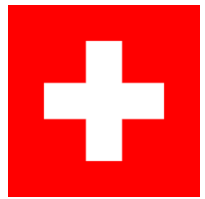


# Eine CO<sub>2</sub>-neutrale Schweiz



**Können wir die importierten fossilen Energieträger durch erneuerbare Energie substituieren, um so den CO<sub>2</sub>-Ausstoss in der Schweiz auf Null zu reduzieren?**

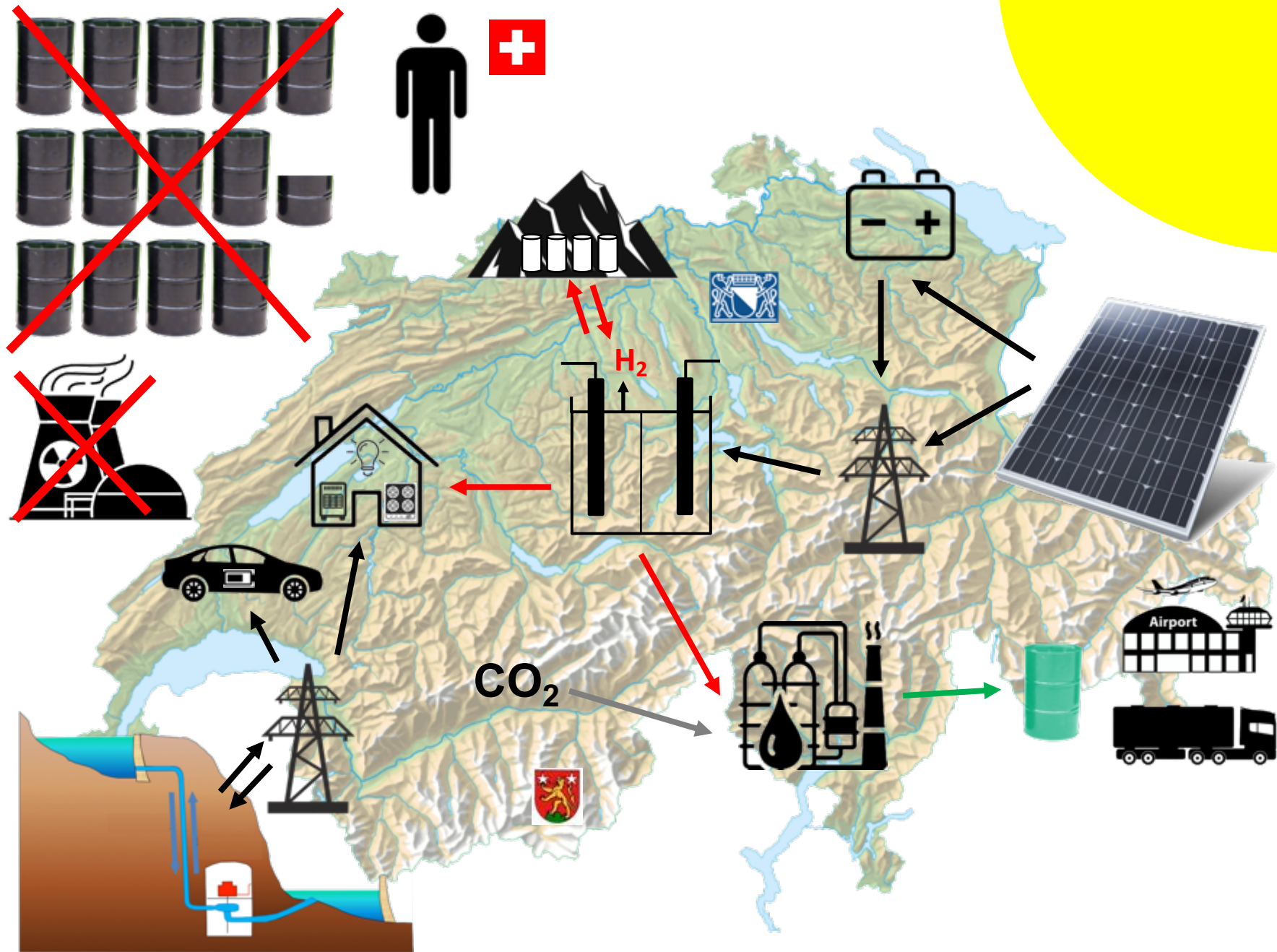
**Was bedeutet eine vollständig auf erneuerbare Energie basierte Gesellschaft aus technischer und wirtschaftlicher Sicht?**

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), <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.785908>



# Inhalt

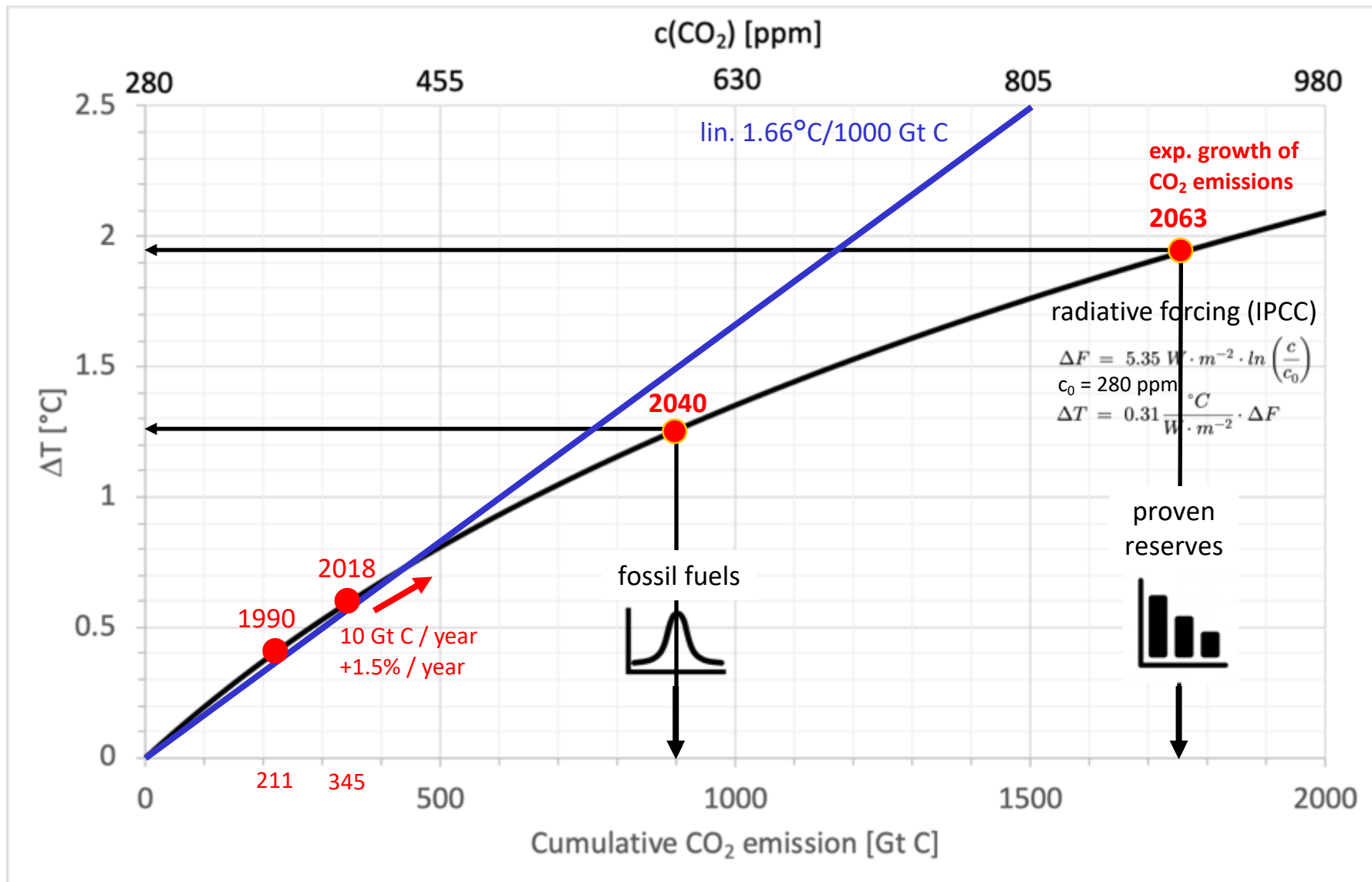
- 1) Die wichtigsten Ergebnisse
- 2) Motivation: Temperatur & CO<sub>2</sub>, fossile Reserven
- 3) Produktion erneuerbarer Energie
- 4) Schweizer Energiebedarf und Solare Einstrahlung
- 5) Ersatz der Kernenergie durch erneuerbare Energie (PV)
- 6) Ersatz der fossilen Energieträger durch Elektrizität aus erneuerbarer Energie (PV)
- 7) Ersatz der fossilen Energieträger durch Wasserstoff aus erneuerbarer Energie (PV)
- 8) Ersatz der fossilen Energieträger durch synthetische Kohlenwasserstoffe aus erneuerbarer Energie (PV)
- 9) Energie und Wirtschaft
- 10) Kosten der Energie
- 11) Produktion der synth. Kohlenwasserstoffe nahe am Äquator



## Die wichtigsten Ergebnisse aus der Analyse

- Erneuerbare Energien können bis zu 70% des Jahresenergiebedarfs kostengünstig decken inklusive Tag/Nacht-Speicherung, die restlichen 30% erfordern saisonale Speicherung, sind also anspruchsvoller und teurer.
- Ein rein elektrisches Energiesystem (ELC) mit Batteriespeicher ist sehr teuer und zu ressourcenintensiv, die saisonale Speicherung in Pumpspeicherseen ist technisch nicht realistisch. Kosten Elektrizität ca. 0.1 CHF/kWh.
- Das auf Wasserstoff basierende Energiesystem (HSY) ist etwas teurer als das auf Elektrizität basierende und erfordert die Entwicklung einer H<sub>2</sub> Infrastruktur und H<sub>2</sub> Anwendungen. Die saisonale Speicherung des Wasserstoffs erfordert grosse unterirdische Kavernen. Kosten H<sub>2</sub> ca. 0.3 CHF/kWh.
- Das auf synthetischen Kohlenwasserstoffen (HCR) basierende Energiesystem ist mehr als doppelt so teuer wie ELC, erlaubt aber die saisonale Speicherung und Herstellung von Kerosin sowie die Verwendung der vorhandenen Infrastruktur und Anwendungen. Die Kosten für synth. Kraftstoff betragen ca. 0.5 CHF/kWh.
- Die Produktion von erneuerbarer Energie und synthetischem Kraftstoff in Äquatornähe reduziert die Kosten um 35 %.





Ref.: <http://www.globalwarmingequation.info/global%20warming%20eqn.pdf> and Ollila, A. (2014), "The potency of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) as a greenhouse gas", Development in Earth Science, Vol. 2, pp. 20-30, available at: [www.seipub.org/des/paperInfo.aspx?ID=17162](http://www.seipub.org/des/paperInfo.aspx?ID=17162)

# Globale Erwärmung und CO<sub>2</sub> Emissionen

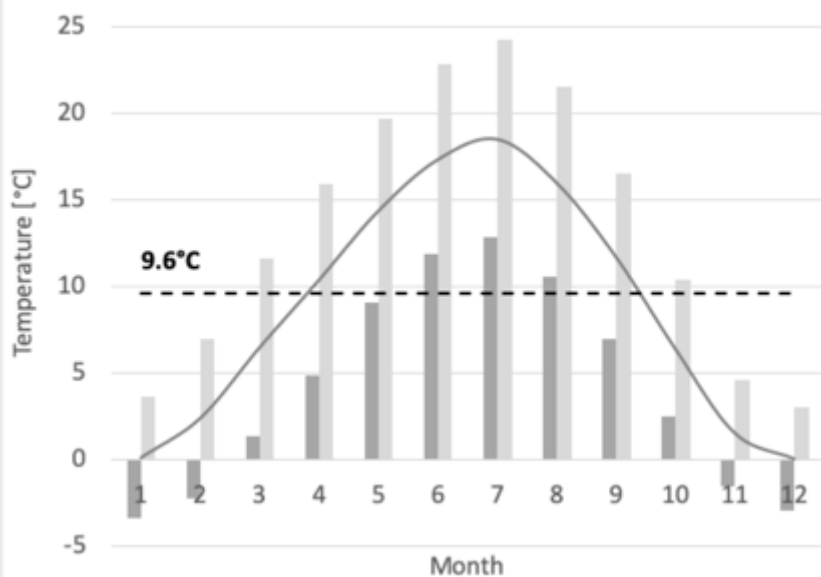
- Über die letzten 50 Jahre korreliert die mittlere globale Temperatur mit dem emittierten fossilen CO<sub>2</sub>.
- Die mittlere globale Temperatur steigt linear mit den kumulierten CO<sub>2</sub> Emissionen 1.66°C/1000 Gt C.
- Gemäss dem Modell der Infrarot-Rückstrahlung durch das CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre hängt die Temperaturerhöhung vom Logarithmus der CO<sub>2</sub>-Konzentration ab.
- Die fossilen Energieträger sind beschränkt, gemäss Campbell sind die Hälfte der fossilen Energieträger bereits verbrannt und die verbleibenden würden bis 2040 reichen. Nach den sogenannten bestätigten Reserven sind noch ca. 1400 Gt C vorhanden was bis 2063 aufgebraucht wäre, falls der Verbrauch weiterhin um 1.5% pro Jahr wächst.
- Nur die Substitution der fossilen durch erneuerbare Energieträger limitiert die CO<sub>2</sub>-Emissionen und garantiert die zukünftige Energieversorgung.



