



Hochschule  
München  
University of  
Applied Sciences

# Sonnenbatterie und Windstrom

## Energiespeicher für nachhaltige Energiesysteme

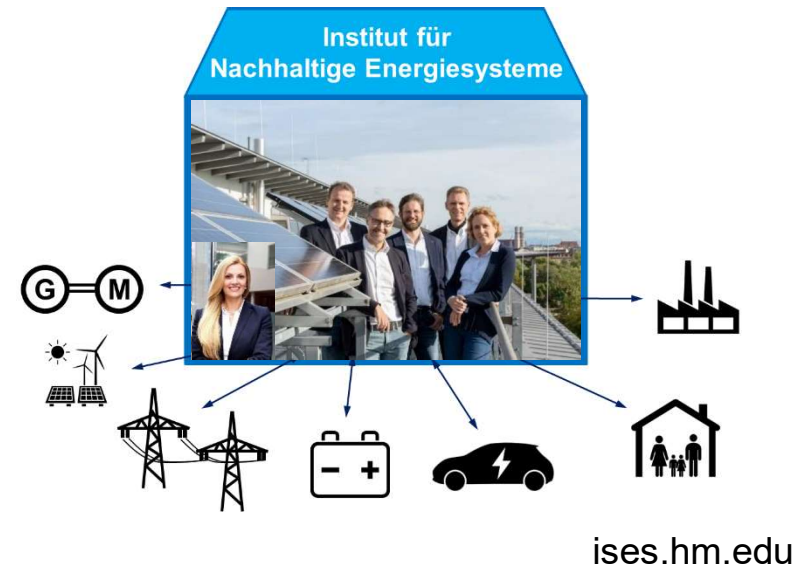
HM-Lectures for Future  
Prof. Dr.-Ing. Oliver Bohlen  
9. November 2020

HM

 ISES

# Agenda

- Nachhaltigkeit
- CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Bedarf an Speichersystemen
- Speichersysteme
- Wasserstoff und Power-to-X
- Nachhaltige Energieversorgung
- Fazit und Diskussion



## Nachhaltig philosophisch

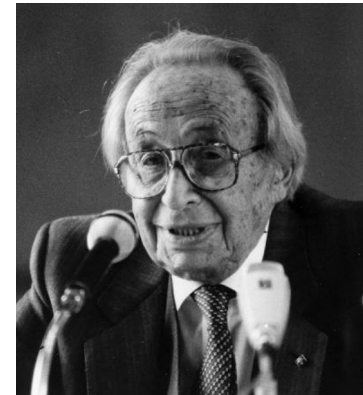
„Handle nur nach derjenigen Maxime, durch die du zugleich wollen kannst, dass sie ein allgemeines Gesetz werde.“

Immanuel Kant: Grundlegung zur Metaphysik der Sitten, 1785



„Handle so, daß die Wirkungen deiner Handlung verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden“; [...].“

Hans Jonas: Das Prinzip Verantwortung, 1984



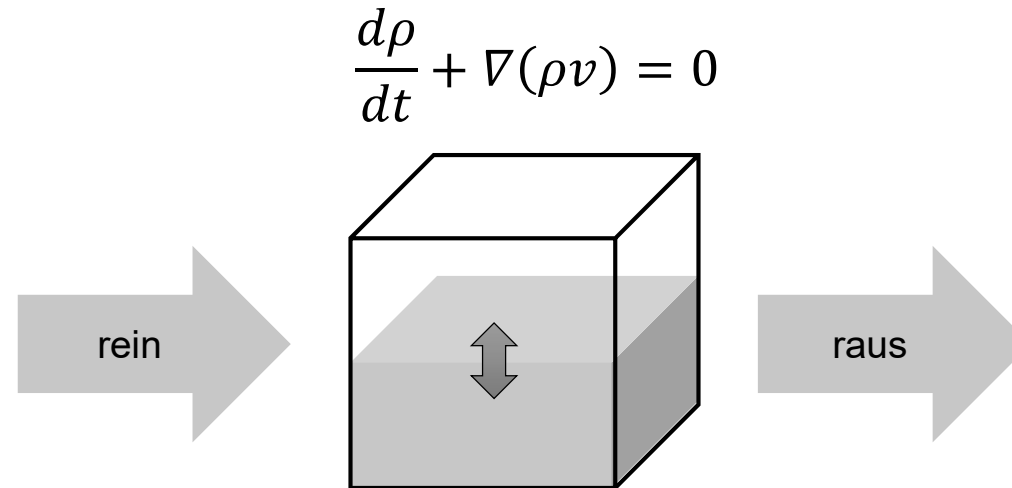
Bildquellen: Wikipedia, J. G. Becker;  
Marius Sobolewski

## Nachhaltig technisch

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla(\rho v) = 0$$

Kontinuitätsgleichung = Massenerhaltung

## Nachhaltig technisch



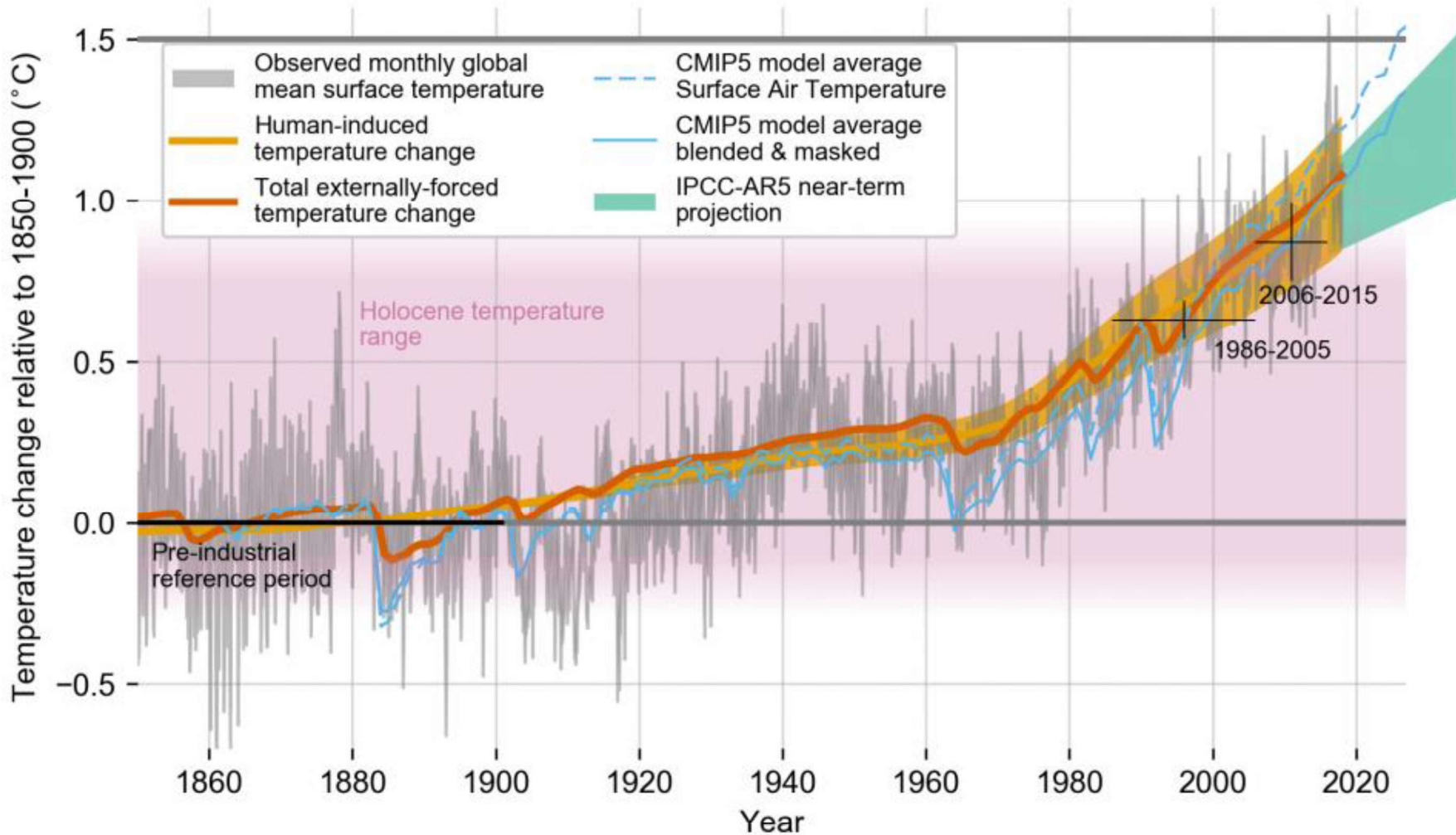
Nachhaltig:  $\frac{d\rho}{dt} = 0$  (also: „rein = raus“) für  $t \rightarrow \infty$  (theoretisch)

Praktisch: für geeignete Zeiträume:

**Renewable Energy (RE)** is energy that is collected from renewable resources, which are *naturally replenished on a human timescale*, such as sunlight, wind, rain, tides, waves, and geothermal heat.

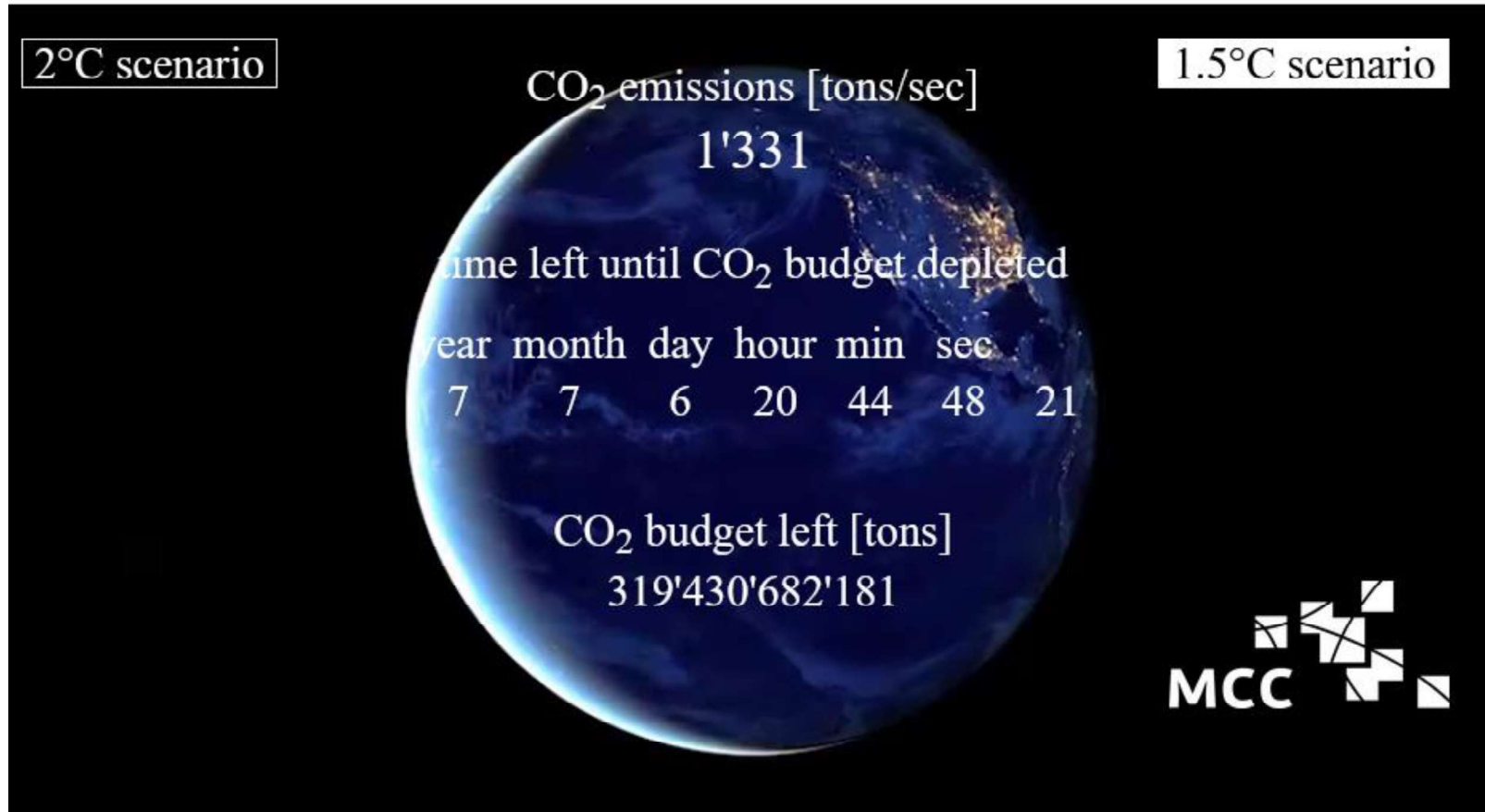
Ellabban, Omar; Abu-Rub, Haitham; Blaabjerg, Frede (2014). "Renewable energy resources...," Renewable and Sustainable Energy Reviews. 39: 748–764 [749]

