

# Prinzipien der Mobilität: Ressourcen- und Energieeffizienz

Circular Economy Congress, 03.09.21 @ Kyburz Freienstein

## ■ Systemsicht für eine zukunftsorientierte Mobilität

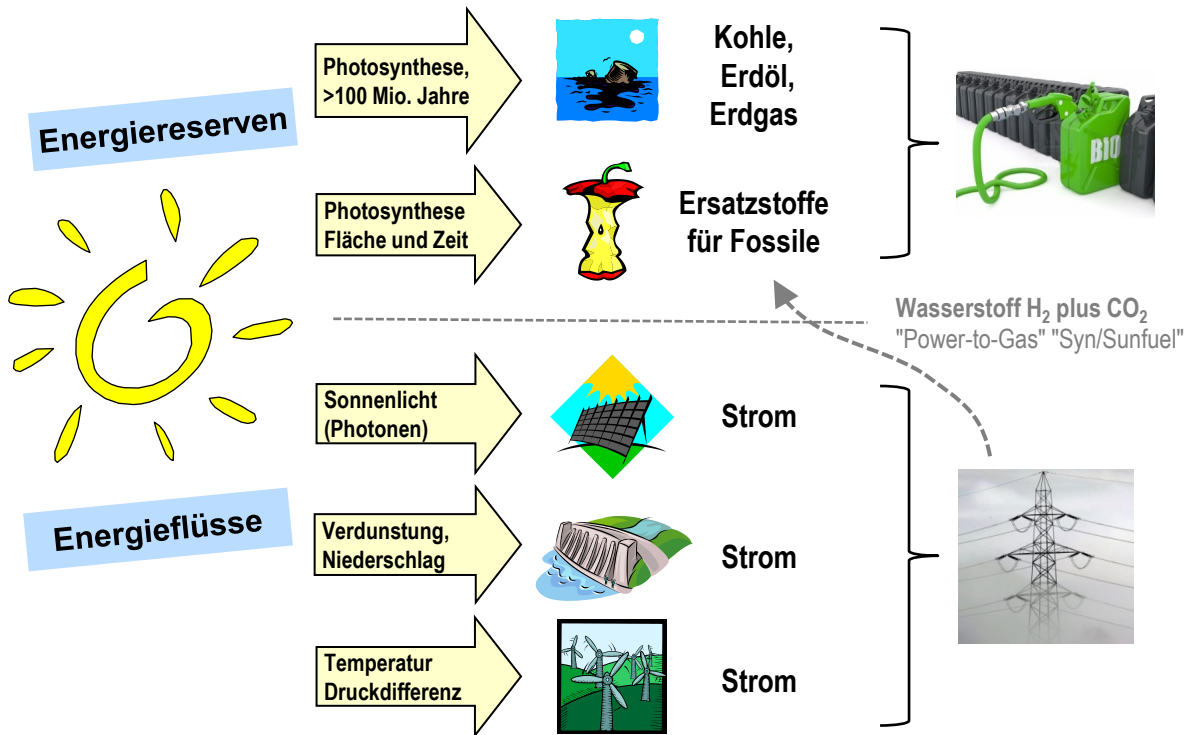


Rolf Widmer, Marcel Gauch  
Technology & Society Lab  
Empa St. Gallen  
marcel.gauch@empa.ch

# Angebot an Energie und Ressourcen

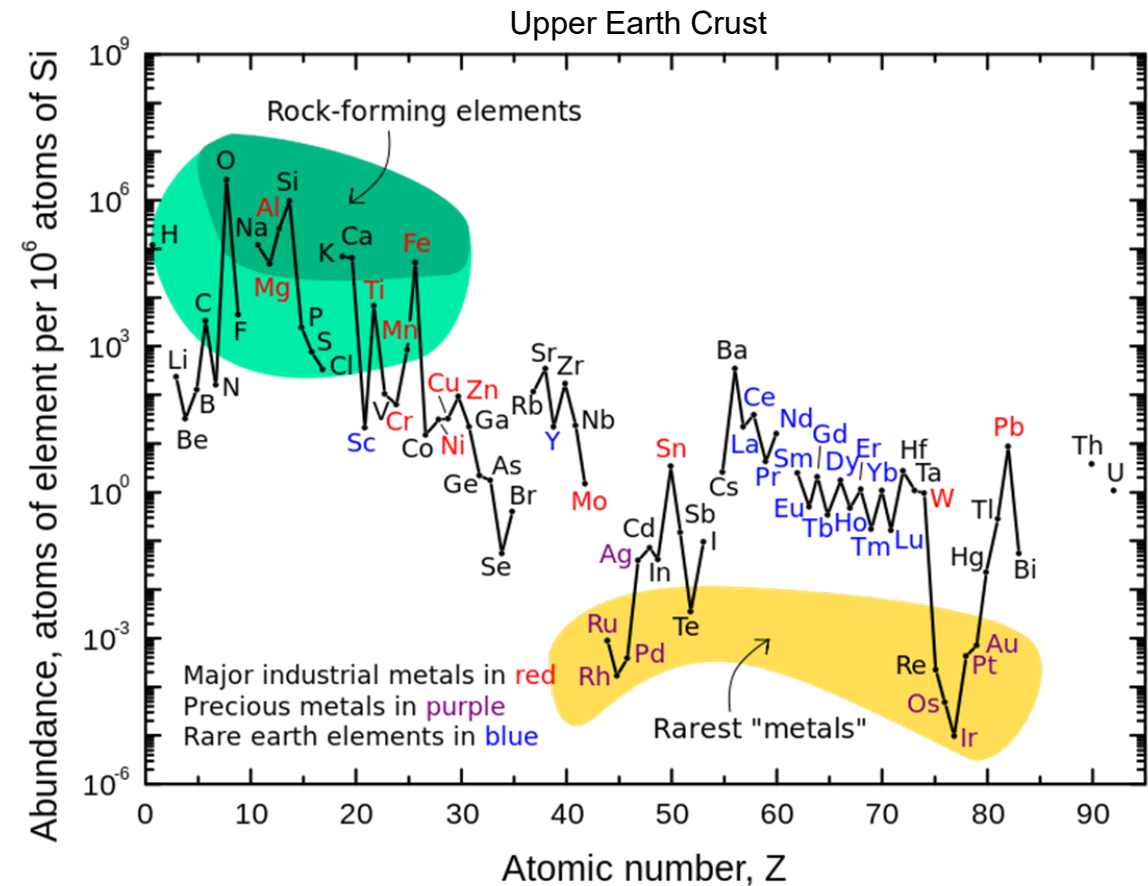
■ Im Prinzip, worauf wir achten müssen...