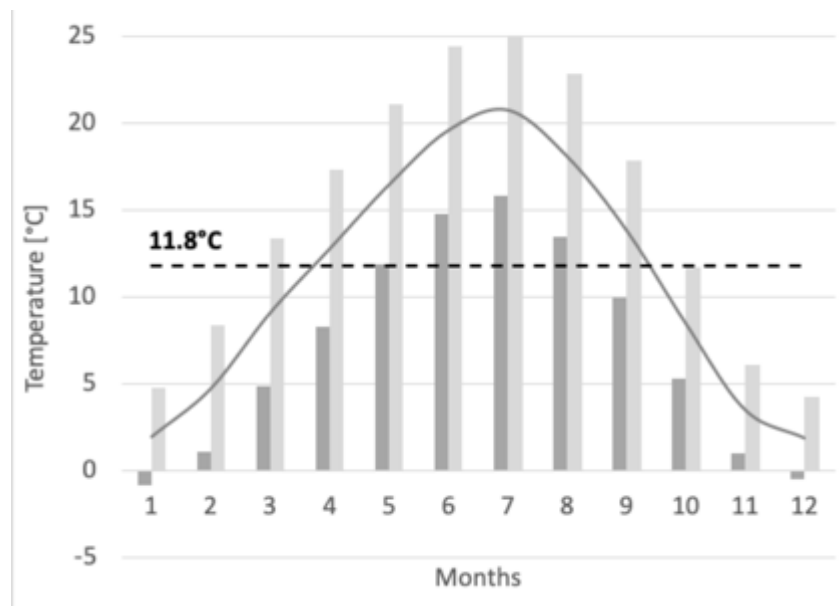
+2.2°C  
→



mittlere monatliche Temperatur in **Bern**



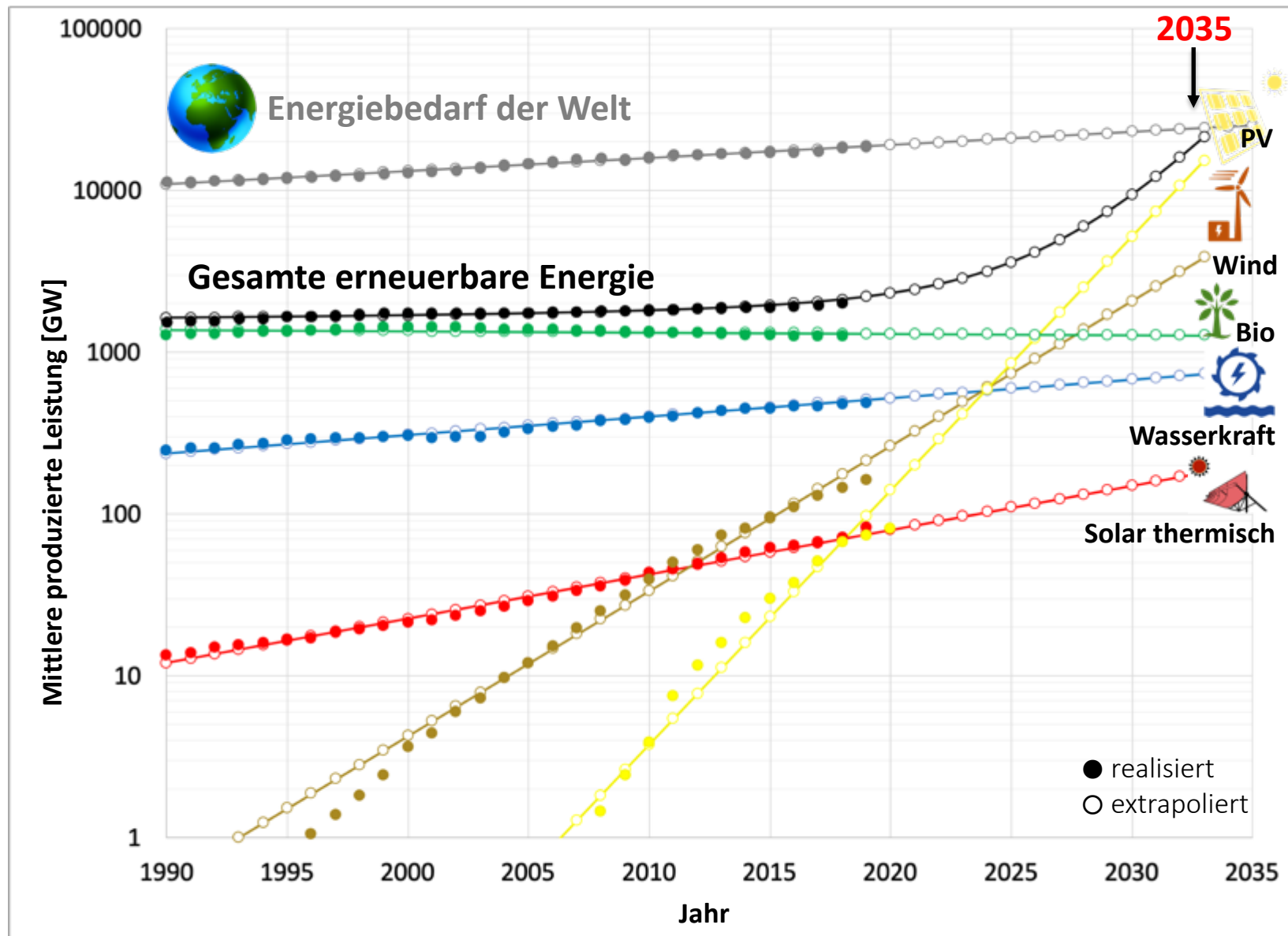
mittlere monatliche Temperatur in **Lausanne**





## Klimawandel und "Change Management"

- Temperatur steigt, Winter werden milder, Sommer wärmer
  - Gletscher werden kleiner, Flüsse drohen im Sommer auszutrocknen
  - Vegetation verändert sich, Boden wird trockener
  - Wasserversorgung wird aufwändiger
- 
- + Winter werden wärmer, weniger heizen, Energiebedarf sinkt
  - + Die meisten Menschen verbringen den Urlaub in wärmeren Ländern
  - + Thermophile Pflanzen (Palmen, Olivenbäume) wachsen weiter nördlich
  - + Die im Sommer durch PV produzierte Elektrizität ermöglicht auch den Betrieb von Klimaanlage
  - + Wasserrückhalt durch Dämme und Seen in den Bergen, neue Erholungsgebiete
  - + Mehr Biomasse durch Photosynthese (CO<sub>2</sub> Konzentration und Wärme)



## Globale Produktion erneuerbarer Energie

- Die erneuerbare Energieproduktion wächst global exponentiell
- Photovoltaik (PV) wächst mit 46% pro Jahr und die Kapitalkosten sinken um 12% pro Jahr.
- Wenn sich die Entwicklung der letzten 20 Jahre fortsetzt, kann der Weltenergiebedarf in 2035 durch erneuerbare Energie gedeckt werden.
- 80% der erneuerbaren Energie würde 2035 durch PV produziert
- In der Schweiz würde dann 20-40% durch Wasserkraft und 80-60% durch PV produziert



0.35 kW  
3 GW



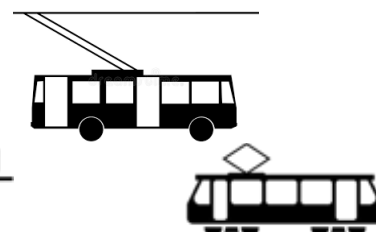
1.65 kW  
14 GW



0.32 kW  
2.7 GW





0.85 kW  
7 GW

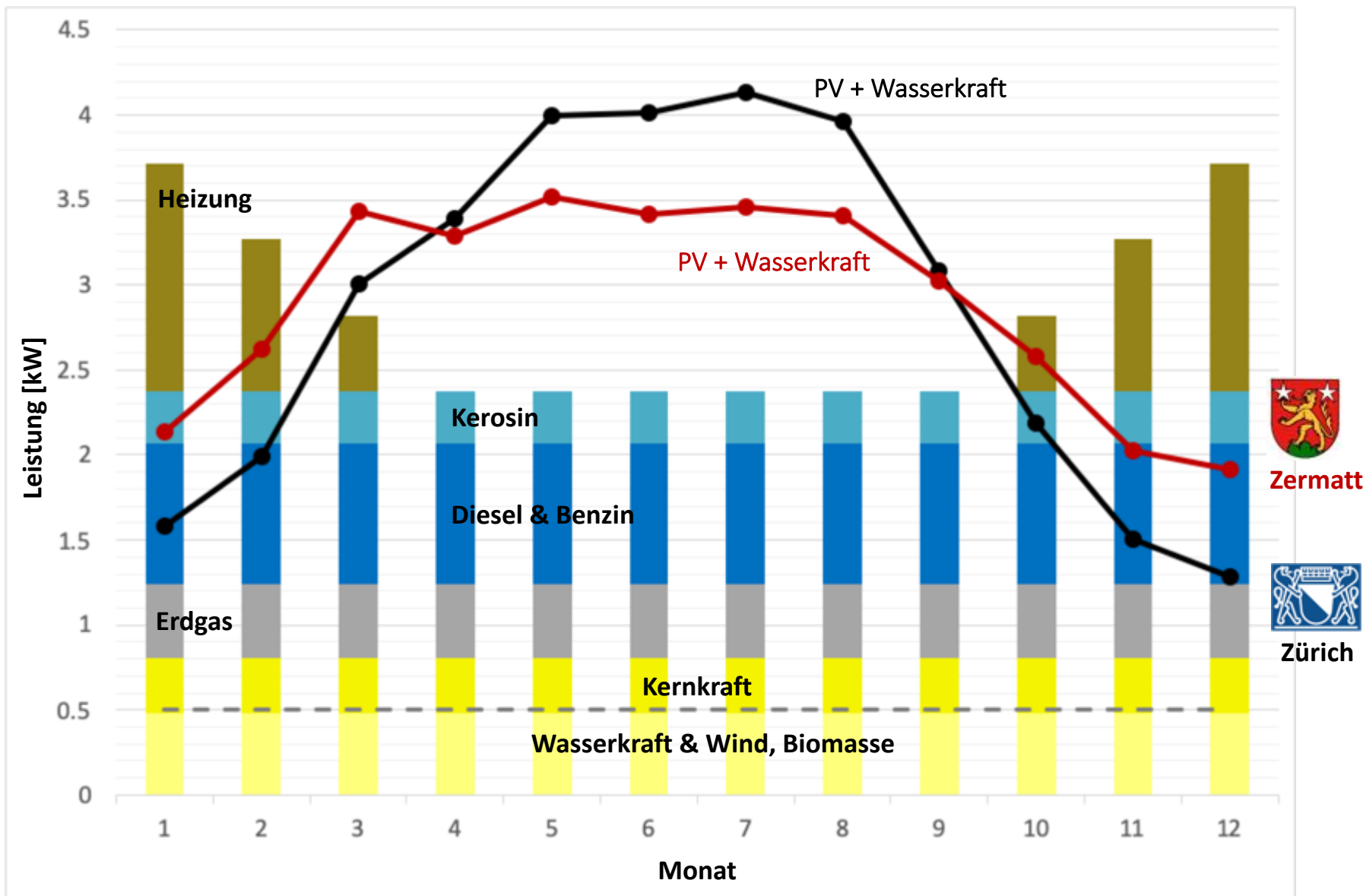


existierende PV, Wind,  
Biomasse und Wasserkraft

# Schweizer Primärenergiebedarf (2020)

		
Wasserkraft	4 GW	0.48 kW
Biomasse	2 GW	0.24 kW
Photovoltaik, Wind	1 GW	0.12 kW
Öl		
Gas	17 GW	2.0 kW
Kernbrennstoff		
nuklear produzierte Elektrizität	2.7 GW	0.3 kW
<b>Primärenergiebedarf</b>	<b>27 GW</b>	<b>3.2 kW</b>
Wärme KKW	8 GW	1.0 kW
Kerosin Ausland	2.5 GW	0.3 kW
Importierte Energie	12.5 GW	1.5 kW
<b>Gesamtenergiebedarf</b>	<b>50 GW</b>	<b>6.0 kW</b>





