

**Umwandlung Strom (“Elektro”) ↔ Stoffe (“Chemie”)**

## **Inhalt:**

1. Einführung
2. Einführung in elektrochemische Systeme
3. Elektrolyte und Leitfähigkeit
4. Doppelschichtkondensatoren
5. Elektrodenprozesse
6. Batterien
7. Redox-flow
8. Brennstoffzellen
9. Elektrolyseverfahren
10. Herstellung synthetischer Kraftstoffe

## Themen:

- 1.1 Anwendungen und Anforderungen
  - 1.1.1 Energiebedarf
  - 1.1.2 Anforderungen Stromnetz
  - 1.1.3 Anforderungen Elektromobilität
- 1.2 Übersicht Energiespeichersysteme
  - 1.2.1 Grundlagen Stromquellen
  - 1.2.2 Energie- und Leistungsdichte
  - 1.2.3 Elektrochemische Grundbegriffe

Grundlagen  
(Prüfungsstoff)

Zentrale Aufgabe bis 2050:

CO<sub>2</sub>-neutrale Gesellschaft

→ Vollständige Dekarbonisierung der Energieversorgung



**EUROPEAN GREEN DEAL**  
**RESEARCH & INNOVATION CALL**

**€1 billion**

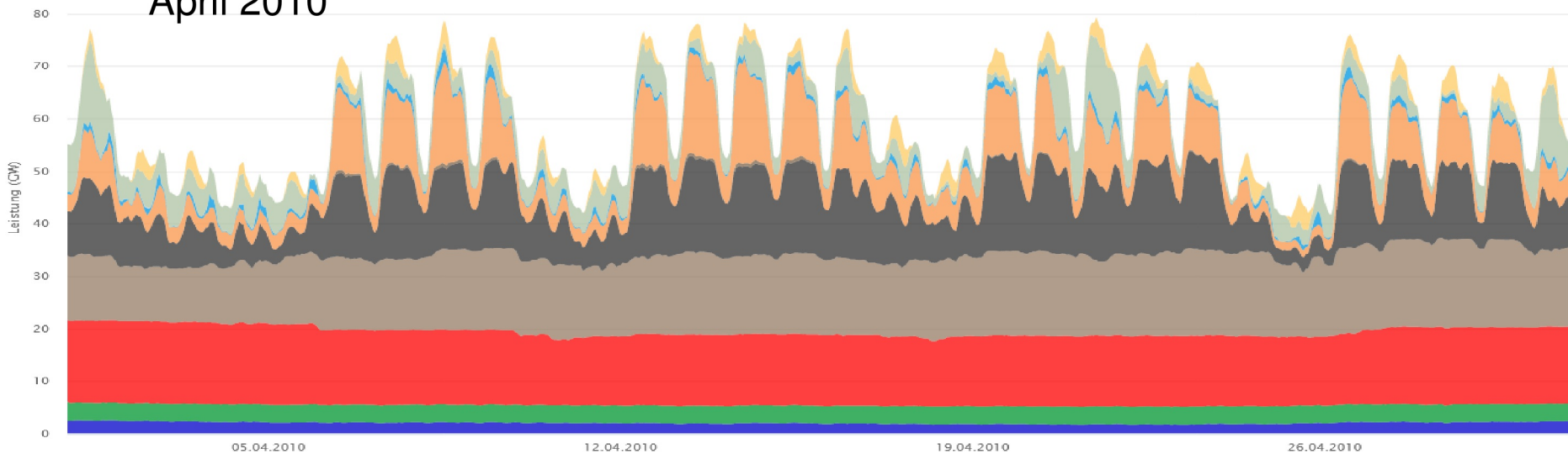
Launch: 18 September 2020  
! Deadline: 26 January 2021

#H2020 #EUGreenDeal #InvestEUresearch

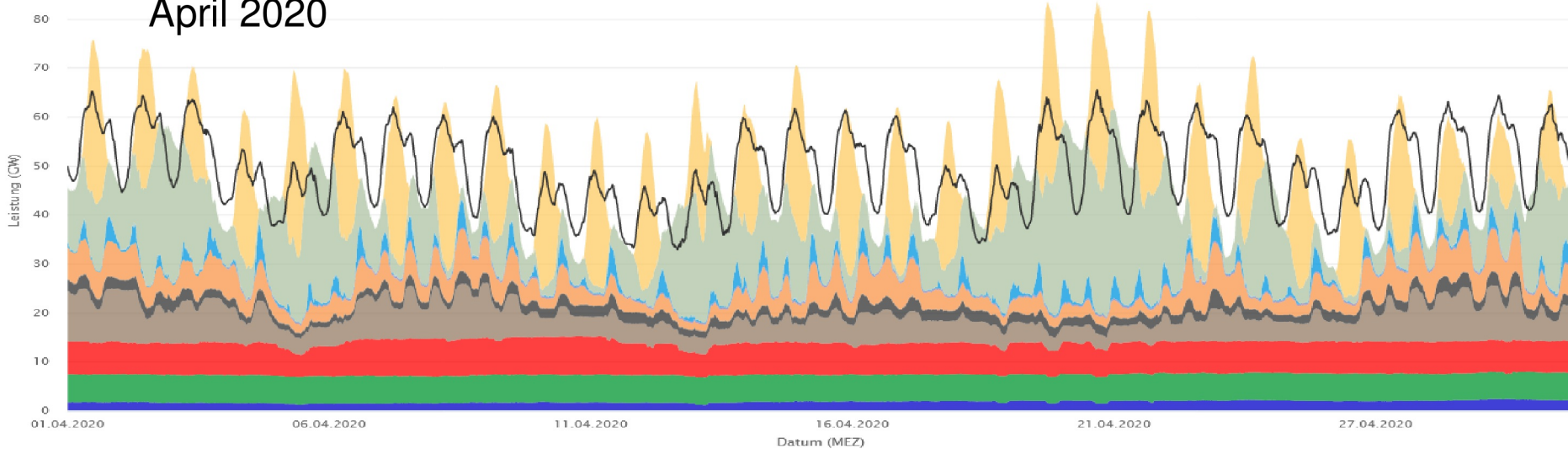
European Commission

The image is a promotional banner for the European Green Deal Research & Innovation Call. It features a light blue background with stylized green and blue foliage on the left. The main text is in bold, green and blue fonts. A dark blue box highlights the amount '€1 billion'. Below this, the launch and deadline dates are listed. At the bottom, there are social media hashtags and the European Commission logo.

April 2010

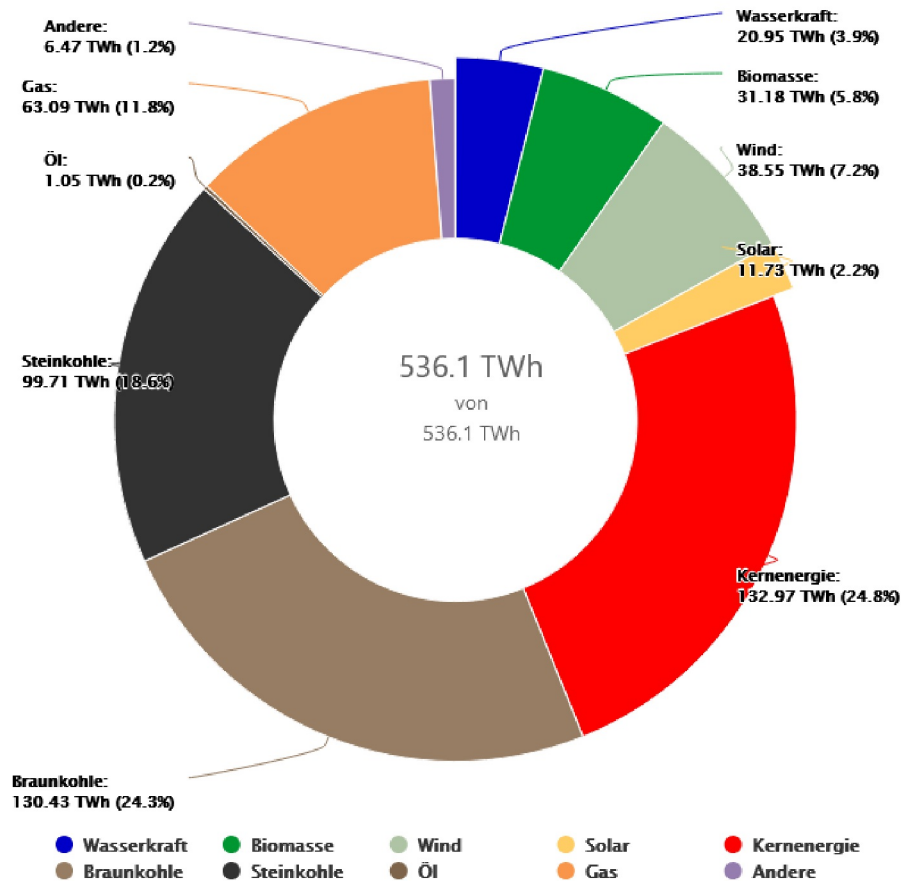


April 2020

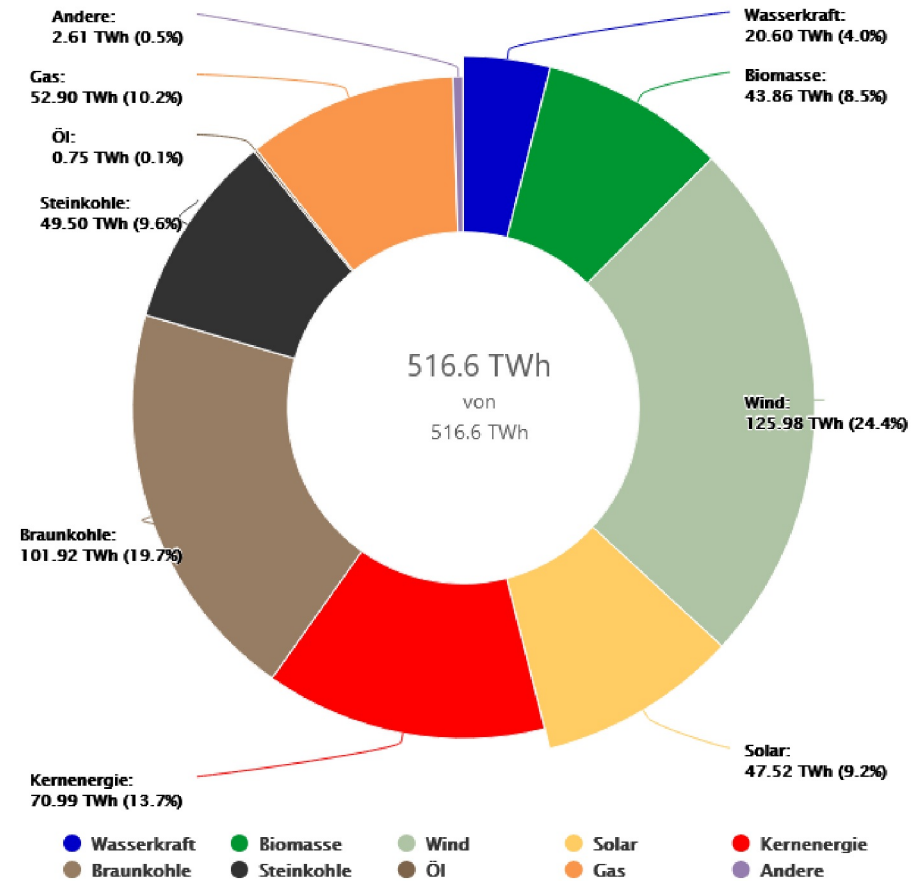


# 1 / 5 Änderungen im Strommix durch die Energiewende

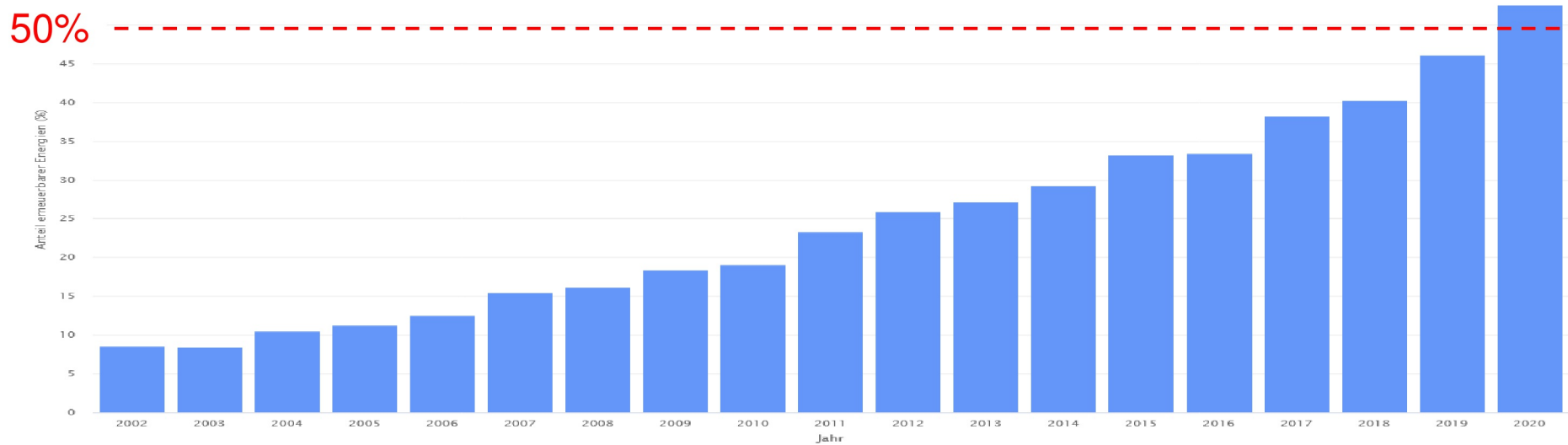
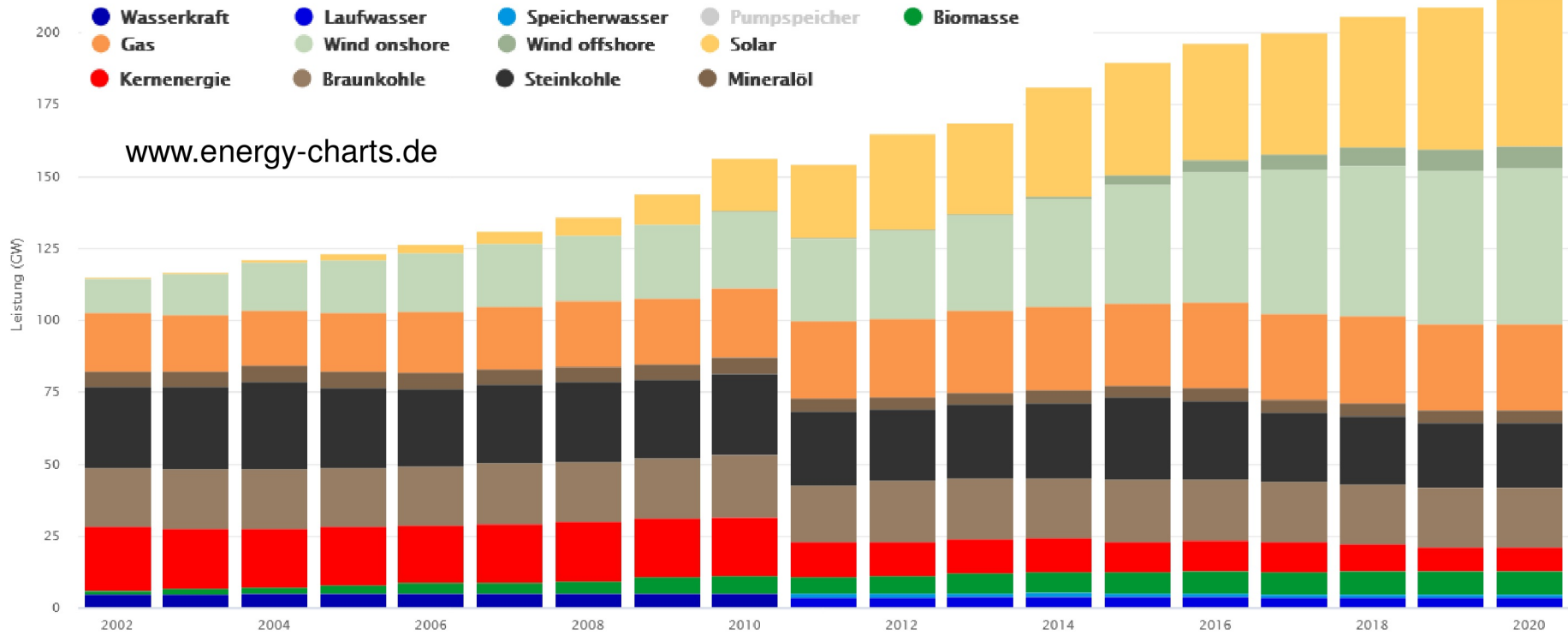
2010