Energie



Die **Sonne** 'kann' nicht nur Photovoltaik

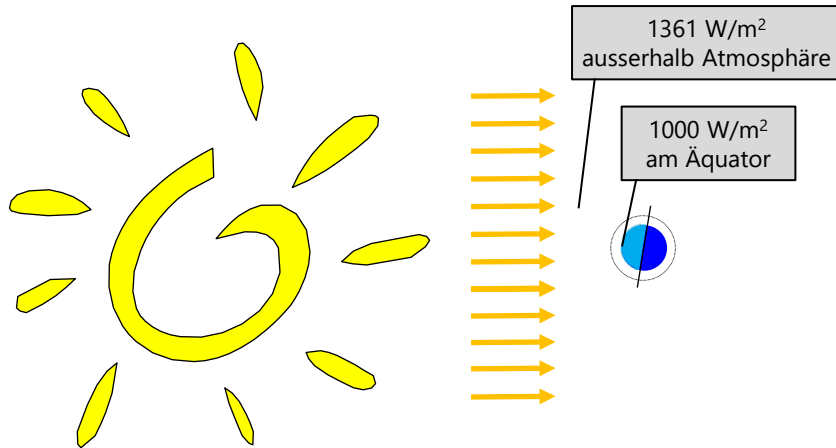
Ressourcen



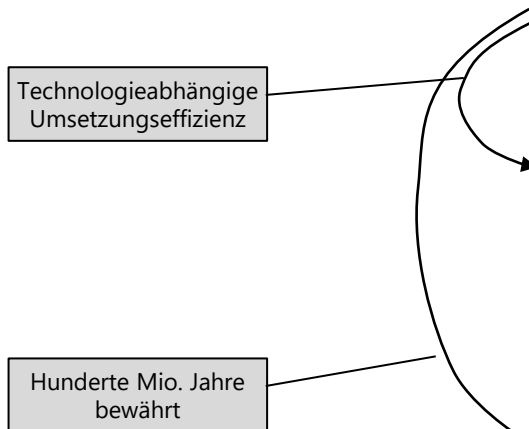
Häufigkeit der Elemente des Periodensystems in der Erdkruste.  
Je schwerer (höhere Ordnungszahl) desto seltener.  
**Silizium** ist das häufigste Element in der oberen Erdkruste.

# Energie Angebot

## ■ Energie = Sonne



- Permanente Leistung:  $1000 \text{ W/m}^2$  am Äquator
- Abzug wegen Erdrotation (Tag/Nacht), Neigung (Jahreszeiten), Wetter (Bewölkung)  
Global:  $\sim 165 \text{ W/m}^2$  globale Durchschnittsleistung, Unterschiede nach Breitengrad
- Schweiz:  $\sim 120 \text{ W}_{\text{avg}}/\text{m}^2$  nach Abzug aller Verluste  
Oslo 95, London 109, Paris 125, New York 147, Rom 176, Malaga 199, Los Angeles 225, Djibouti 266  $\text{W/m}^2$
- Schweiz: Jahres-Energieangebot:  $\sim 1'000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$   
 $120 \text{ W/m}^2 \cdot 8760 \text{ h/a} = 1'051'200 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$



