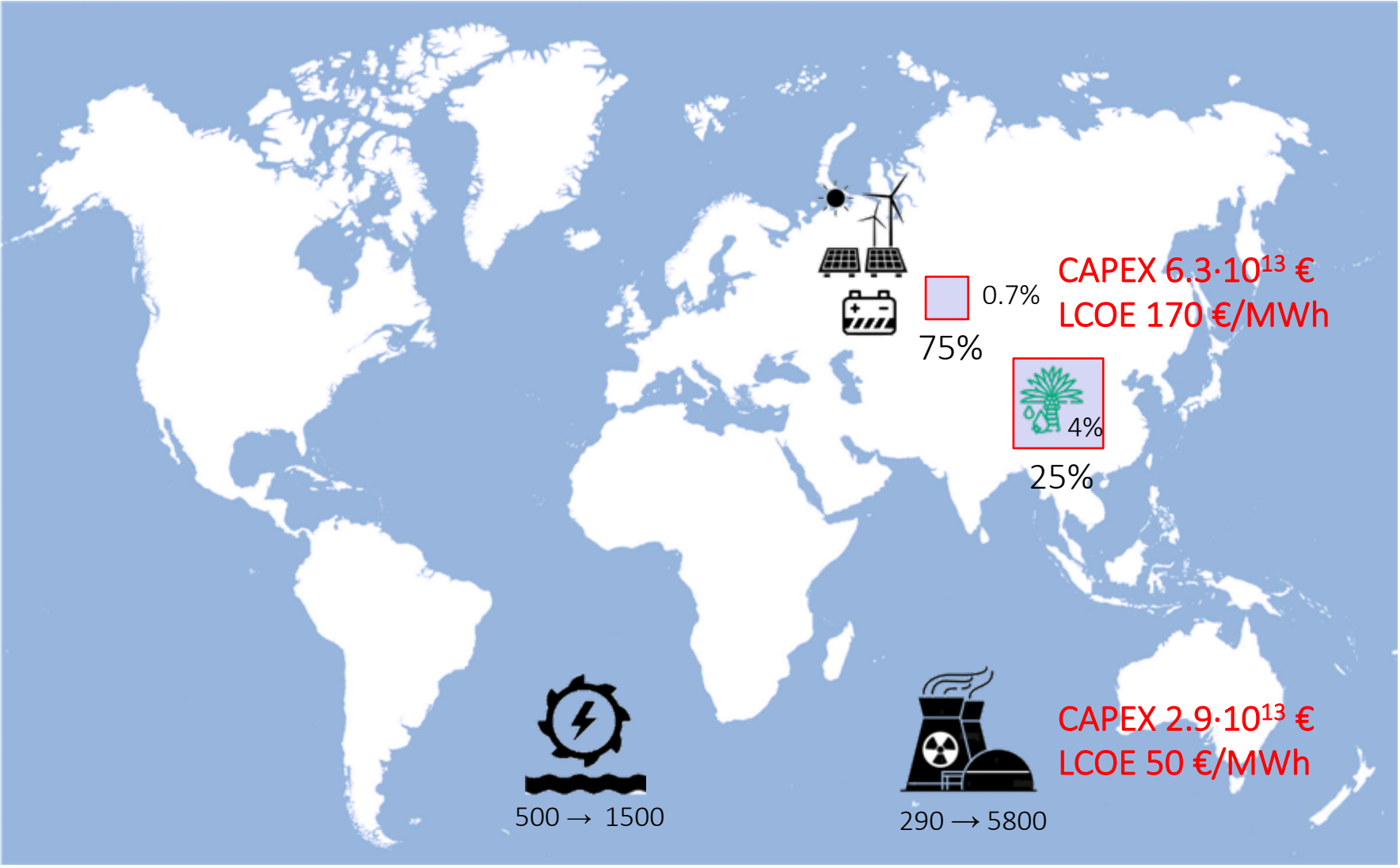


Ref.: <https://elements.visualcapitalist.com/mapped-solar-and-wind-power-by-country/>