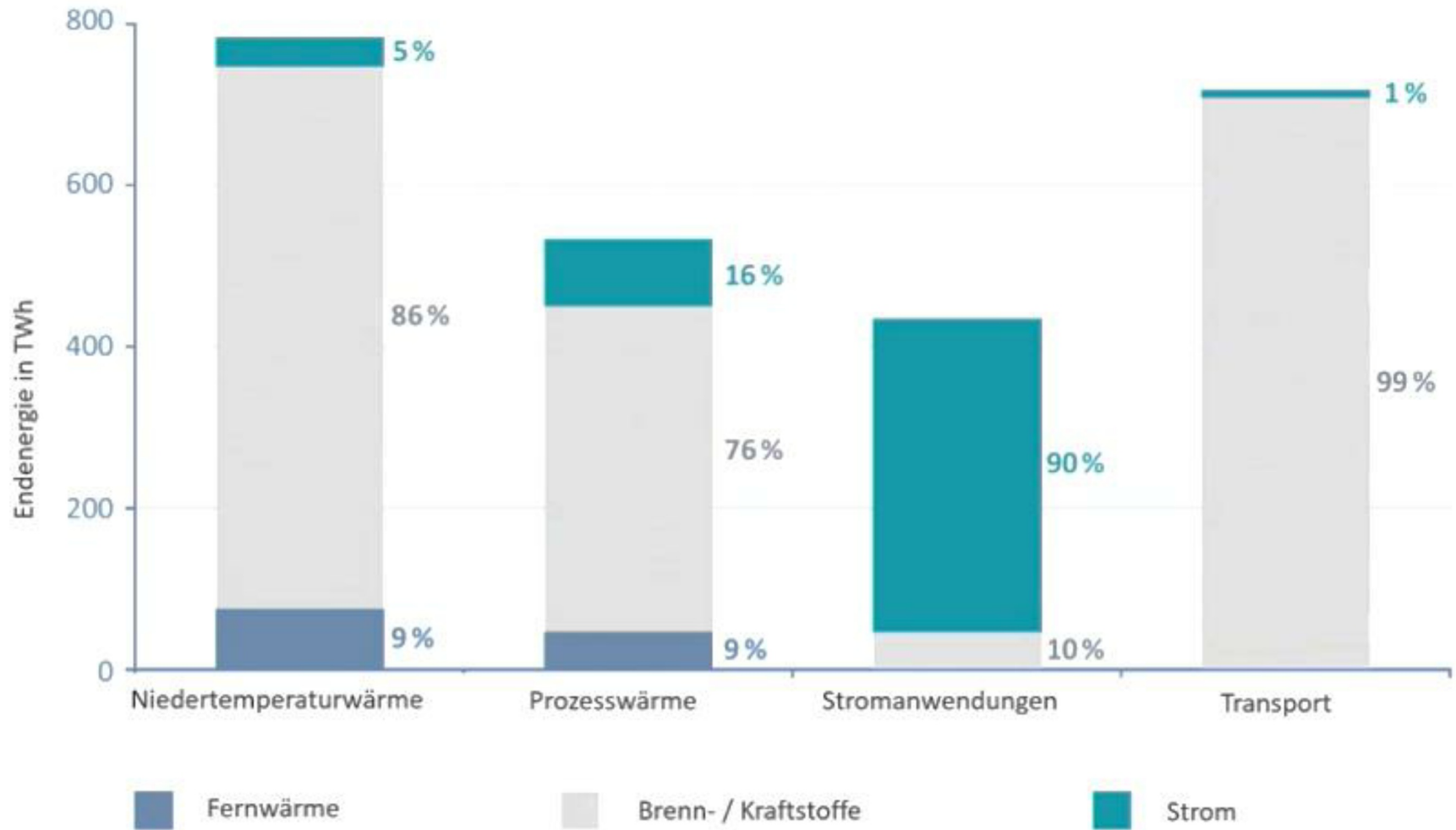
2019



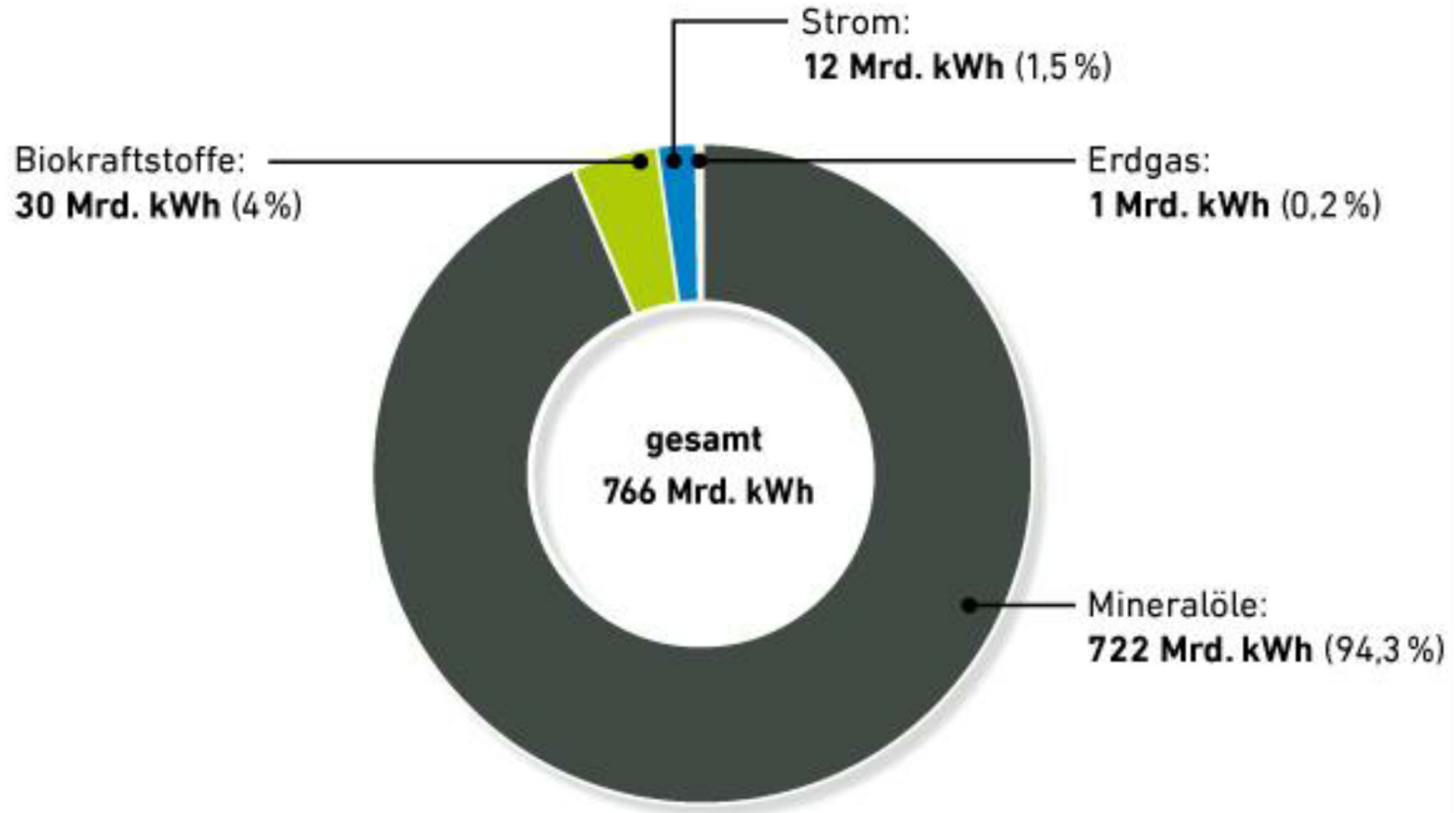
# 1 / 6 Änderungen im Strommix durch die Energiewende



## Energieverbrauch in Deutschland nach Sektoren



## Endenergieverbrauch des Verkehrs 2017 (einschließlich Bahn) in Milliarden Kilowattstunden



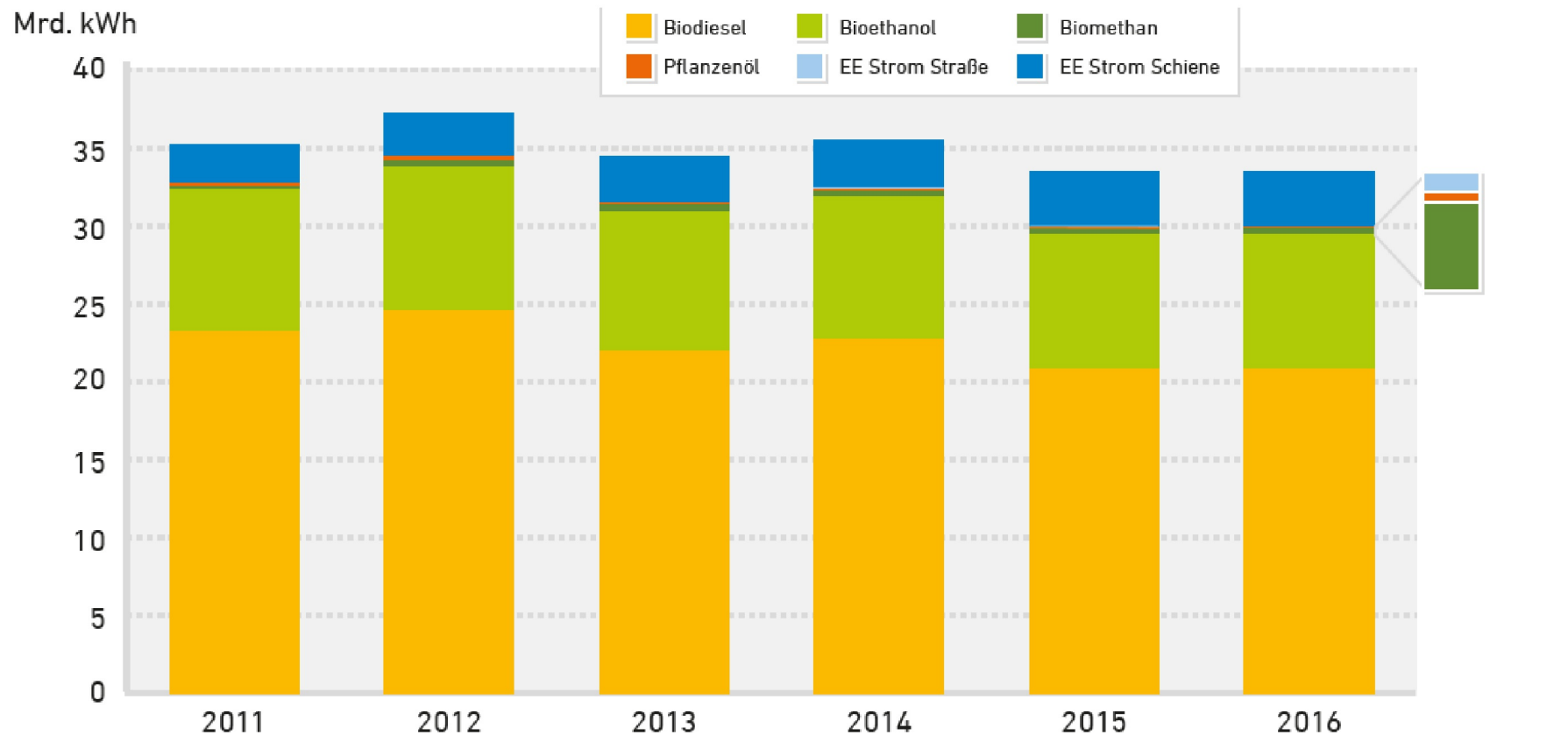
Quelle: eigene Darstellung nach AG Energiebilanzen  
Stand: 7/2018

© 2018 Agentur für Erneuerbare Energien e.V.