# Solare Einstrahlung und Energiebedarf in der Schweiz

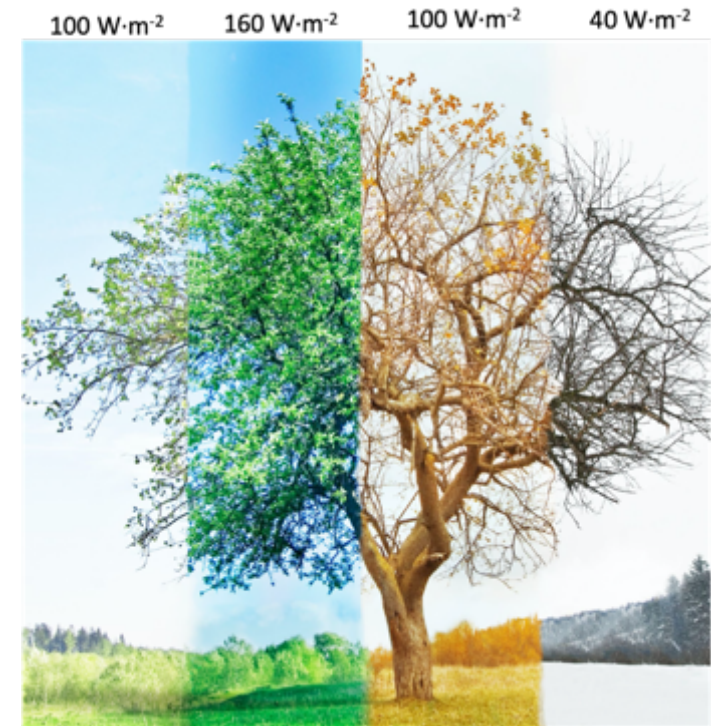
## Photovoltaik

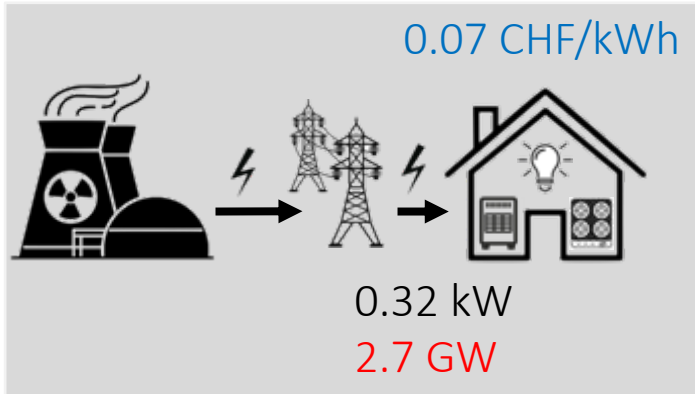
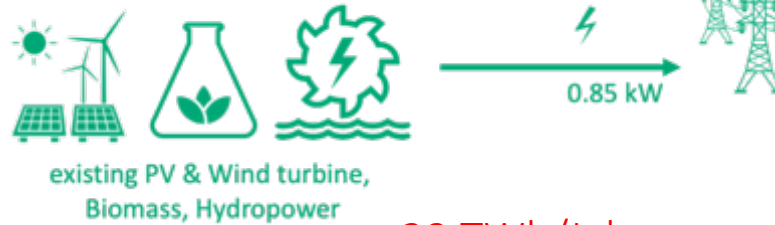
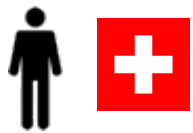
Die saisonale Variationen des Klimas in der Schweiz bedingt die Speicherung der erneuerbaren Energie vom Sommer in den Winter (ca. 25% der Jahresproduktion)

Alternativ kann auch eine Überdimensionierung der PV um Faktor 4 die saisonale Speicherung ersetzen und es wird nur noch ein Tag/Nacht speicher benötigt (ca. 0.25% der Jahresproduktion)

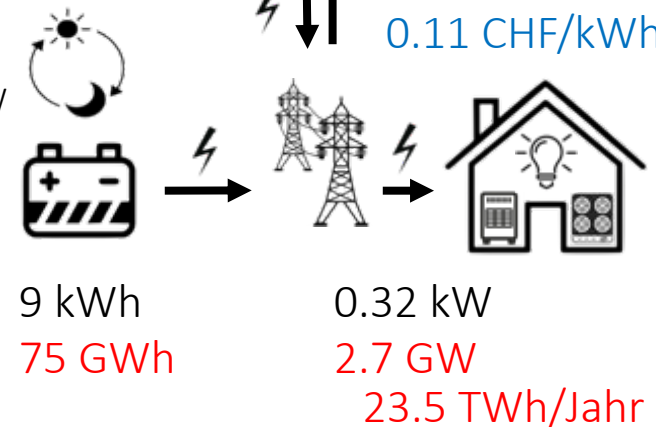
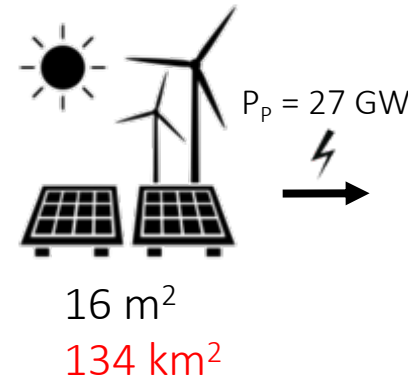
Die saisonale Speicherung elektrischer Energie in Batterien ist unwirtschaftlich (1 Lade/Entlade Zyklus pro Jahr) und erfordert wegen der geringen Energiedichte der Batterien grosse Mengen an Ressourcen.

Die Speicherung der Elektrizität in Pumpspeicherkraftwerken ist mit einem Wirkungsgrad von ca. 80% effizient und günstig es kommen aber die Netzkosten zum Transport der Elektrizität dazu. Die Rückverstromung erfolgt ebenfalls mit einer Effizienz von ca. 80%.





29 TWh/Jahr



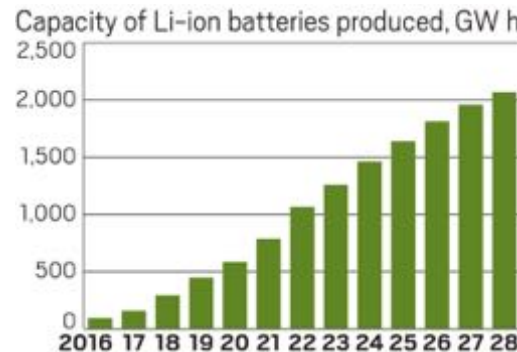
PV 134 km<sup>2</sup> = Dachfläche

10% der globalen Li-Batterie Prod.

+4 x Grande-Dixence



$P_p = 26.8 \text{ GW}$



$C = 75 \text{ GWh}$

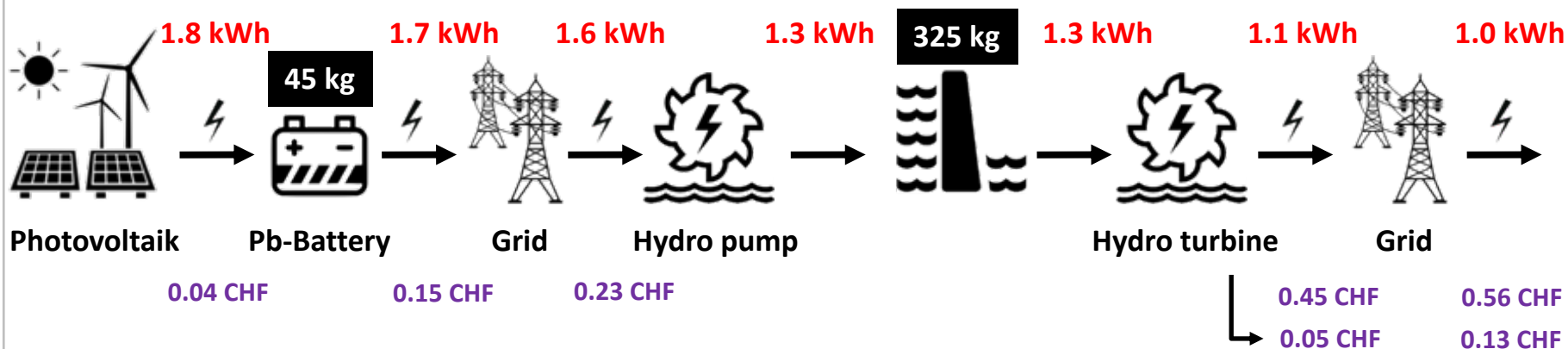


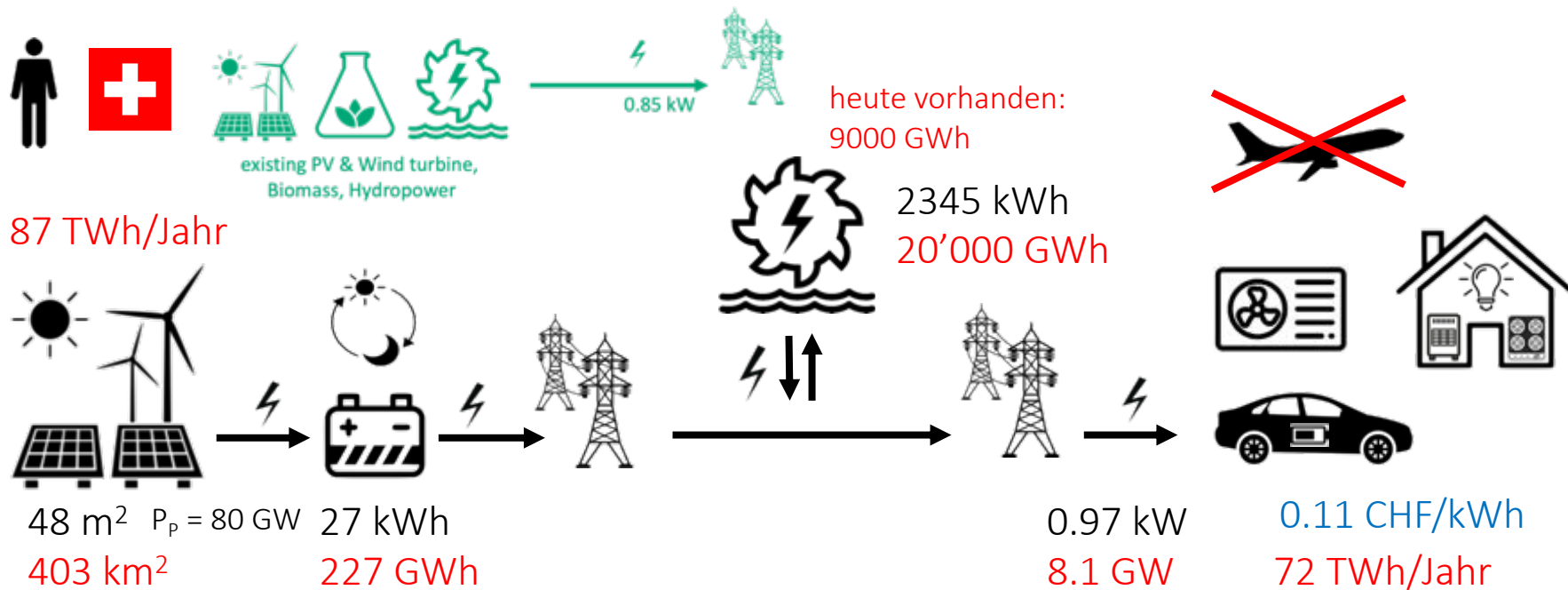
$W_{el} = 1570 \text{ GWh}$

$P = 1260 \text{ MW}, t = 52 \text{ days}$

## Ersatz der Kernkraftwerke durch Photovoltaik (PV)

- Die 4 Kernreaktoren der Schweiz produzieren 0.32 kW/Kopf Bandlelektrizität d.h. konstante Leistung.
- Die Produktion dieser Leistung durch PV erfordert 16m<sup>2</sup>/Kopf.
- Zur saisonalen Speicherung müssen zusätzlich zu den bestehenden Pumpspeicherkraftwerken noch 4 mal ein Kraftwerk der Grösse von Grand-Dixence (1500 GWh) gebaut werden.
- Die Kosten der Elektrizität setzen sich zusammen aus Produktionskosten (0.04 CHF/kWh), Batteriekosten (0.1 CHF/kWh) Netzkosten (0.08 CHF/kWh), Pumpkosten, Speicherkosten, Turbinierungskosten (0.06 CHF/kWh) und wieder Netzkosten (0.08 CHF/kWh)





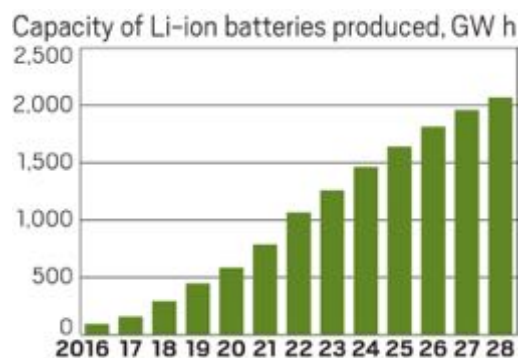
PV 403 km<sup>2</sup>, 1% of CH

30% der globalen Li-Batterie Prod.