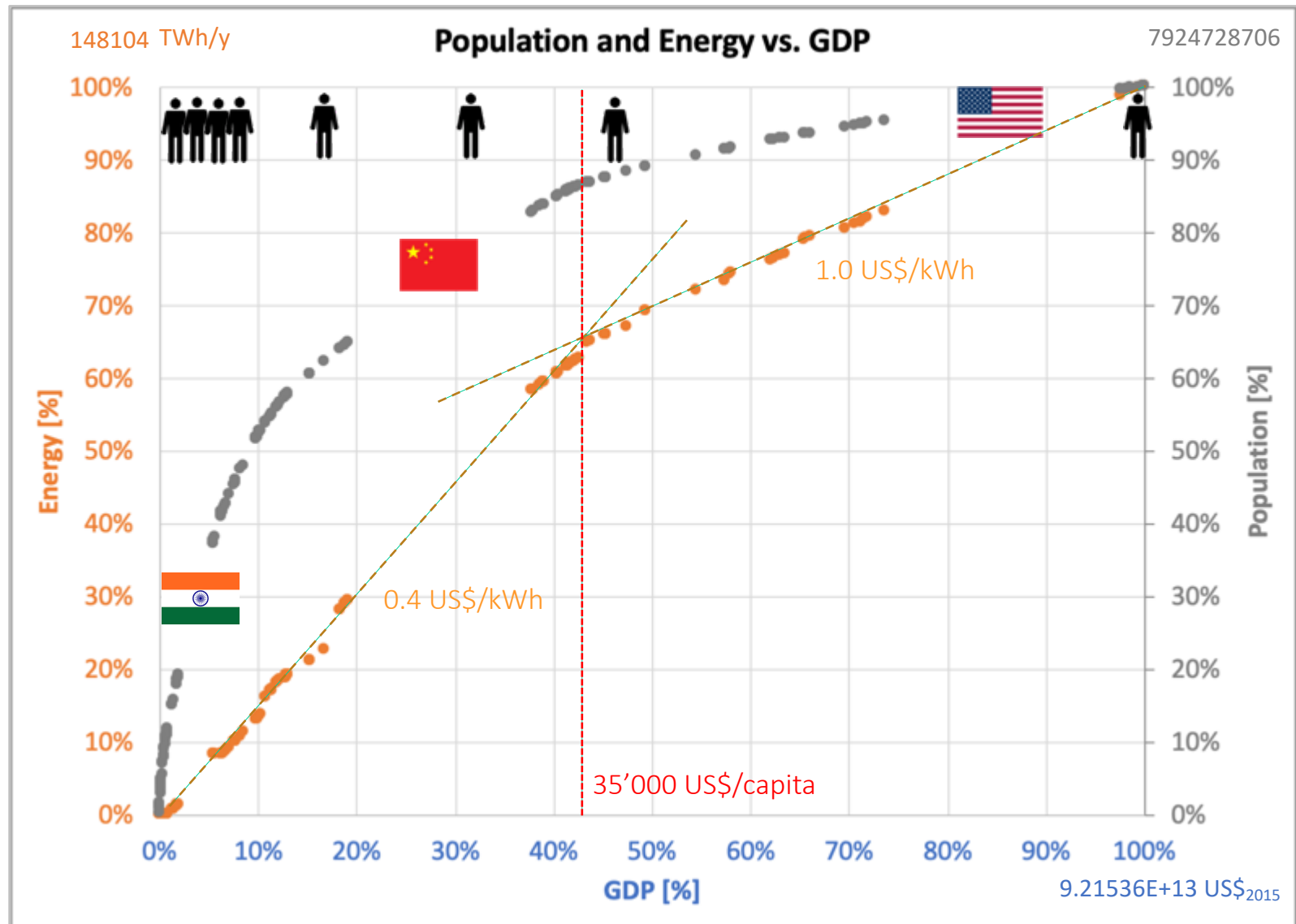
CO₂ neutrale zukünftige Energiewirtschaft



Welt: 510'000'000 km²
Landfläche: 149'000'000 km²
Globales GDP: 9.2·10¹³ US\$



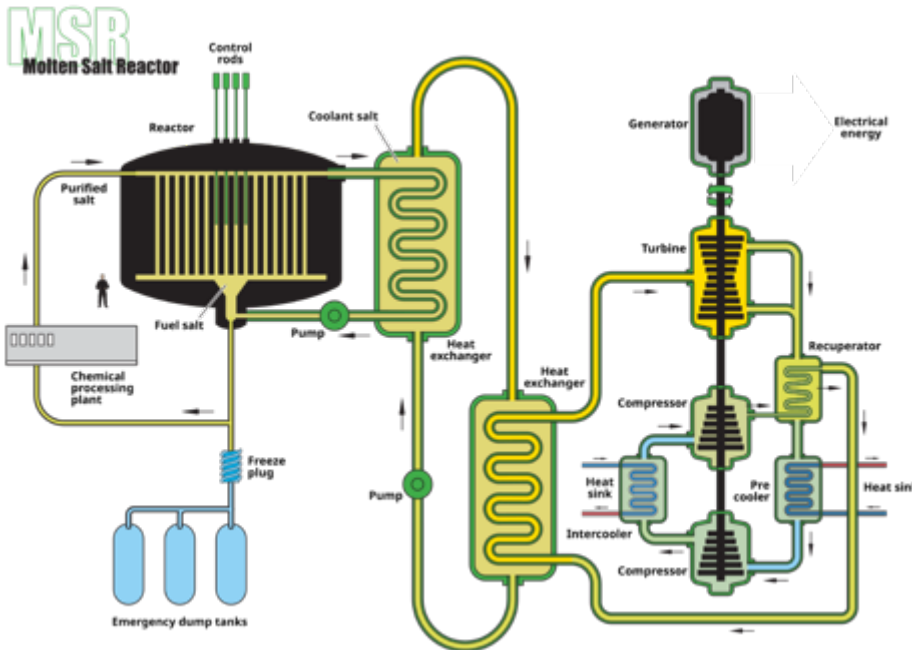
Energie und Bevölkerung vs. Bruttosozialprodukt



Ref.: <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-person-vs-gdp-per-capita>