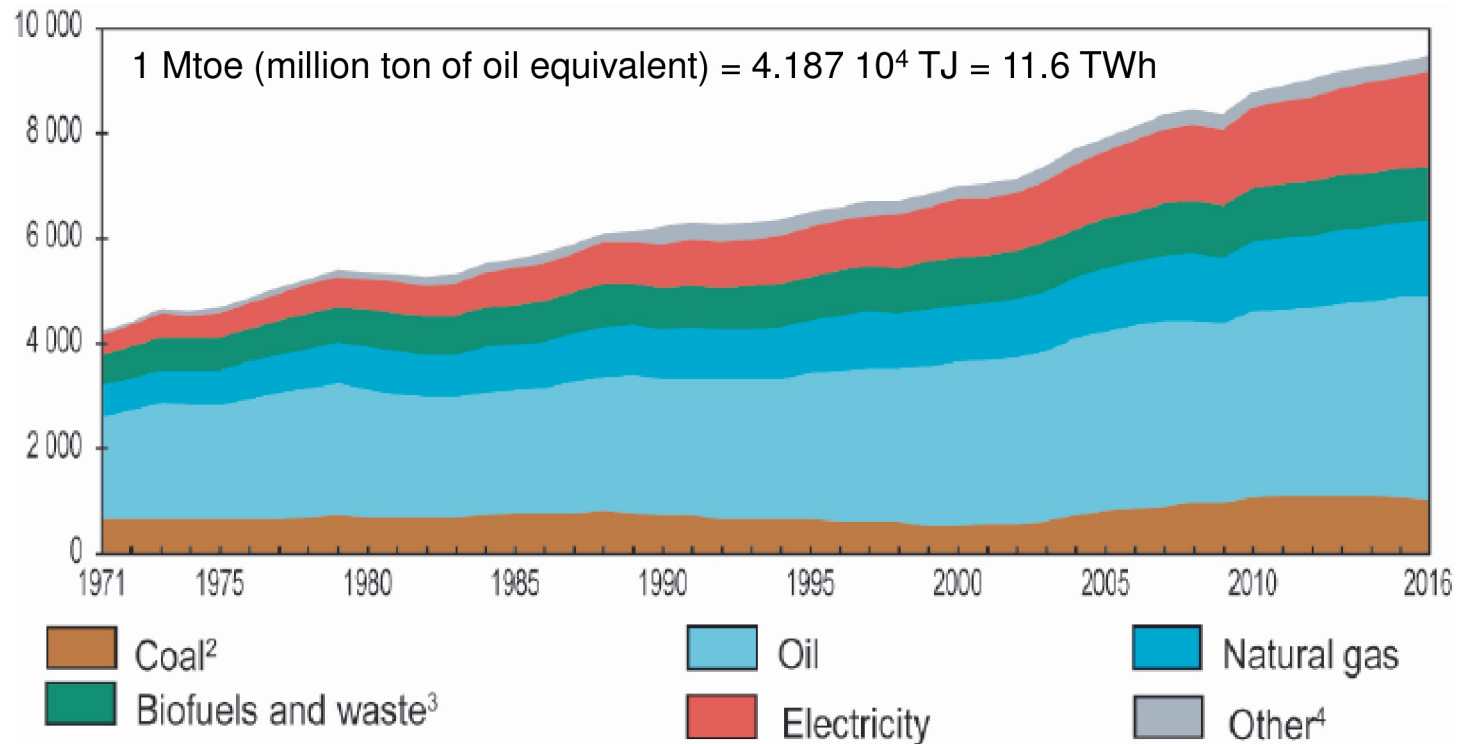
## Nutzung Erneuerbarer Energien im deutschen Verkehrssektor

Bislang sind Erneuerbare nur nennenswert vorhanden, wo sie wie flüssige Biokraftstoffe und Bahnstrom bestehende Infrastruktur nutzen.



Quelle: UBA, AGEE-Stat, Stand: 9/2017

## Anwachsen des Energiebedarfs seit 1970 nach Anwendungsbereich

World<sup>1</sup> TFC from 1971 to 2016 by fuel (Mtoe)

Key world energy statistics 2018  
International Energy Agency

Aktueller weltweiter Energiebedarf:  
 $6 \cdot 10^{20}$  J/Jahr = 167 000 TWh/Jahr  $\approx$  19 TW

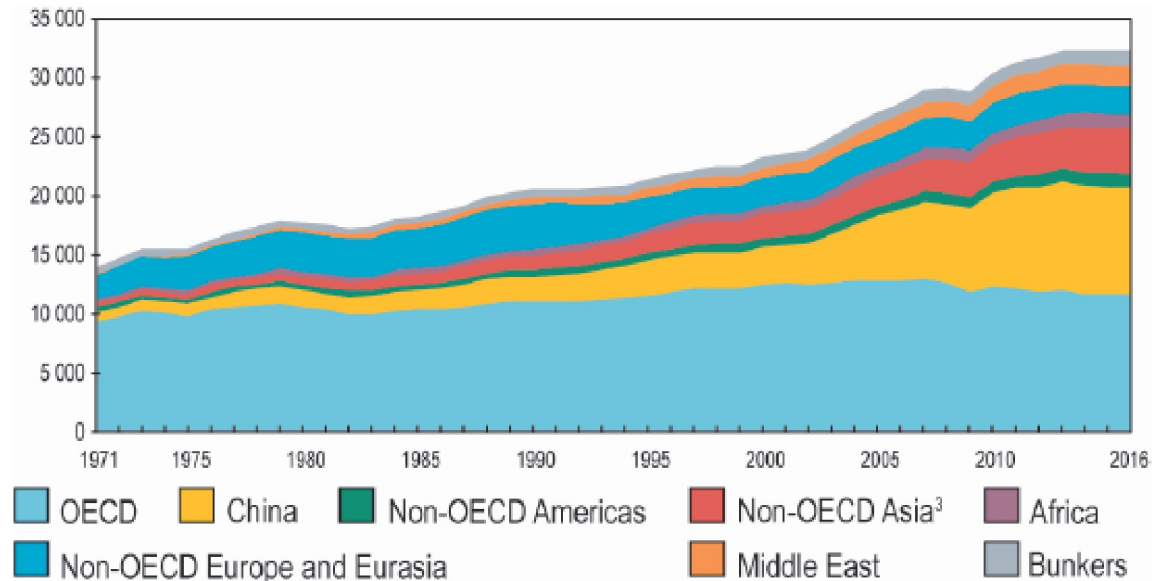
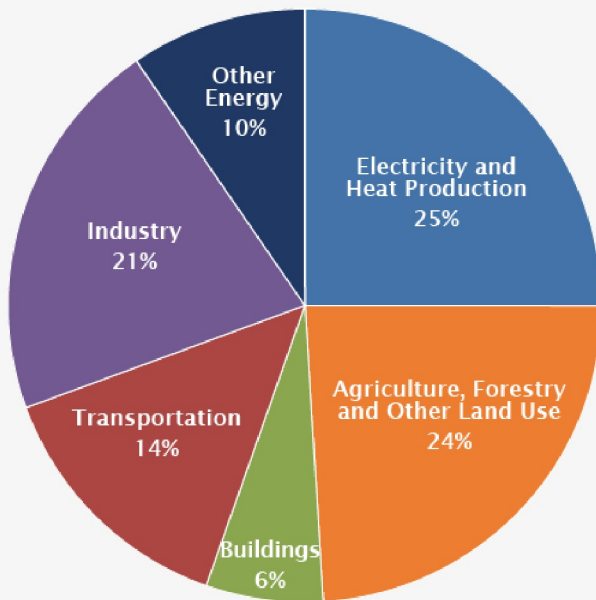
## Korrelation CO<sub>2</sub> Emission korreliert mit Verbrauch fossiler Kraftstoffe

Oxidation von  $\text{CH}_3\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{CH}_3$   
 → Stöchiometrische  
 Freisetzung von CO<sub>2</sub>

## CO<sub>2</sub> emissions by region

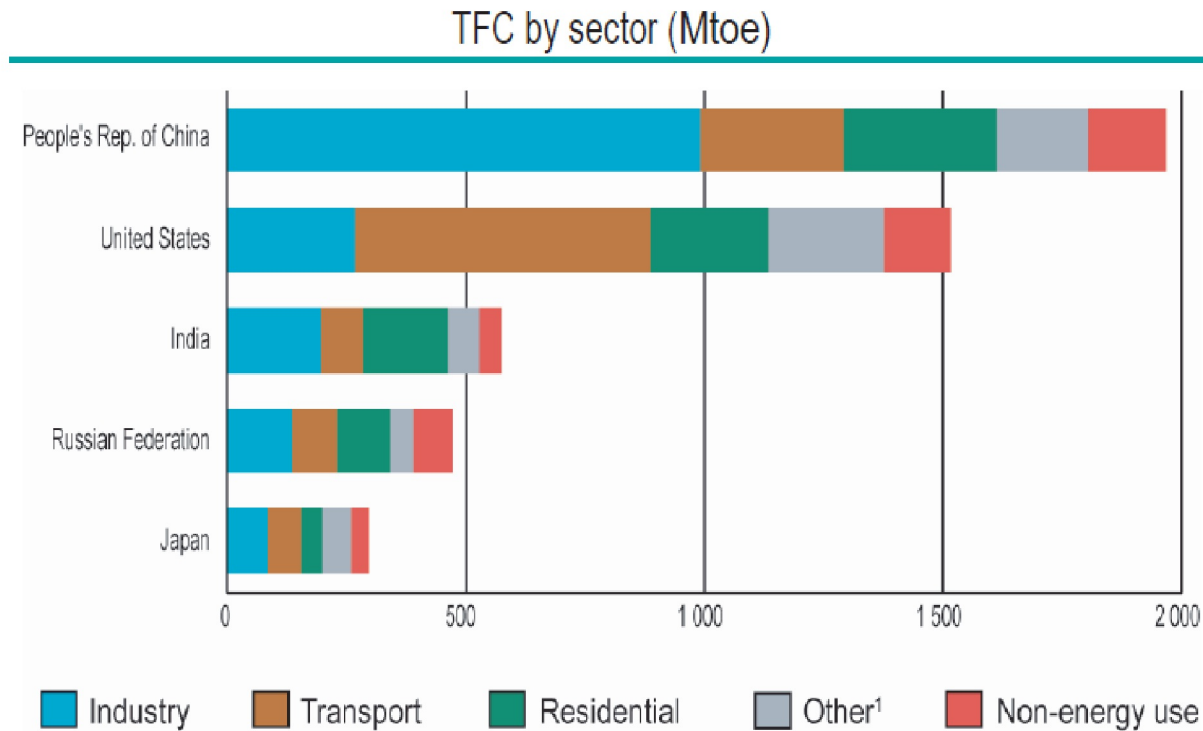
World<sup>1</sup> CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion<sup>2</sup> from 1971 to 2016  
 by region (Mt of CO<sub>2</sub>)

### Global Greenhouse Gas Emissions by Economic Sector



Key world energy statistics 2018  
 International Energy Agency

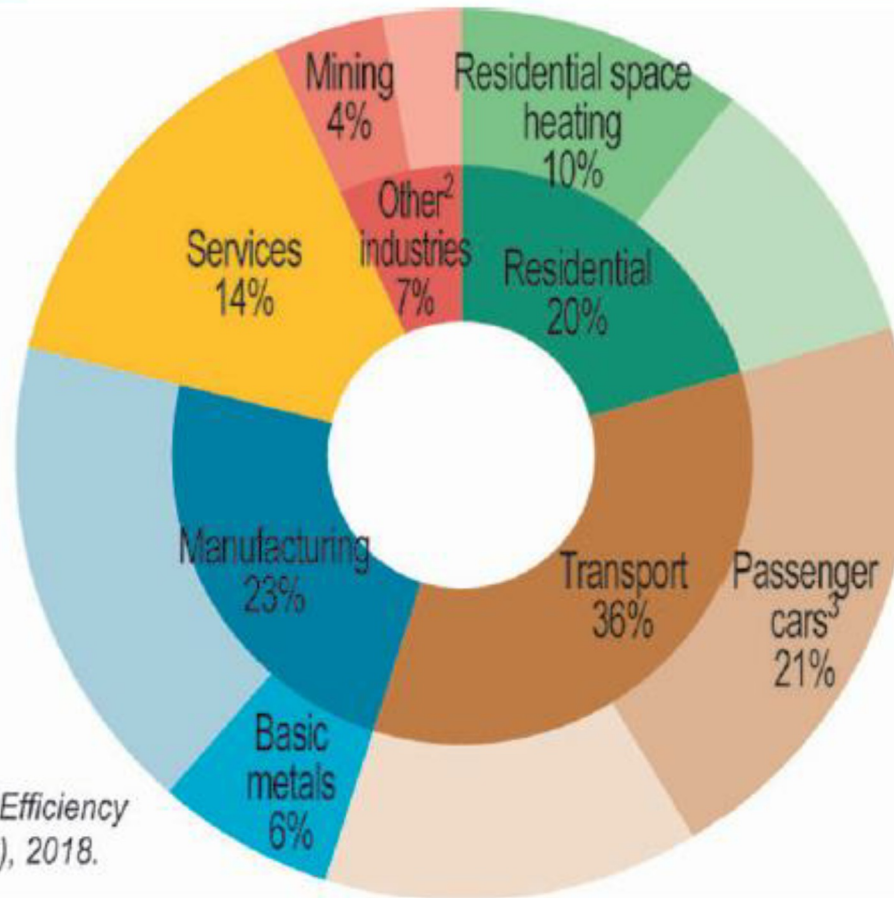
## Energieverbrauch nach Anwendungsbereich („Sektoren“)