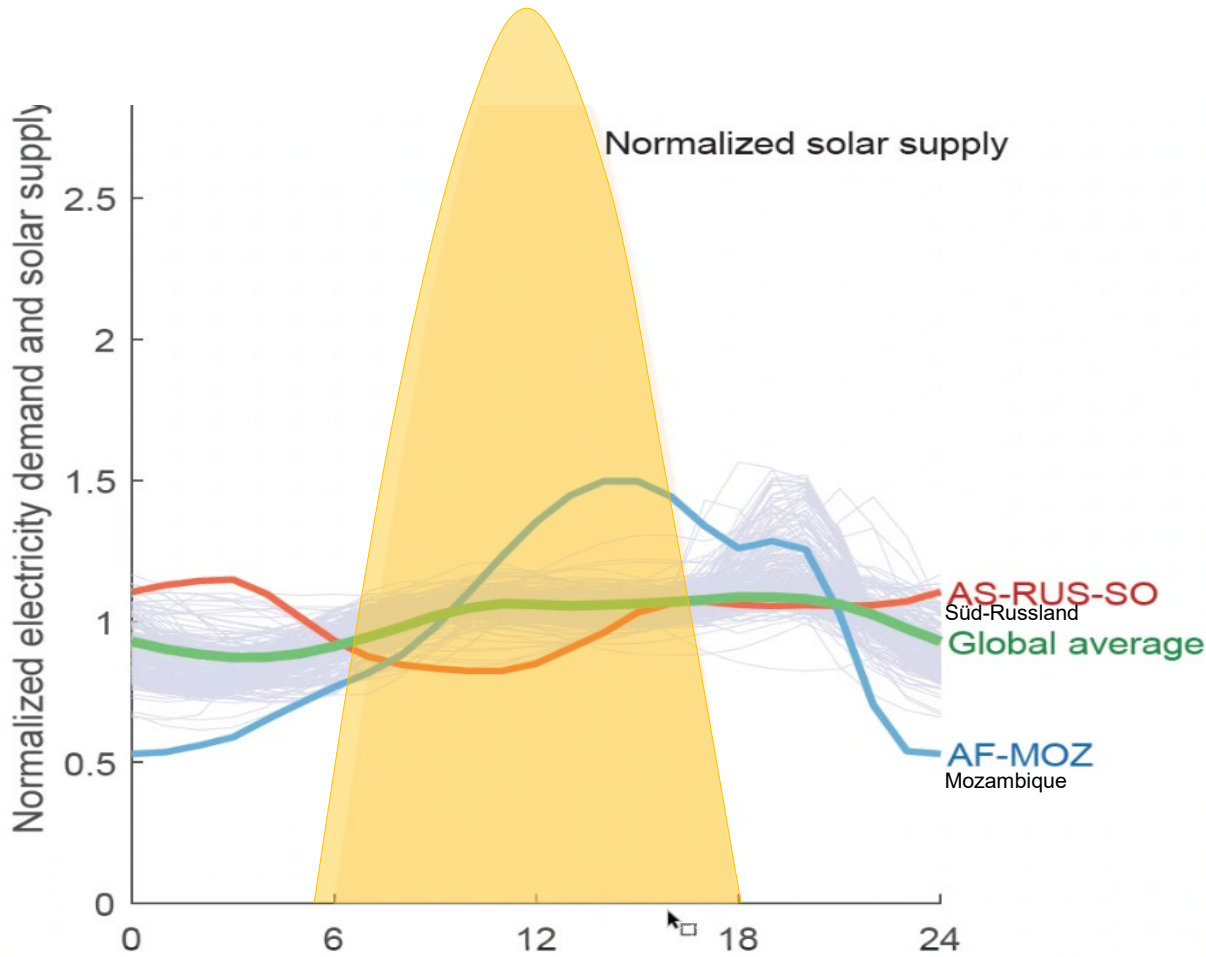
- Photovoltaik ( $\eta = 15\%$ ):  $\sim 150 \text{ kWh}_{\text{elektrisch}}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$   
Strombedarf CH:  $\sim 50 \text{ m}^2/\text{Person}$ ,  $400 \text{ km}^2/\text{CH}$ , 1% v. CH  
Pro Auto in der CH:  $\sim 15 \text{ m}^2/\text{Auto}$ ,  $60 \text{ km}^2/\text{CH}$ , 0.15% v. CH  
Potenzial (BFE 2020 \*)  
50 TWh Dächer, 17 TWh Fassaden  
34 TWh Planung Energieperspektiven 2050+
- Photosynthese ( $\eta = 0.5\%$ ):  $\sim 5 \text{ kWh}_{\text{th\_Heizwert}}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$   
Biotreibstoff in Gen/Motor ( $\eta = 30\%$ )  $\sim 1.5 \text{ kWh}_{\text{el/mech}}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$   
Heizung/Warmwasser CH:  $\sim 1600 \text{ m}^2/\text{Person}$ ,  $11600 \text{ km}^2/\text{CH}$ , 28% v. CH  
Pro Auto in der CH:  $\sim 1500 \text{ m}^2/\text{Auto}$ ,  $6000 \text{ km}^2/\text{CH}$ , 15% v. CH