7. KAPITEL Neue Technologien

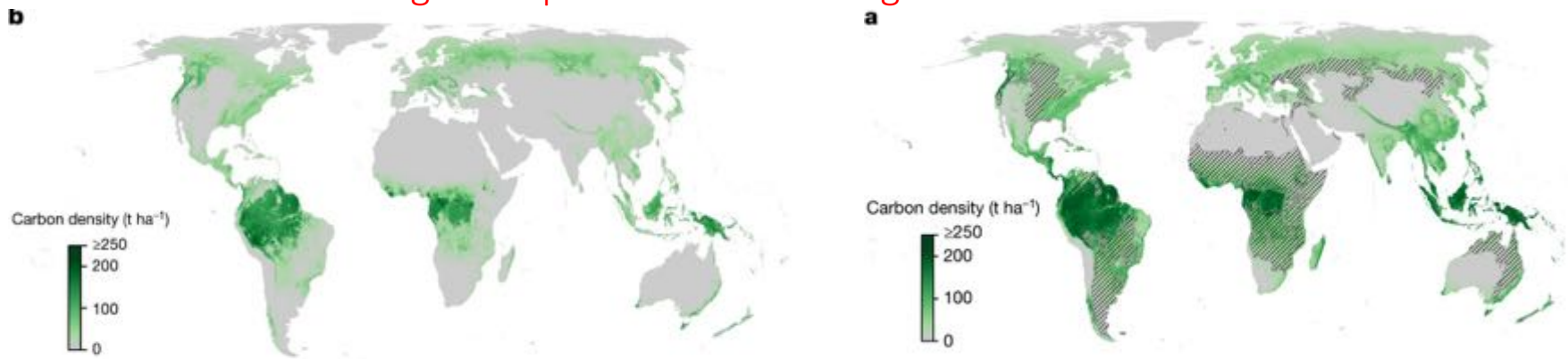


CO₂ Senken und Palmöl Produktion

Derzeit liegt die globale Kohlenstoffspeicherung in Wäldern deutlich unter dem natürlichen Potenzial, mit einem Gesamtdefizit von **226 GtC** (Modellbereich = 151 – 363 GtC) in Gebieten mit geringem menschlichen Fussabdruck. [1] Bei 142 verfügbaren Ölpalmenstämmen (OPT) pro Hektar Plantagenfläche und einer neu bepflanzten Fläche von 100.550 Hektar im Jahr 2017 belief sich das geschätzte Trockengewicht der erzeugten OPT (74.5 t ha⁻¹) auf insgesamt 7.5 Mio. t [2]. Es werden 4.0 t·ha⁻¹·y⁻¹ Palmöl produziert und die Ölpflanzen werden alle 20 Jahre neu gepflanzt.



30 kg Öl·a⁻¹ pro Baum mit 524 kg trockene Biomasse



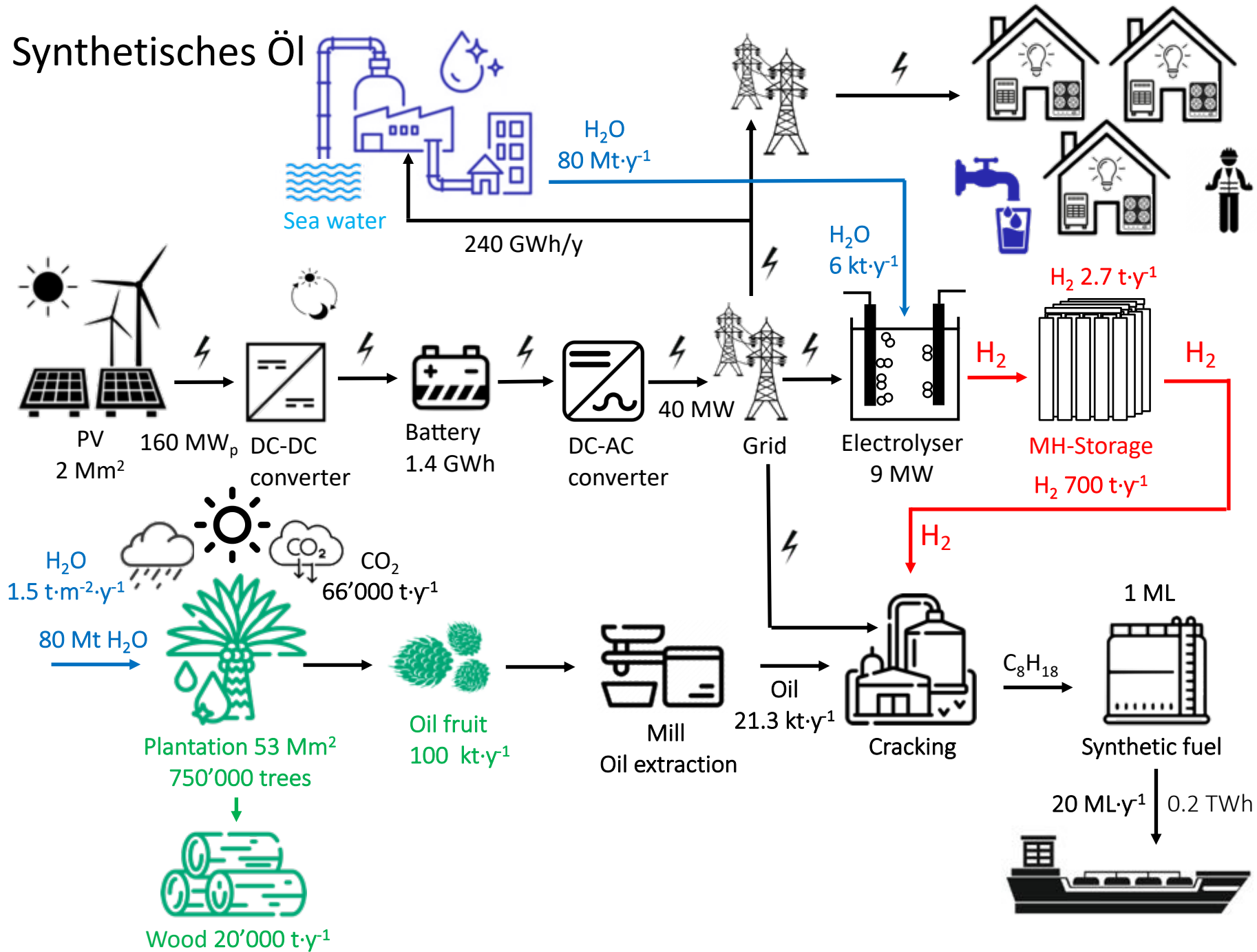
226 Gt Ölpalmen produzieren 13 Gt Öl·a⁻¹ mehr als der Weltenergiebedarf an Öl

Ref.: [1] Mo, L., Zohner, C.M., Reich, P.B. et al. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. Nature (2023).