+13 x Grande-Dixence



P<sub>p</sub> = 80 GW  
3x Dachfläche der Schweiz



C = 227 GWh

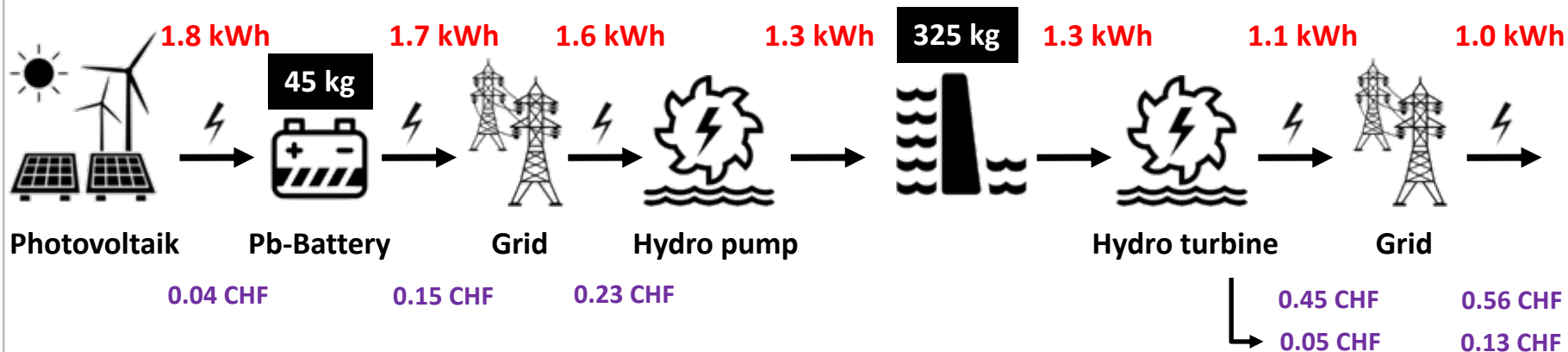


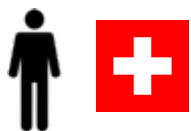
W<sub>el</sub> = 1570 GWh  
P = 1260 MW, t = 52 days



# Elektrifizierung und Ersatz der fossilen Energie durch PV

- Die komplette Elektrifizierung führt zu einer Reduktion des Energiebedarfs von 20 GW auf 8 GW (0.97 kW/Kopf) durch Effizienzgewinn.
- Die Produktion dieser Leistung durch PV erfordert 48 m<sup>2</sup>/Kopf (3 mal die Dachfläche der Schweiz).
- Der Leistungsausgleich der PV und die Tag/Nacht Speicherung erfolgt in Batterien mit einer Kapazität von 27 kWh/Kopf was ca. 1% des benötigten saisonalen Speichers entspricht.
- Zur saisonalen Speicherung (20000 GWh) müssen zusätzlich zu den bestehenden Pumpspeicherkraftwerken noch 13 mal ein Kraftwerk der Grösse von Grand-Dixence (1500 GWh) gebaut werden.





0.85 kW



980 kg CO<sub>2</sub>/year

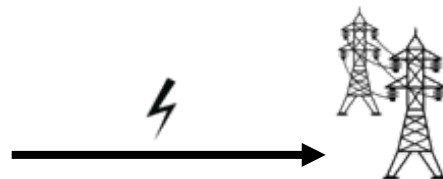
87 TWh/Jahr



48 m<sup>2</sup>  
403 km<sup>2</sup>



27 kWh  
227 GWh



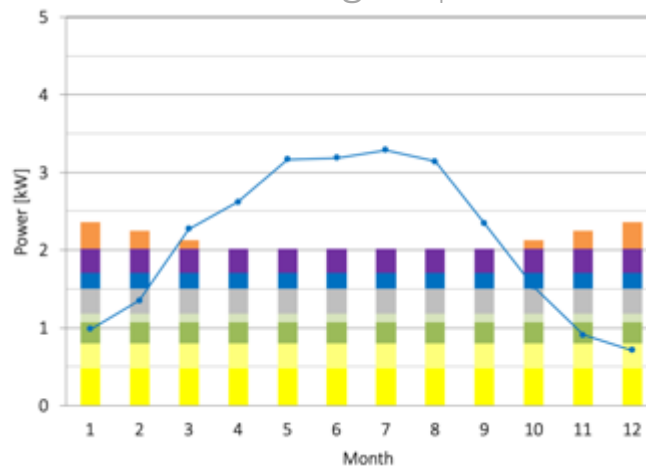
0.97 kW  
8.1 GW



72 TWh/Jahr

0.11 CHF/kWh

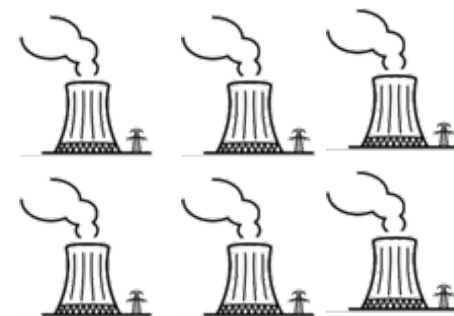
455 kg CH<sub>4</sub>



CO<sub>2</sub> emission: 2231 kg CO<sub>2</sub>/year  
17·10<sup>9</sup> kg CO<sub>2</sub>/Jahr (42% of today)

20 TWh/Jahr

6 thermische Kraftwerke  
mit je 1 GW<sub>el</sub>.Leistung



h = 40%

1251 kg CO<sub>2</sub>/year

PV 403 km<sup>2</sup>, 1% of CH



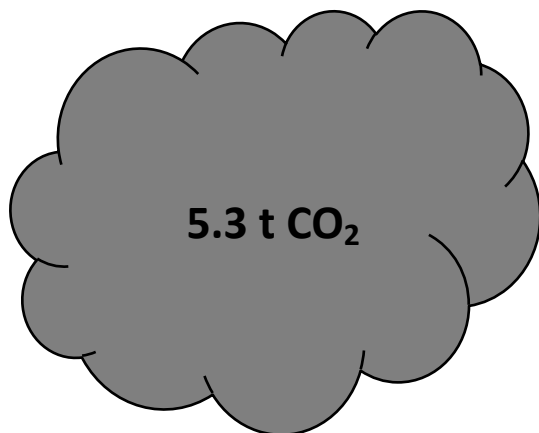
P<sub>p</sub> = 80 GW

3x Dachfläche der Schweiz

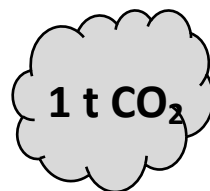
## Ersatz der fossilen Energie durch PV ohne Speicherung

- Die komplette Elektrifizierung ohne saisonale Speicherung führt zu einer Elektrizitätslücke von 20'000 GWh (max. 6 GW) während den 6 Wintermonaten.
- Zur Deckung dieser Lücke müssten 6 Gaskraftwerke mit einer el. Leistung von je 1 GW gebaut werden, welche 1250 kg CO<sub>2</sub>/Kopf·Jahr austossen.
- Zusammen mit den Flugtreibstoffen (980 kg/Kopf·Jahr) führt dies zu einem CO<sub>2</sub> Ausstoss von 2231 kg CO<sub>2</sub>/Kopf·Jahr, entsprechend 42% des heutigen CO<sub>2</sub> Ausstosses.