Energie für  
Technologien

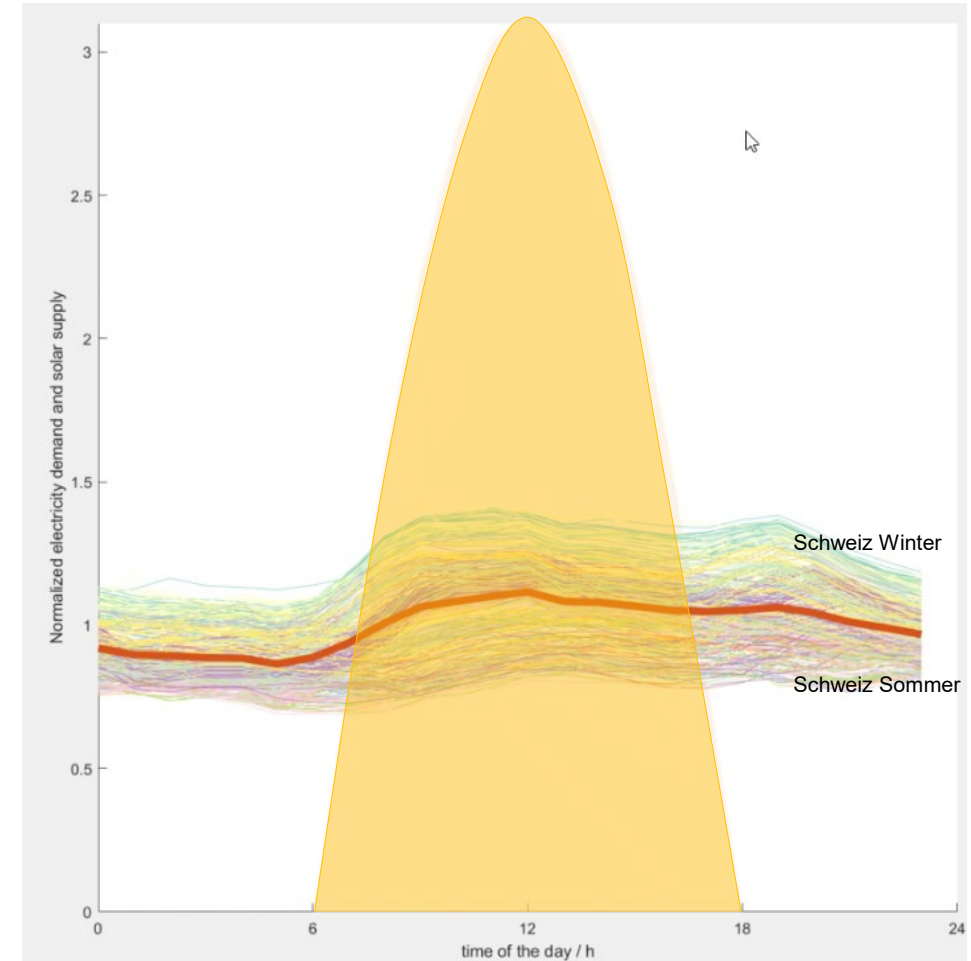
Energie für das  
Leben

# Energie Angebot und Nachfrage

## ■ Leben in der Nacht



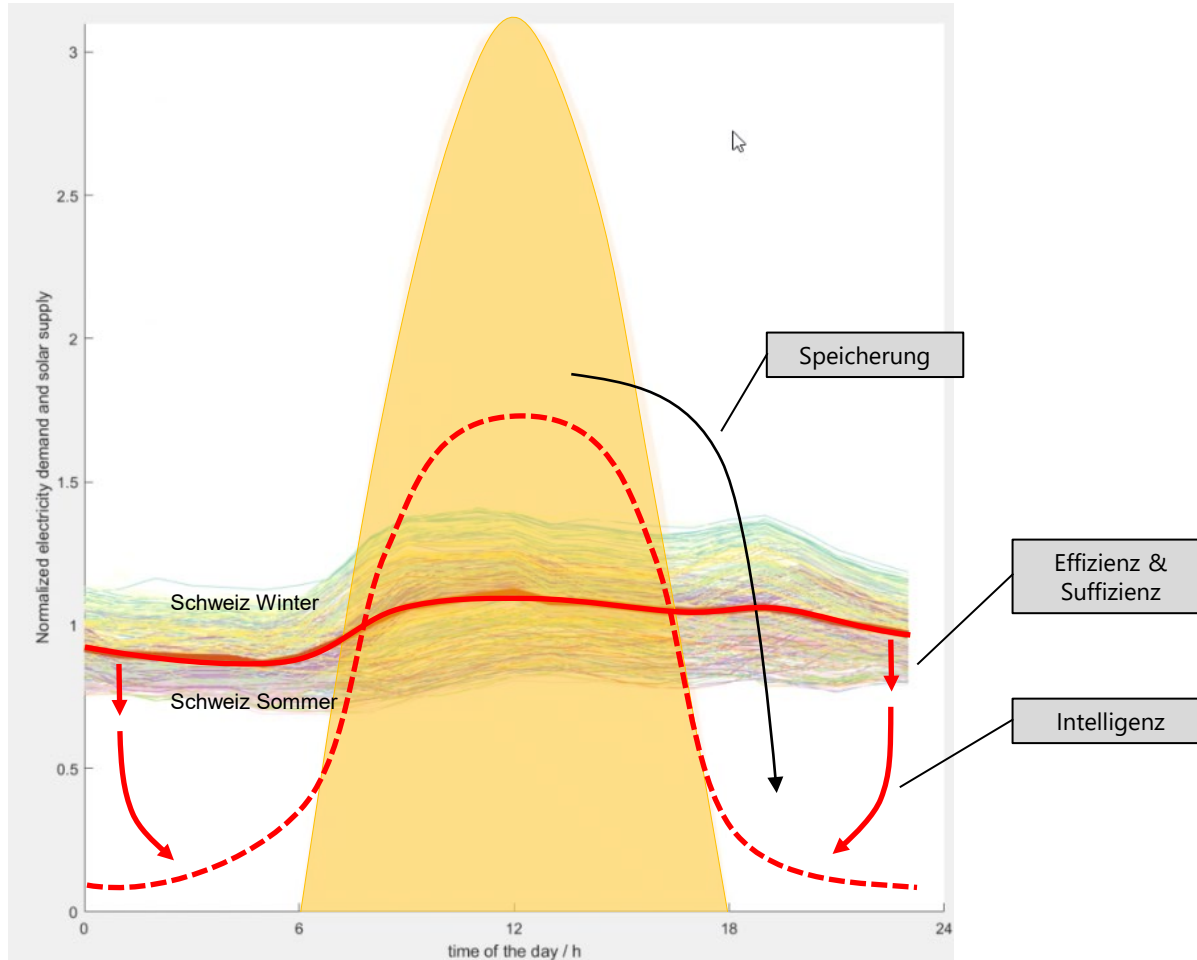
Tagesgang der Energienachfrage für ~170 Länder.  
Die meisten Länder sind 24h energiehungrig. **Folge des billigen Nachtstroms?**  
Mozambique ist am nächsten, Südrussland am weitesten  
entfernt von einer Sonnenblumen-Gesellschaft.