# Klimawandel findet statt!

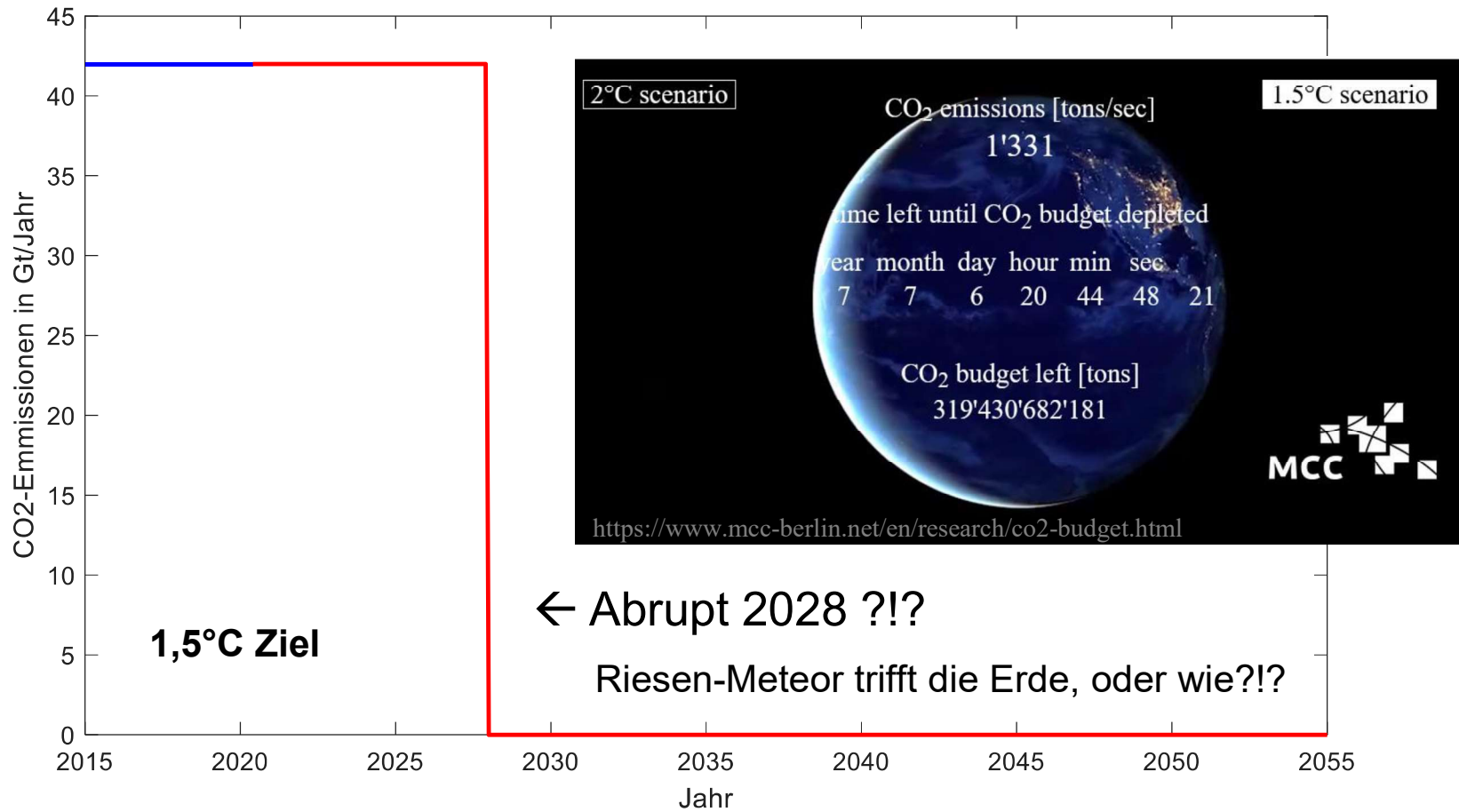


Quelle: IPCC, <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-1/1-2/1-2-1/1-2-1-1/figure-1-2/>

# Exkurs: Wann CO<sub>2</sub>-Emissionen stoppen?

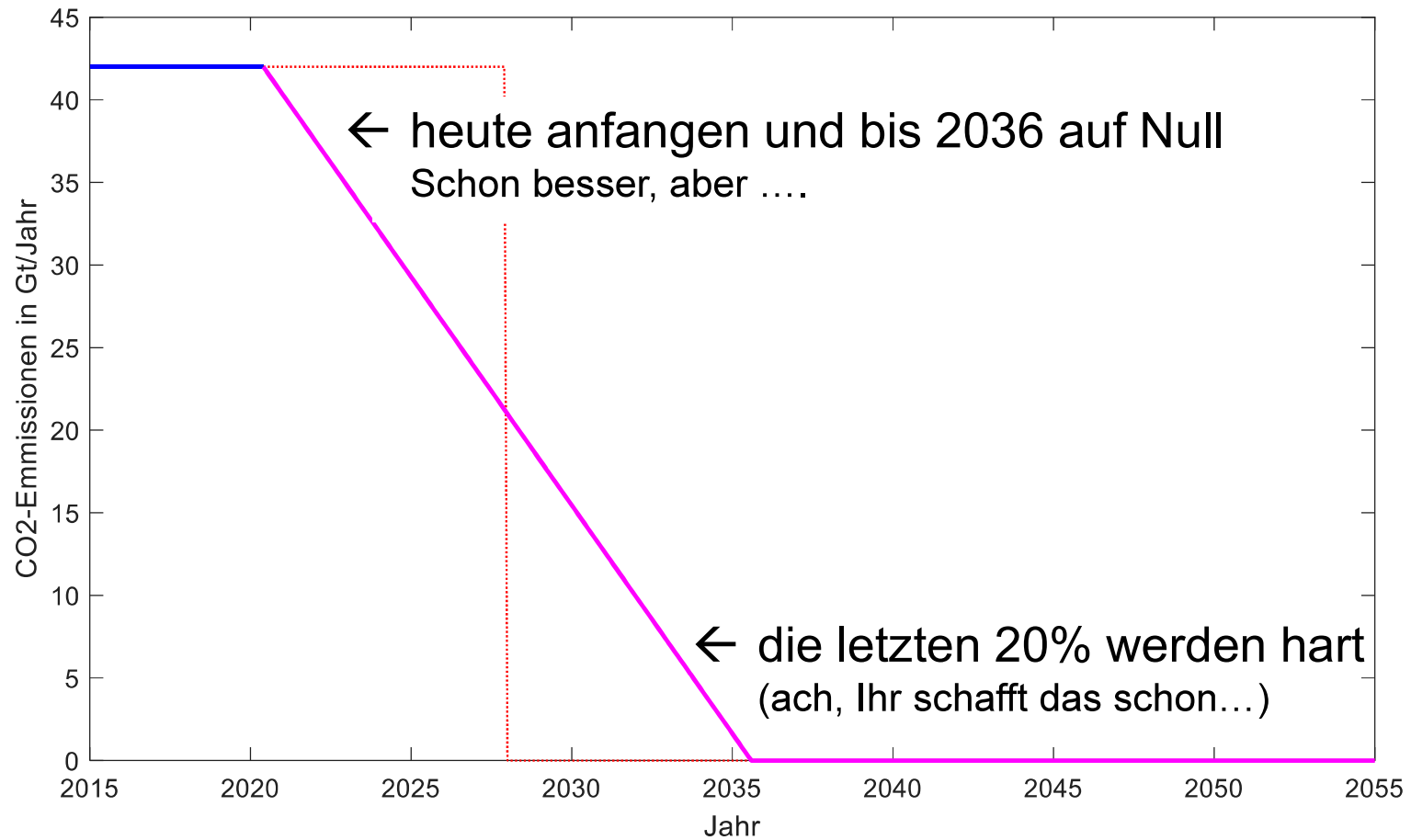


# Exkurs: Wann CO<sub>2</sub>-Emissionen stoppen?

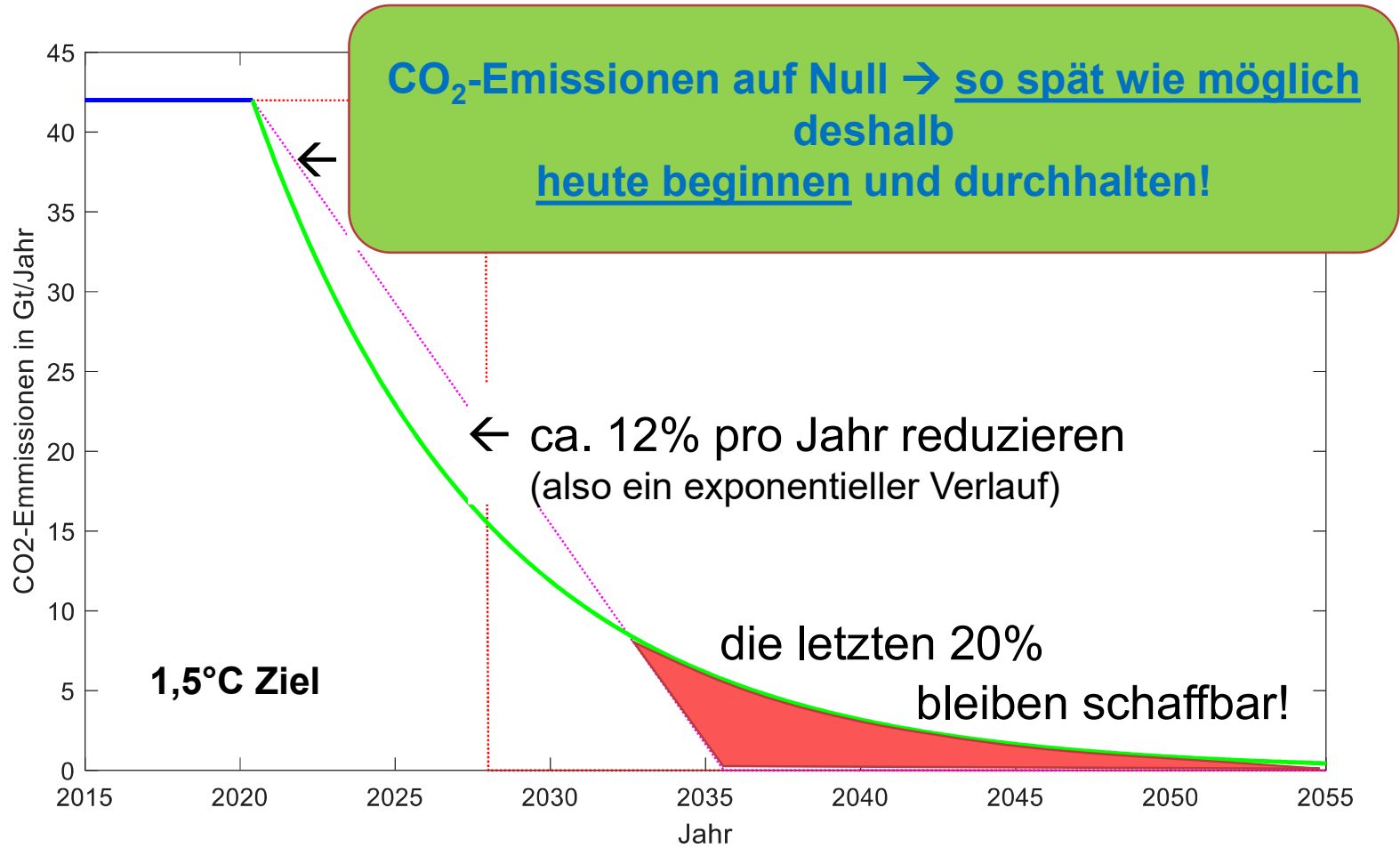




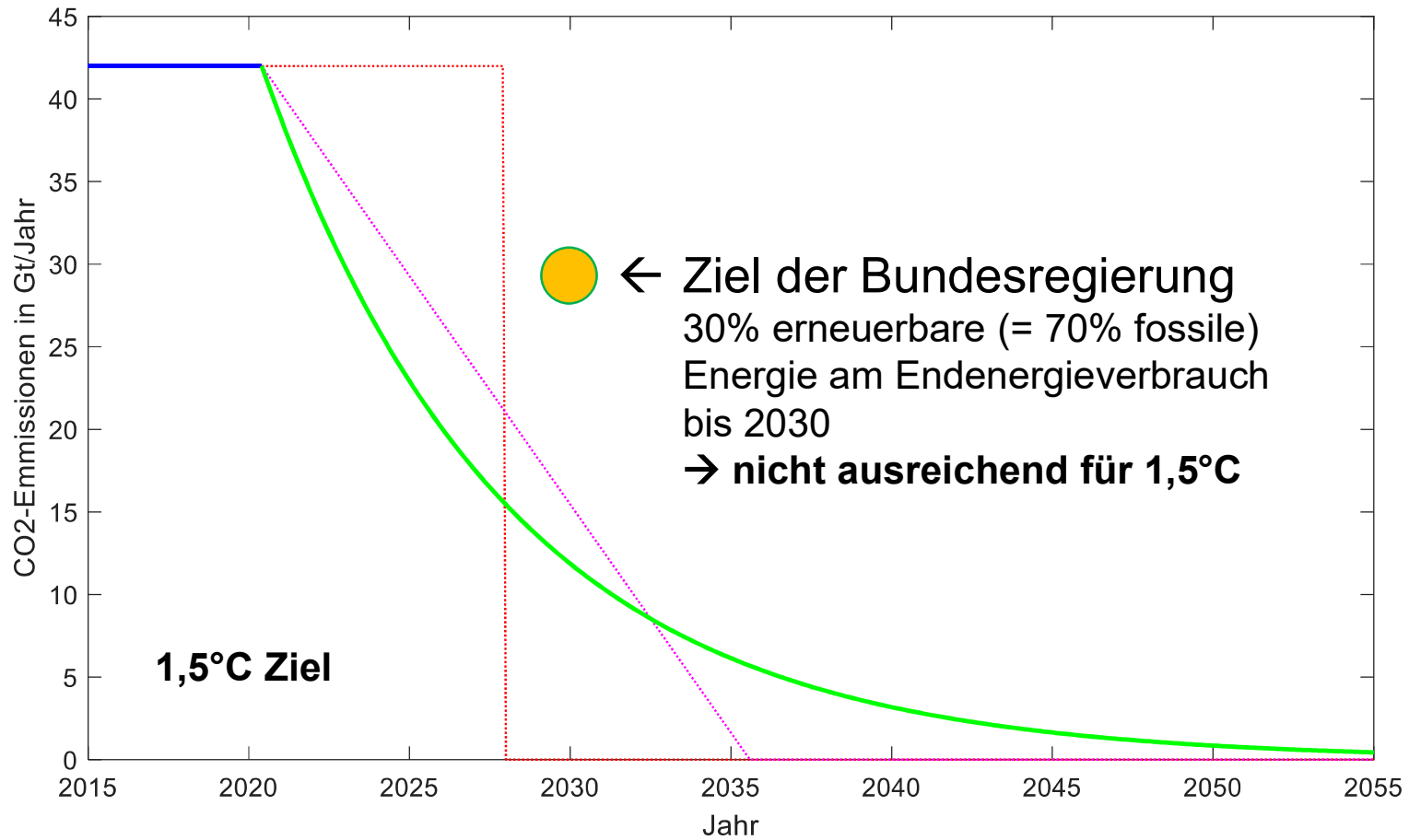
# Exkurs: Wann CO<sub>2</sub>-Emissionen stoppen?