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>

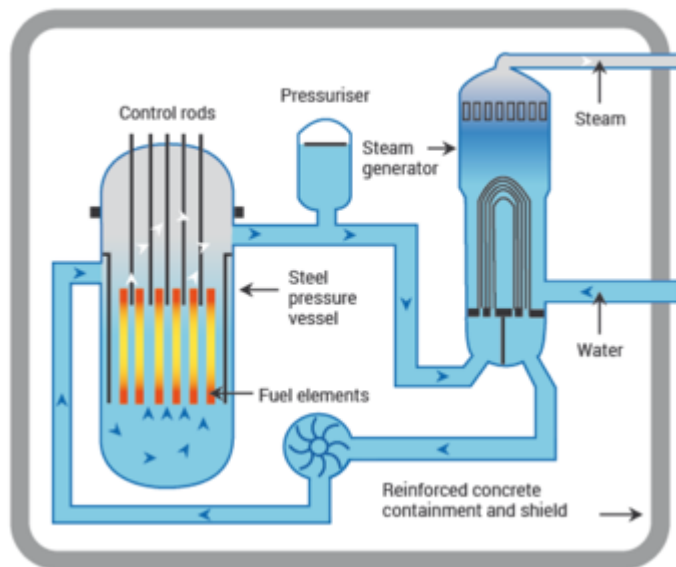
[2] Thiruchelvi Pulingam, Manoj Lakshmanan, Jo-Ann Chuah, Arthy Surendran, Idris Zainab-La, Parisa Foroozandeh, Ayaka Uked, Akihiko Kosugid, Kumar Sudesh "Oil palm trunk waste: Environmental impacts and management strategies", Industrial Crops & Products 189 (2022), 115827

Synthetisches Öl



Kernreaktoren

Uran-Spalt-Reaktoren



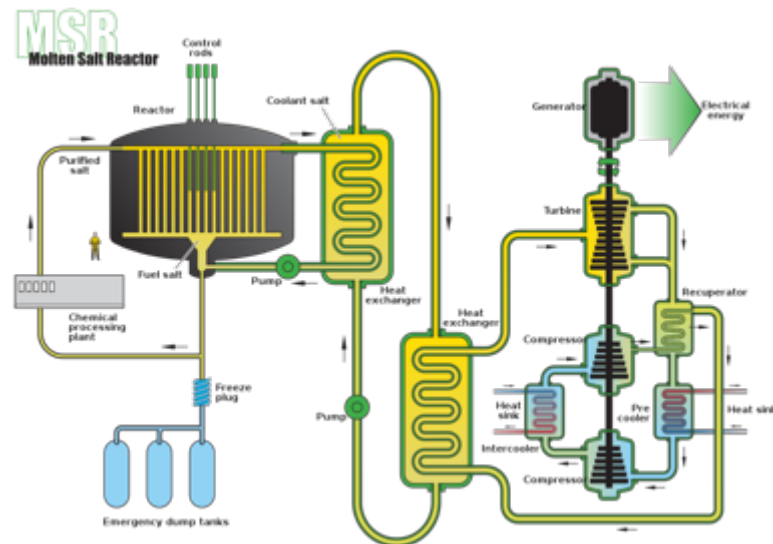
Nachteile:

- Begrenzte Uranreserven (6 % für 100 Jahre)
- Gefahr des Kernschmelzens
- Langlebige Isotope (Pu)
- geringer Wirkungsgrad (25%)
- begrenzte Wärmenutzung
- Endlager von Nuc. Abfall
- Kleine modulare Reaktoren (SMR)

ZUKUNFT



Thorium-Flüssigsalz-Brutreaktoren

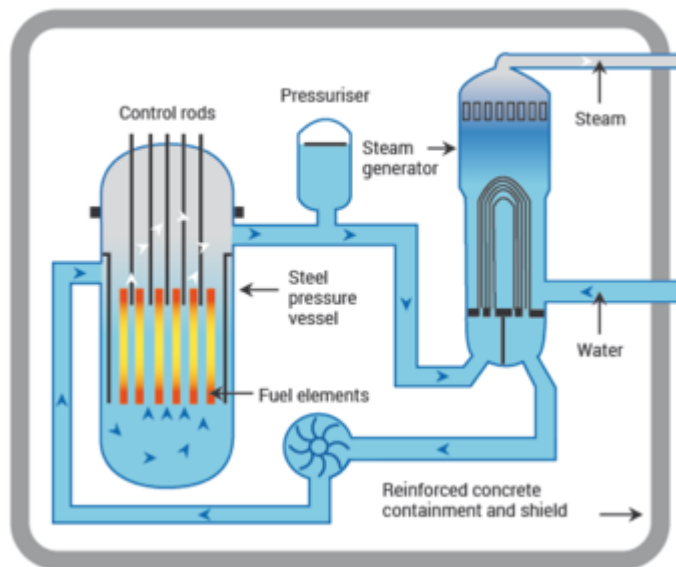


Vorteile:

- Große Thoriumreserven (Verwendung von Atommüll, 95 % sind Brennstoff)
- Kein Kernschmelzen möglich
- Keine langlebigen Isotope
- höhere T, höhere Effizienz (>25%)
- Nutzung von Wärme zum Heizen
- Schmelzsaltreaktor (MSR)

Kernreaktoren

Uran-Spalt-Reaktoren



Nachteile:

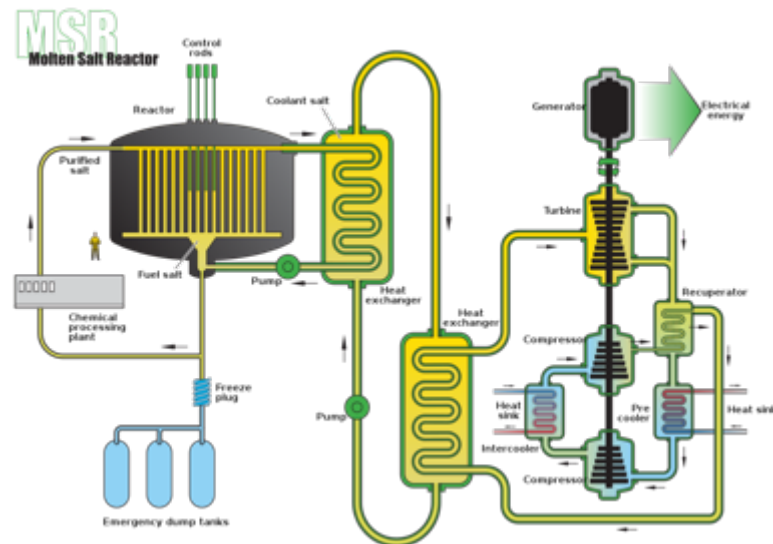
- Begrenzte Uranreserven (6 % für 100 Jahre)
- Gefahr des Kernschmelzens
- Langlebige Isotope (Pu)
- geringer Wirkungsgrad (25%)
- begrenzte Wärmenutzung
- Endlager von Nuc. Abfall
- Kleine modulare Reaktoren (SMR)

Ref.: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Operating-permit-issued-for-Chinese-molten-salt-re>