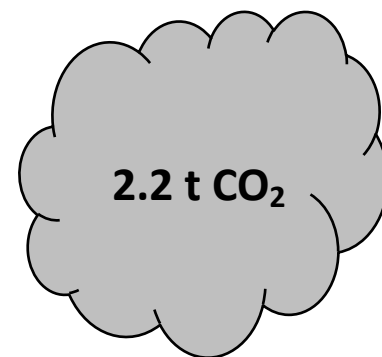
**Fossile Energieträger  
heute**

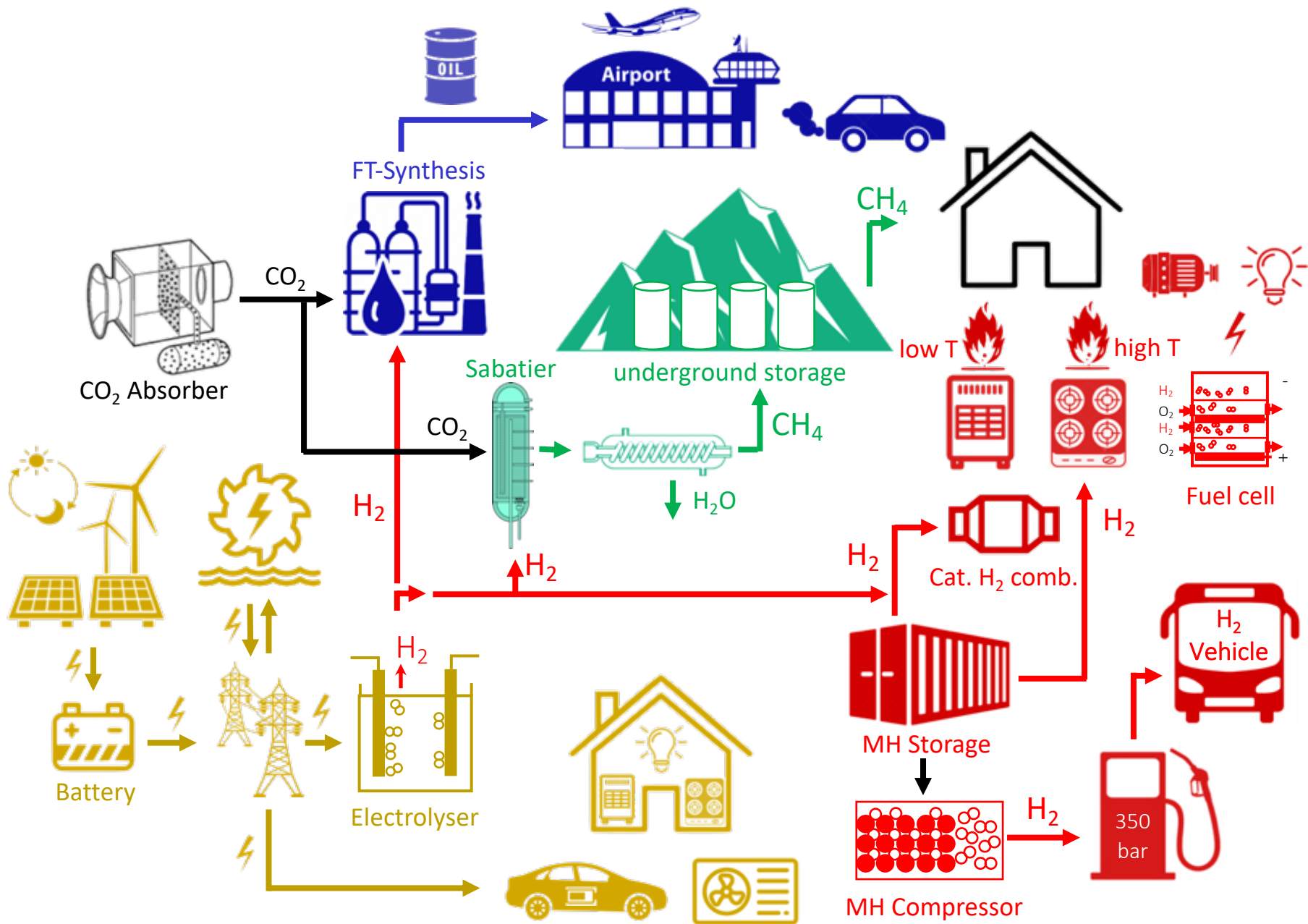


**Elektrifizierung  
mit Speicherung**



**Elektrifizierung  
ohne Speicherung**

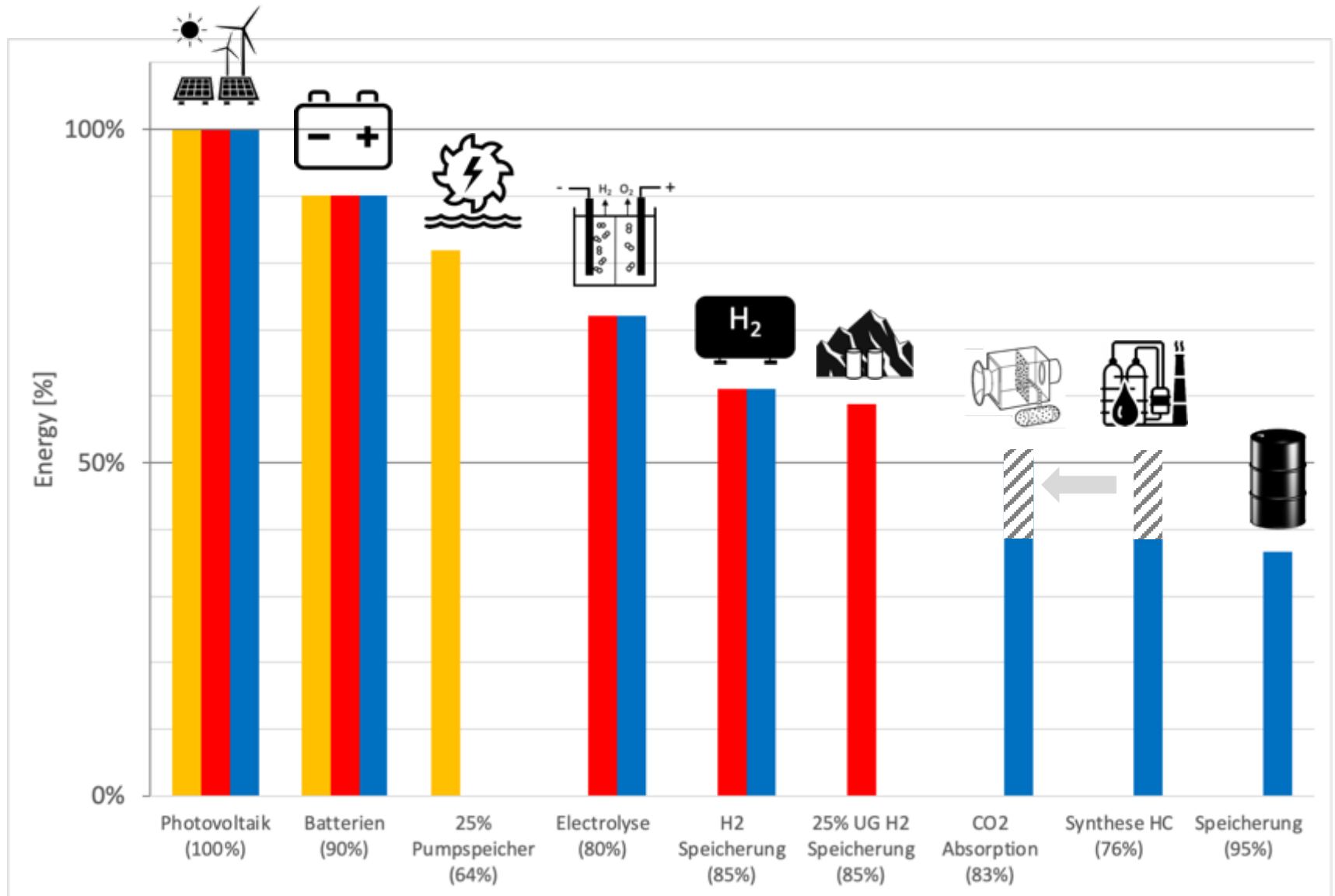




## Das erneuerbare Energiesystem

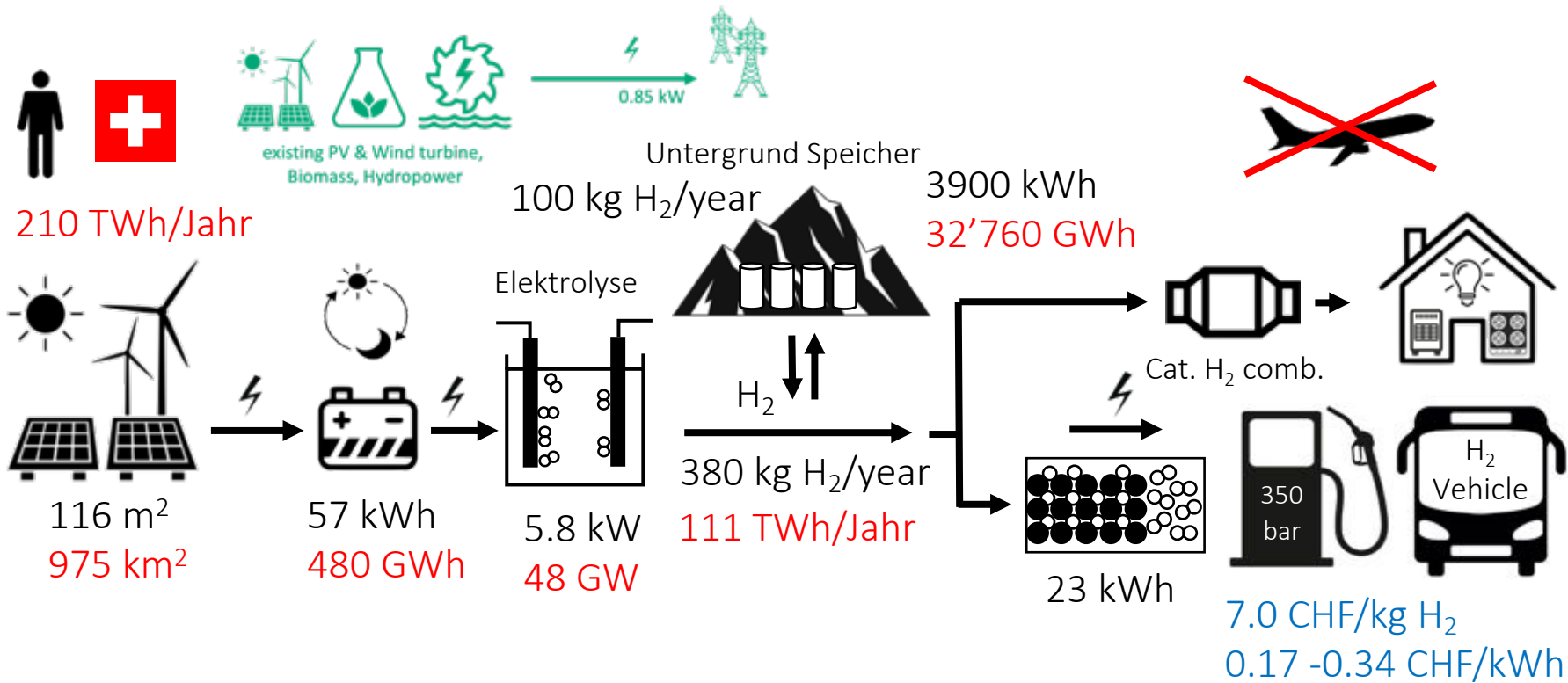
- Erneuerbare Energie, z.B. Photovoltaik, Windkraft und Wasserkraft, tritt in Form von Elektrizität auf.
- Ein rein elektrisches System hat eine hohe Effizienz. Die Speicherung der Elektrizität in Batterien ist aber sehr teuer und ressourcenintensiv.
- Wasserstoff ermöglicht die Speicherung grosser Energiemengen und deckt sowohl die Nachfrage nach Wärme (katalytische Verbrennung) als auch Elektrizität (Brennstoffzelle). Wasserstoff erfordert den Aufbau einer neuen Infrastruktur und spezifische Anwendungen.
- Mit Wasserstoff und CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre kann über den Sabatier-Prozess Methan synthetisiert werden und als CO<sub>2</sub>-neutrales Gas das Erdgas ersetzen.
- Mit Wasserstoff und CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre können über den Fischer-Tropsch Prozess Kohlenwasserstoffe synthetisiert werden und als CO<sub>2</sub>-neutrale Brenn- und Treibstoffe die Fossilien ersetzen.





## Effizienz der Produktion der Energieträger

- Die Wahl geeigneter Energieträger ermöglicht die Speicherung und spezielle Anwenden auch wenn Energiewandlung mit Verlusten verbunden sind.
- Ein rein elektrisches System hat eine hohe Effizienz. Die Speicherung der Elektrizität in Batterien ist aber sehr teuer und ressourcenintensiv.
- Wasserstoff enthält je nach Speicherform ca. 60% der für die Herstellung ursprünglich eingesetzten Elektrizität.
- Das synthetische Methan enthält max. 50% der erneuerbar produzierten Elektrizität.
- Die synthetischen Kohlenwasserstoffe enthalten max. 37% der erneuerbar produzierten Elektrizität.