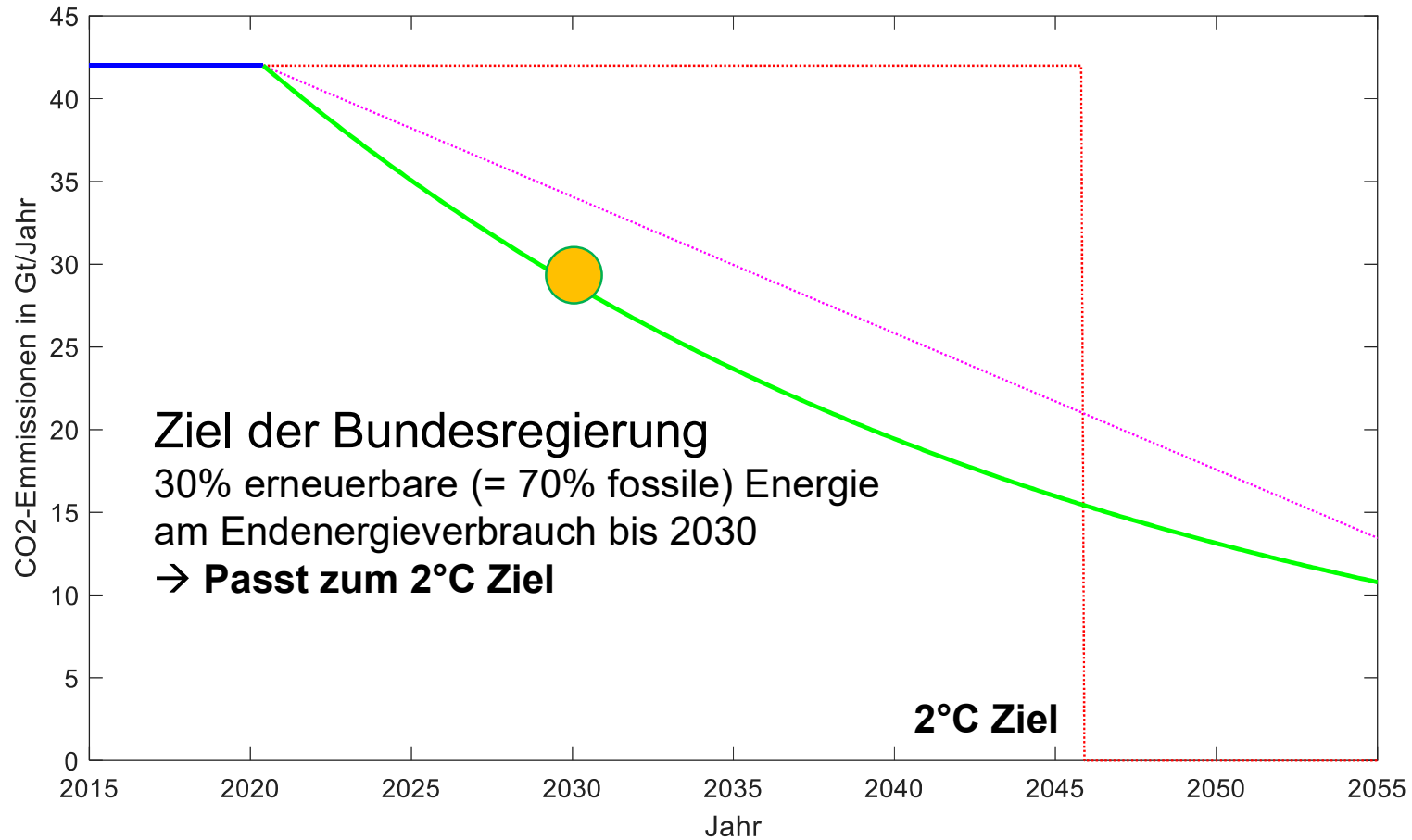
# Exkurs: Wann CO<sub>2</sub>-Emissionen stoppen?



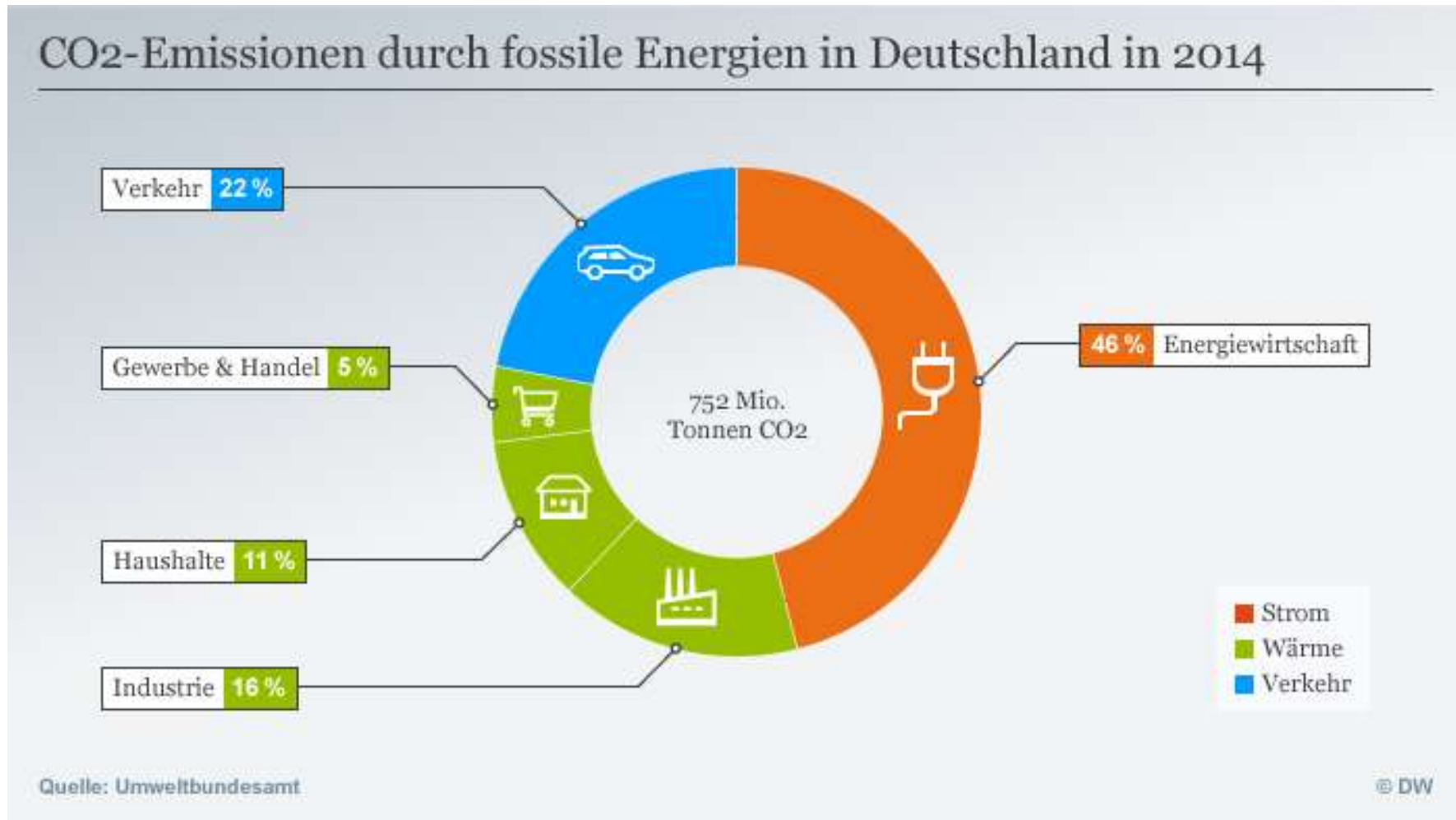
# Exkurs: Wann CO<sub>2</sub>-Emissionen stoppen?



# Exkurs: Wann CO<sub>2</sub>-Emissionen stoppen?



# Anthropogene CO2-Erzeugung



# Wozu brauchen wir Energiespeicher in der Stromversorgung?

Heute

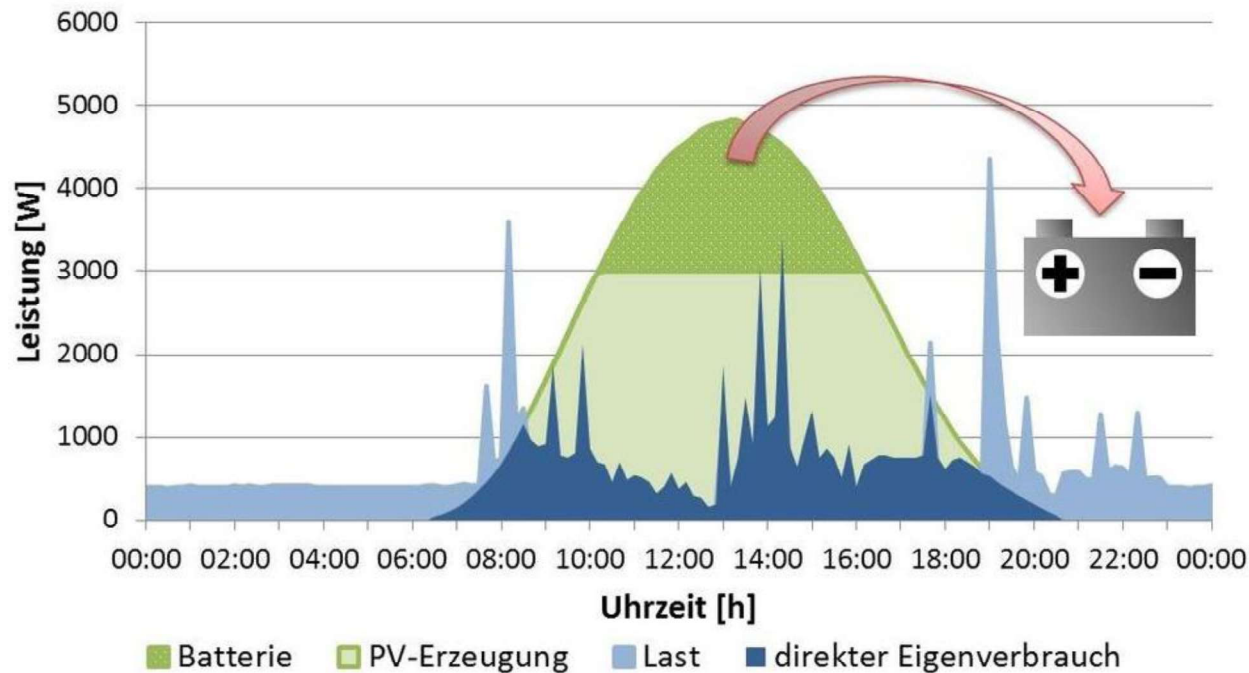
- Netzstabilisierung (Primärregelleistung)
- Sekundär und Minutenreserve (z.Z. Pumpspeicher-KWs)
- Privat: Eigenverbrauchserhöhung der PV-Anlage
- → eher kurze Speicherzeiten, Batterien

Zukünftig bei hohem Anteil Regenerative

- Überbrücken von Dunkelflauten
- Ausgleich saisonaler Schwankungen
- → hohe Speicherzeiten, Pumpspeicher-KWs, Power2Gas etc.