Key world energy statistics 2018  
International Energy Agency

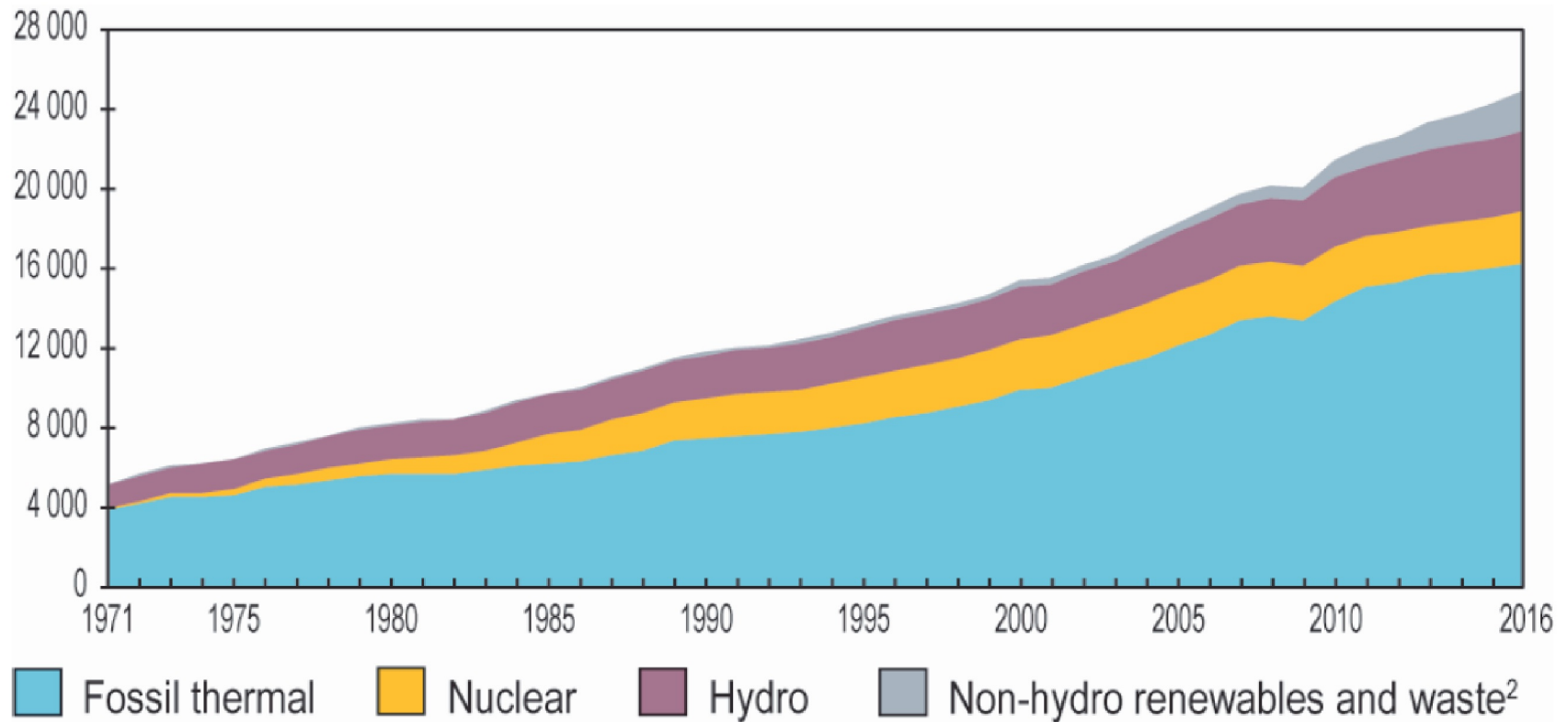
## Energieverbrauch nach Anwendungsbereich („Sektoren“)

Largest end uses of energy by sector in IEA<sup>1</sup>, 2015

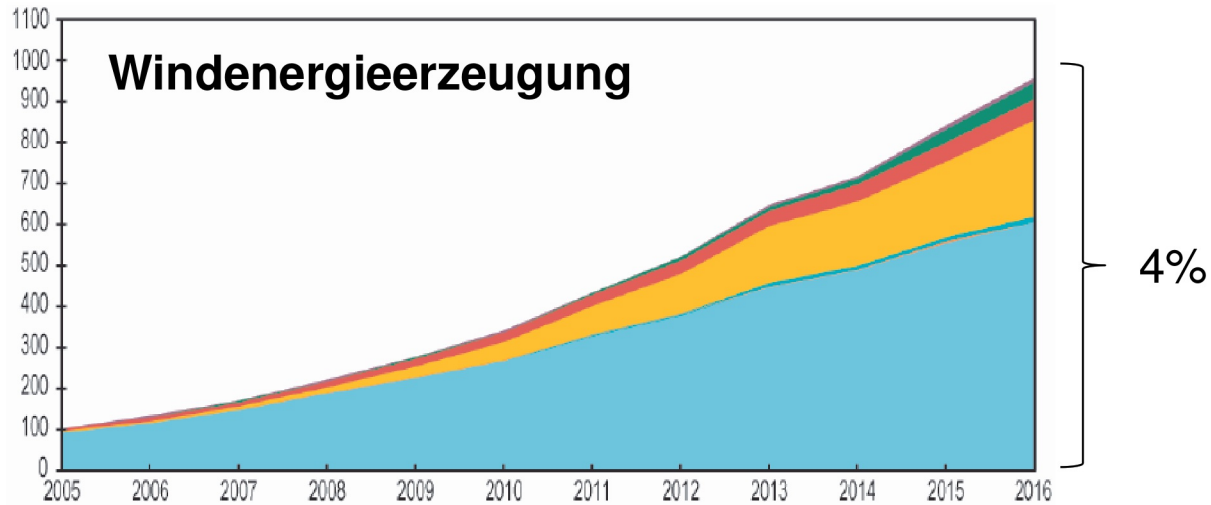


Source: IEA Energy Efficiency Indicators (database), 2018.

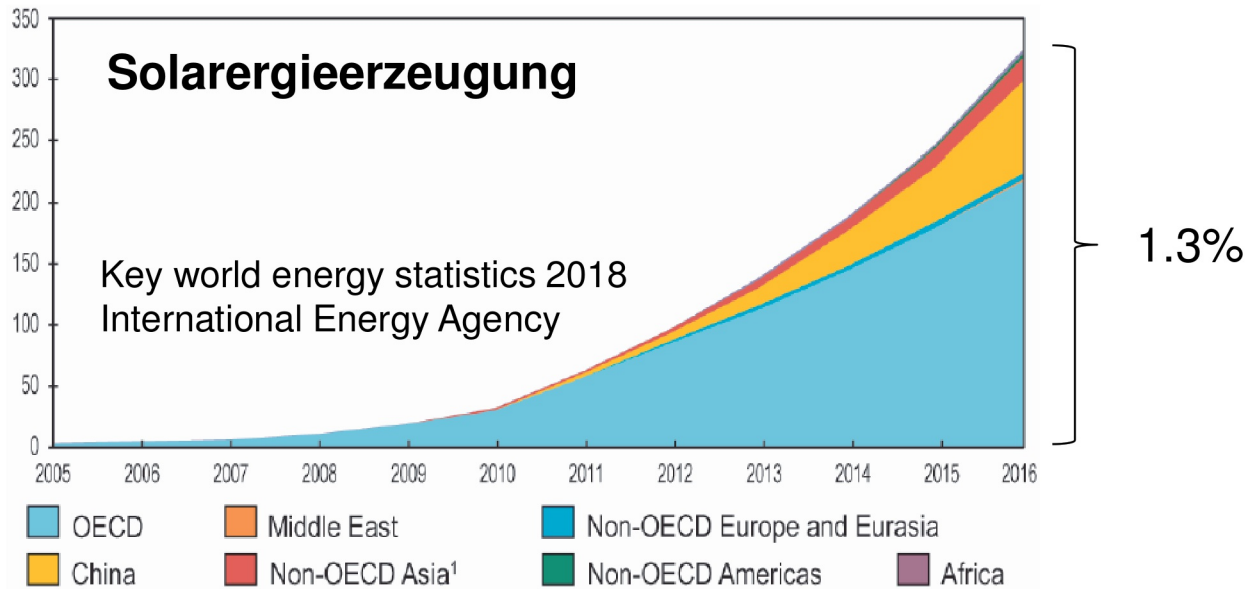
## Energieerzeugung seit 1970

World electricity generation<sup>1</sup> from 1971 to 2016 by fuel (TWh)

World wind electricity production from 2005 to 2016 by region (TWh)



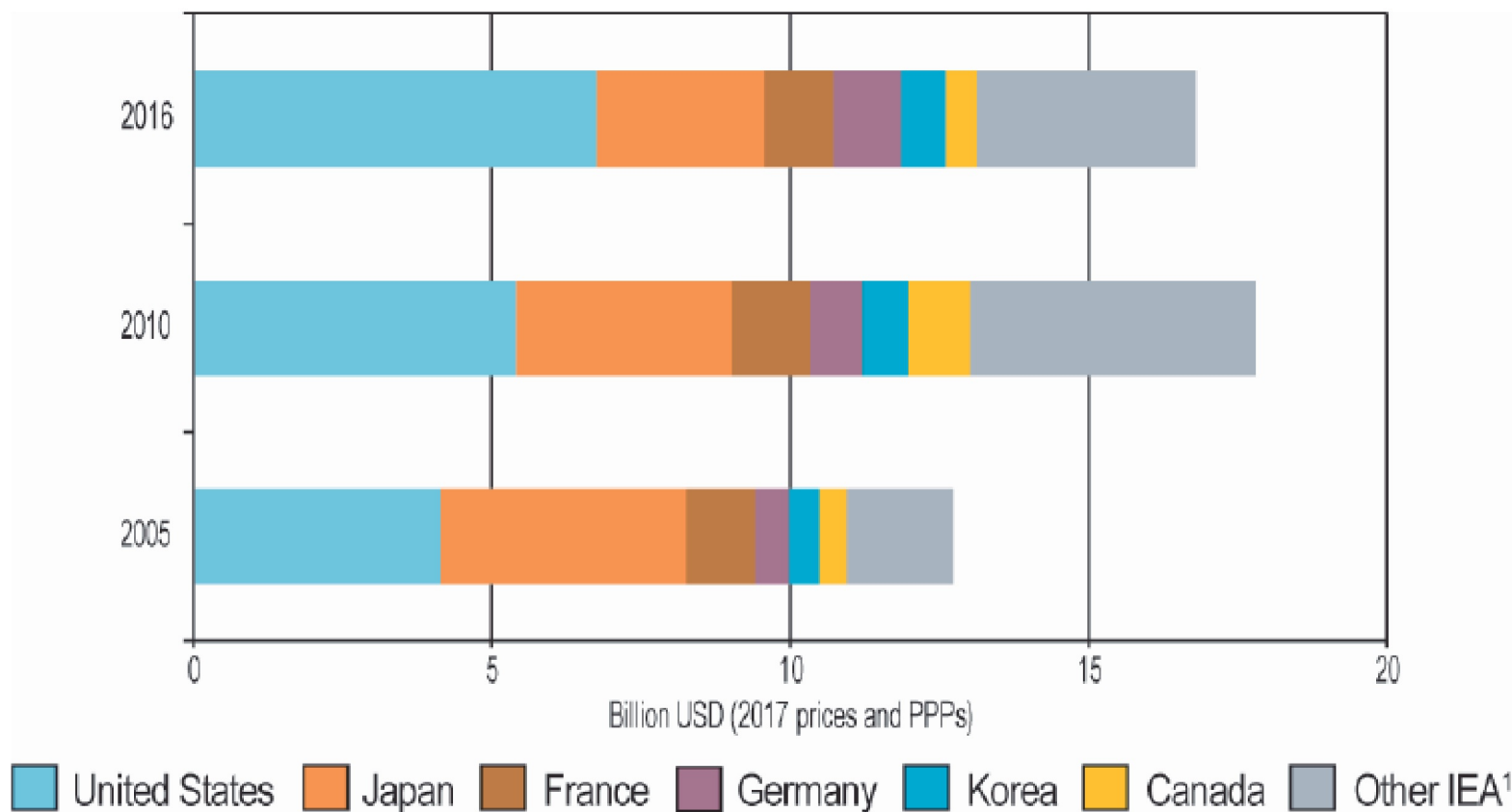
World solar PV electricity production from 2005 to 2016 by region (TWh)



- OECD
- Middle East
- Non-OECD Europe and Eurasia
- China
- Non-OECD Asia<sup>1</sup>
- Non-OECD Americas
- Africa

## Staatliche Ausgaben für Energieforschung

Total public energy RD&D for selected countries in 2005, 2010 and 2016

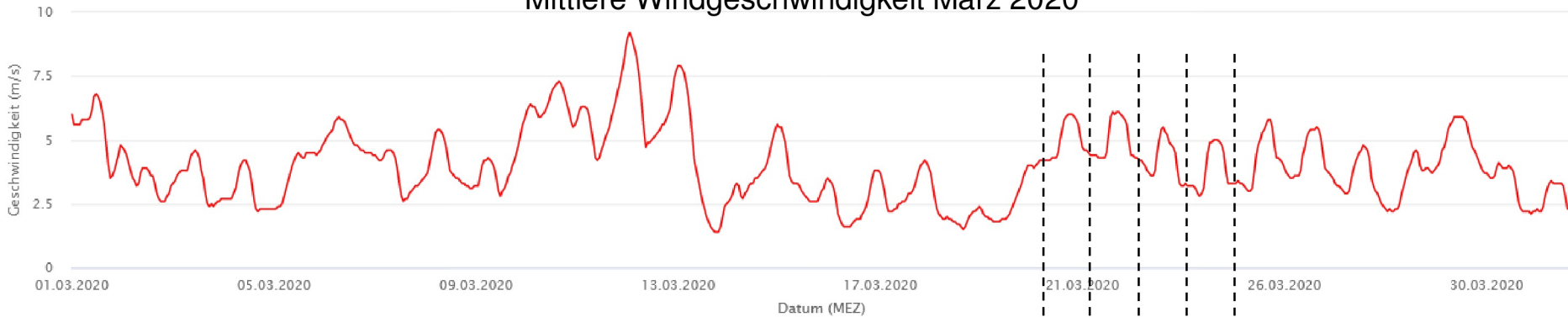




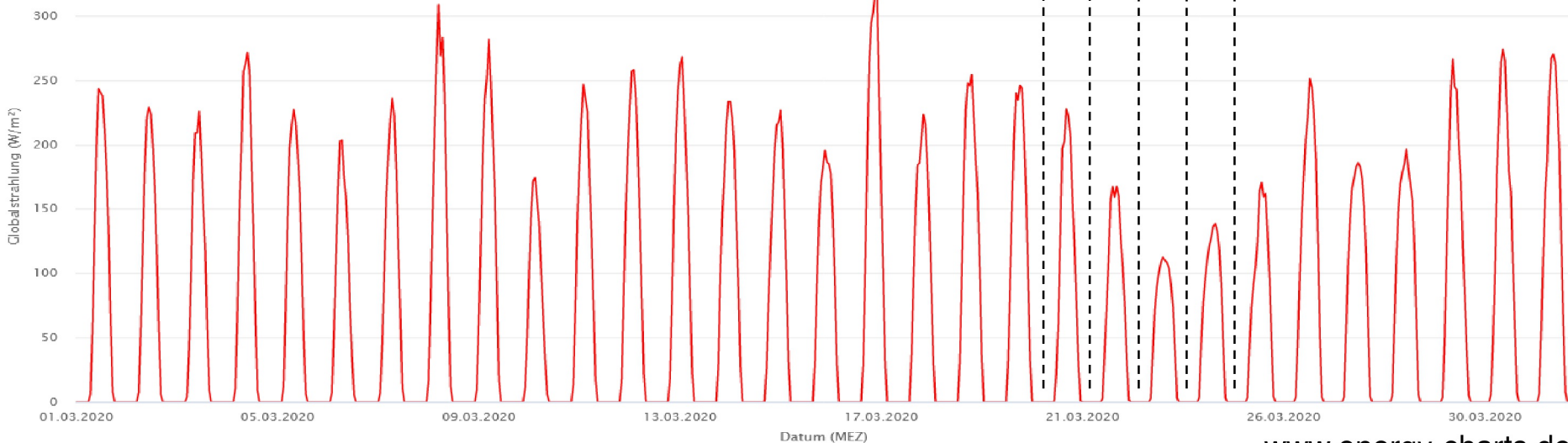
## Grundregel: Stromverbrauch = Stromerzeugung