PV 975 km<sup>2</sup>, 2.4 % of CH



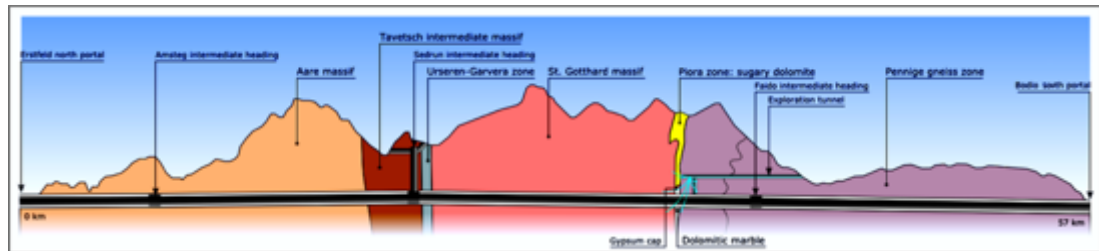
$P_p = 195 \text{ GW}$

7x Dachfläche der Schweiz

Unterirdische Wasserstoff Kavernen

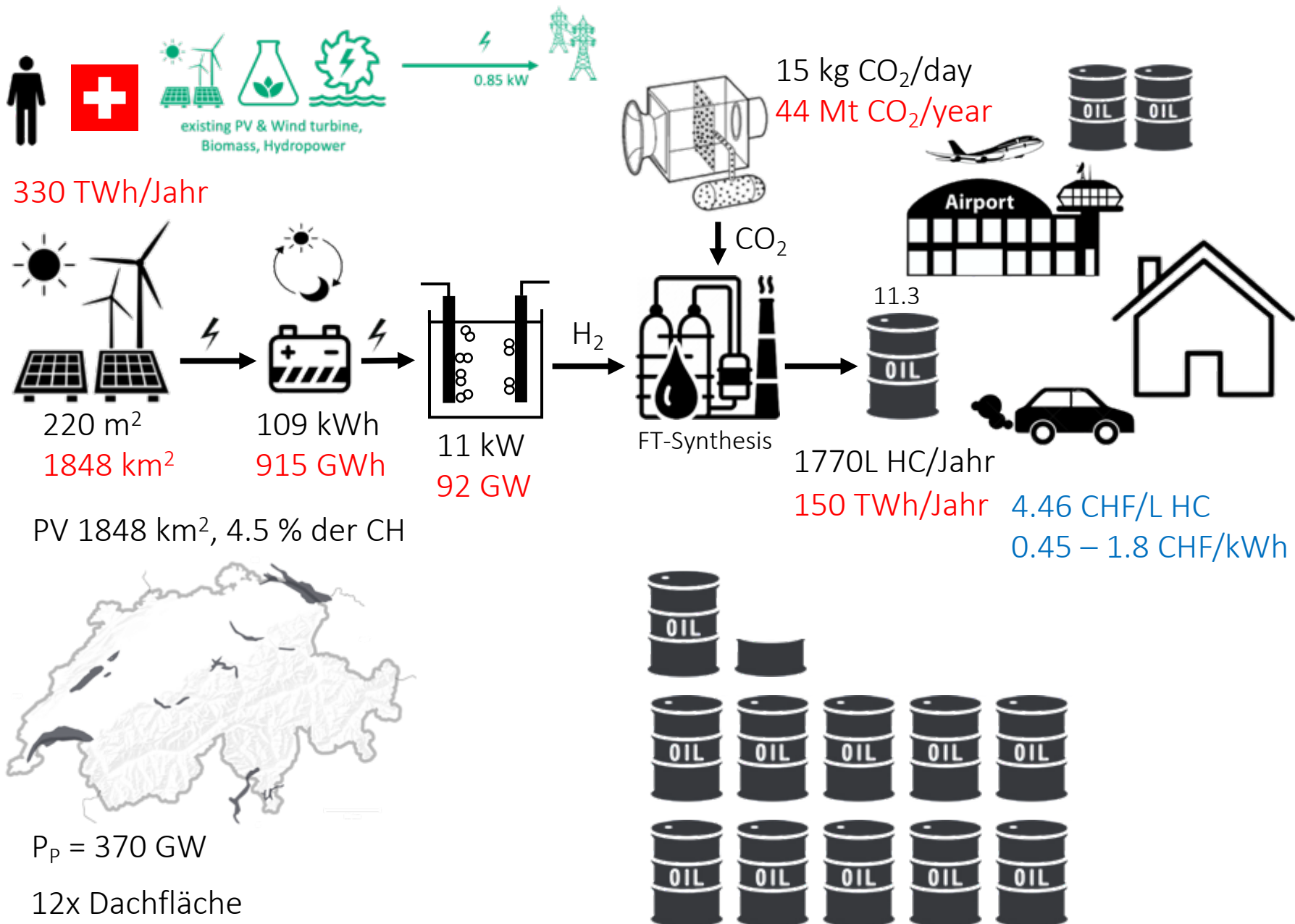
$V = 57 \text{ Mm}^3$

25 x Gotthard Basistunnel  $V = 2.3 \text{ Mm}^3$



## Ersatz der fossilen Energie durch PV und Wasserstoff

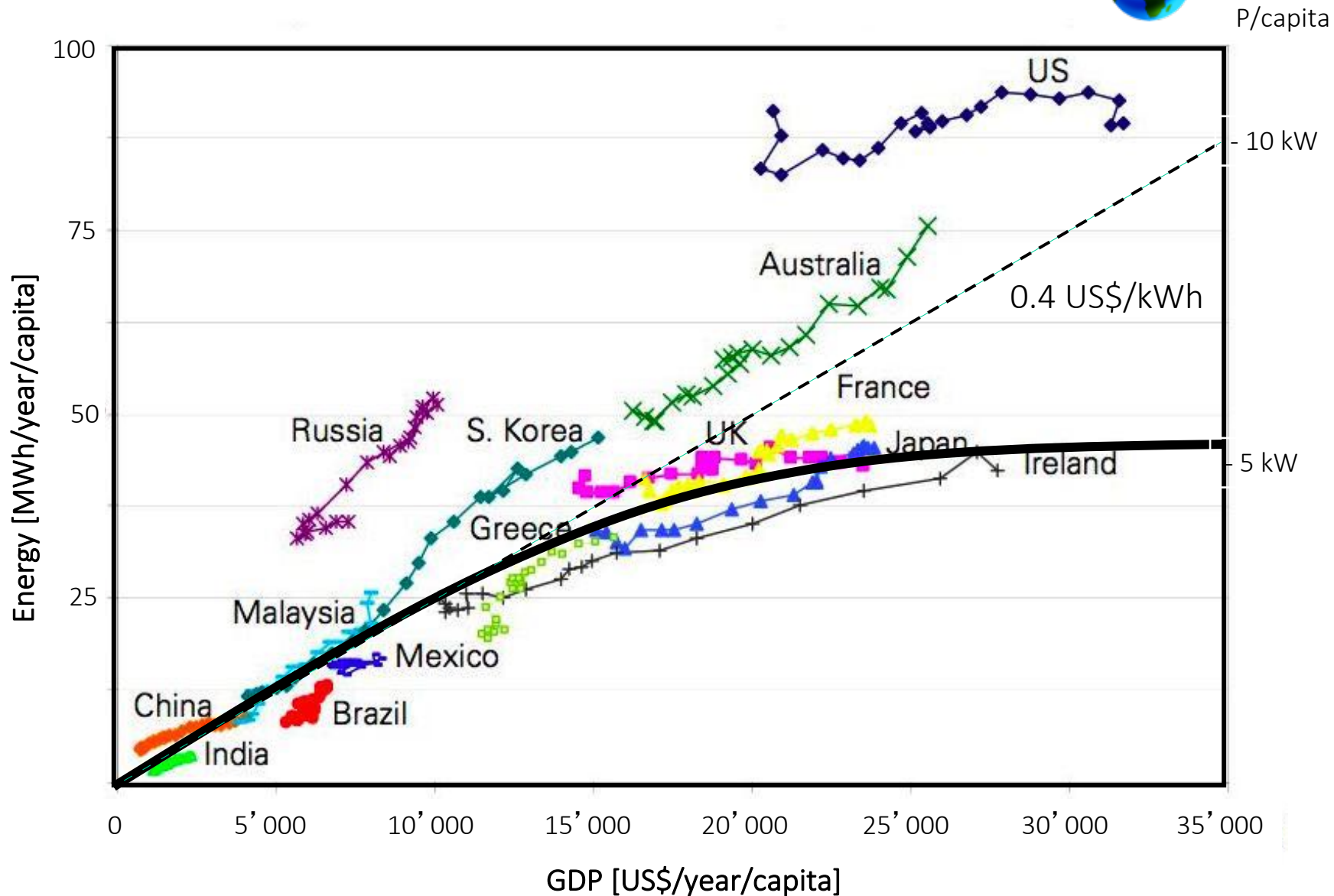
- Die Herstellung von Wasserstoff als Energieträger durch Elektrolyse aus erneuerbar produzierter Elektrizität (PV) erlaubt die Verteilung und Speicherung der Energie.
- Wasserstoff kann katalytisch verbrannt werden, um Wärme zu produzieren, oder mit Brennstoffzellen kann Elektrizität produziert werden.
- Wasserstoff erfordert den Aufbau einer neuen Infrastruktur und die Anpassung der Anwendungen, ermöglicht aber in einem weiten Bereich die energetischen Bedürfnisse CO<sub>2</sub>-frei zu befriedigen.
- Die Energiespeicherdichte pro Volumen ist von Wasserstoff ca. 3 mal kleiner als von Kerosin, deshalb müssen zusätzlich zu Wasserstoff auch synthetische Kohlenwasserstoffe für die Aviatik hergestellt werden.
- Die saisonale Energiespeicherung mit Wasserstoff unter 200 bar Druck in unterirdischen Kavernen erfordert ein Volumen von 57 Millionen m<sup>3</sup> was etwa 25 mal dem Gotthard Basistunnel entspricht.





## Ersatz der fossilen Energie durch PV und synth. Kohlenwasserstoffe

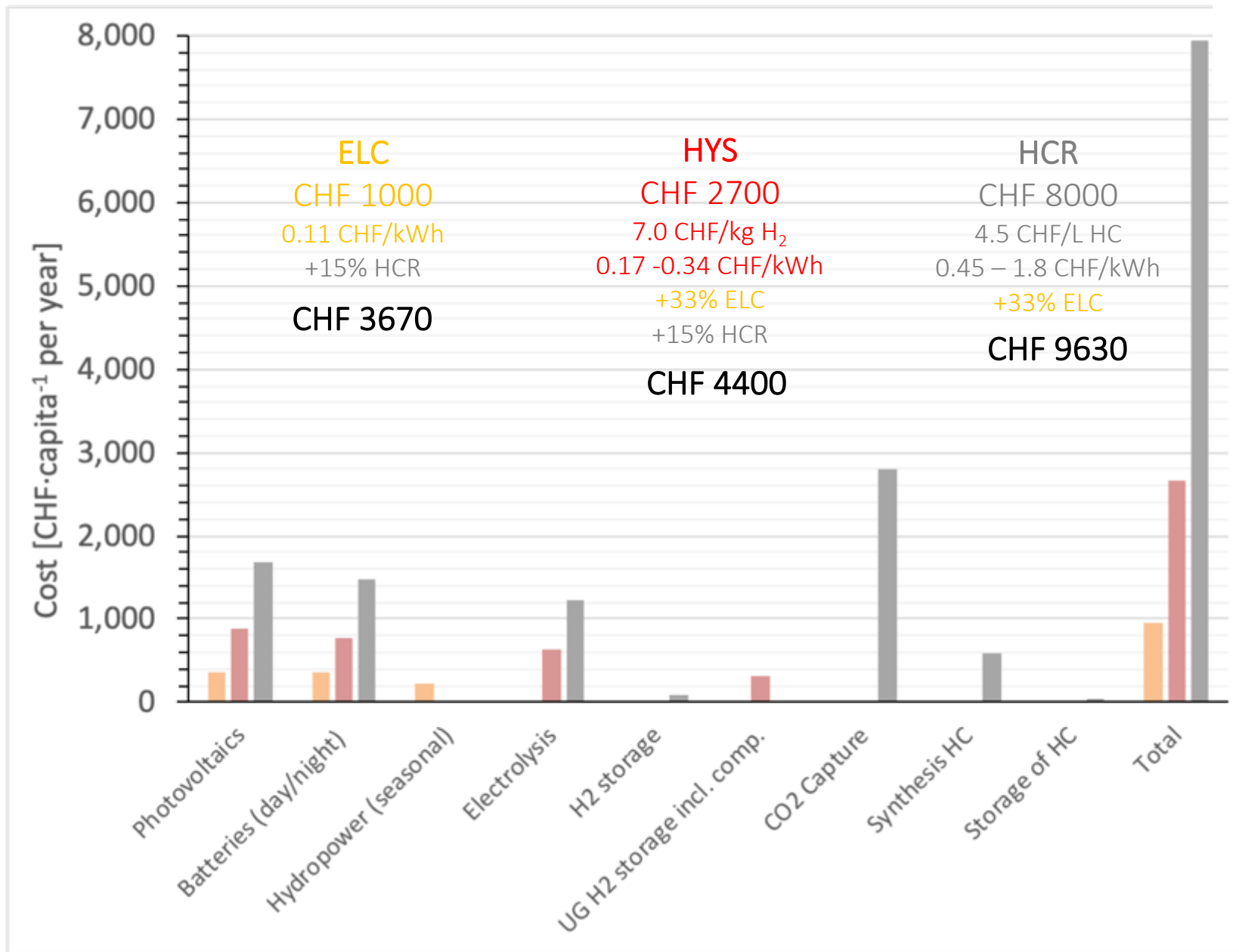
- Der Ersatz der fossilen Energieträger durch synthetische Kohlenwasserstoffe erfordert die Absorption des emittierten CO<sub>2</sub> an der Quelle bzw. aus der Atmosphäre.
- Vorhandene Infrastruktur und Anwendungen können weiter verwendet werden.
- Speicherung ist technisch etabliert und kostengünstig.
- Treibstoffe für die Aviatik werden CO<sub>2</sub>-neutral hergestellt.
- 4.5% der Fläche der Schweiz bzw. 12 mal die Dachfläche müssen mit PV ausgerüstet und mit 915 GWh Batterie ergänzt werden um die Peakleistung von 370 GW auf 50 GW auszugleichen.



Ref.: [http://muller.lbl.gov/teaching/physics10/PffP\\_textbook/PffP-10-climate\\_files/image022.gif](http://muller.lbl.gov/teaching/physics10/PffP_textbook/PffP-10-climate_files/image022.gif)

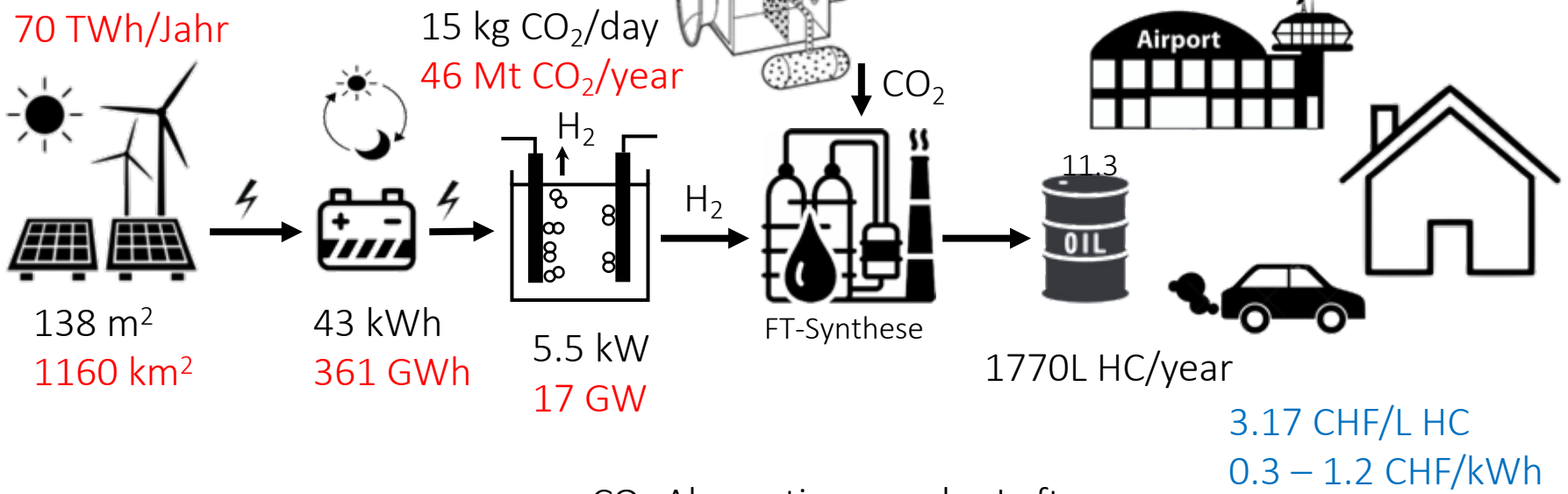
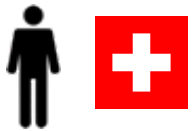
## Energie und Wirtschaft

- Seit der Industrialisierung, d.h. in den letzten 200 Jahren, ist die Wirtschaftsleistung direkt an die Verfügbarkeit der Primärenergie gekoppelt.
- Alle Länder folgen derselben Kurve mit Ausnahme der USA und Russland, welche doppelt soviel Energie verbrauchen um dasselbe Einkommen wie die andern Länder zu generieren.
- Der Energiebedarf geht in die Sättigung für die hohen Einkommen, weil die Länder mit hohem Einkommen viele der energieintensiven Güter (Stahl, Zement, Aluminium usw.) importieren.
- Die Steigung des Bruttosozialproduktes als Funktion des Primärenergiebedarfs beträgt 0.4 CHF/kWh. Das heisst, die Energie darf nicht mehr als 0.4 CHF/kWh kosten, sonst arbeitet die Wirtschaft mit Verlust.
- Im rechten unteren Quadranten (unterhalb der Kurve) positioniert sich kein Land. Niemand kann das hohe Einkommen generieren ohne den entsprechenden Primärenergie Einsatz.