## Regenerative Energien – Beispiel Heim-PV

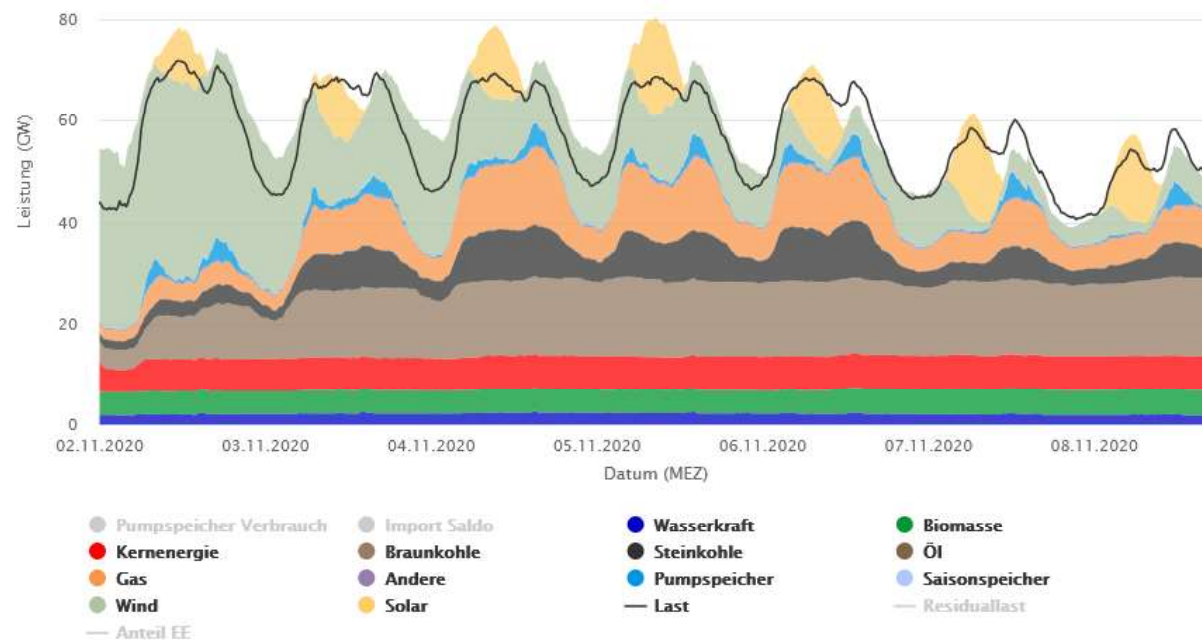
- Stromproduktion und -verbrauch nicht immer zusammen
- Speicher erhöht Eigenverbrauch Ausgleich
- Netzentlastung bei geeigneter Regelung



Quelle: [www.speichermonitoring.de](http://www.speichermonitoring.de)

# Regenerative Energien – Stromversorgung BRD

- Schwankungen Wind- und Sonnenstrom unterschiedlich
- Ausgleich bisher durch konv. Kraftwerke und Verbundnetz
- Bedarf Lang- und Kurzzeitspeicher bei hohem RE-Anteil



Energy-Charts.info; Datenquelle: 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, EEX, ENTSO-E; Letztes Update: 09.11.2020, 10:22 MEZ

Quelle: [www.energy-charts.de](http://www.energy-charts.de)



## Wie viel Speicher braucht die Energiewende?

Dr. Björn Peters, Ressortleiter Energiepolitik beim Deutschen Arbeitgeberverband (DAV) [...] kommt zu dem Schluss, dass der gesamte Speicherbedarf somit bei 270 TWh liegt.

Wie viele Stromspeicher braucht die Energiewende? Dr. Klaus Decken, 23. Mai 2017, <https://energyload.eu>

**Sehr fraglich !!!**

Der Nettostromverbrauch in Deutschland beträgt im Jahr 2019 rund 512 Terawattstunden. Der Nettostromverbrauch bezeichnet die vom Verbraucher genutzte elektrische Arbeit nach Abzug des Eigenbedarfs der Kraftwerke und der Übertragungs- bzw. Netzverluste.

© Statista 2020, A. Breitkopf, 18.03.2020

Auch bei hohen EE-Anteilen an der Stromerzeugung (ca. 90% in Deutschland und über 80% in Europa) kann bei Flexibilisierung von Erzeugung und Nachfrage der notwendige Ausgleich weitgehend ohne zusätzliche Stromspeicher geschafft werden.

Dabei ist der Anteil abgeregelter EE-Erzeugung mit ca. 1% gering.

Roadmap Speicher, Fraunhofer IWES, 2014 Wie viele Stromspeicher

# Speicherbedarf Deutschland – Metastudie 2018

F. Cebulla et al. / Journal of Cleaner Production 181 (2018) 449–459

4

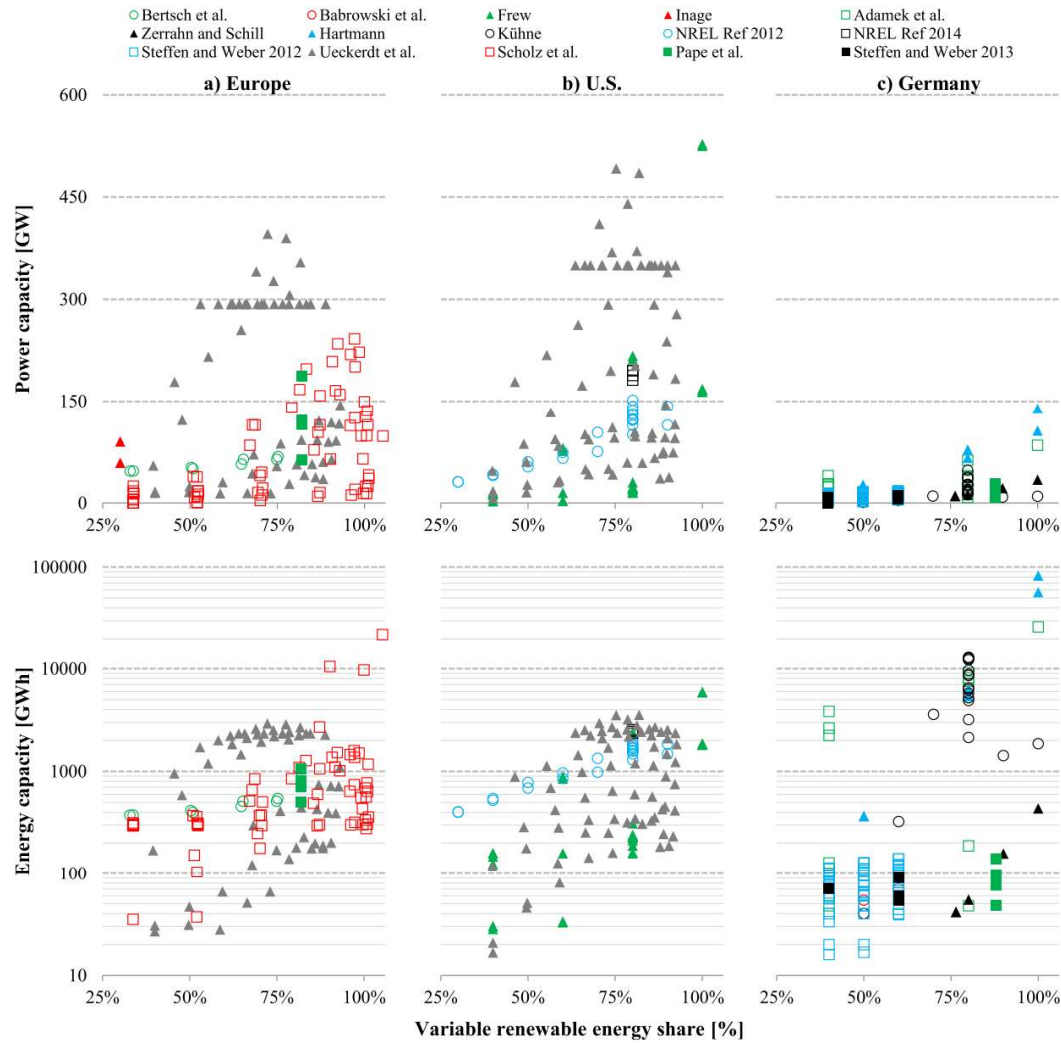
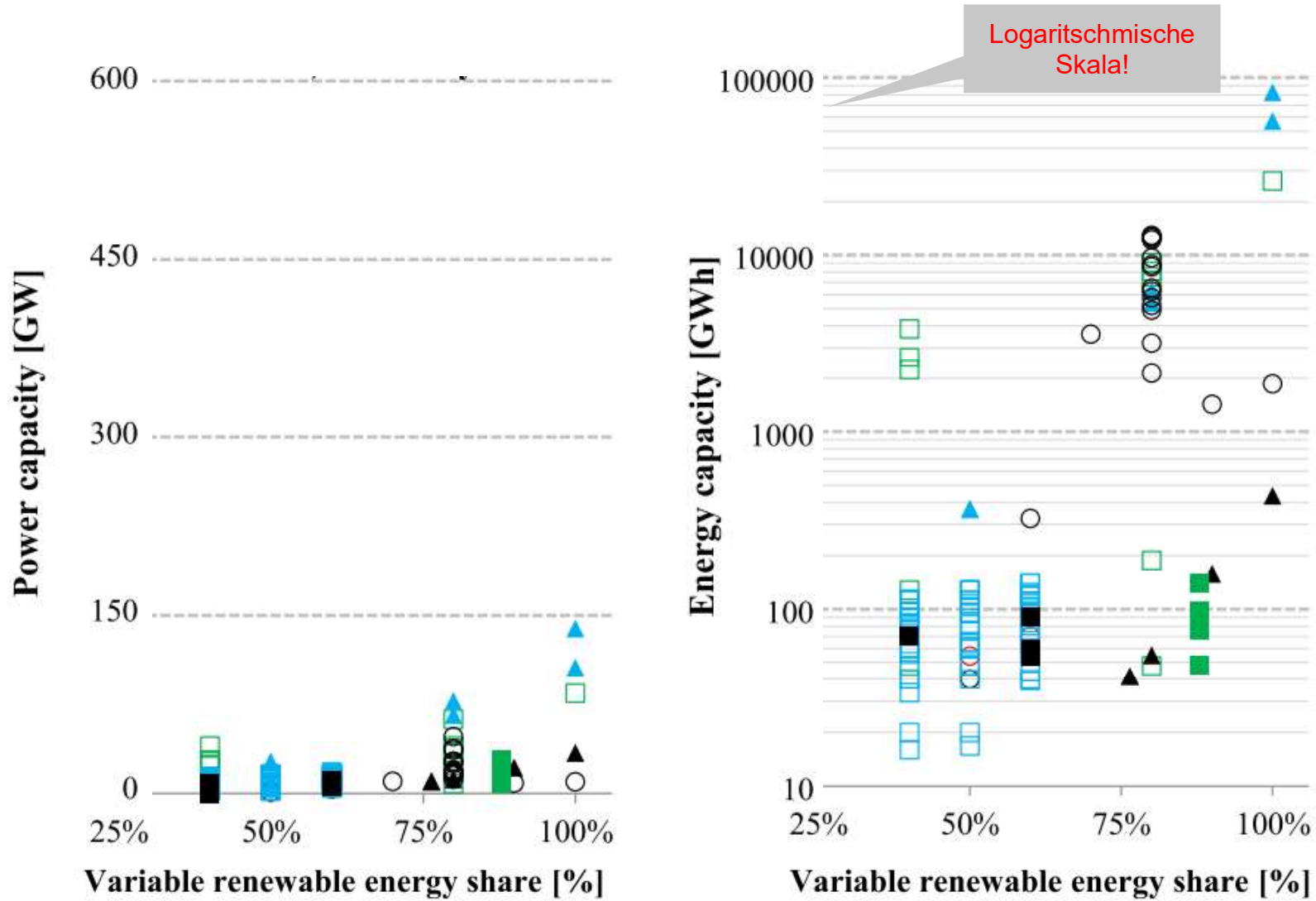


Fig. 1. Requirement of EES power capacity [GW] and energy capacity [GWh].<sup>5</sup> Note that the energy capacity is depicted on a logarithmic scale.