Tagesgang Elektrizitätsbedarf Schweiz über 365 Tage (2015).  
Sehr wenig Tageszeitschwankung.  
-> **Room for improvement!**

# Energie Angebot und Nachfrage

## ■ Optionen



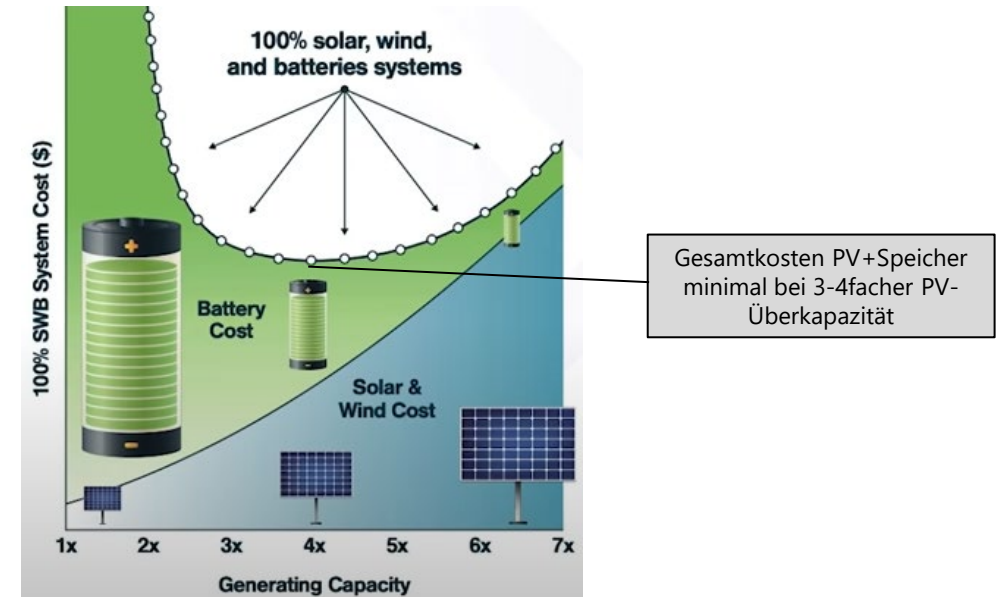
Tagesgang Elektrizitätsbedarf Schweiz über 365 Tage (2015)  
Bei diesem Nachfrageprofil müssten  
**~53% des Tagesbedarfs gespeichert** werden können.

Wie kann die Speicherung optimiert werden?

- **Effizienz & Suffizienz...**
- **Intelligenz:** Verschiebung des Stromkonsums, weniger in der Nacht, mehr am Tag -> Rundsteuerungen anpassen! Tarife!

Ohne Optimierung: Hoher Bedarf an PV- und Speicherkapazität.  
-> Wo liegt das Optimum? Nach welchem Kriterium?

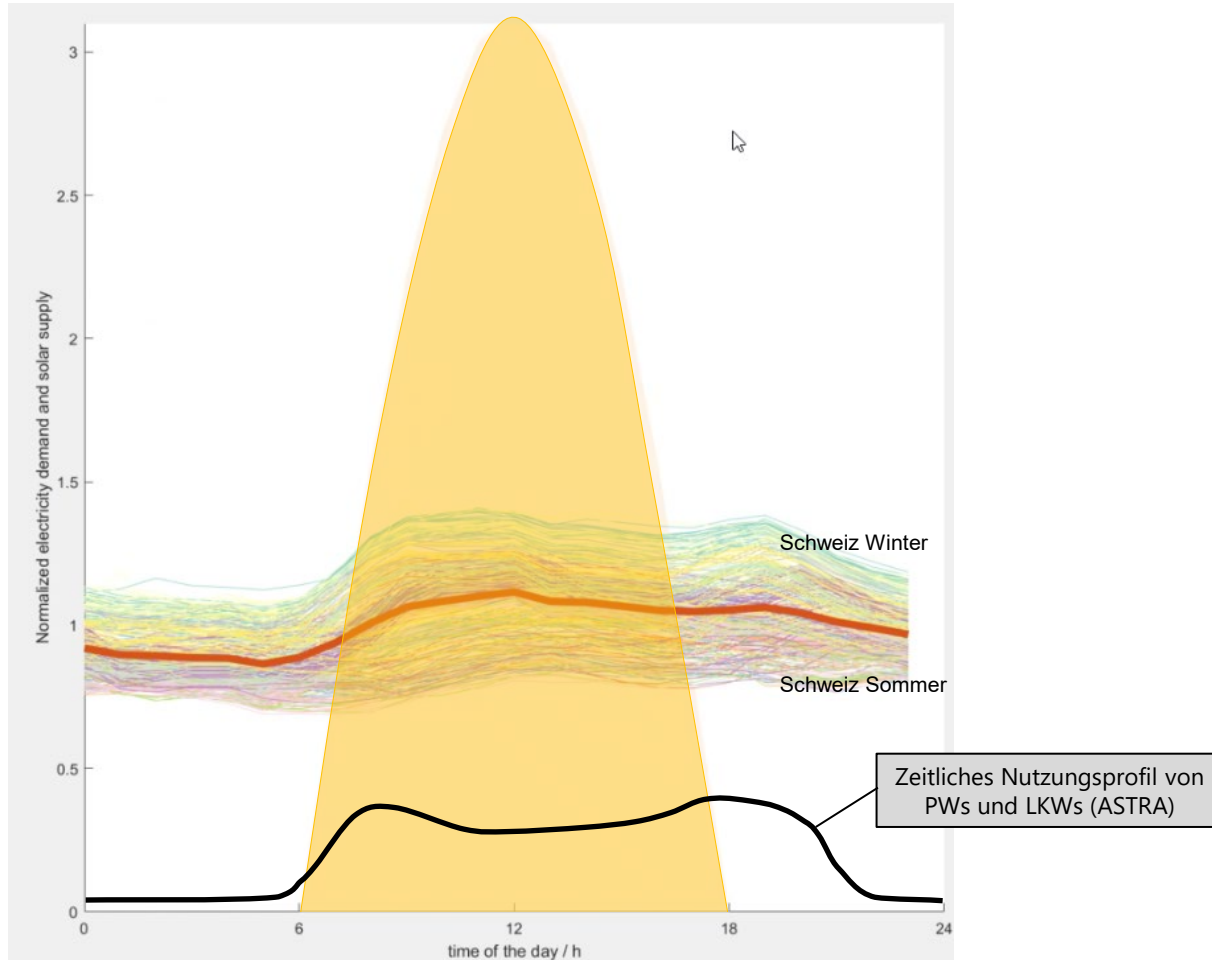
Nichtlinearer Zusammenhang zwischen PV-Produktion und Speicherung bei finanzieller Betrachtung:



Tony Seba, RethinkX, Prof. Stanford, "Clean Disruption of Energy and Transportation"

# Energie Angebot und Nachfrage

## ■ Wie passt die Mobilität in dieses Bild?



Tagesgang Elektrizitätsbedarf Schweiz über 365 Tage (2015)  
Bei diesem Nachfrageprofil müssten  
~53% des Tagesbedarfs gespeichert werden können.