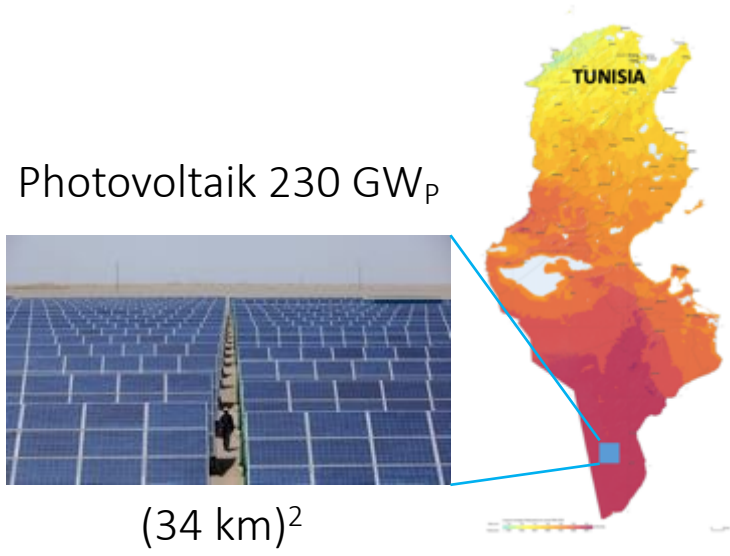


## Kosten der Energie in den drei Energiesystemen

- Heute kostet die Primärenergie im Durchschnitt 3000 CHF/Kopf pro Jahr.
- Im vollständig elektrifizierten System ist sowohl die terrestrische Mobilität elektrisch als auch die Heizungen mit Wärmepumpen. Nur die Aviatik erfordert noch synthetische Kohlenwasserstoffe. Mit der bereits heute erneuerbaren Energie würden sich die Energiekosten auf rund 3669 CHF/Kopf pro Jahr belaufen (ohne Netzkosten).
- Das auf Wasserstoff basierte System liefert die Versorgung mit Elektrizität und Wasserstoff für die Mobilität und die Wärmeversorgung. Die saisonale Speicherung erfolgt in unterirdischen Kavernen mit Wasserstoff. Nur die Aviatik erfordert noch synthetische Kohlenwasserstoffe. Mit Einbezug der bereits heute produzierten erneuerbaren Energie würden sich die Energiekosten auf rund 5683 CHF/Kopf pro Jahr belaufen.
- Die synthetischen Kohlenwasserstoffe erlauben den direkten Ersatz der fossilen Energieträger in der vorhandenen Infrastruktur und den heutigen Anwendungen und ermöglichen die saisonale Speicherung der erneuerbaren Energie. Die Energiekosten belaufen sich auf 9713 CHF/Kopf pro Jahr.



CO<sub>2</sub> Absorption aus der Luft



130 kt CO<sub>2</sub>/day

Synthese der Kohlenwasserstoffe



GTL Qatar  
140'000 Fass/Tag

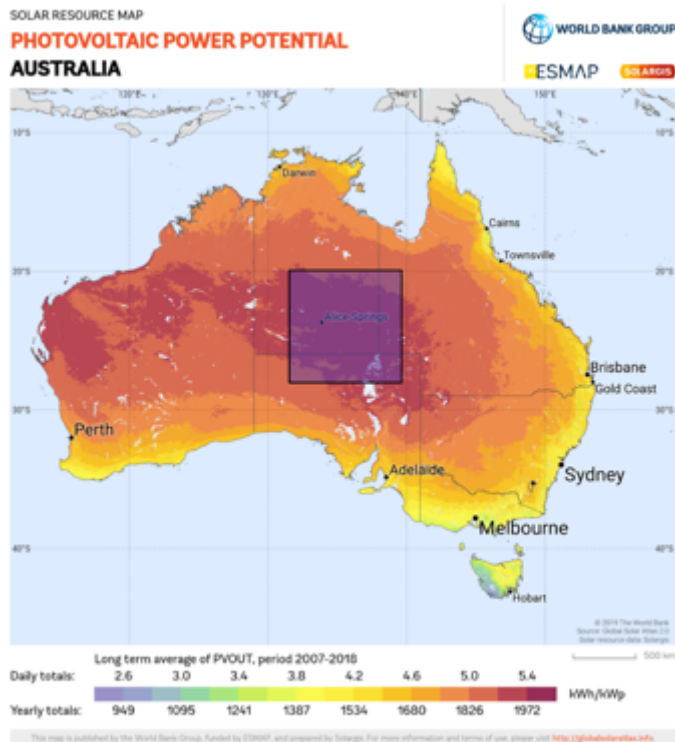
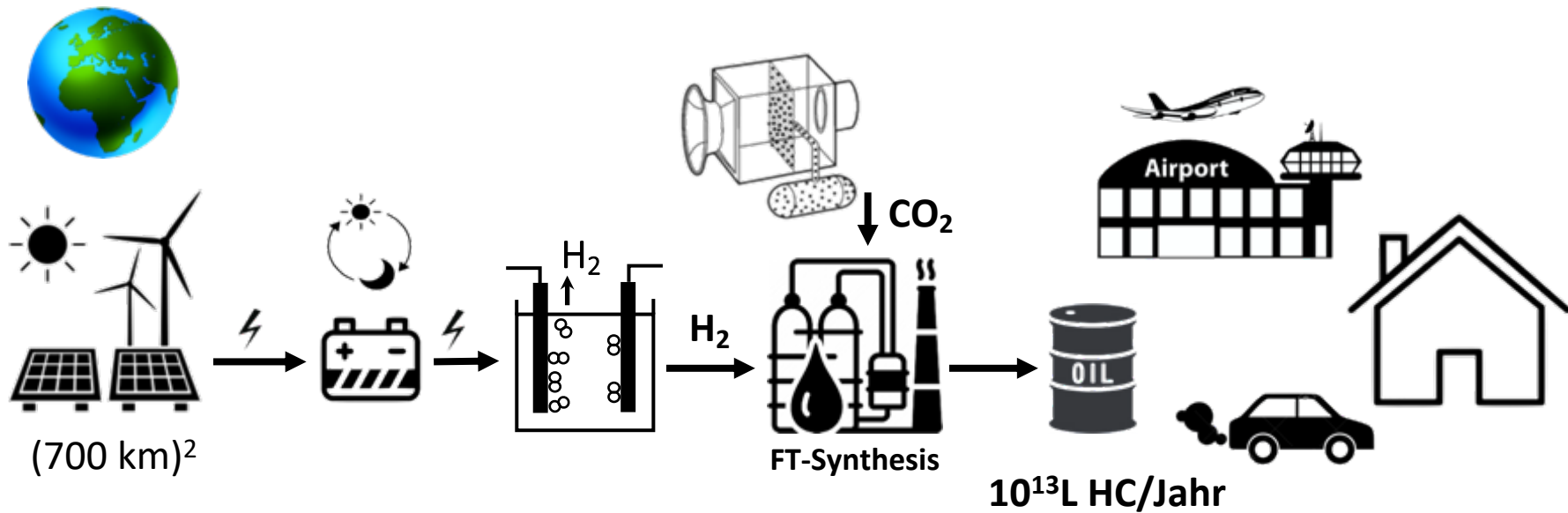
260'000 Fass/Tag





## Produktion der synth. Kohlenwasserstoffe nahe am Äquator

- Die Produktion der synthetischen Kohlenwasserstoffe in der Nähe des Äquators hat viele Vorteile:
  - Die Sonnenintensität ist rund doppelt so hoch
  - Keine saisonalen Schwankungen
  - PV kann auf nicht genutzten Flächen installiert werden
  - Die Kosten der synthetischen Treibstoffe sind um ein Drittel tiefer.
  - Die Produktion schafft Arbeitsplätze und generiert Einkommen in wirtschaftlich schwachen Regionen.
- Transport der synthetischen Treibstoffe ist zum grossen Teil bereits etabliert.
- Neben Afrika hat auch Australien eine hohe Sonnenintensität und grosse Flächen, welche wesentlich zur Versorgung der Welt mit erneuerbarer Energie und synthetischen Energieträgern beitragen könnten.



Synthese von Kohlenwasserstoffen



1300 x GTL Qatar

175 Mio. Fass/Tag



3.17 CHF/L HC  
0.3 – 0.5 CHF/kWh

Umsatz: 3500 Mrd./Jahr

Gewinn: 350 Mrd./Jahr

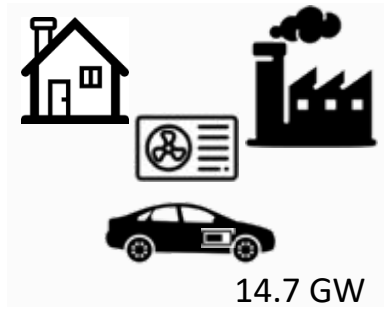
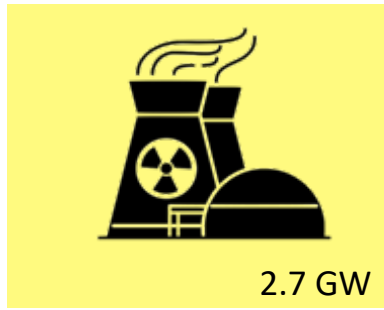
BSP(Australia): 1300 Mrd./Jahr (2019)

Kohle Export: 0.3 Gt/Jahr (30 Mrd. /Jahr)