# Speicherbedarf Deutschland – Metastudie 2018



F. Cebulla et al. / Journal of Cleaner Production 181 (2018) 449–459

# Speicherbedarf vs. Abregeln

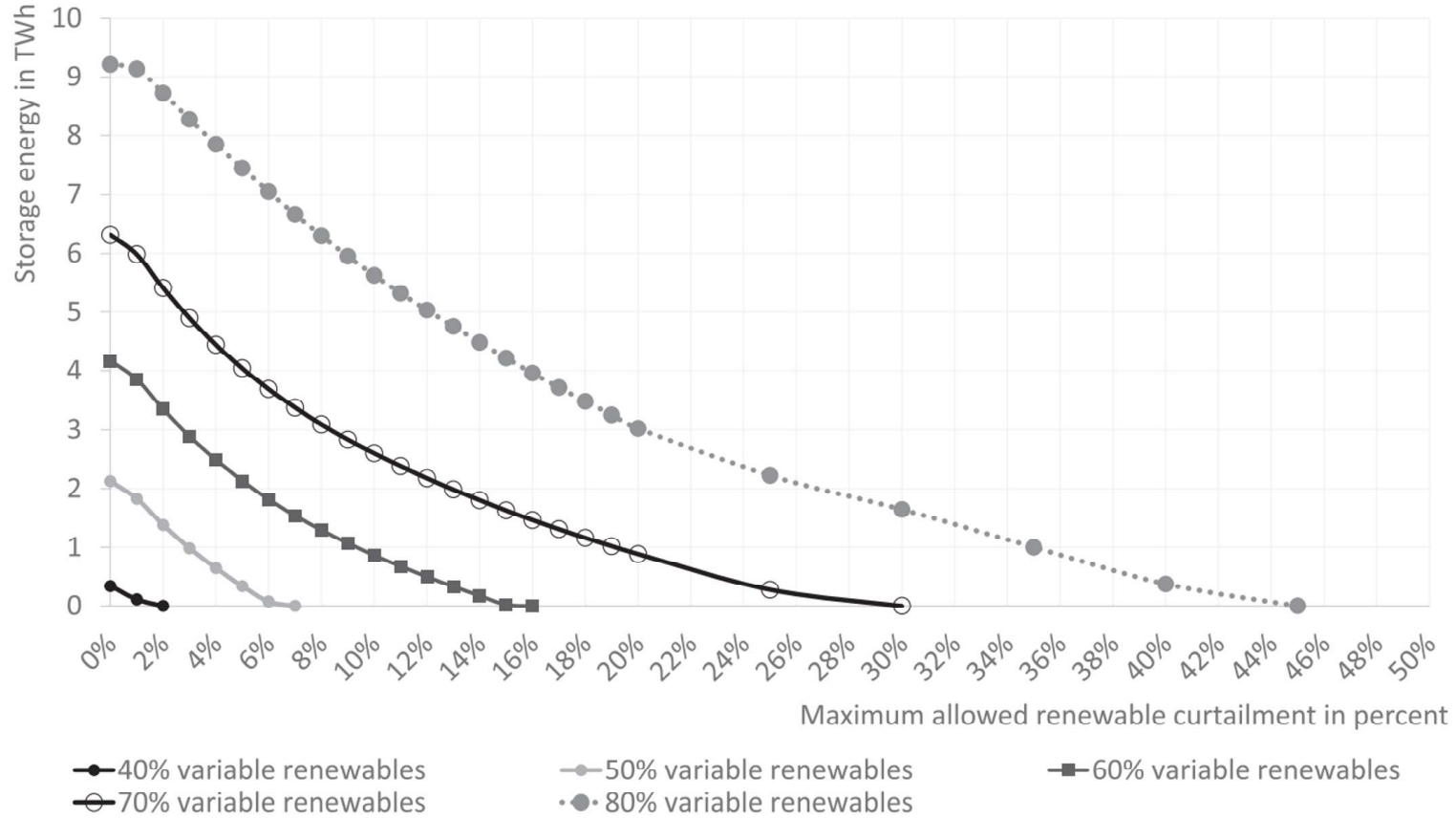


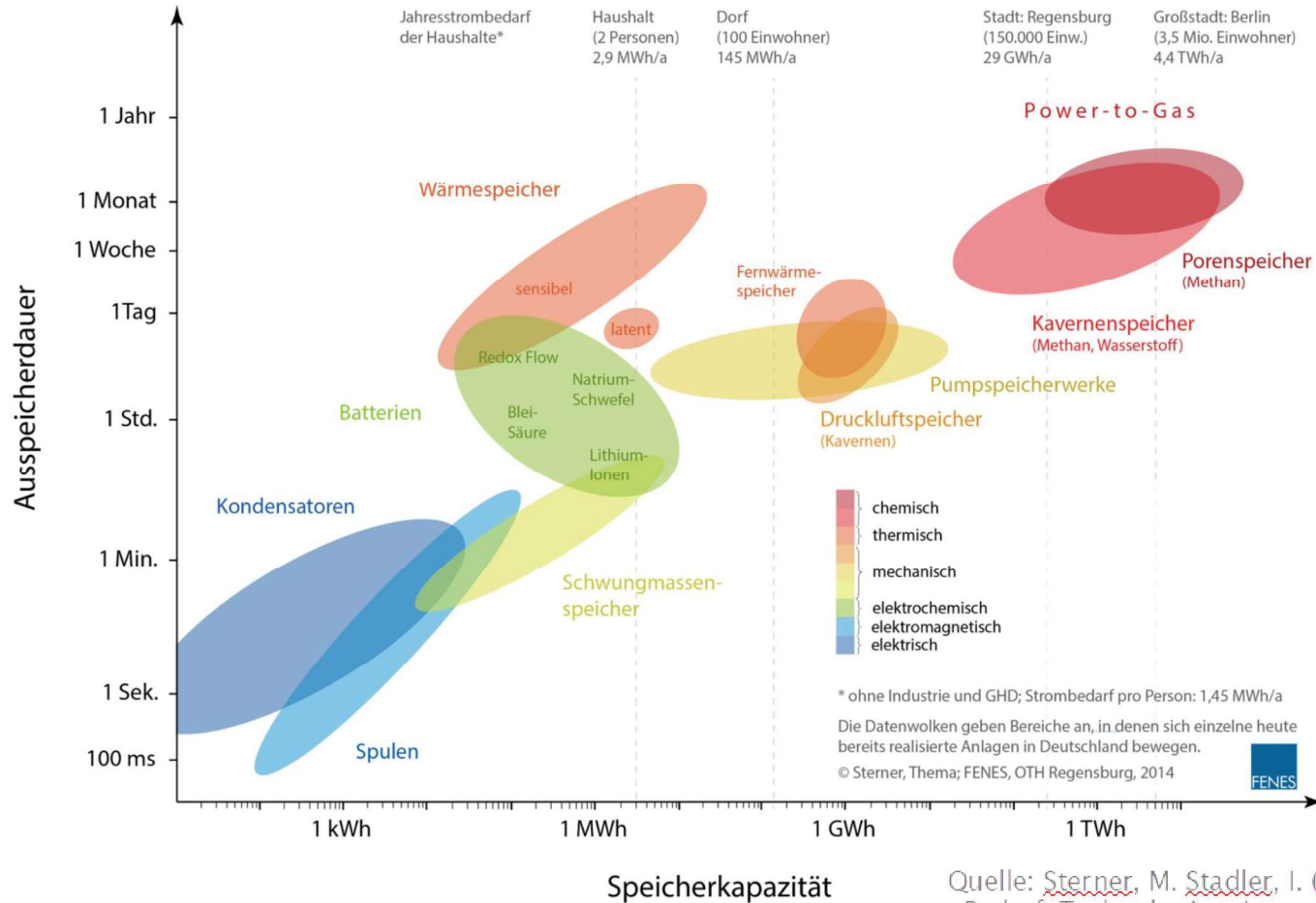
Fig. 6. Storage energy requirements substantially decrease when power-oriented curtailment of renewable electricity is allowed.

## Wie viel Speicher braucht die Energiewende?

- Leistungsbedarf steigt etwa linear mit dem Anteil erneuerbarer Energien.
- Energiebedarf steigt etwa exponentiell mit dem Anteil erneuerbarer Energien.
- Unterschiedliche Annahmen in den Randbedingungen wie
  - Abregelung
  - Energiehandel
  - Wetterprognosen
  - Anteil steuerbarer erneuerbarer Energien
  - Ökonomische und politische Randbedingungenhaben massiven Einfluss auf die resultierenden notwendigen Speicherbedarfe
- Energiespeicher sind teuer und Langzeitspeicher haben geringe Wirkungsgrade, daher gilt:

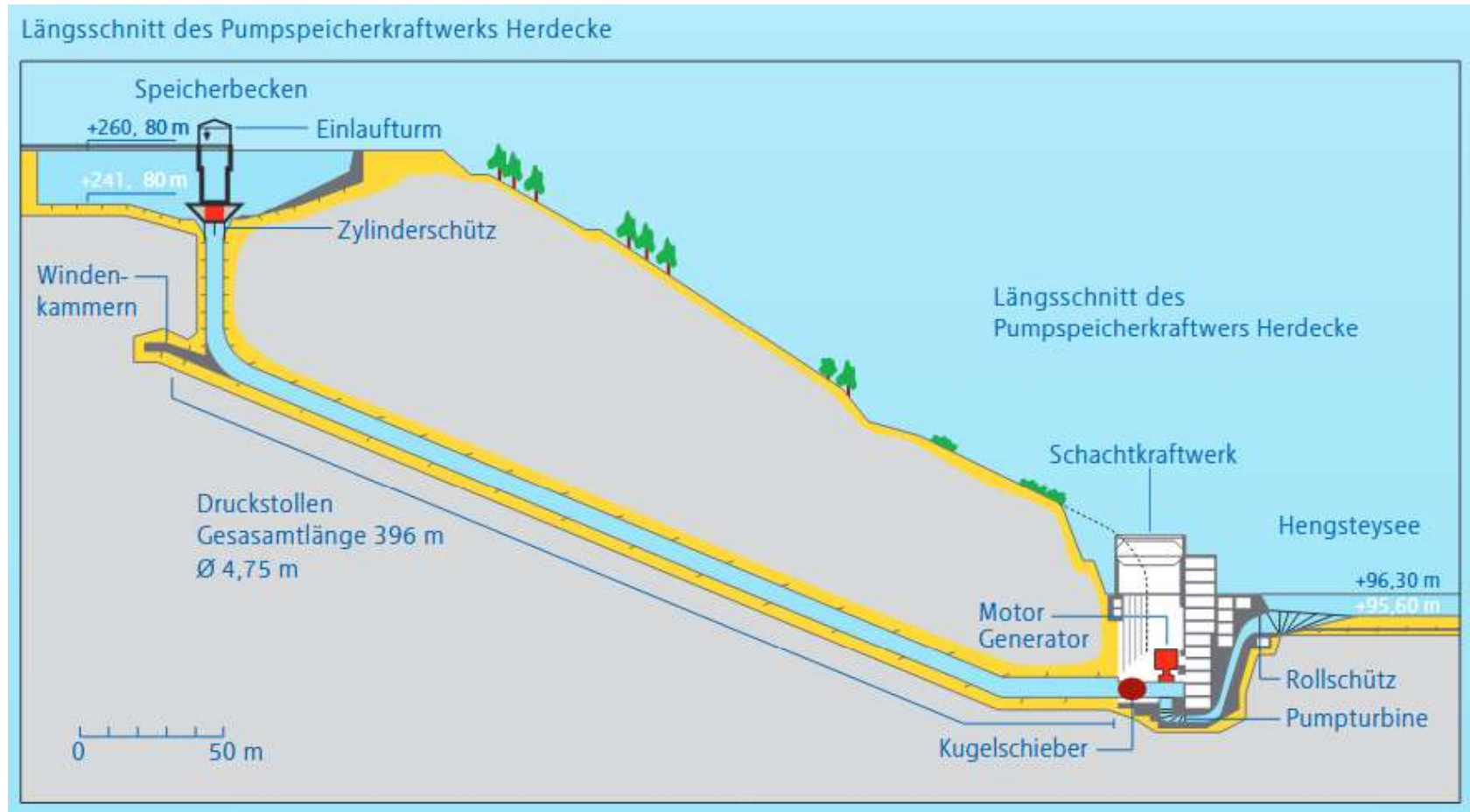
**So viel Speicher wie notwendig, aber so wenig wie möglich!**

# Welche Speicher braucht die Energiewende?



Quelle: Sterner, M., Stadler, I. (ed.) Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2014

# Pumpspeicherkraftwerk



# Pumpspeicherkraftwerke

- Pumpspeicherkraftwerke sind **der** relevante Energiespeicher in Netzen heute
- Traditionell eingesetzt zur Bereitstellung Regelleistung
- (+) guter Wirkungsgrad (70 – 85%), schnelle Ansprechzeit (60 – 120 s), erprobte & langlebig, unabhängige Dimensionierung P&E, daher rel. geringe Kosten pro kWh
- (-) sehr lange Planungszeiten, begrenzte geographische Möglichkeiten

Table 2: Stationary energy storage power capacity by technology type and country, operational by mid-2017

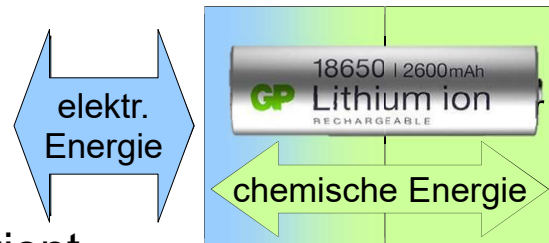
	Electro-mechanical	Electro-chemical	Thermal storage	Pumped hydro storage	Grand total (GW)
China		0.1	0.1	32.0	32.1
Japan		0.3		28.3	28.5
United States	0.2	0.7	0.8	22.6	24.2
Spain	0.0	0.0	1.1	8.0	9.1
Germany	0.9	0.1	0.0	6.5	7.6
Italy		0.1	0.0	7.1	7.1
India		0.0	0.2	6.8	7.0
Switzerland	0.0	0.0		6.4	6.4
France	0.0	0.0	0.0	5.8	5.8
Republic of Korea		0.4		4.7	5.1
Grand total (GW)	1.1	1.6	2.3	128.1	133.1

Source: US DOE, 2017.