### Personenwagen

- Fahrzeuge sind 23h-Stehzeuge  
-> Laden am Tag, zuhause und am Arbeitsplatz
- Anschluss bidirektional  
-> Nutzwertsteigerung, Fz sollen arbeiten, z.B. >30kWh für grid storage

### Schwerverkehr

- Fahrzeuge im Dauereinsatz, v.a. tagsüber  
-> Schnellladen beim Beladen/Entladen tagsüber  
-> über Nacht parkiert bei Verteilzentren  
Ladeleistung anpassen, damit z.B. um 6h voll

-> Gut geeignet für die Koppelung PV - Batterie - Ladestation

CH total Verkehr ca. 68 Mia.Fz.km/a, davon 28 Mia. Autobahn.  
Autobahn 28 Mia.Fz.km/a: Davon 1.6 Mia.km schwere Nutzfahrzeuge >3.5t ; 3.2 Mia.km für Lieferwagen bis 3.5t;  
23 Mia.km durch Personenwagen.  
Autobahnlänge total nur 3% der gesamten Strassenlänge, darauf 41% der Verkehrsleistung.  
38% der Autobahn-km alleine auf der A1 Genf-St.Margrethen.  
(Astra, Verkehrsflussbericht '19)



# Optionen für Mobilität

## Energie 'am Rad'

### ■ Grundprinzip (unabhängig von Antriebsart/Motor):

### Effizienz

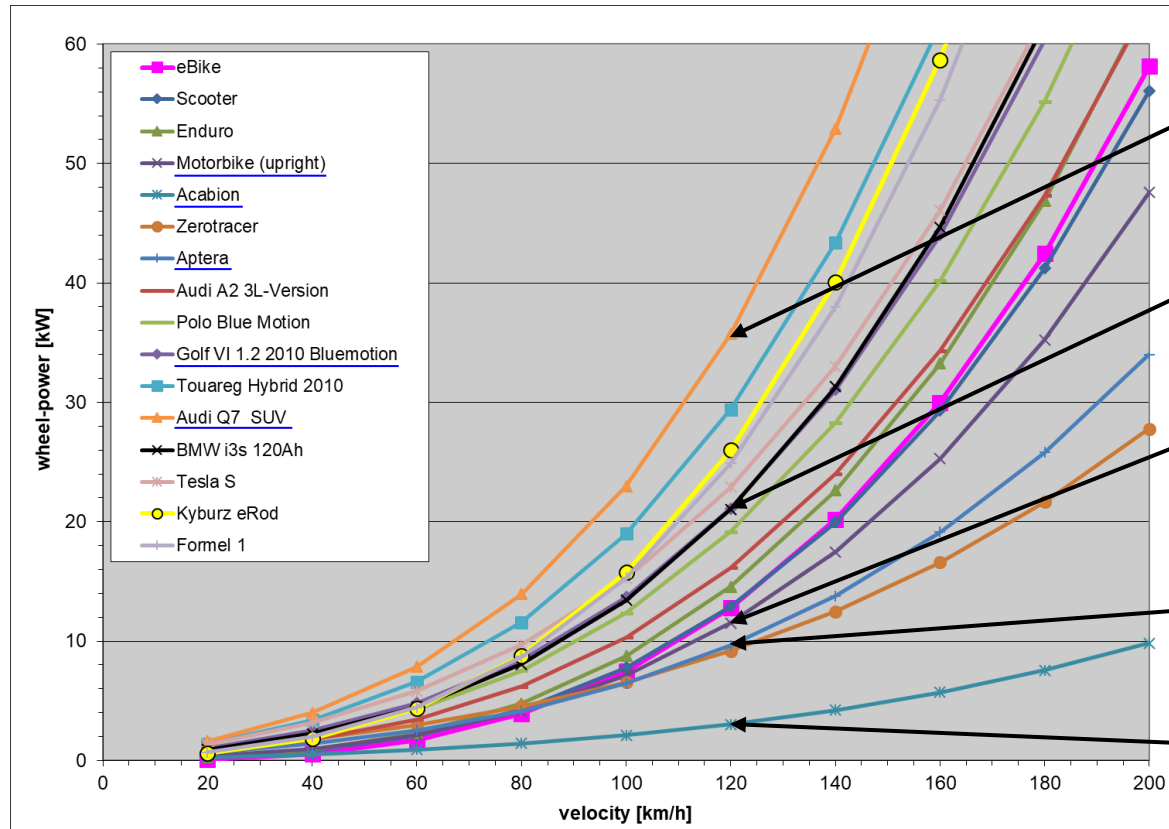
Der Energiebedarf eines Fahrzeugs ist von nur 4 Faktoren abhängig:

1. Masse
2. Frontfläche
3. Luftwiderstand
4. Rollwiderstand

kg ↓  
m<sup>2</sup> ↓  
c<sub>w</sub> ↓  
μ ↓



Isaac Newton's laws of motion and gravity 1687



36kW@120km/h  
**49PS** an den Rädern  
Audi Q7; c<sub>w</sub> \* A = 1.2



21kW@120km/h  
**29PS** an den Rädern  
Golf Bluemotion; c<sub>w</sub> \* A = 0.69