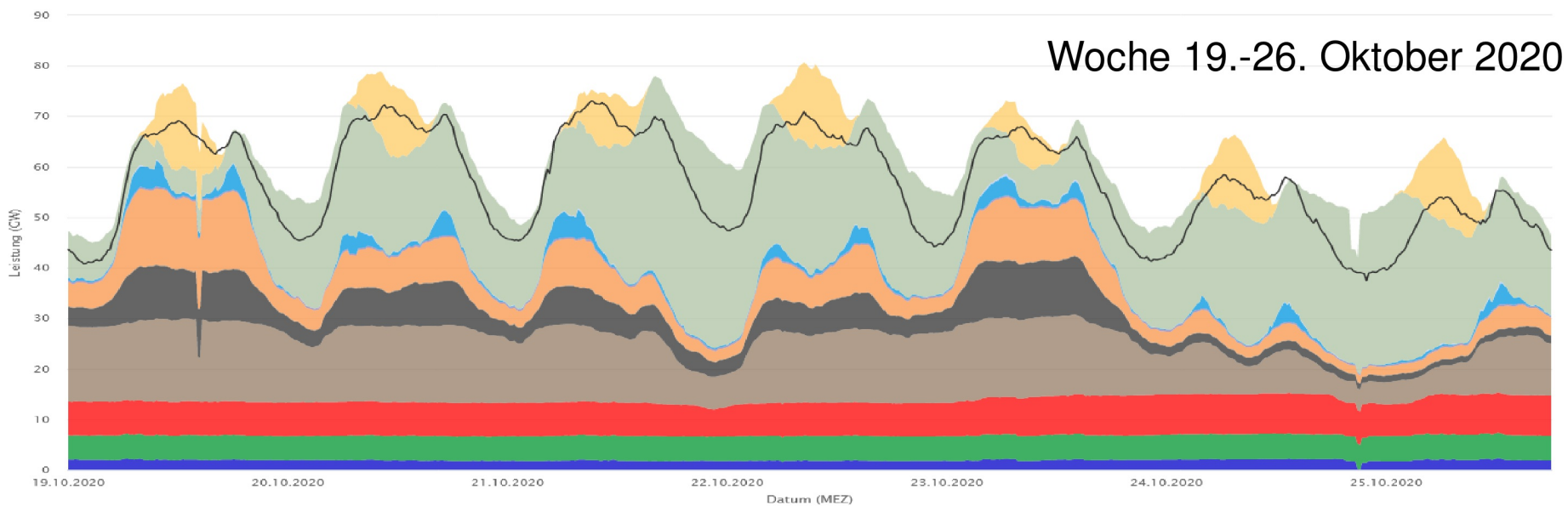
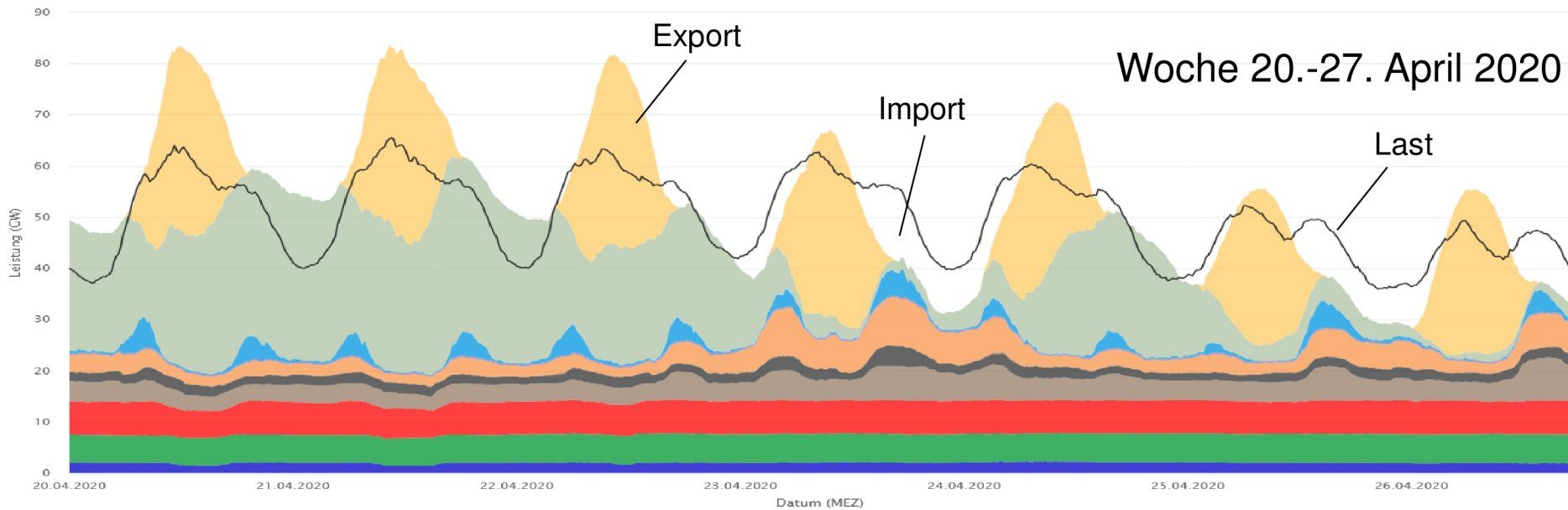
Tägliche/jährliche Fluktuationen im Bedarf  $\neq$  Fluktuationen in Wind-/Solarenergieerzeugung  
→ Problem für Netzstabilität

### Mittlere Windgeschwindigkeit März 2020

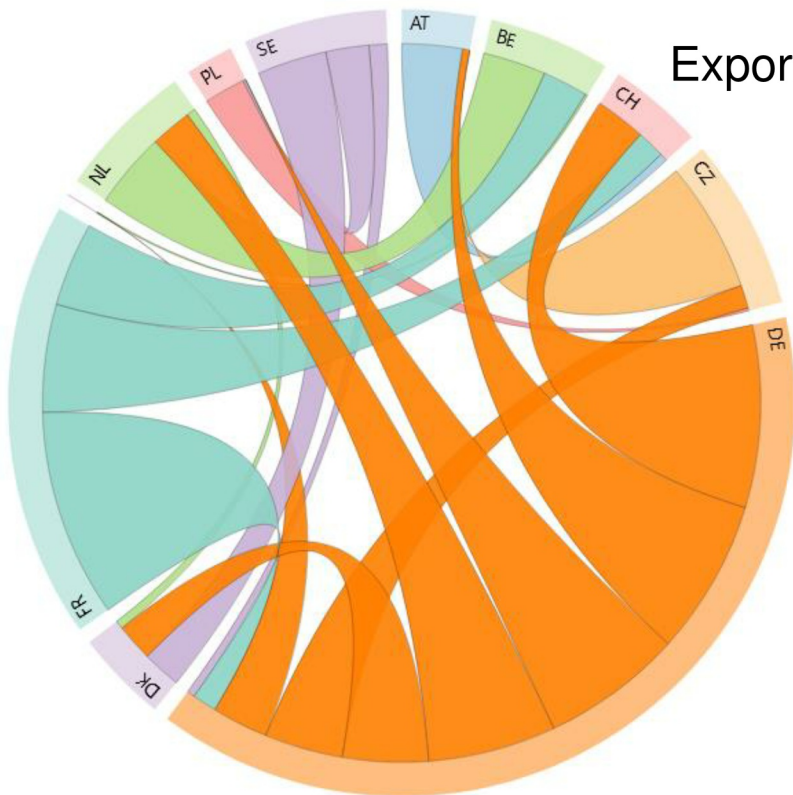


### Gesamte Solarstrahlung März 2020



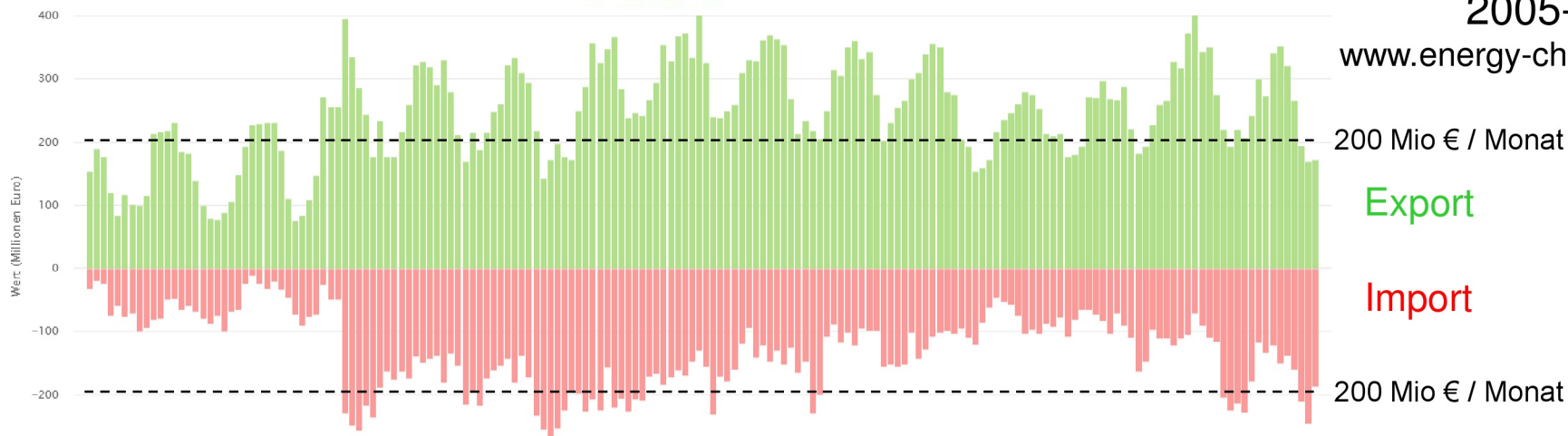


- AT, Österreich
- BE, Belgien
- CH, Schweiz
- CZ, Tschechien
- DE, Deutschland
- DK, Dänemark
- FR, Frankreich
- LU, Luxemburg
- NL, Niederlande
- PL, Polen
- SE, Schweden



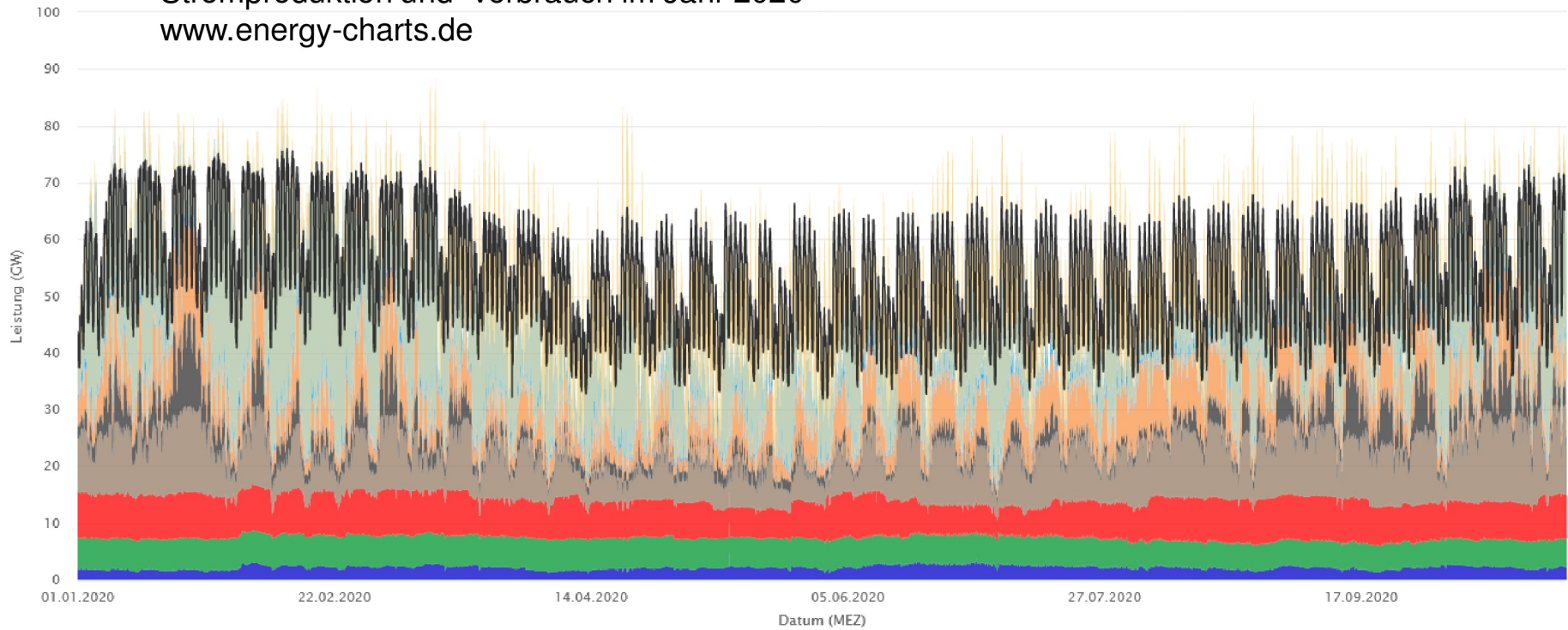
Export/-import elektrischer Energie 2020  
[www.energy-charts.de](http://www.energy-charts.de)

Energieexport/-import  
 2005-2020  
[www.energy-charts.de](http://www.energy-charts.de)