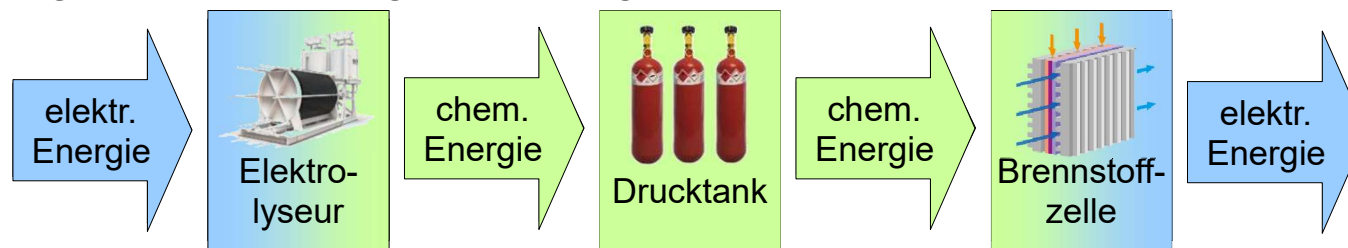
# Elektrochemische Langzeit- und Kurzzeitspeicher

- Batterien als Kurzzeitspeicher



- Kompakt und effizient
- Schlecht geeignet für sehr große Energiemengen und Speicherdauern

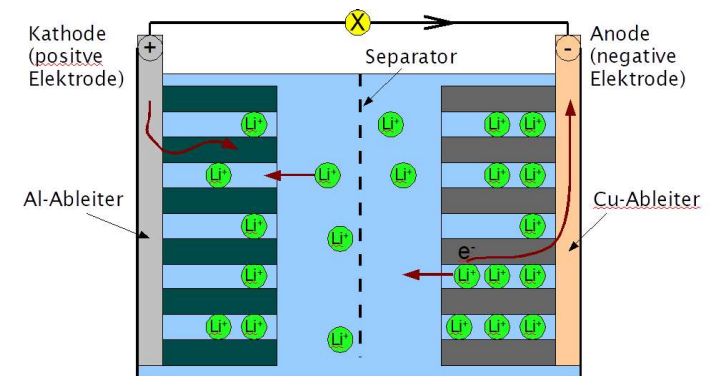
- Langzeitspeicherung: Trennung von Wandler und Speicher



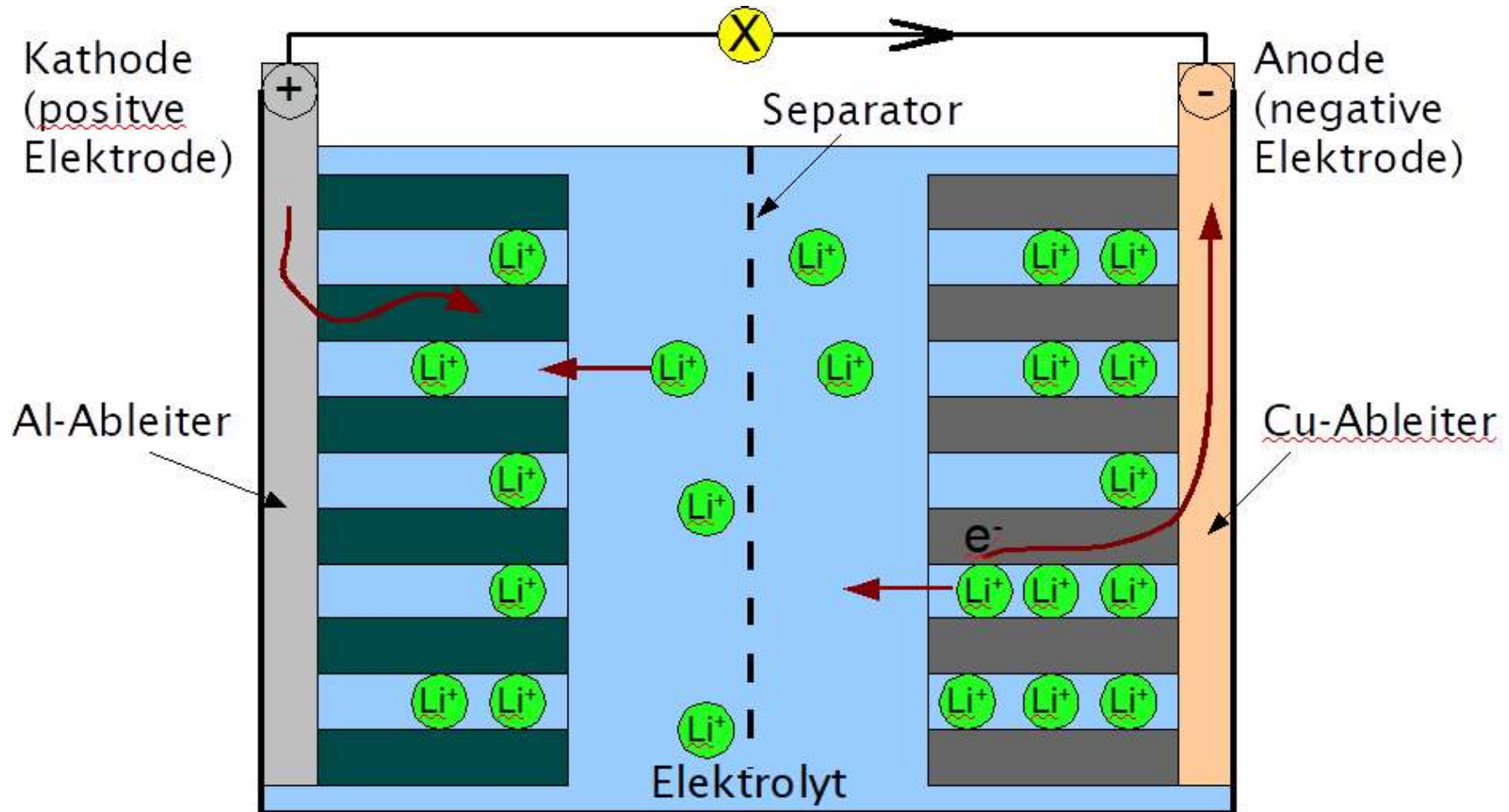
- Energiekosten skalieren nur mit Speichereinheit und -medium
- Wirkungsgradkette problematisch

# Batteriespeicher

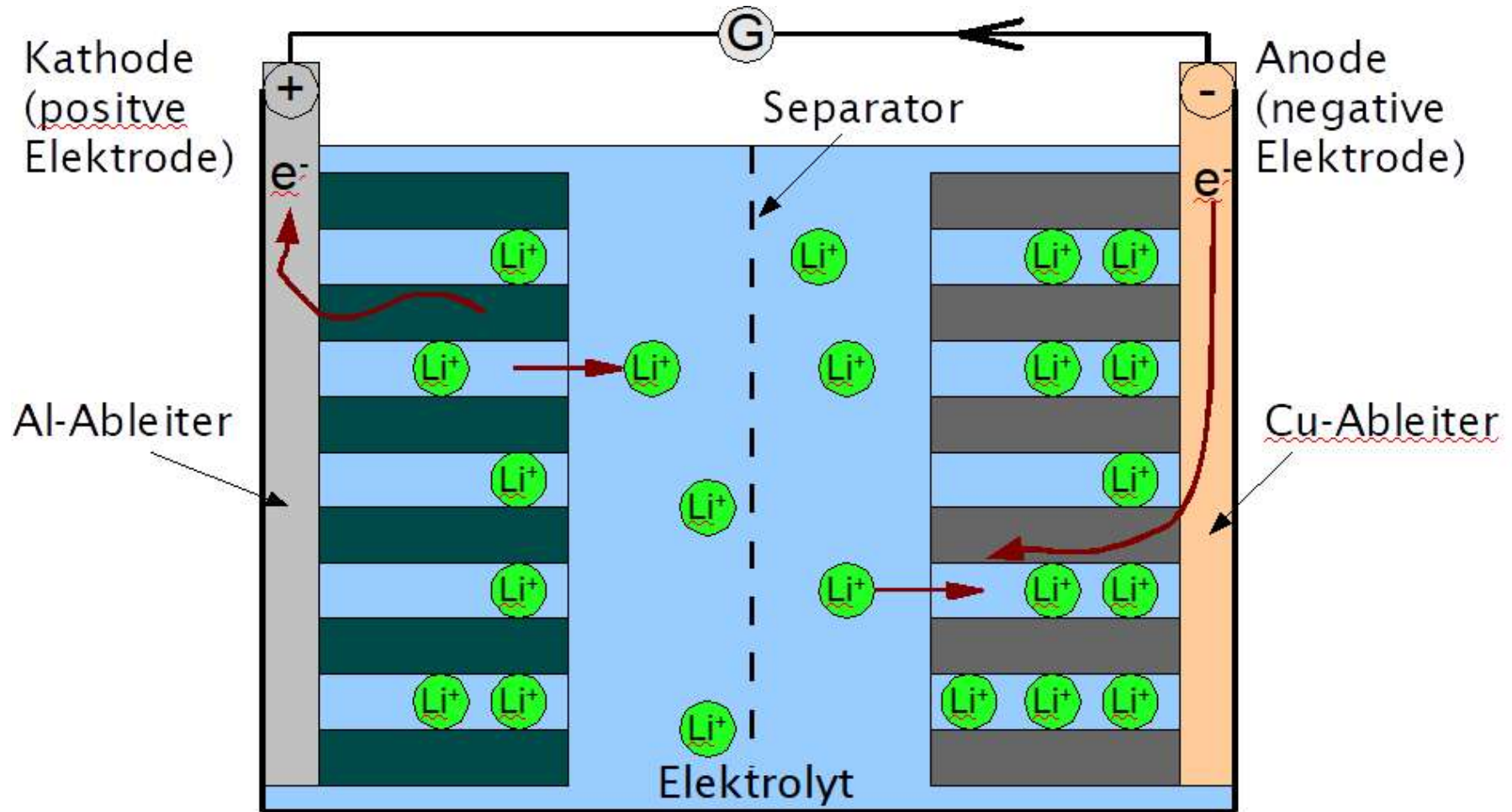
- Früher:  
Blei- und NiMH-Batterien
  - Etabliert seit Jahrzehnten
  - Niedrige Investitionskosten
- Heute:  
Li-Ionen-Batterien
  - bessere Lebensdauer und Energiedichte
  - Höhere Investition und technischer Aufwand



# Li-Ionen-Batterie – Entladung



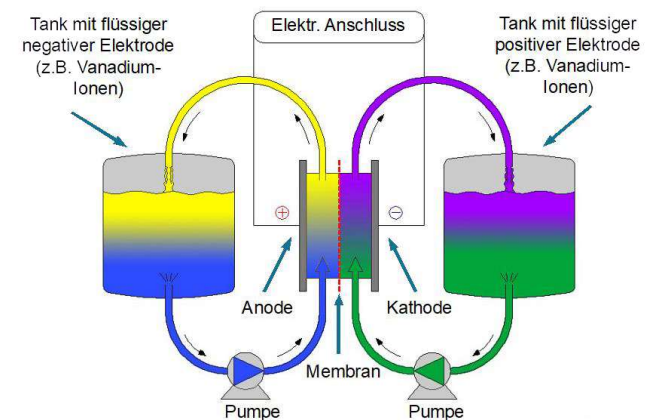
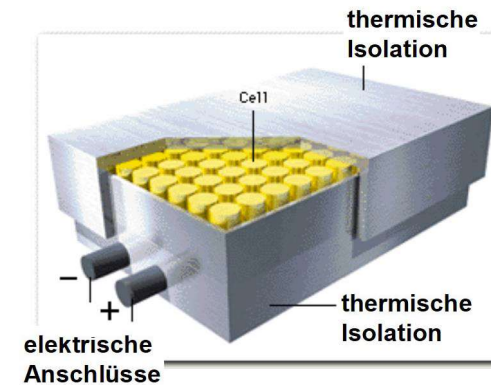
# Li-Ionen-Batterie – Ladung



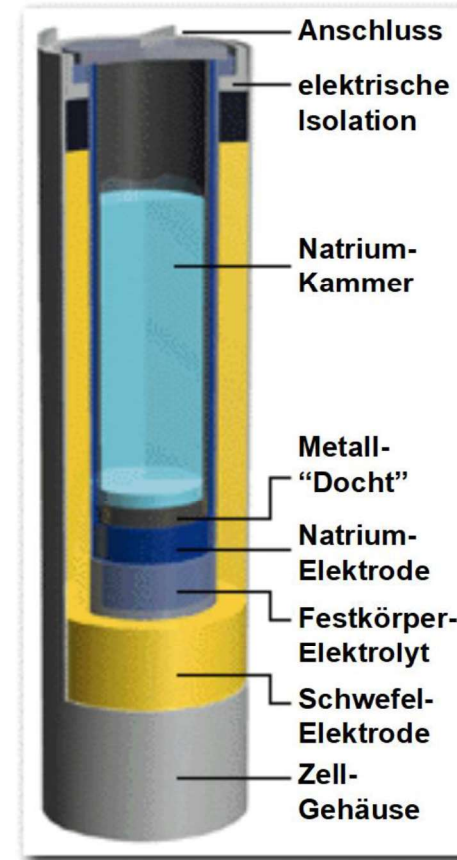
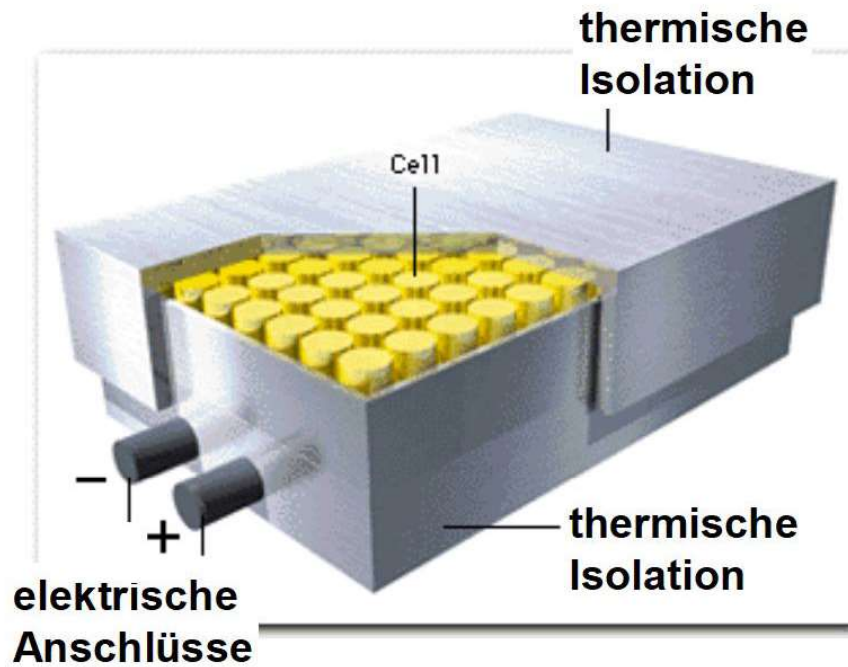
# Batteriespeicher