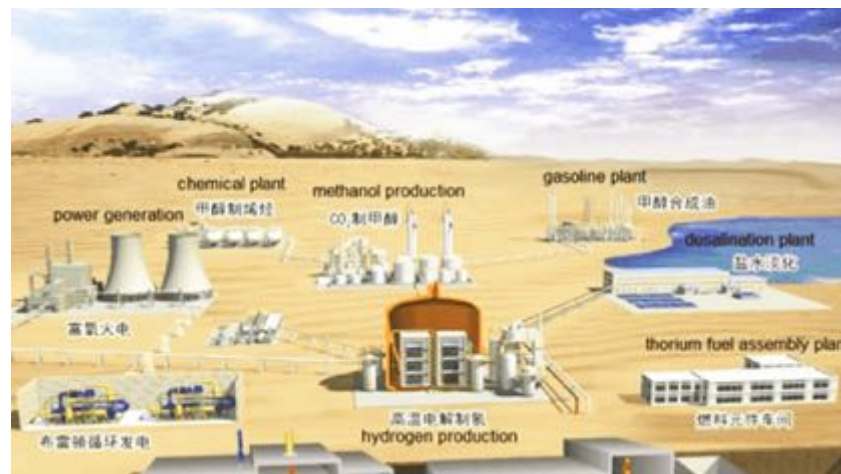
ZUKUNFT



Thorium-Flüssigsalz-Brutreaktoren



Unterirdisch im Berg, Wärmenutzung

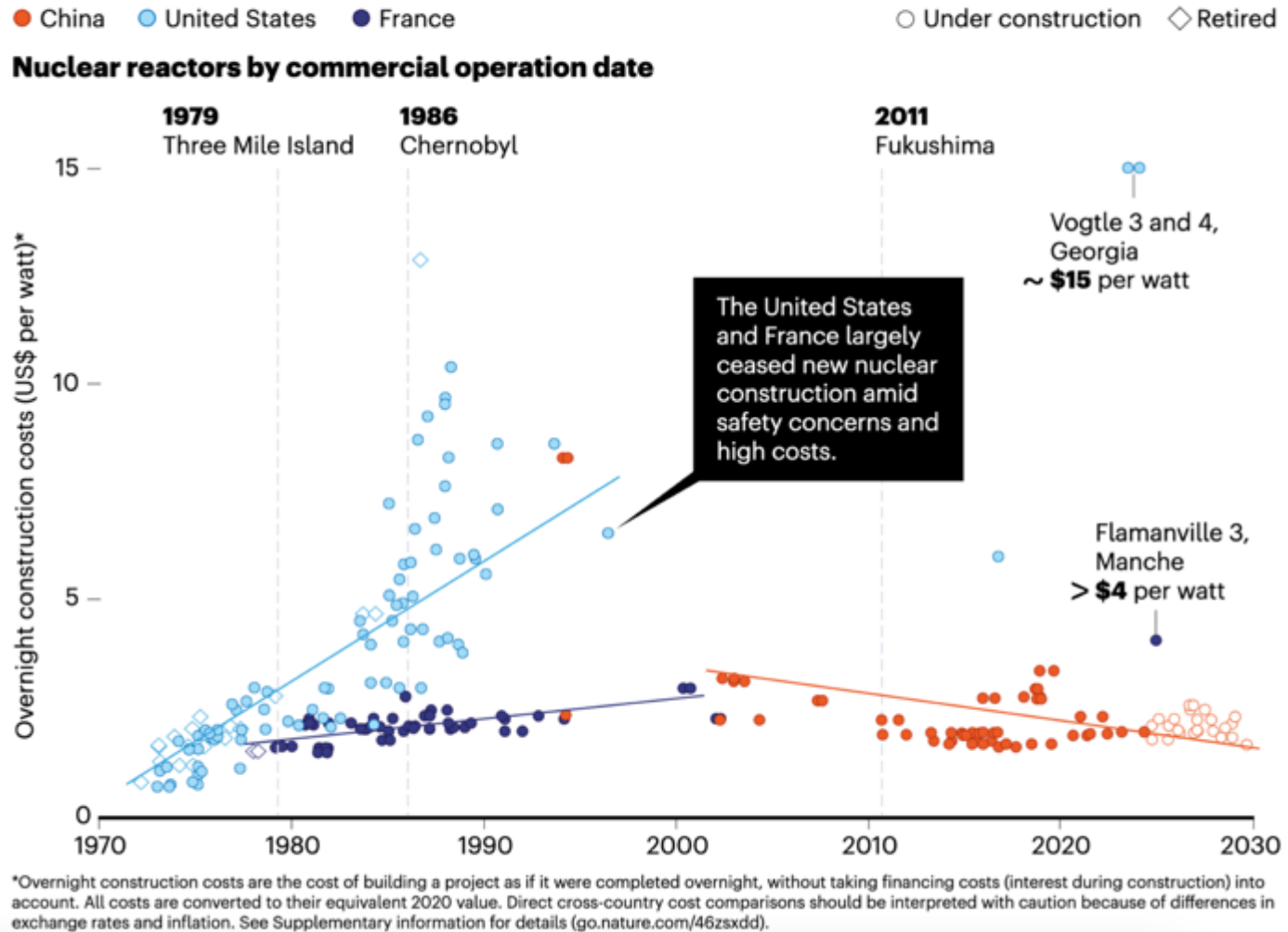


TMSR-LF1 (2 MW_{therm.}) construction 2018 - 2023, Wuwei city, Gansu province, China, operated since July 2023



Kosten der Kernreaktoren

China has managed to rein in the expenses associated with commercial nuclear units. US nuclear costs rose sharply, in particular after the Three Mile Island accident in 1979, owing to a lack of standardization, rising labour and material costs and stricter regulations. Costs also increased in France as the country moved to larger and more complex reactor designs.



Ref.: Shangwei Liu, Gang He, Minghao Qiu & Daniel M. Kammen, "Can China break the 'cost curse' of nuclear power?", Nature 643 (2025), 1186 - 1189

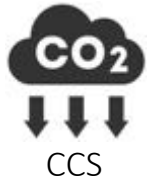


Schlusswort





Schlussfolgerungen



Der globale Energiebedarf wächst effizienzkorrigiert 7 mal schneller als die erneuerbare Elektrizitätsproduktion. CCS ist sinnlos!



PV und Windturbinen mit Batterien könnten 75% des globalen Energiebedarfs (2023) decken.



Bioöl könnte die verbleibenden 25% des globalen Energiebedarfs decken und lässt sich nach Hydrierung einfach in bestehenden Speichern lagern.



Neue Kernkraftwerke (Brutreaktoren) werden wesentlich zur zukünftigen Elektrizitätsproduktion beitragen.



Eine Milliarde Menschen brauchen 35% der Energie und erarbeiten 55% des globalen GDP. Der Energieverbrauch wird stark wachsen (280%).



Die globale Energiewende kostet ca. 50% des globalen GDP; über 25 Jahre entspricht das einer Investition von ca. 2 – 3% des jährlichen GDP.



Future Swiss Energy Economy: The Challenge of Storing Renewable Energy

Andreas Züttel^{1,2*}, Noris Gallandat^{1,2}, Paul J. Dyson³, Louis Schlapbach⁴, Paul W. Gilgen⁵ and Shin-Ichi Orimo⁶

¹Laboratory of Materials for Renewable Energy (LMER), Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Lausanne, Switzerland, ²Empa Materials Science and Technology, Dübendorf, Switzerland, ³Laboratory of Organometallic and Medicinal Chemistry (LOCM), Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Lausanne, Switzerland, ⁴Emertus Empa and ETH Zürich and Université de Fribourg, Fribourg, Switzerland, ⁵Formerly Empa Materials Science and Technology, Dübendorf, Switzerland, ⁶WPI-Advanced Institute for Materials Research (WPI-AMR), Tohoku University, Aoba-ku, Sendai, Japan

OPEN ACCESS

Edited by:

Carlo Roselli,
University of Sannio, Italy

Reviewed by:

Francesco Liberato Cappiello,
Second University of Naples, Italy
Giovanni Campi,
Università degli Studi della Campania
Luigi Vanvitelli, Italy

*Correspondence:

Andreas Züttel
andreas.zuetzel@epfl.ch

Specialty section:

This article was submitted to
Process and Energy Systems
Engineering,
a section of the journal
Frontiers in Energy Research

Received: 29 September 2021

Accepted: 17 November 2021

Published: 25 January 2022

Citation:

Züttel A, Gallandat N, Dyson PJ,
Schlapbach L, Gilgen PW and
Orimo S-I (2022) Future Swiss Energy
Economy: The Challenge of Storing
Renewable Energy.
Front. Energy Res. 9:785908.
doi: 10.3389/fenrg.2021.785908

Fossil fuels and materials on Earth are a finite resource and the disposal of waste into the air, on land, and into water has an impact on our environment on a global level. Using Switzerland as an example, the energy demand and the technical challenges, and the economic feasibility of a transition to an energy economy based entirely on renewable energy were analyzed. Three approaches for the complete substitution of fossil fuels with renewable energy from photovoltaics called energy systems (ES) were considered, i.e., a purely electric system with battery storage (ELC), hydrogen (HYS), and synthetic hydrocarbons (HCR). ELC is the most energy efficient solution; however, it requires seasonal electricity storage to meet year-round energy needs. Meeting this need through batteries has a significant capital cost and is not feasible at current rates of battery production, and expanding pumped hydropower to the extent necessary will have a big impact on the environment. The HYS allows underground hydrogen storage to balance seasonal demand, but requires building of a hydrogen infrastructure and applications working with hydrogen. Finally, the HCR requires the largest photovoltaic (PV) field, but the infrastructure and the applications already exist. The model for Switzerland can be applied to other countries, adapting the solar irradiation, the energy demand and the storage options.