Stromproduktion und -verbrauch im Jahr 2020

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



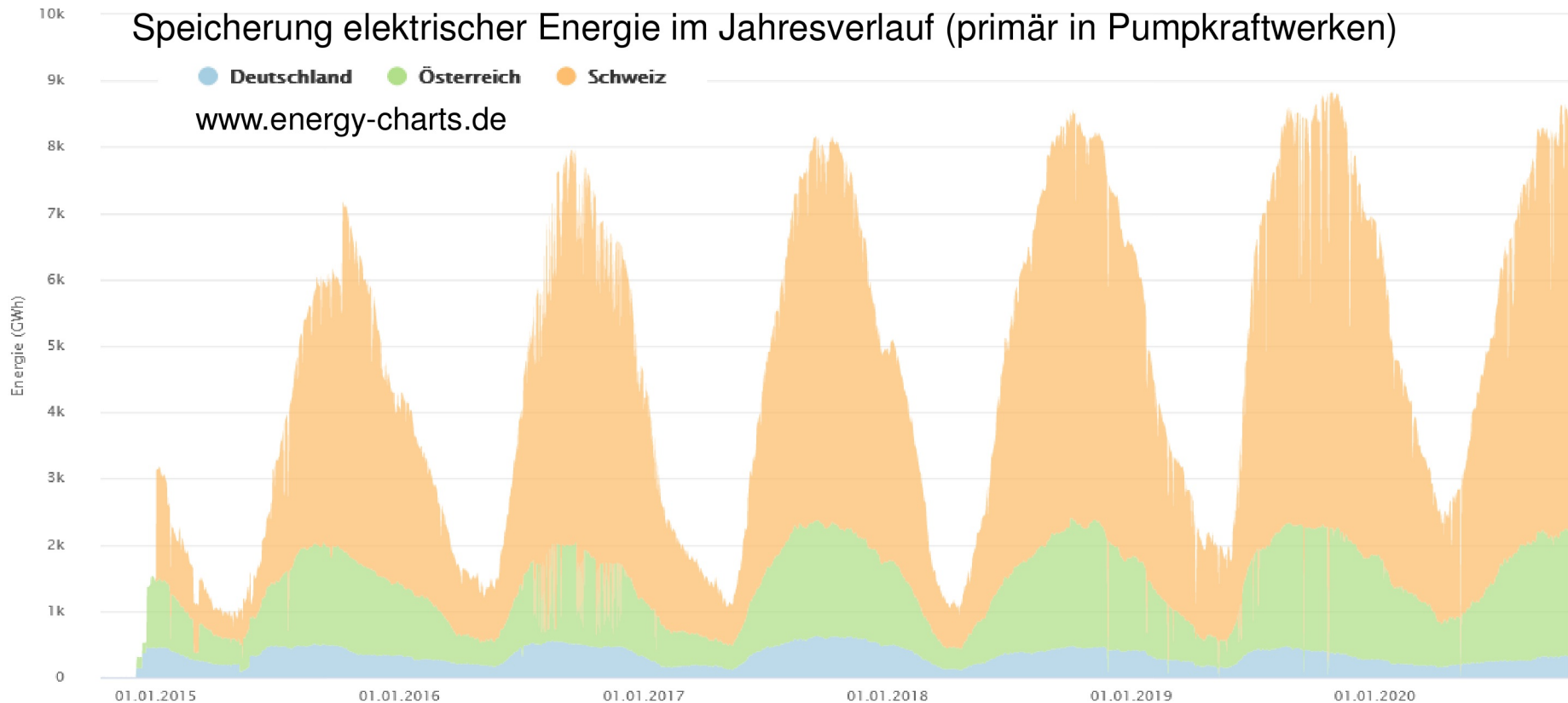
- |                          |                |               |                |                |                  |
|--------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|------------------|
| ● Pumpspeicher Verbrauch | ● Import Saldo | ● Wasserkraft | ● Biomasse     | ● Kernenergie  | ● Braunkohle     |
| ● Steinkohle             | ● Öl           | ● Gas         | ● Andere       | ● Pumpspeicher | ● Saisonspeicher |
| ● Wind                   | ● Solar        | — Last        | — Residuallast | — Anteil EE    |                  |

## Möglichkeiten der Speicherung elektrischer Energie:

- Pumpspeicherkraftwerke
- Wärmespeicher / Druckspeicher / mechanische Speicher
- Elektrochemische Speicher
- Umwandlung in Wasserstoff / Kraftstoffe

Bedarf zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen ist  $\geq 20\%$  des Tagesbedarfs:  
 $600 \text{ TWh} / 365 \text{ Tage} * 0.2 \approx 300 \text{ GWh}$

Speicherung elektrischer Energie im Jahresverlauf (primär in Pumpkraftwerken)

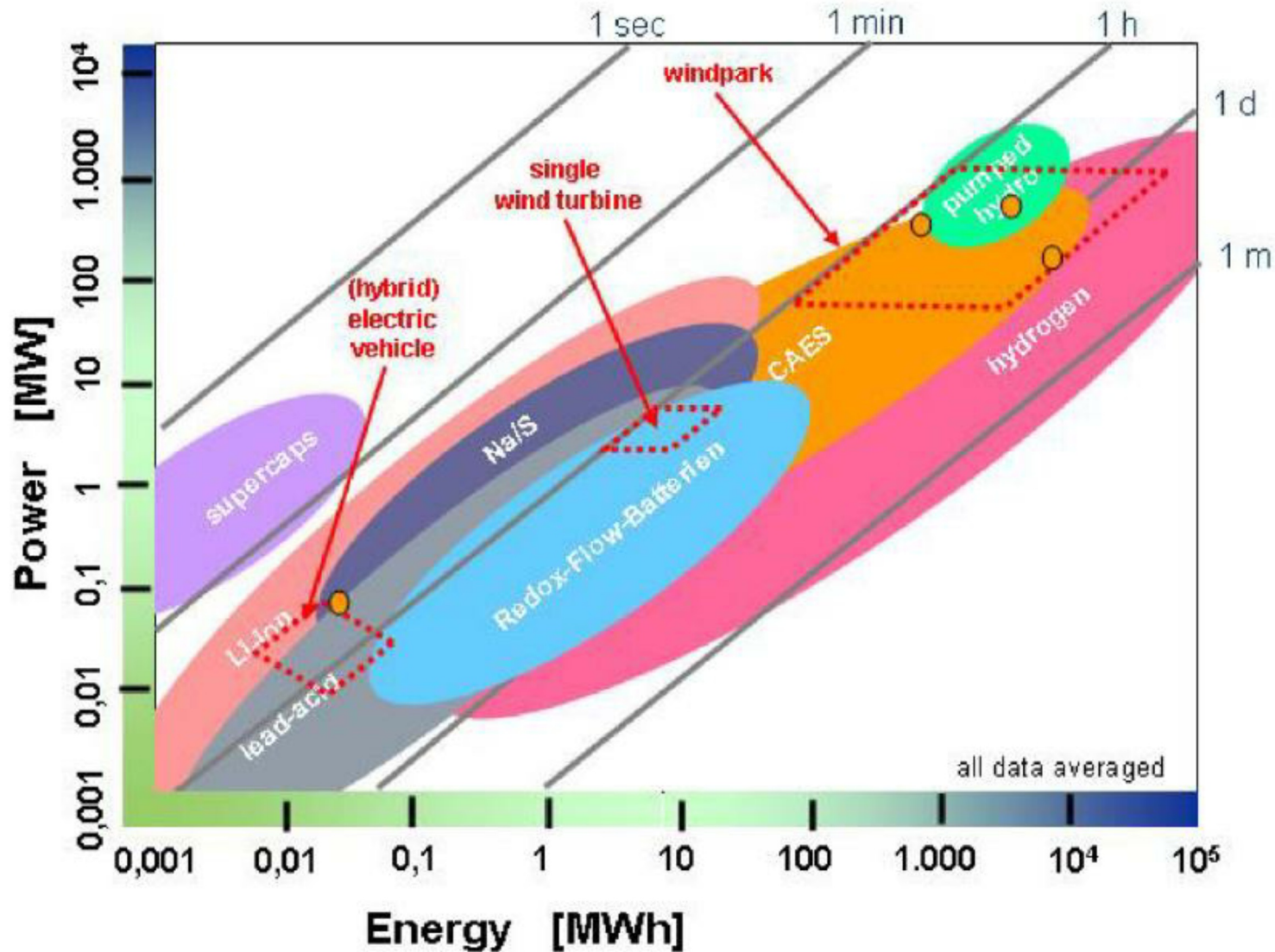


# Energiespeicherung für Stromversorgung

[http://videosever3.rz.uni-kiel.de/caulehre/supex144/Millwood\\_Energizer-en\\_x264.mp4](http://videosever3.rz.uni-kiel.de/caulehre/supex144/Millwood_Energizer-en_x264.mp4)



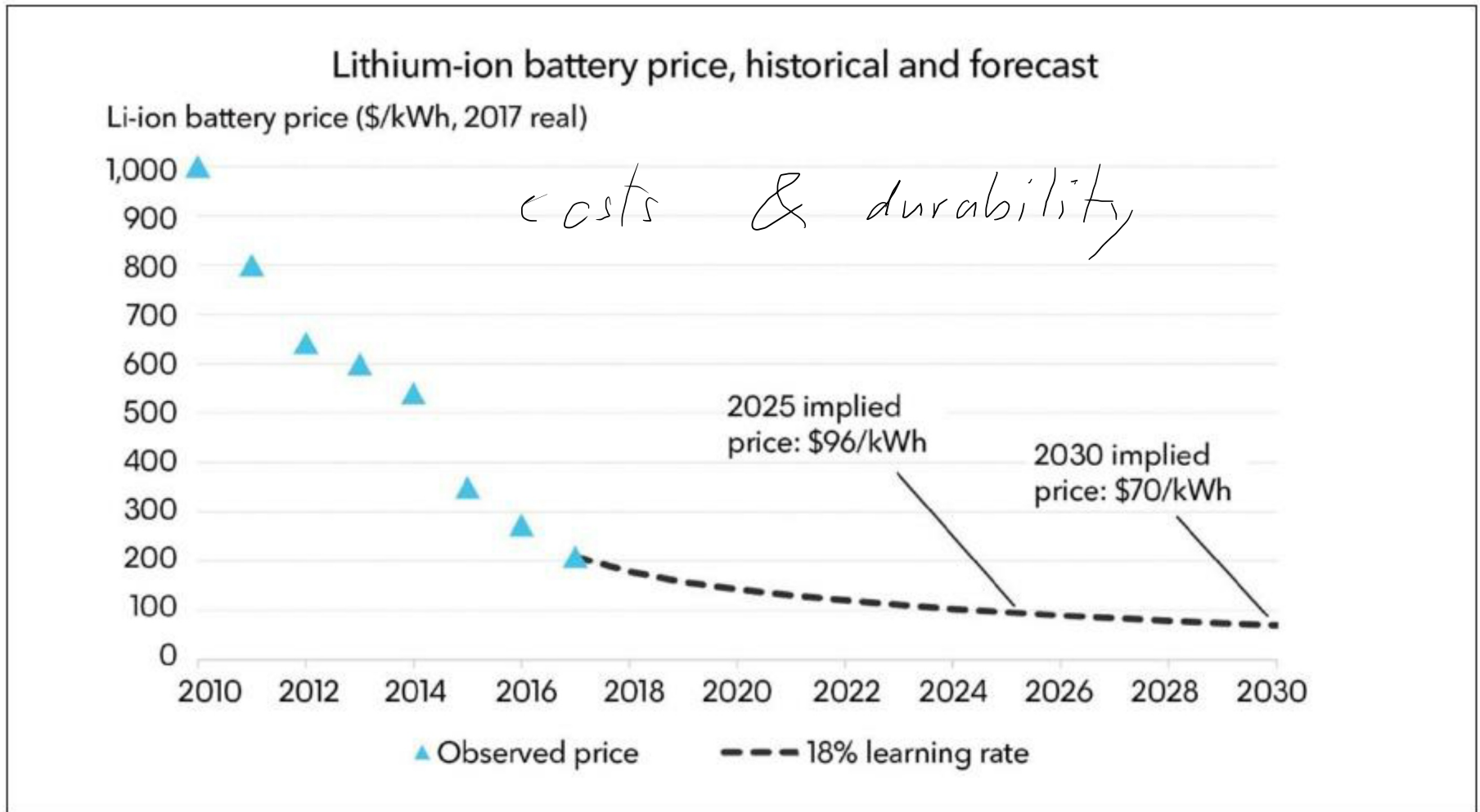
## Speicherbedarf für dezentrale Anwendungen





In Jardelund ist der größte Batteriespeicher Europas in Betrieb gegangen. In der Nähe der dänischen Grenze hat der niederländische Energieversorger Eneco einen Speicher mit einer Leistung von 46 Megawatt (MW) und einer Kapazität von mehr als 50.000 Kilowattstunden (kWh) ans Netz gebracht. Etwa 10.000 Lithium-Ionen-Batterien sind in dem XXL-Speicher installiert - genug, um etwa 5300 Haushalte für 24 Stunden mit Strom zu versorgen.





**FIGURE 3.4: Li-ion Battery Module Costs Trend & Outlook.** Source: Bloomberg New Energy Finance



Die Erneuerbare-Energien-Gesellschaft Energie des Nordens, deren Hauptgesellschafter Greenpeace Energy ist, und H-TEC SYSTEMS aus Lübeck haben heute den Kaufvertrag für einen PEM-Elektrolyseur zur Wasserstoffproduktion unterzeichnet. Die neu entwickelte Anlage mit einer Nennleistung von einem Megawatt soll im schleswig-holsteinischen Haurup ab 2020 aus überschüssigem Windstrom jährlich bis zu drei Millionen Kilowattstunden Wasserstoff ins Gasnetz einspeisen.