## Alternativen für morgen:

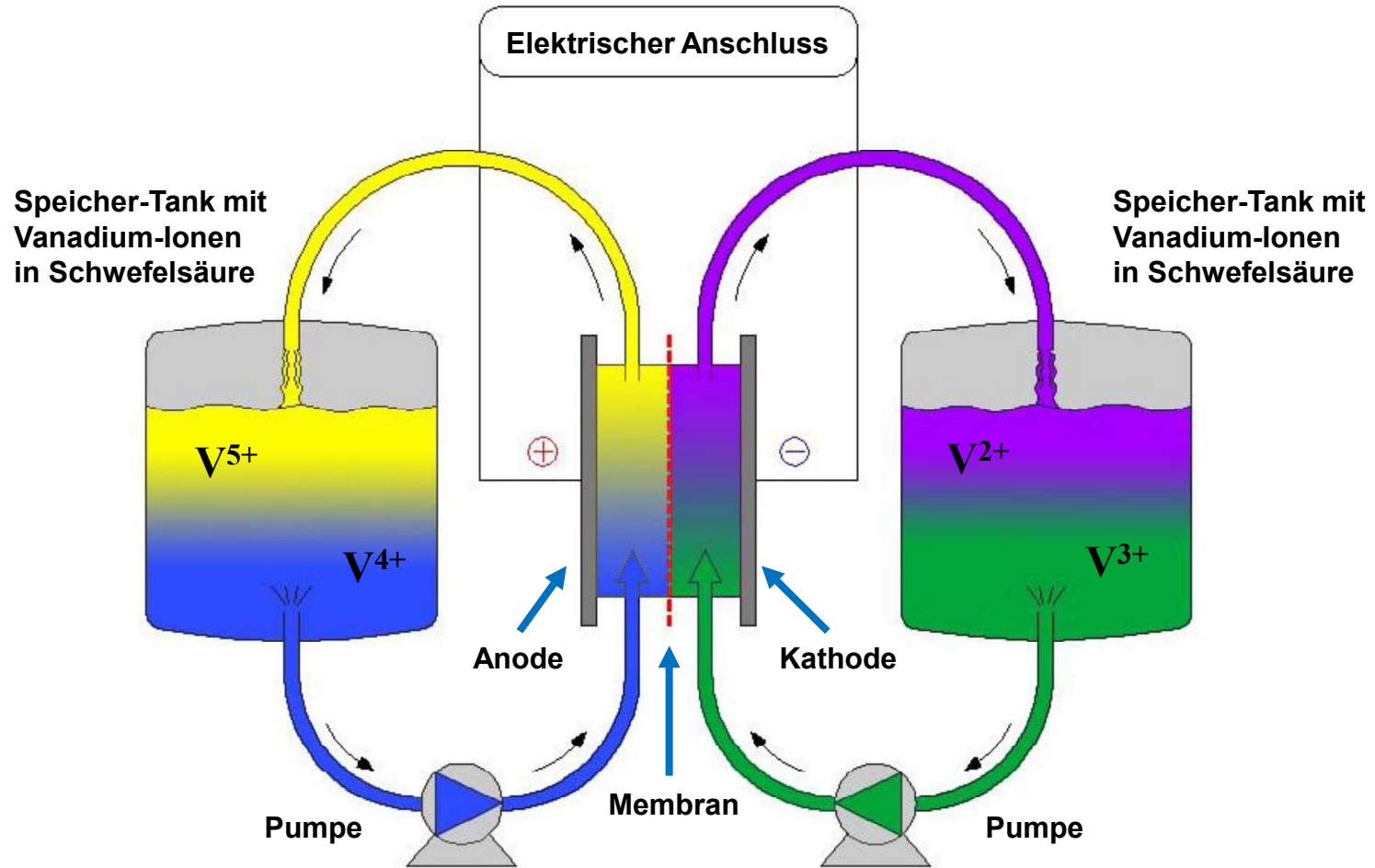
- Hochtemperaturbatterien
  - Günstige Aktivmaterialien (Na, S)
  - technische aufwändig
  - teure Keramiken
- Redox-Flow-Batterien
  - Flüssige Elektroden in Tanks als Langzeitspeicher
  - technische aufwändig
  - meist teure Aktivmaterialien



# Hochtemperatur-Batterie (Natrium-Schwefel)



# Vanadium-Redox-Flow-Batterie



Quelle: Prof. Julia Kowal, TU Berlin

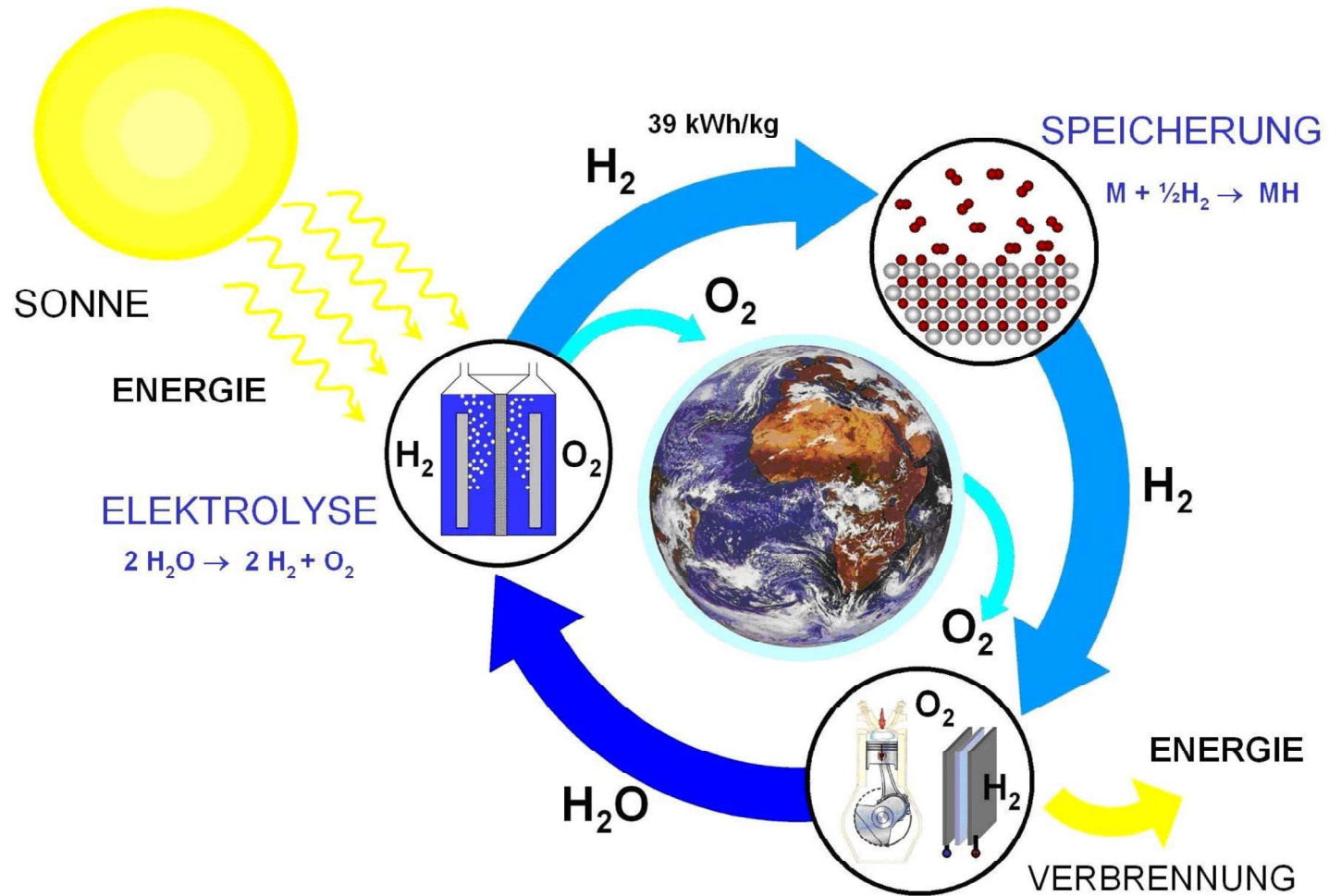
# Redox-Flow-Batterie



<https://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/ae/rfb.html>



# Wasserstoff: Brennstoffzelle & Co.



Reference: <https://idw-online.de/de/news196319>

# Elektrolyseur + Brennstoffzelle

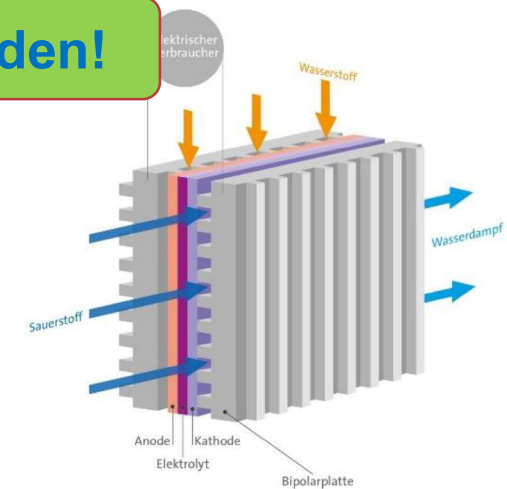
- Elektrolyse:
  - Erzeugung Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser mithilfe von Strom
  - Häufig große zentrale Anlagen > 100 MW, Wirkungsgrade ~65 – 85%
- Wasserstofferzeugung heute
  - Nur 4% aus Elektrolyse, <1% regenerativ



Quelle: Norsk Hydro

**Wasserstoff muss nachhaltig erzeugt werden!**

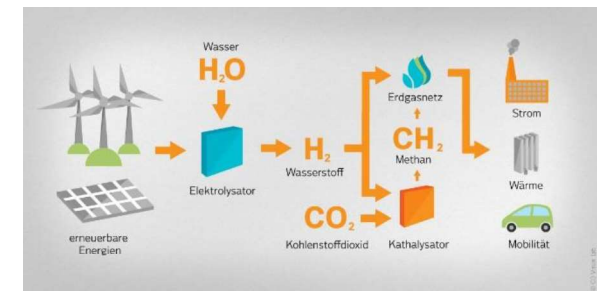
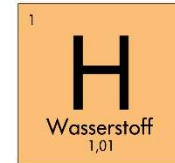
- Brennstoffzellen
  - Unterschiedliche Systeme (kW bis MW)
  - Neben Wasserstoff auch andere Brennstoffe wie Methan oder Methanol möglich
  - Wirkungsgrade ~40 – 60%