Keywords: renewable energy, photovoltaic, batteries, hydrogen, synthetic hydrocarbons, energy economy

Abbreviations: ES, energy systems; ELC, substitution of fossil fuels through electrification; HYS, substitution of fossil fuels by hydrogen; HCR, substitution of fossil fuels by synthetic hydrocarbons; PV, photovoltaics; CO₂, carbon dioxide; kWh/year, kilowatt hours per year = terawatts·10⁻⁶ kW/TW·365 day/year·24 h/day; GW_p, gigawatt peak; TW_p, terawatt peak; <P>, average power; W, annual energy per year; I, annual solar irradiation; η, efficiency; A, PV surface area; P_p, PV peak power; P_{av}, average power; <P>/P_p, power factor; C, capital cost (CAPEX); Z, interest; P_y, annual payback; n, number of years; C₀, cost of the energy per energy unit; E_y, annual energy received from the energy system; OPEX, operational cost; C_e, cost of the energy.



Prof. Dr. Andreas ZÜTTEL



Dr. Noris GALLANDAT



Prof. Dr. Paul DYSON



Prof. Dr. Louis SCHLAPBACH



Mr. Paul W. GILGEN



Prof. Dr. Shin-Ichi ORIMO

Andreas ZÜTTEL, Noris GALLANDAT, Paul J. DYSON, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN, Shin-Ichi ORIMO, “Future Swiss Energy Economy: the challenge of storing renewable energy”, *Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering*, 9 (2022), <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.785908>



Publication 2024

frontiers | Frontiers in Energy Research

TYPE Original Research
PUBLISHED 02 August 2024
DOI 10.3389/fenrg.2024.1336016

Check for updates

OPEN ACCESS

EDITED BY
Pourya Pourhejazy,
UIT The Arctic University of Norway, Norway

REVIEWED BY
Ghobad Bagheri,
Technip Energies, Netherlands
Ivan Kristianto Singgh,
University of Surabaya, Indonesia
Wahyu Andy Prastyabudi,
UIT The Arctic University of Norway, Norway, in
collaboration with reviewer IS

*CORRESPONDENCE
Andreas Züttel,
✉ andreas.zuetzel@epfl.ch

RECEIVED 09 November 2023
ACCEPTED 22 May 2024
PUBLISHED 02 August 2024

CITATION
Züttel A, Nützenadel C, Schlapbach L and
Gilgen PW (2024) Power plant units for CO₂
neutral energy security in Switzerland.
Front. Energy Res. 12:1336016.
doi: 10.3389/fenrg.2024.1336016

COPYRIGHT
© 2024 Züttel, Nützenadel, Schlapbach and
Gilgen. This is an open-access article
distributed under the terms of the Creative
Commons Attribution License (CC BY). The use,
distribution or reproduction in other forums is
permitted, provided the original author(s) and
the copyright owner(s) are credited and that the
original publication in this journal is cited, in
accordance with accepted academic practice.
No use, distribution or reproduction is
permitted which does not comply with these
terms.

Power plant units for CO₂ neutral energy security in Switzerland

Andreas Züttel^{1,2*}, Christoph Nützenadel³, Louis Schlapbach⁴
and Paul W. Gilgen⁵

¹Laboratory of Materials for Renewable Energy (LMER), Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Sion, Switzerland, ²Empa Materials Science and Technology, Dübendorf, Switzerland, ³Christoph Nützenadel AG, Zurich, Switzerland, ⁴Emeritus Empa & ETH Zurich, Université de Fribourg, Bern, Switzerland, ⁵Empa Materials Science and Technology, Dübendorf, Switzerland

A new concept based on Power Plant Units, able to deliver renewable energy on demand, for the transition from fossil fuels to renewable energy in Switzerland is presented. The technically realized efficiencies showed that complete electrification leads to the most efficient energy system and cheapest electricity. The electricity demand is expected to almost double, and the overall energy cost will increase by 20% compared to 2019. However, the technical challenges of seasonal electricity storage, without any reserves and redundancy, amounts to 20 TWh. Hydropower and PV without storage produce the cheapest electricity. Future nuclear fission technologies, e.g., molten salt Thorium breeding reactor - currently still in an experimental stage-might become the most economical and least environmental impact solution for CO₂ neutral continuous electricity production. The opportunities for a massive increase of hydroelectric production are limited, already shifting the use of water (9 TWh) from summer to winter is a great challenge. PV and hydrogen production in Switzerland have the advantage to provide approximately 75% of the electricity without seasonal storage leading to significantly lower electricity cost than from imported hydrogen or synthetic hydrocarbons. The most economical solution for aviation and reserves is imported bio-oil converted to synthetic Kerosene, for which large storages already exist.

KEYWORDS

renewable energy, energy storage, cost of energy, power plant units, CO₂ free, nuclear

Highlights

- Renewable energy on demand is essential for replacing fossil fuels and can be realized by combining intermittent energy supplies like photovoltaic and wind with battery and seasonal storage in a power plant unit.
- Importing renewable energy carriers requires a storage capacity similar to the seasonal storage for domestic production of renewable energy.
- Renewable energy production in Switzerland with seasonal storage and importing renewable energy carriers is a technical and economic challenge, respectively.
- The fuel for aviation and the energy reserves for the power plant units can be realized with synthetic oil produced by hydriding bio-oil, avoiding the need for new large and expensive storage systems and CO₂ capture from the atmosphere.
- Thermal power plants fueled with renewable energy carriers provide equal amounts of electricity and heat. Both forms of energy are of high value in the wintertime.