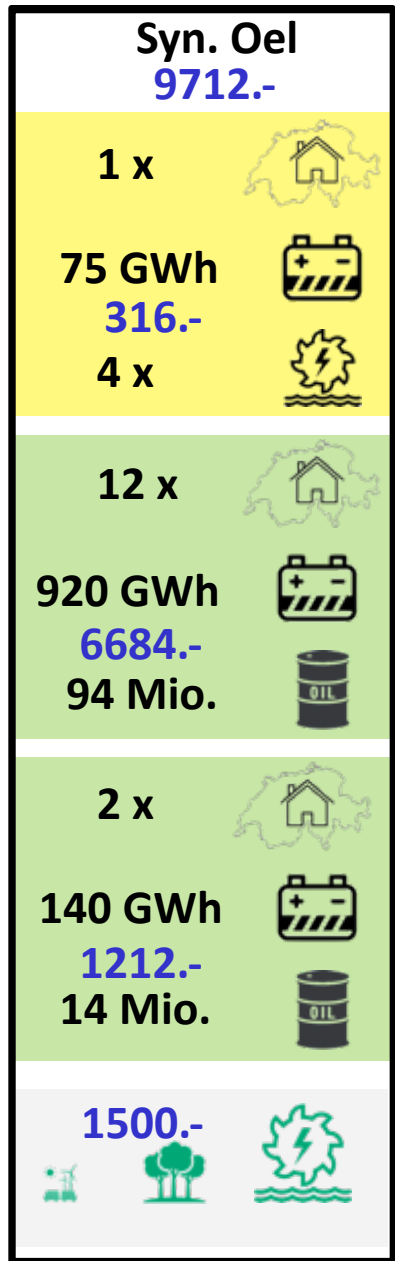
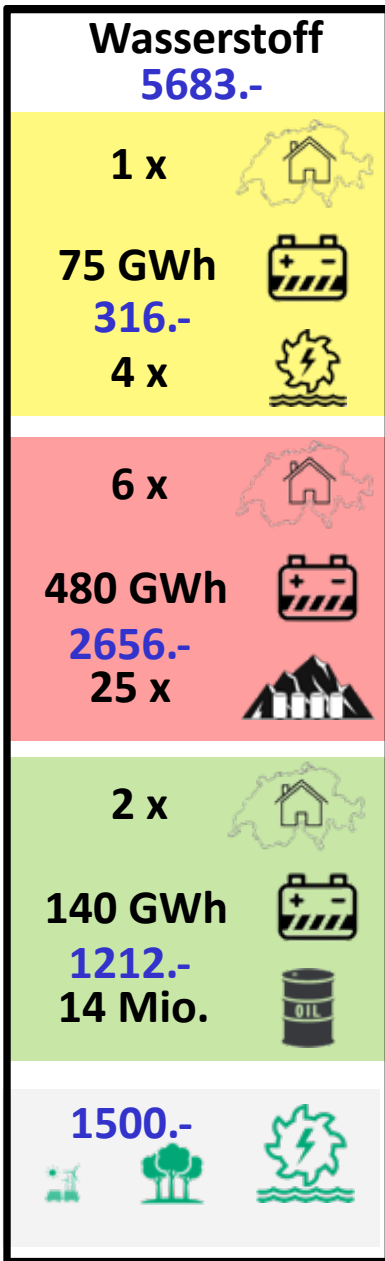
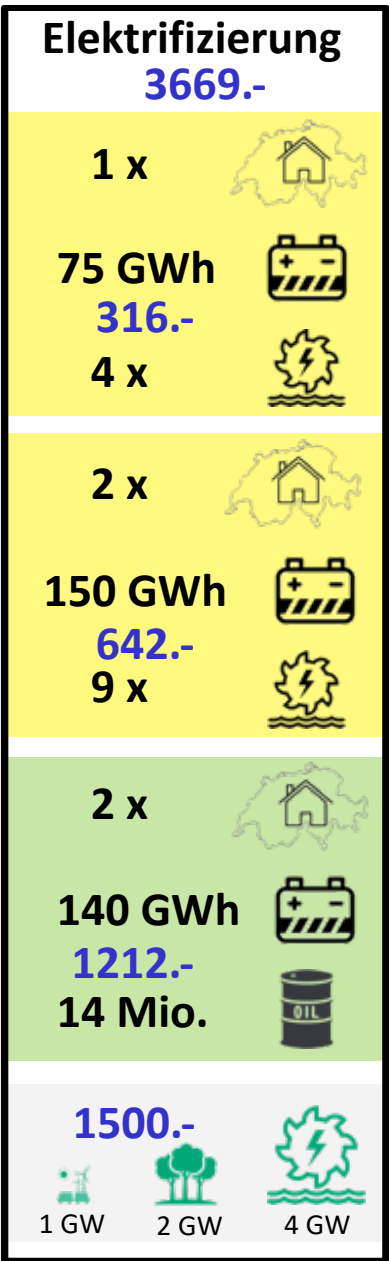
## Produktion der synth. Kohlenwasserstoffe in Australien

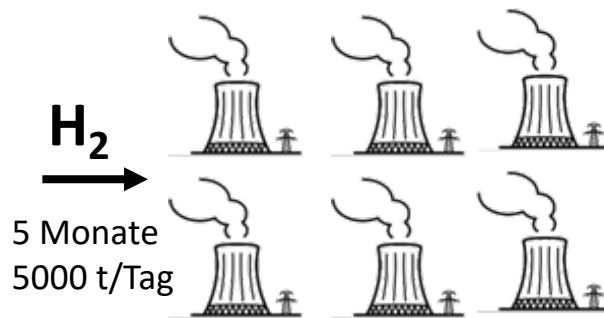
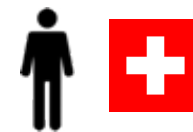
- Die Produktion der synthetischen Kohlenwasserstoffe in Australien:
  - Die Sonnenintensität ist rund doppelt so hoch
  - Wenig saisonalen Schwankungen
  - PV kann auf nicht genutzten Flächen installiert werden
  - Die Kosten der synthetischen Treibstoffe sind um ein Drittel tiefer.
- Transport der synthetischen Treibstoffe mit Pipeline an die Küste und anschliessend per Schiff nach Asien, Europa und Amerika.
- Eine Fläche von 1 Mio. km<sup>2</sup> (1/8 der Fläche Australiens) reicht zur Versorgung der ganzen Welt mit synthetischem Öl aus (175 Mio. Fass/Tag).
- Australien befindet sich auf der Südhalbkugel, was zu einer erwünschten saisonalen Verschiebung der Produktion führt.
- Die elektrische Energieversorgung wird durch lokale Photovoltaik ergänzt.
- Erneuerbare Energie kann nur dann die fossilen Energieträger vollständig ersetzen, wenn eine globale Produktion und globalen Handel aufgebaut wird.

# Energie-Systeme



existierende  
PV, Biomasse,  
Wasserkraft      7.0 GW



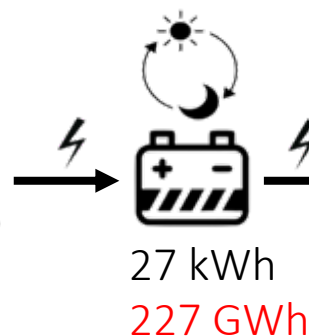


63 TWh/Jahr

87 TWh/Jahr



48 m<sup>2</sup>  
403 km<sup>2</sup>



18 TWh/Jahr



71 TWh/Jahr



0.97 kW  
8.1 GW

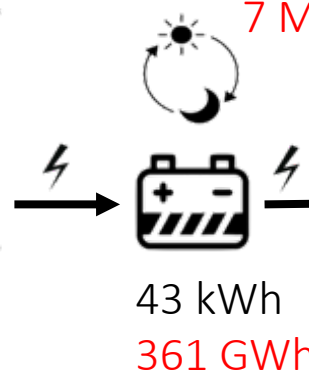


0.11 CHF/kWh

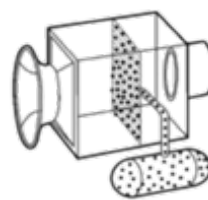
70 TWh/Jahr



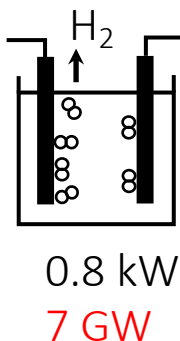
21 m<sup>2</sup>  
174 km<sup>2</sup>



2.3 kg CO<sub>2</sub>/Tag  
7 Mt CO<sub>2</sub>/Jahr



CO<sub>2</sub>



H<sub>2</sub>



FT-Synthese

1.7



266 L HC/year

z.B. in Tunesien

23 TWh/Jahr



>3.17 CHF/L HC  
0.3 – 1.2 CHF/kWh



## Optimale Lösung für die Schweiz 1/2

- Die Schweiz elektrifiziert weitgehend Mobilität, Heizungen und Industrie :
  - Eine Fläche entsprechen 3 mal der Dachfläche der Schweiz (403 km<sup>2</sup>) wird mit PV ausgestattet.
  - Lokale Batteriespeicher (152 GWh) für den Leistungs-Ausgleich verhindern die Überlastung des Netzes am Mittag.
  - Während 151 Tagen im Winter ergänzen 6 H<sub>2</sub>-Kraftwerke (Dampferzeuger auf Turbinen, je 1 GW<sub>el.</sub>) die Elektrizitätsproduktion.
  - Das synthetische Kerosin wird von Kraftwerken nahe am Äquator produziert und in die Schweiz importiert.
- Nahe dem Äquator kann auf 174 km<sup>2</sup> PV-Fläche und 25% der GTL Anlage von Shell in Katar kann das Kerosin für die Schweiz produziert werden.
- Die hohe Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht in der Wüste können für die effiziente und Kostengünstige Absorption des CO<sub>2</sub> aus der Luft genutzt werden.



## Lösung 2/2

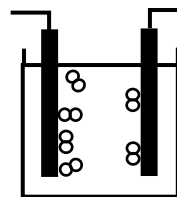
57 TWh/5 Monate



Photovoltaik  
48 km<sup>2</sup>



Pb-Battery  
180 GWh



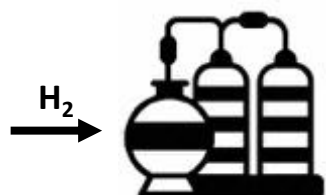
Electrolyseur  
15 GW



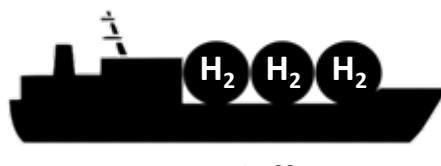
Kompressor



Pipeline



H<sub>2</sub> Verflüssiger



H<sub>2</sub> Schiff  
(LNG Schiff 250'000 m<sup>3</sup>)



Kompressor



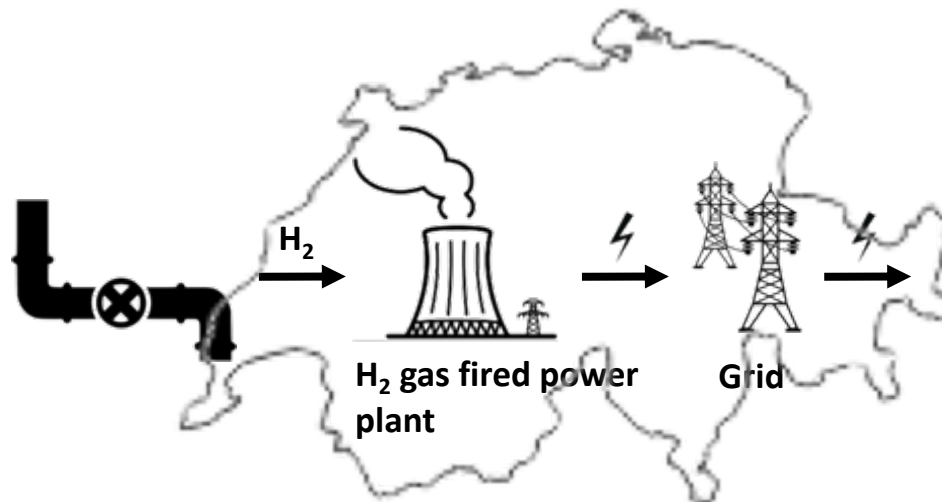
Pipeline



5 Monate  
5000 t/d

30 TWh/5 Monate

16.5 CHF/kg H<sub>2</sub>



18 TWh/5 Monate

0.89 CHF/kWh

## Optimale Lösung für die Schweiz 2/2

- Die Produktion des Wasserstoffs in Australien:
  - Die Sonnenintensität ist rund doppelt so hoch
  - Saison ist um ein halbes Jahr verschoben
  - PV kann auf nicht genutzten Flächen installiert werden
  - Die Kosten für Wasserstoff sind ca. 16 CHF/kWh.
- In Australien muss eine PV-Flächen von 48km<sup>2</sup> zur Produktion von 5000t H<sub>2</sub> pro Tag erstellt werden. Der Wasserstoff wird verflüssigt und in Schiffen (150'000 m<sup>3</sup>, ca. 1 Schiff alle 2 Tage während 151 Tagen im Jahr) in einen Hafen in Europa gebracht.
- Vom Hafen in die Schweiz kann der Wasserstoff in einer Pipeline transportiert werden.

# Symbolerklärung



Erneuerbare Energie  
Photovoltaik  
Windkraft



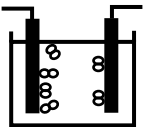
Batterie für  
Tag/Nacht Speicherung



Stromnetz



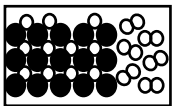
Pumpspeicher  
Wasserkraftwerk  
(saisonaler Speicher)



Elektrolyseur  
produziert Wasserstoff (H<sub>2</sub>)



Untergrund Gasspeicher



Metallhydridspeicher



Wasserstoff Tankstelle



Wasserstoff-Fahrzeug



Kernkraftwerk



Gaskraftwerk



Flughafen



Batterieelektroauto



Wärmepumpe



Oelfass (159 L)



Katalytischer Wasserstoffbrenner  
produziert Wärme aus Wasserstoff  
Brenn- oder Treibstoff aus Biomasse



Haus elektrifiziert

## Wissenschaftliche Publikation:

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>

Open access: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.785908/full>

## Editorial Facts & Figures:

Paul W. GILGEN

Louis SCHLAPBACH

Andreas ZÜTTEL

e: [andreas.zuettel@epfl.ch](mailto:andreas.zuettel@epfl.ch)

m: +41 79 484 2553

EPFL & Empa  
11. Februar 2022