12kW@120km/h  
**16PS** an den Rädern  
Motorbike; c<sub>w</sub> \* A = 0.43

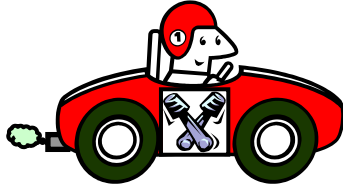


9.6kW@120km/h  
**13PS** an den Rädern  
Aptera, c<sub>w</sub> \* A = 0.27



3.0kW@120km/h  
**4.1PS** an den Rädern  
Acabion; c<sub>w</sub> \* A = 0.073

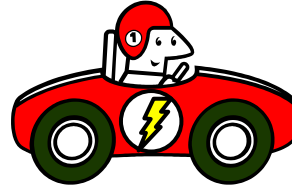
### Fossile und biogene Treibstoffe



#### Verbrennungsmotor (ICE)

- Fossile Treibstoffe:
  - Erdgas
  - Benzin
  - Diesel
- Biogas (Methan) aus:
  - Bioabfall (CH)
- Bioethanol (Alkohol) aus:
  - Zuckerrohr (BR)
  - Holzabfälle (CH)
- Biodiesel (Methylester) aus:
  - Palmöl (MY)

### Strom aus diversen Quellen



#### Elektroantrieb mit Batterie (BEV)

- Ökostrom CH (15 g/kWh (Dose))
- Nuklear CH (28 g/kWh (Dose))
- PV-Dach CH (82 g/kWh)
- Steckdosen-Mix CH (99 g/kWh)
- Strom aus modernem Gas-Kombikraftwerk (444 g/kWh)
- Steckdosen-Mix EU (ENTSO, 479 g/kWh)
- Kohlekraftwerk DE (1081 g/kWh)

### Mischformen, Hybridantriebe



#### Hybrid (HEV) 'Prius'

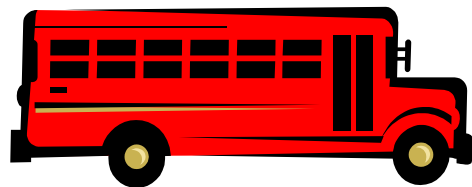
- Benzin
- Erdgas (Empa CLEVER)

#### Plug-In Hybrid (PHEV) 'Ampera'

- Steckdosen-Mix CH (99 g/kWh)
- Benzin

#### Brennstoffzelle (FC)

- Wasserstoff H<sub>2</sub>



- Umstieg auf andere Verkehrsmittel, z.B. **öffentlicher Verkehr** oder **Zweiräder**

#### Egal welcher Pfad, die grossen Fragen...

- ... schmal, leicht, windschlüpfrig, ...
- ... erneuerbare Energieträger
- ... verträgliche Materialien (elements of hope)
- ... hohe Recyclingtauglichkeit



# Optionen für Mobilität

## ■ Horizonterweiterung: **Es gibt nicht nur Strassen**

- Wieviele Kilogramm 'Vehikel' pro Person? Wieviel Graue Energie? Wieviel Energie für den Antrieb? Auslastung?

### Boden



**Motorrad:** 1 Person  
 100..200 kg ~150 kg/pro Person  
 kg/m<sup>2</sup>/c<sub>w</sub>/c<sub>r</sub> 150/0.75/0.60/0.02  
 bei 100 km/h 7.0 kWh/100km pro Person



**Auto:** 4 Personen  
 1.3..2.5 t ~500 kg/Person vollbesetzt  
 kg/m<sup>2</sup>/c<sub>w</sub>/c<sub>r</sub> 1'800/2.4/0.30/0.01  
 bei 100 km/h 3.4 kWh/100km pro Person



**Bus 12m:** 50 Personen  
 10..18 t ~300 kg/Person vollbesetzt  
 kg/m<sup>2</sup>/c<sub>w</sub>/c<sub>r</sub> 15'000/8.4/0.70/0.01  
 bei 100 km/h 2.5 kWh/100km pro Person



**Zug ICE 4** 918 Personen  
 736 t ~800 kg/Person vollbesetzt  
 kg/m<sup>2</sup>/c<sub>w</sub>/c<sub>r</sub> 736'000/10/0.25/0.0015  
 bei 100 km/h 0.6 kWh/100km pro Person

Auto bedeckt mit Solarzellen?  
 Sono Motors Sion Prototyp: Im Durchschnitt kann das Fahrzeug selbst Energie für ~15 km/Tag produzieren.

### Wasser

**Kreuzfahrtschiff:** 6'600 Personen  
 183'000 BRZ ~28'000 kg Vehikel pro Person  
 337 x 42m 62'000 kW Generatorleistung, 37'000 kW<sub>el</sub>.  
  
 Schätzung 45'000 kW<sub>Flüssiggas</sub> für 31 km/h  
 bei 31 km/h 22 kWh/100km pro Person



<https://www2.aida.de/kreuzfahrt/schiffe/aidanova#highlights>

### Luft

**Flugzeug:** Airbus A320 150 Personen  
 ~70 t ~500 kg/Person vollbesetzt  
 kg/m<sup>2</sup>/c<sub>w</sub>/c<sub>r</sub> 70'000/16/0.08/0.01  
 bei 100 km/h 1.5 kWh/100km pro Person  
 19'000 kg<sub>Kerosen</sub> (200'000 kWh) für 6'100 km Reichweite  
 bei 840 km/h 22 kWh/100km pro Person



<http://www.airplanepics.ch/Flugzeugtypen/A%20320-200.html>

# Optionen für Mobilität

## Energie in Wasser und Luft

### ■ Das Grundprinzip bleibt gleich: **Effizienz auf dem Wasser**

Der Aggregatzustand ändert sich, die Regeln bleiben gleich. Ausser: Der Auftrieb braucht zusätzlich Energie.