Prof. Dr. Andreas ZÜTTEL



Dr. Christoph NÜTZENADEL



Prof. Dr. Louis SCHLAPBACH



Mr. Paul W. GILGEN

Andreas ZÜTTEL, Christoph NÜTZENADEL, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN “Power plant units for CO₂ Neutral Energy Security in Switzerland”, Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering, 12:1336016 (2024), [https://doi:10.3389/fenrg.2024.1336016](https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1336016)

www.lmer.epfl.ch

“Energiewende und die Rolle des Wasserstoffs”

Für die Substitution fossiler Brenn- und Treibstoffe mit erneuerbaren Energie wird ein neues Konzept auf der Grundlage von Kraftwerkseinheiten vorgestellt, die erneuerbare Energie nach Bedarf und mind. 1 GW liefern können. Die technisch realisierten Wirkungsgrade zeigen, dass eine voll-ständige Elektrifizierung zum effizientesten Energiesystem und zum billigsten Strom führt. Es wird erwartet, dass sich der Strombedarf ca. verdoppelt und die Gesamtenergiekosten im Vergleich zu 2023 um 20% steigen werden. Die technischen Herausforderungen der saisonalen Strom-speicherung ohne jegliche Reserven und Redundanz belaufen sich jedoch auf mind. 20 TWh. Wasserkraft und Photovoltaik ohne Speicherung produzieren den billigsten Strom. Die Möglichkeiten für eine massive Steigerung der Wasserkraftproduktion sind begrenzt, schon die Verlagerung der Wassernutzung (9 TWh) vom Sommer in den Winter ist eine grosse Herausforderung. PV- und Wasserkraftproduktion in der Schweiz haben den Vorteil, dass sie etwa 75 % des Stroms ohne saisonale Speicherung liefern können, was zu deutlich niedrigeren Stromkosten führt, als bei importiertem Wasserstoff oder synthetischen Kohlenwasserstoffen. Die wirtschaftlichste Lösung für die Luftfahrt und die Reserven ist importiertes Bio-Öl, das mit Wasserstoff in synthetischen Diesel und Kerosin umgewandelt wird und für das es bereits grosse Tanklager gibt.

Ref.: Andreas ZÜTTEL, Christoph NÜTZENADEL, Louis SCHLAPBACH, Paul W. GILGEN “Power plant units for CO₂ Neutral Energy Security in Switzerland”, Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems Engineering, 12:1336016 (2024), [https://doi:10.3389/fenrg.2024.1336016](https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1336016)



Andreas ZÜTTEL, Prof. Dr.

Laboratory of Materials for Renewable Energy (LMER)
 Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC)
 Basic Science Faculty (SB)
 École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) Valais/Wallis
 Rue de l'Industrie 17, CP 440
 CH-1951 Sion, Switzerland

e: andreas.zuettel@epfl.ch
 m: +41 79 484 2553
 T: +41 21 695 8304 (Secretary)
 U: <http://lmer.epfl.ch>



CV Andreas ZÜTTEL, Prof. Dr.

Born 22. 8. 1963 in Bern, Switzerland. 1985 Engineering Degree in Chemistry, Burgdorf, Switzerland. 1990 Diploma in Physics from the University of Fribourg (UniFR), Switzerland. 1993 Dr. rer. nat. from the science faculty UniFR. 1994 Post Doc with AT&T Bell Labs in Murray Hill, New Jersey, USA. 1997 Lecturer at the Physics Department UniFR. 2003 External professor at the Vrije Universiteit Amsterdam, Netherlands. 2004 Habilitation in experimental physics at the science faculty UniFR (www.unifr.ch). President of the Swiss Hydrogen Association „HYDROPOLE“ (www.hydropole.ch). 2006 Head of the section “Hydrogen & Energy” at EMPA (www.empa.ch) and Prof. tit. in the Physics department UniFR. 2009 Guest Professor at IMR, Tohoku University in Sendai, Japan. 2012 Visiting Professor at Delft Technical University, The Netherlands, 2014 Full Professor for Physical Chemistry, Institut des Sciences et Ingénierie Chimiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL (www.lmer.epfl.ch), Switzerland. 2017 Co-Founder of GRZ Technologies Ltd. (www.grz-technologies.com). 2020 Member of the Swiss Academy of Technical Science (SATW, <https://www.satw.ch>). 2025 Honorary Professor Shanghai University, P.R. China.



A. Züttel

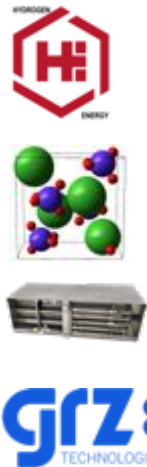


 BSc Chemistry
HTL Burgdorf

 MSc Physics
PhD Physics
Habilitation
Prof. tit.
 UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
UNIVERSITÄT FREIBURG


 AT&T
Bell Laboratories
  
Prof. tit.
UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
UNIVERSITÄT FREIBURG
 Empa
 EPFL
Full Prof.
 TOHOKU
UNIVERSITY


 HYDROPOLE
President
 satw it's all about
technology
Member
 sses
Member
 Energie Club Schweiz
Club Energie Suisse
Club Energia Svizzera
Member



Int. Symposium
Hydrogen & Energy
since 2007
Borohydrides
2000
MH Storage
2004
Start Up Company
2017 Grolley (FR)
grz-technologies.com

Google scholar: Andreas ZÜTTEL; researcherID.com: F-5117-2015; orcid.org/0000-0002-5708-1855.

Total Publications: 432, h-index: 80 , Citations: 40'577