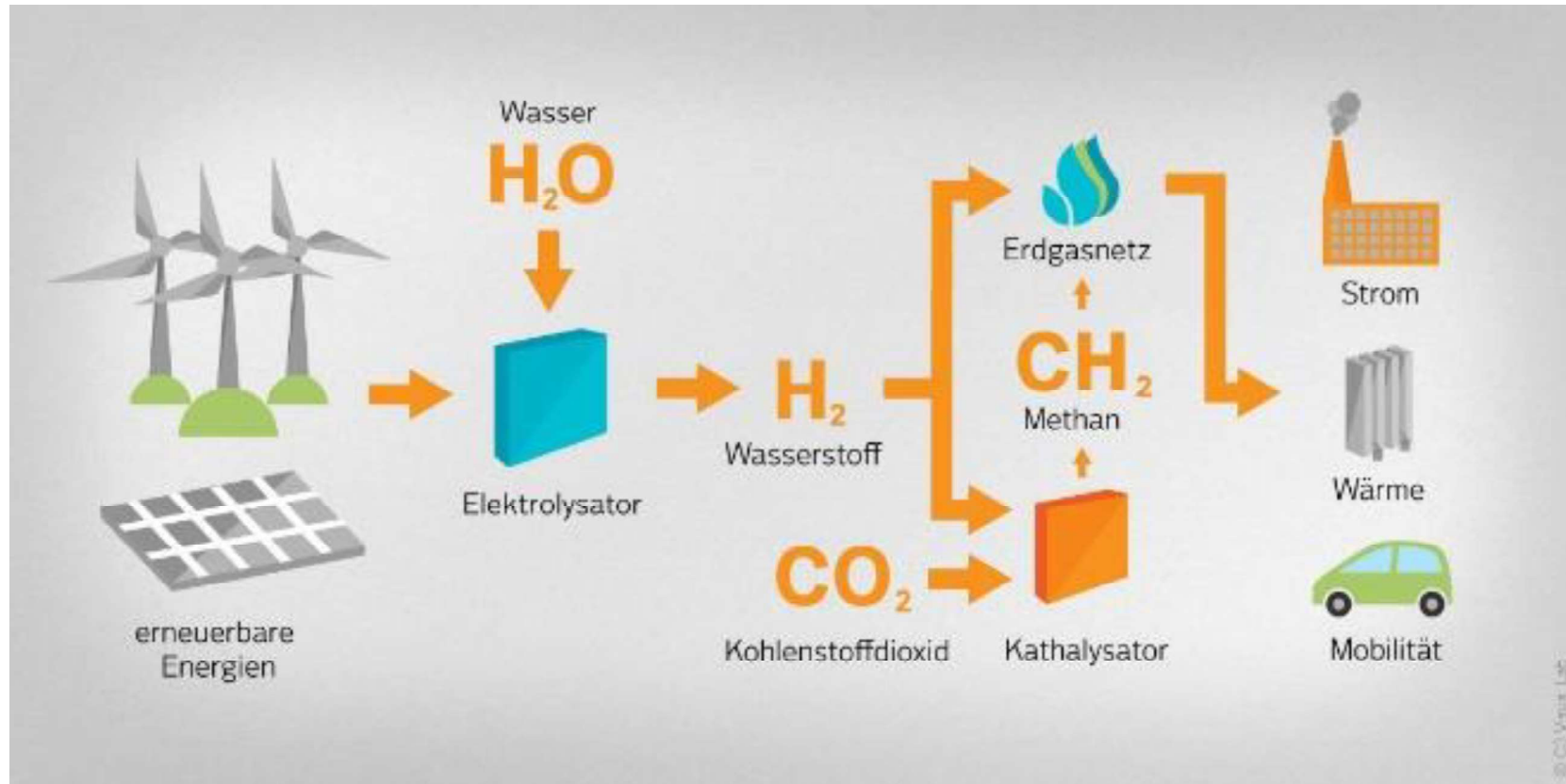
www.asue.de

# H<sub>2</sub>-Speicherung + Power2Gas

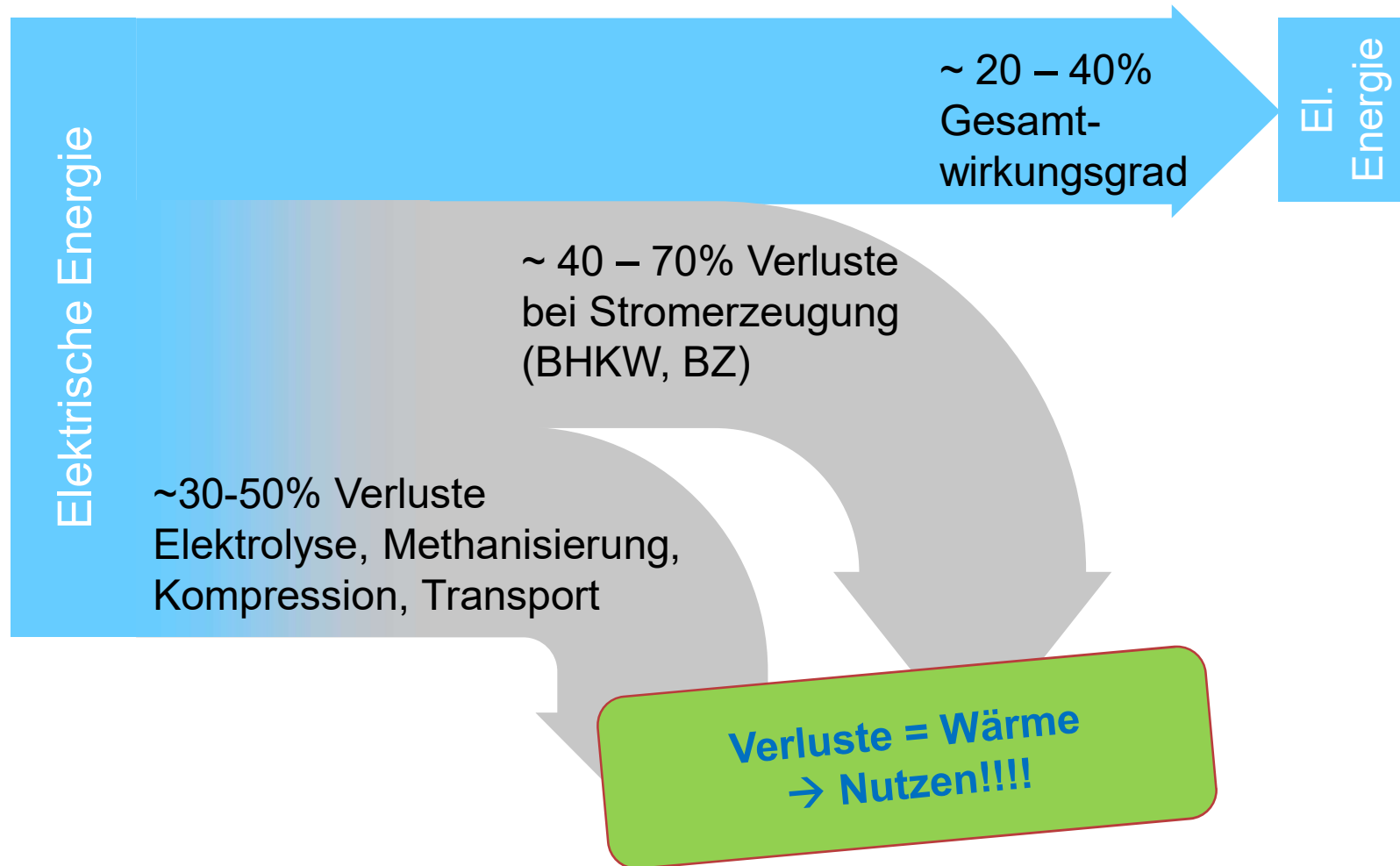
- Wasserstoff:
  - Beste gravimetrische Energiedichte
  - Sehr schlechte volumetrische Energiedichte bei Normaldruck
- Speicher
  - Druck 350 --- 700 bar → Energieaufwand Kompression
  - Kühlen + Verflüssigen → Energieaufwand Kühlen
  - Metallhydride → sehr schwer
- Power2Gas
  - Wasserstoff mit CO<sub>2</sub> in Methan wandeln
  - Bessere Energiedichte, einfachere Nutzung
  - Wirkungsgrad verschlechtert durch Wandlung
- Power2Liquid
  - Methan in Methanol wandeln (z.B.)
  - Noch bessere Energiedichte und noch schlechterer Wirkungsgrad



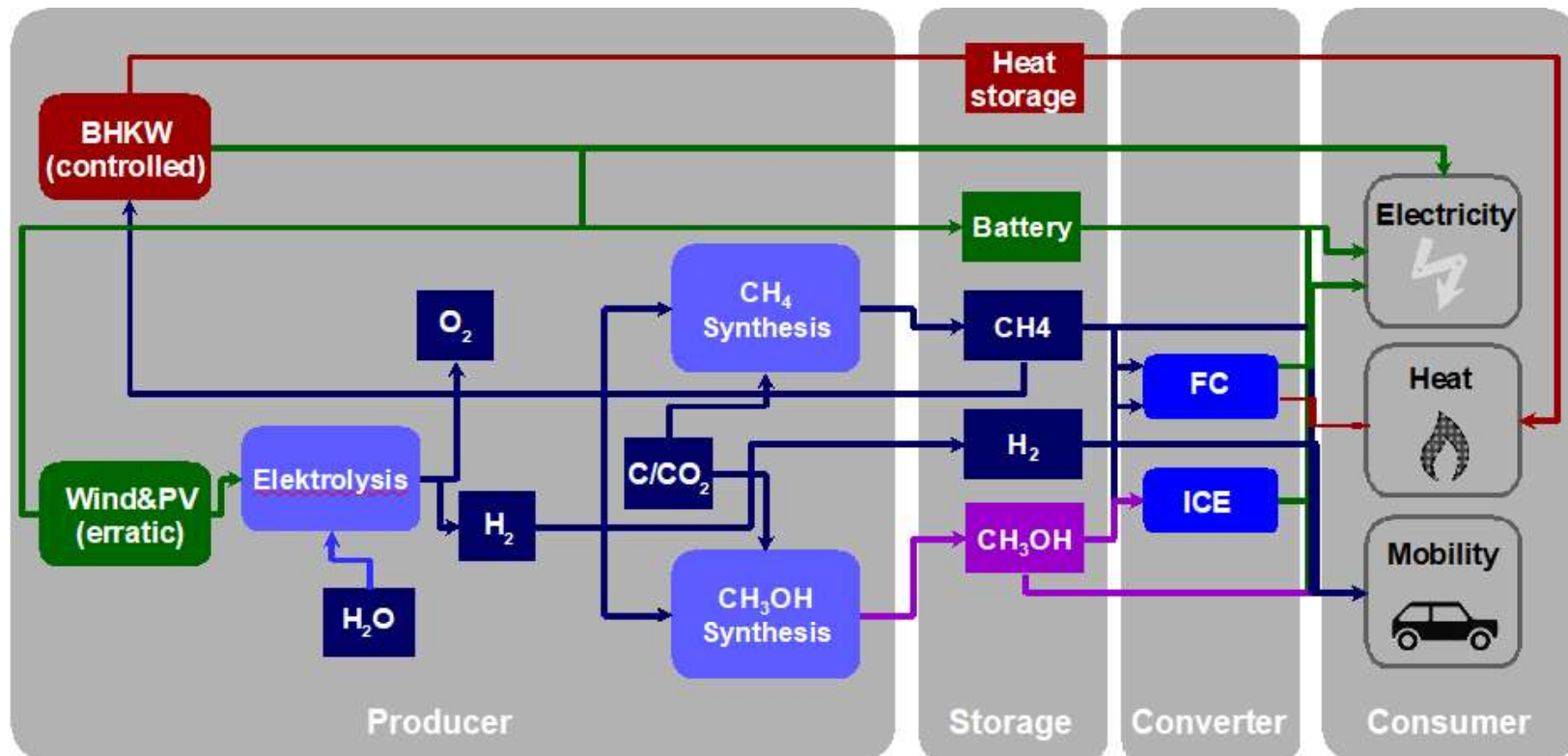
## H<sub>2</sub>-Speicherung + Power2Gas



# Wirkungsgradkette Power-To-Gas-To-Power



# Sektorenkopplung



BHKW: Electric-heat co-generation  
 FC: Fuel Cell  
 ICE: Internal Combustion Engine

Reference: Prof. Herbert Palm (modified)

# Nachhaltige elektrische Energieversorgung

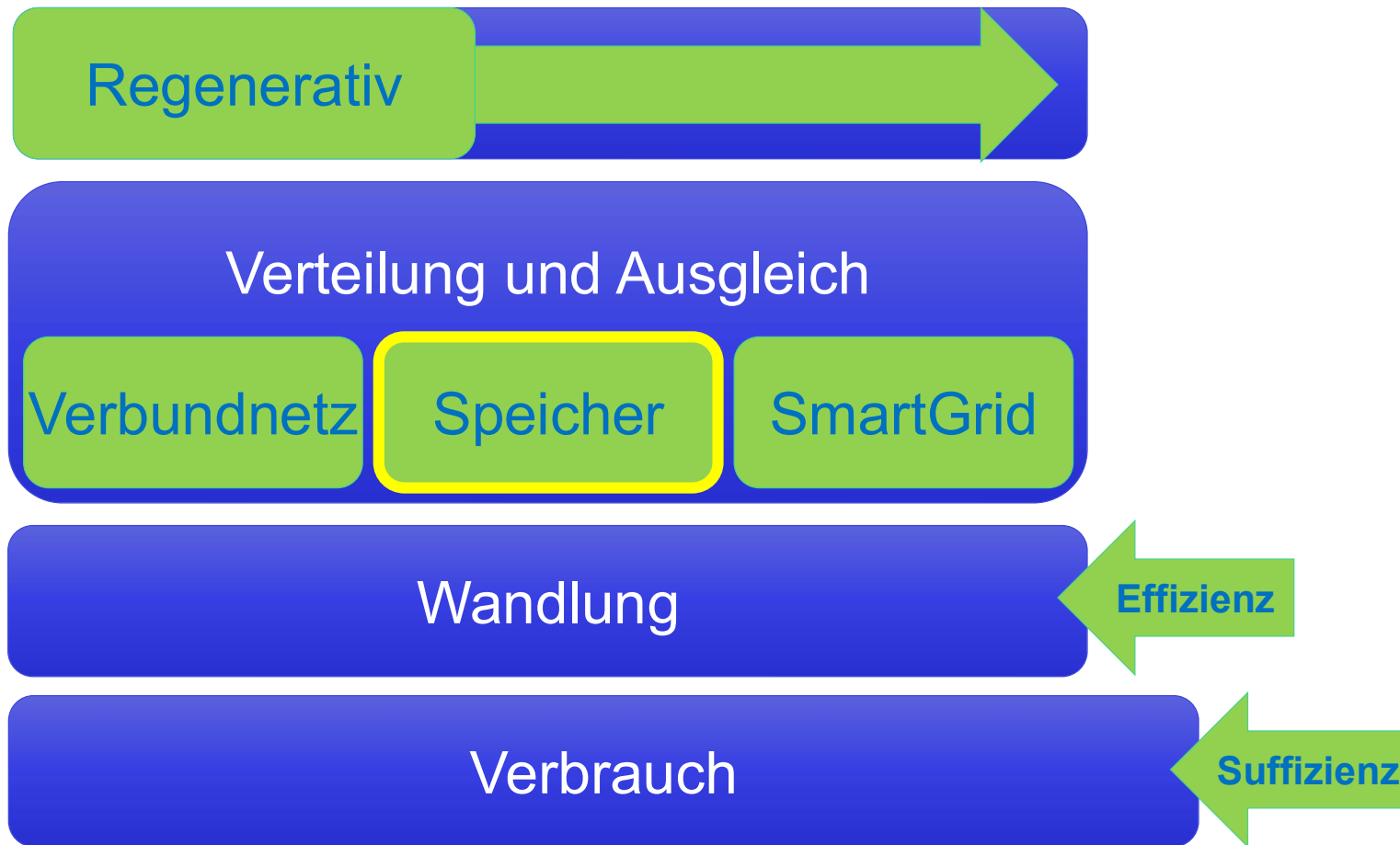


# Nachhaltige elektrische Energieversorgung





# Nachhaltige elektrische Energieversorgung



## Fazit

- Beschleunigter Ausbau regenerativer Stromerzeugung ist notwendig um die Klimaziele zu erreichen
- Bei hohen Anteilen regenerativer Stromerzeuger gewinnen Speicher an Bedeutung, im Zusammenspiel mit intelligentem Lastmanagement und Verbundnetz
- Batterien für kurze Speicherdauern und hohe Wirkungsgrade
- Power2Gas für Langzeitspeicher oder Sektorenkopplung
- Energiewende braucht intelligente technische Lösungen

**...aber nicht alleine auf technische Lösungen setzen!**

**Umstieg auf's Radl spart mehr CO<sub>2</sub> als Elektrofahrzeuge je erreichen können!**

**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!**

**Fragen & Diskussion**