$\text{kg} \downarrow$   $\text{m}^2 \downarrow$   $c_w \downarrow$   $\mu \downarrow$

#### Wasser

Tragflügelboote (Hydrofoils) reduzieren die Reibung im Wasser, indem sie den Bootsumpf über die Wasseroberfläche heben und hohe Geschwindigkeiten zu erreichen. Renn-Segelboote nutzen diesen Effekt auch, z.B. im America's Cup.

Frachtschiffe nutzen den hohen Auftrieb von Wasser, um hohe Lasten zu transportieren, allerdings bei tiefen Geschwindigkeiten wegen der hohen Reibung.



<https://mechstuff.com/how-hydrofoils-work-advantages-and-disadvantages/>



<https://www.sail-world.com/news/223749/Americas-Cup-Te-Aihe-warms-up-on-the-Waitemata>



Source: imago images/Xinhua

Future-E Konzept: Top speeds 56 km/h. Bei 15 km/h startet die Anhebung, ab 30 km/h voller Foiling-Modus.

Candela C-8, Schweden: 8 Personen, 60-kWp zum starten, 44 kWh Batterie, max. 93km range, ab 30 km/h foiling bis 55 km/h, <50 kWh/100km, "reduce drag by up to 80%", 16 kW bei 40 km/h, lift to drag ratio of 17



<https://www.autoevolution.com/news/futur-e-hydrofoil-electric-boat-flies-on-water-like-a-supercar-oozes-sophistication-167701.html>



<https://www.autoevolution.com/news/candela-c-8-electric-boat-has-an-appetite-for-high-speeds-flies-silently-above-the-water-168141.html>

Containerfrachter	ca. 15-25 Knoten, 28-46 km/h
Öltanker	ca. 15 Knoten, 28 km/h
Kreuzfahrtschiff	ca. 15-21 Knoten, 28-39 km/h
Kursschiffe auf Seen	ca. 12 Knoten, max. 23 km/h

Könnte ein Frachtschiff aus dem Wasser gehoben werden?

# Optionen für Mobilität

## ■ Das Grundprinzip bleibt gleich: **Effizienz in der Luft**

Der Aggregatzustand ändert sich, die Regeln bleiben gleich. Ausser: Der Auftrieb braucht zusätzlich Energie.

**kg ↓ m<sup>2</sup> ↓ c<sub>w</sub> ↓ μ ↓**

### Luft

**Elektroflugzeuge** sind bereits in Entwicklung bzw. Umsetzung.  
 Eviation Alice, 12 Stk. bestellt durch DHL, Aug. 21, 2 x 640 kW Magni 650,  
 Reichweite 440 Nautical miles = **815 km** Zulassung plus Reserve  
 Geschwindigkeit 250 kts = 463 km/h, **9+1 Passagiere**,  
 Nutzlast 2500 lbs = 1134 kg

6.3 t Totalgewicht, davon 3.8 t Batterien mit 980 kWh (260 Wh/kg)  
 980 kWh / 815 km -> **~100 kWh/100km @ 463 km/h**  
 100 kWh/100km / 10 Passagiere -> **10 kWh/100km** pro Passagier



Source: [www.eviation.co](http://www.eviation.co) <https://www.electrive.com/2018/02/15/eviation-aircraft-sets-sights-kokam-batteries/>

- Ein Elektroflugzeug ist pro Person etwa gleich effizient wie ein Elektroauto mit 2 Personen.

### Trend: VTOL Vertical takeoff and landing

Es wäre ein grosser Fortschritt, nicht auf Flugplätze mit langen Landebahnen angewiesen zu sein. Deshalb gehen verschiedene Entwicklungen in Richtung moderner Helikopter.

Prinzip: Ähnlich wie Drohnen.

Einsatzbereich: Kürzere Strecken, '**Flugtaxis**' in urbanen Regionen.

Das Starten und Landen ohne Landebahn braucht viel Energie, deshalb sind VTOL's eher für kürzere Strecken geeignet.

Wann werden klassische Helikopter abgelöst?



Source: [www.lilium.com](http://www.lilium.com)

- Mit modernen Elektroantrieben werden Konzepte möglich, die früher undenkbar waren.

# Take home...

- **Energie** -> **Erneuerbar**
- **Rohstoffe** -> **Elements of hope, schlanke Autos, gutes Recycling**
- **Treibstoffe** -> **verschiedene, aber:**
  - \* Kürzere und mittlere Strecken (100km?):
    - *Vorwiegend Strom, je mehr erneuerbar desto besser*
  - \* Langstrecken (100'e km?):
    - *Fossile Treibstoffe und 'gute' Biotreibstoffe (aus Reststoffen)*
    - *Ev. aus Wasserstoff abgeleitete Treibstoffe ("Stromüberschuss"?)*
    - *Strom! 2035: 600km mit 300kg-Batterie*
  - \* Flugzeuge (1000'e km):
    - *Fossile Treibstoffe und 'gute' Biotreibstoffe (aus Reststoffen)*

Der Strombedarf der Elektrifizierung der gesamten CH-Mobilität würde ca. **20% des heutigen Strombedarfs** (~65 TWh) betragen. Dafür spart man 100% des heutigen Benzin/Dieserverbrauchs.

- > Der Strom **muss und kann** aus **erneuerbaren Quellen** stammen.
- > Herausfordernd ist die **Speicherung** über längere Zeit.

**Merci**

rolf.widmer@empa.ch,  
marcel.gauch@empa.ch  
Technology & Society Lab @ Empa