## „Die Zukunft gehört dem Elektroauto“

VW-Chef Winterkorn

16.06.2008, Spiegel online

## „Das ist die Zukunftstechnologie schlechthin“

Daimler-Entwicklungsvorstand Thomas Weber

28.06.2008, Wirtschaftswoche

### Vorteile

- **umweltfreundlich**
  - energieeffizient
  - Rückgewinnung der Energie
  - keine Abgase
  - potenziell CO<sub>2</sub> emissionsfrei
- **gute Fahreigenschaften**
  - hohe Anfangsbeschleunigung
  - gleichmäßiges Drehmoment über gesamten Drehzahlbereich
- **Komfort**
  - leise
  - wartungsarm



## Energieverbrauch Elektroauto vs. Auto mit Verbrennungsmotor

- „well-to-wheel“ Betrachtung notwendig
- Herstellungskosten müssen mit eingerechnet werden

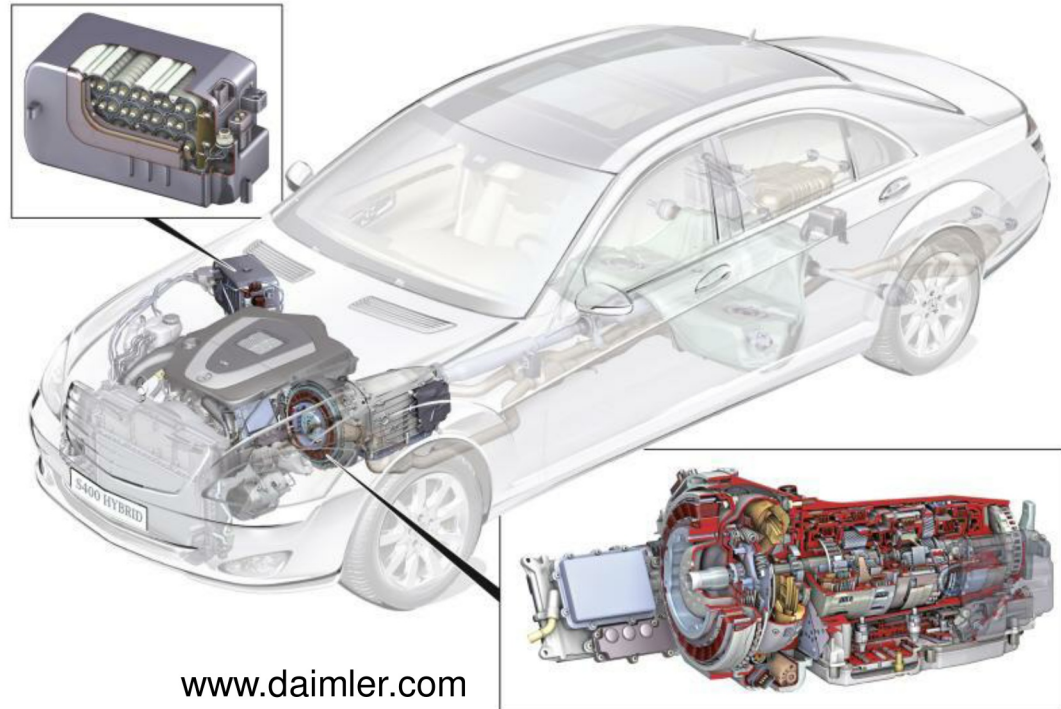
Year	Power Plant Efficiency	Grid Efficiency	Inverter AC/DC Efficiency	Battery Efficiency (Fast Charge)	Power Electr. Efficiency (DC/DC DC-AC)	Motor and Magnetic Gear Efficiency	Energy Consumption Ideal mid-size car Wh/km #	Total Consumption of Primary Energy Wh/km
2008 Range 150km	0.42	0.80	0.90	0.80	0.90	0.80-0.86	120	641-689 -15% Reg. Braking
2008 Range 150km	Renewable Energy only	0.93	0.90	0.80	0.90	0.80-0.86	120	235-219 -15% Reg. Braking
2008 Range 600km	WTW Powertrain Efficiency of a Conventional Internal Combustion Engine car in reality: 0.16 - 0.23						120	750-522 -10% micro-mild hybrids

## Problem Energiespeicherung

### • Anforderungen

- Energie für 800 km Fahrt → Batterie mit 100 kWh (→ 670 kg Li-Ionen-Akku)
- mindestens 50 kW Leistung
- kurze Betankungs-/Ladezeiten
- 10 Jahre Lebensdauer
- geringer Platzbedarf
- geringe Kosten

16.000 km / Jahr  
= 120 Wh / km  
= 2 Mh



## Hybridfahrzeuge



Toyota Prius III



Mercedes-Benz S400 BlueHybrid

## Elektrofahrzeuge mit Akkumulatoren



Tesla Roadster

## Brennstoffzellenfahrzeuge

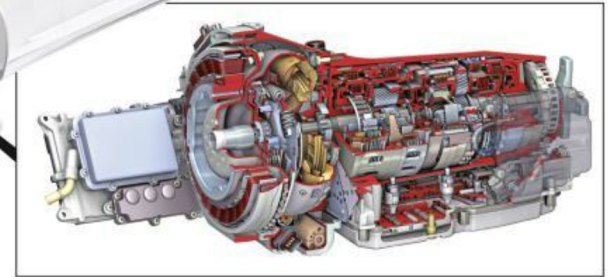
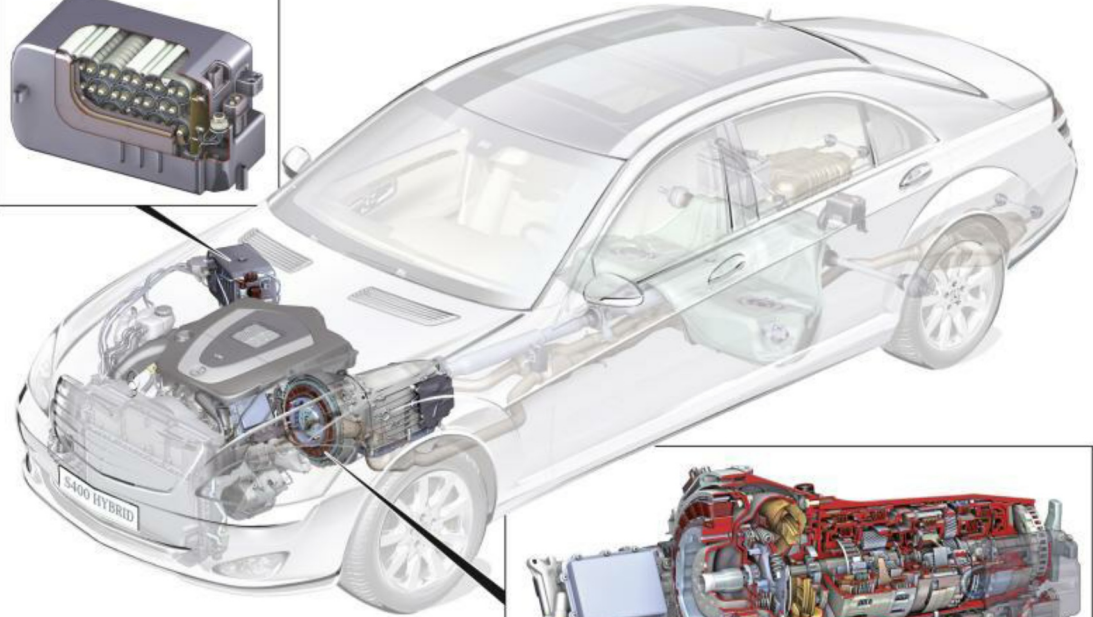


Mercedes-Benz F-Cell (A-Klasse)



Mercedes-Benz S400 BlueHybrid

Li Batterie



## Daten

- Leistung V6-Benzinmotor: 205 kW/279 PS
- + Hybridmodul: + 15 KW/20 PS
- Nennleistung: 220 KW/299 PS
- max. Drehmoment: 375 Nm
- Beschleunigung 0-100 km/h: 7,3 Sek.
- NEFZ-Verbrauch: 7,9 l/100 km
- CO2-Emission: 186 g/km



Seit 2017 auf dem Markt, bis jetzt (2020) ca. 500.000 verkaufte Einheiten  
46.990 – 54.990 US\$

Electric motor: Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor

Transmission: 1-speed fixed gear 9:1 ratio

Battery: 54 or 62 or 75 kWh (190 or 220 or 270 MJ) Lithium ion

Electric range:

354 km Standard Range

423 km Standard Range Plus

504 km Long Range Performance AWD with Performance Upgrade

Charging:

up to 120 km in 5 minutes and 290 km in 15 minutes (250 kW V3 Supercharger)

6.5 h full charge time (10% -> 90%)

Battery life time:

1500 cycles  $\approx$  500.000 km

Battery weight:

480 kg for 75 kWh version  
(1,847 kg total weight)

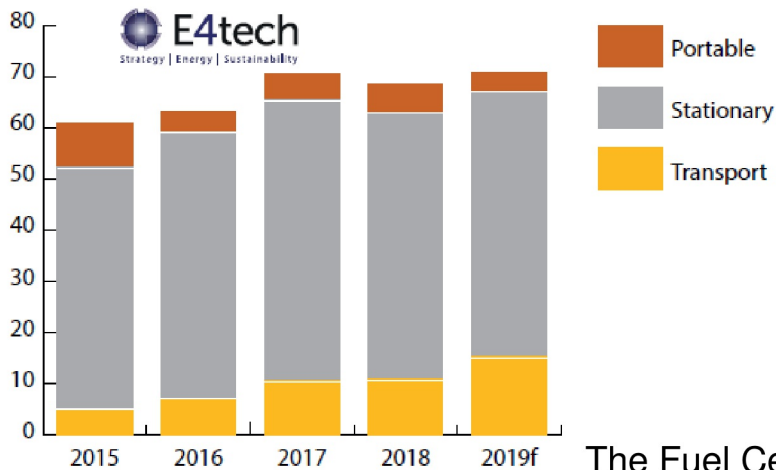






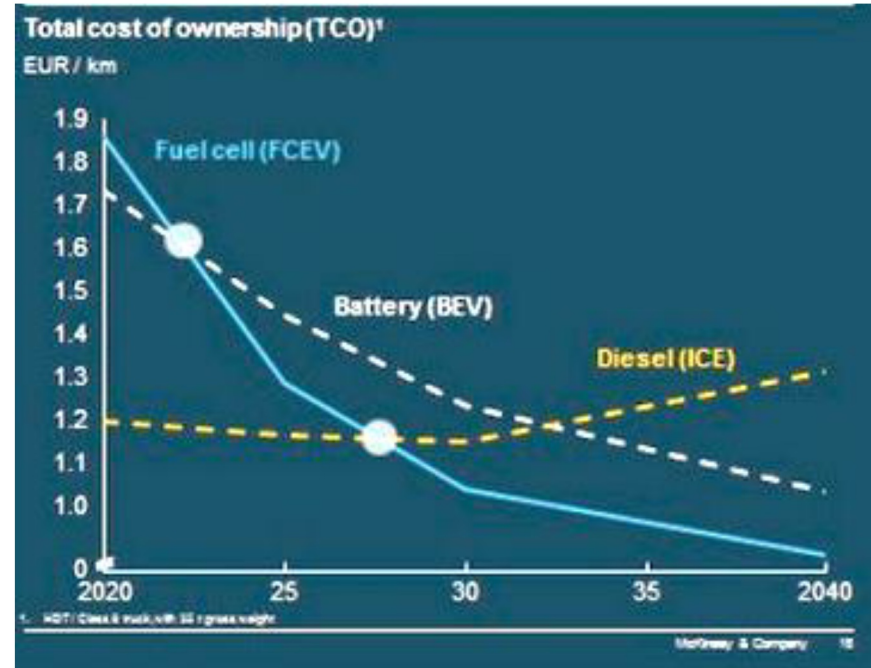
Brennstoffzellen-Fahrzeuge Ballard (Stand 2020)

Shipments by application 2015 - 2019 (1,000 units)



The Fuel Cell Industry Review 2019

Einsatz von Brennstoffzellen primär erwartet im kommerziellen Schwertransport



McKinsey – Path to Hydrogen Competitiveness report 2020



Hersteller: Honda

Kommerziell erhältlich (Japan/USA): 2017

174 PS

Reichweite: 600 km

## Grundlagen Stromquellen

Typische Beschreibung Elektrotechnik:  
 Ideale Spannungsquelle ( $U_0$ ) mit  
 Innenwiderstand ( $R_i$ ) ergibt  
 Klemmenspannung  $U_{Kl}$

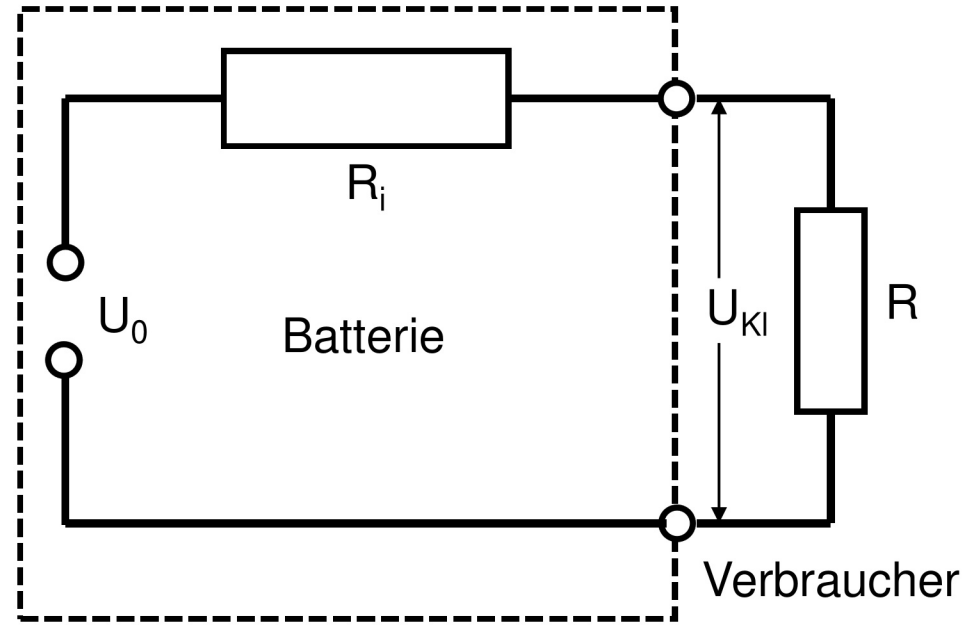
Analog bei Ladevorgang

Aber:

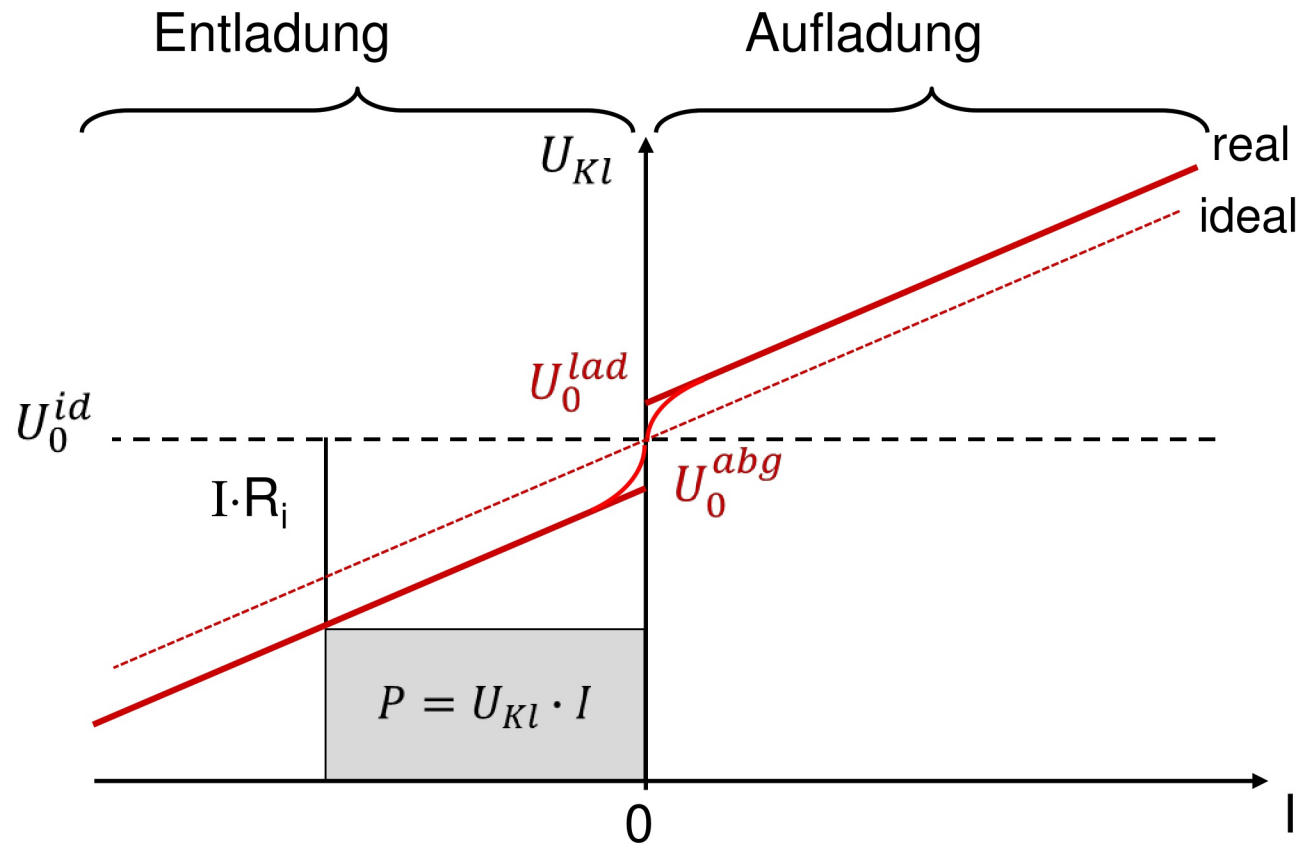
Bei Akkumulatoren ist  $U_0$  bei Ladung  
 und Entladung nicht gleich

Ladung:  $U_{Kl} = U_0^{lad} + R_i I$

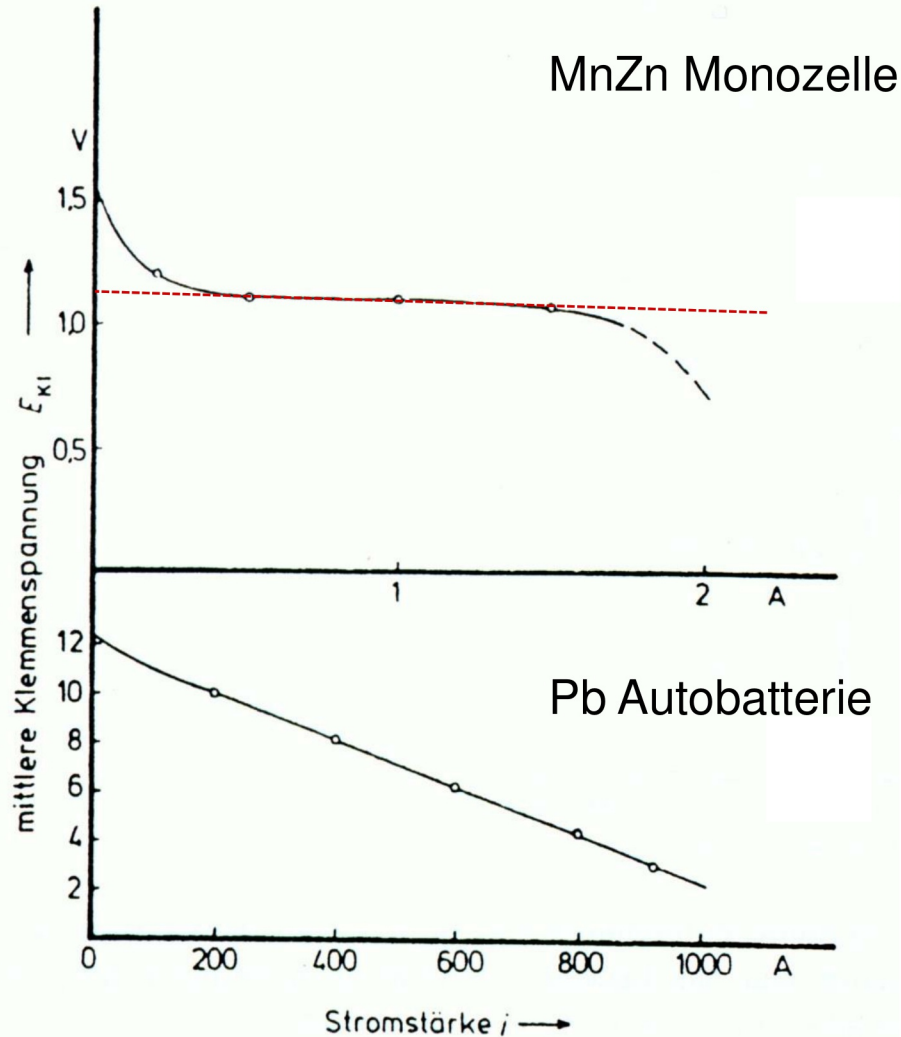
Entladung:  $U_{Kl} = U_0^{abg} - R_i I$



## Strom-Spannungs-Charakteristik



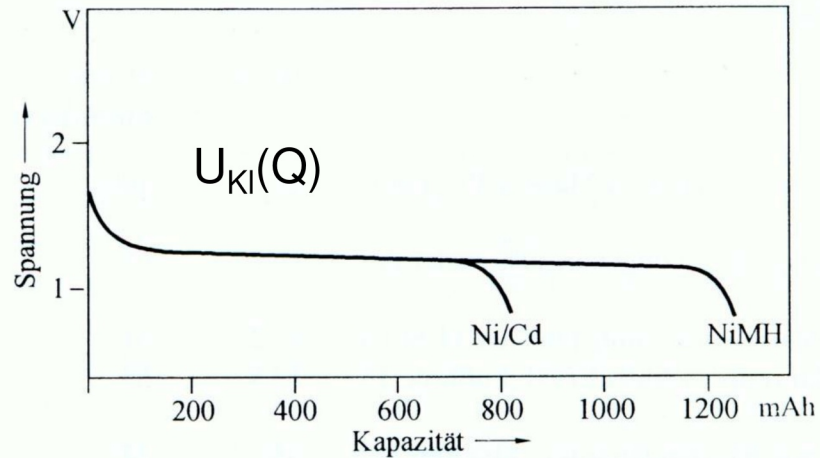
## Strom-Spannungs-Charakteristik von Batterien



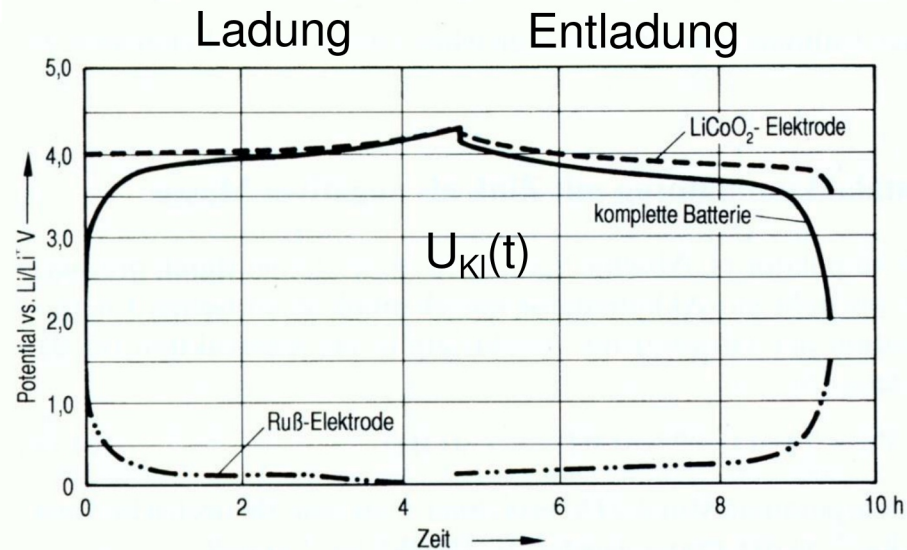
## Lade-/Entladekurve

Aufladung- /  
Entladung bei  
konstantem Strom

Hamann/Vielstich,  
Elektrochemie



**Abb. 9-16** Entladekurve (einstündige Entladung) einer NiMH- im Vergleich zu einer Ni/Cd-Mignon-Zelle (Information Varta AG).



**Abb. 9-17** a) Schematische Darstellung einer Lithium-Ionen-Batterie. b) Lade-/Entladezyklus einer Lithium-Ionen-Batterie nach M. Fabian, Fa. Sonnenschein-Lithium.

Weiter zu berücksichtigen:

- Zyklenzahl
- Selbstentladung
- Ladedauer
- Lebensdauer
- Gedächtniseffekte
- Sicherheit
- Kosten

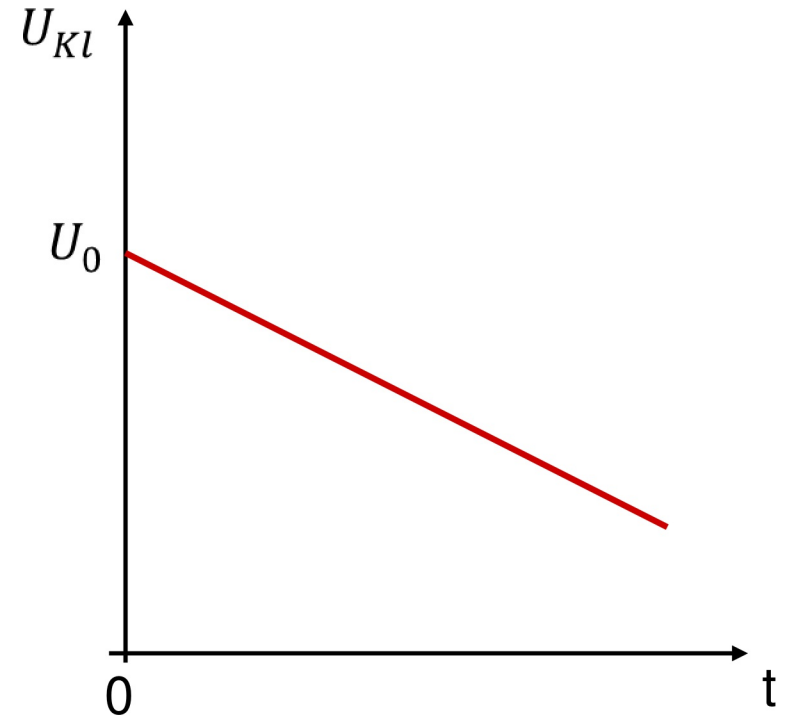
## Kondensatoren

$$U = q / C$$

mit Kapazität  $C$

Für  $I = dq/dt = \text{konst.}$

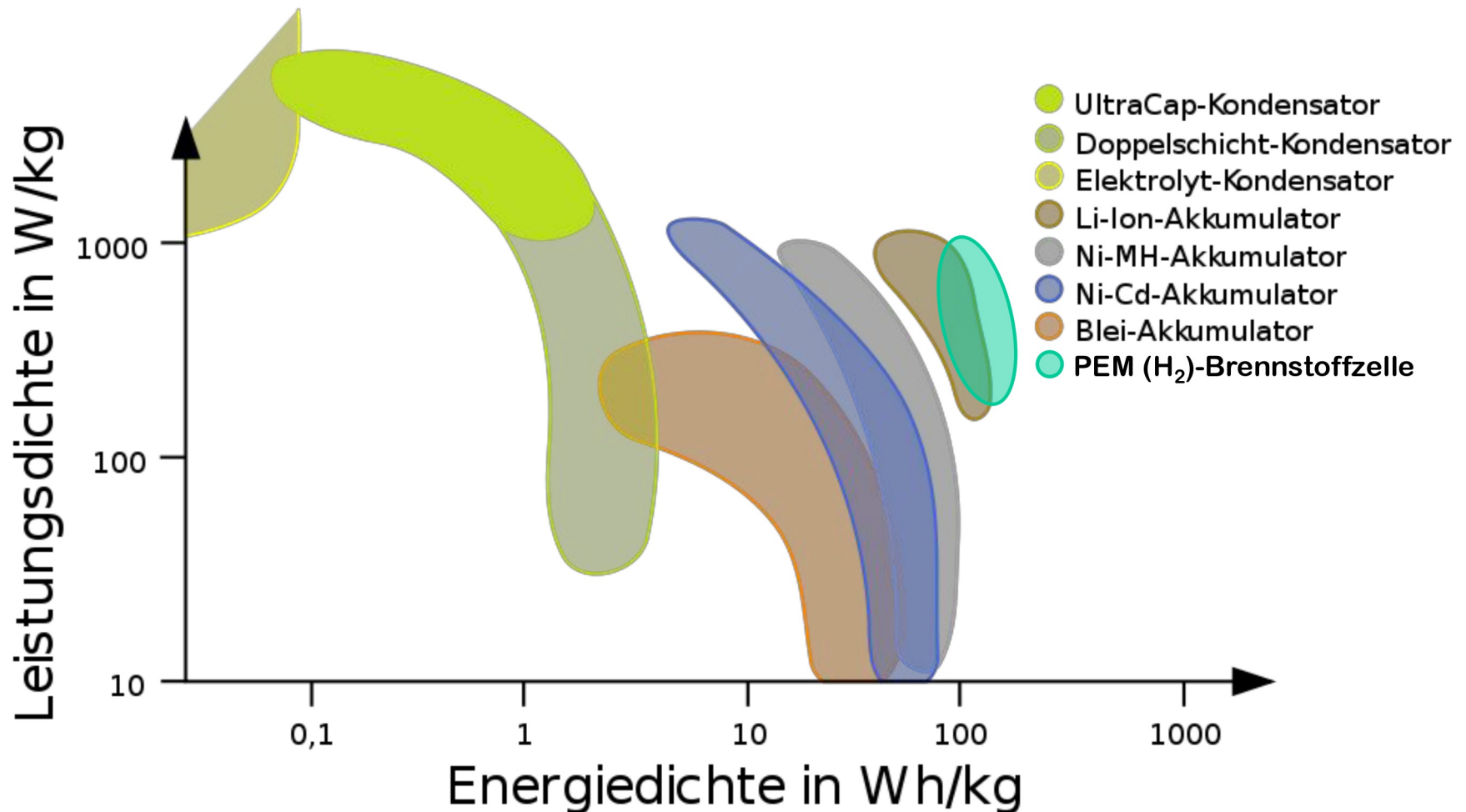
Gilt bei Entladung:  $U_{Kl} = U_0 - \frac{I}{C} t$



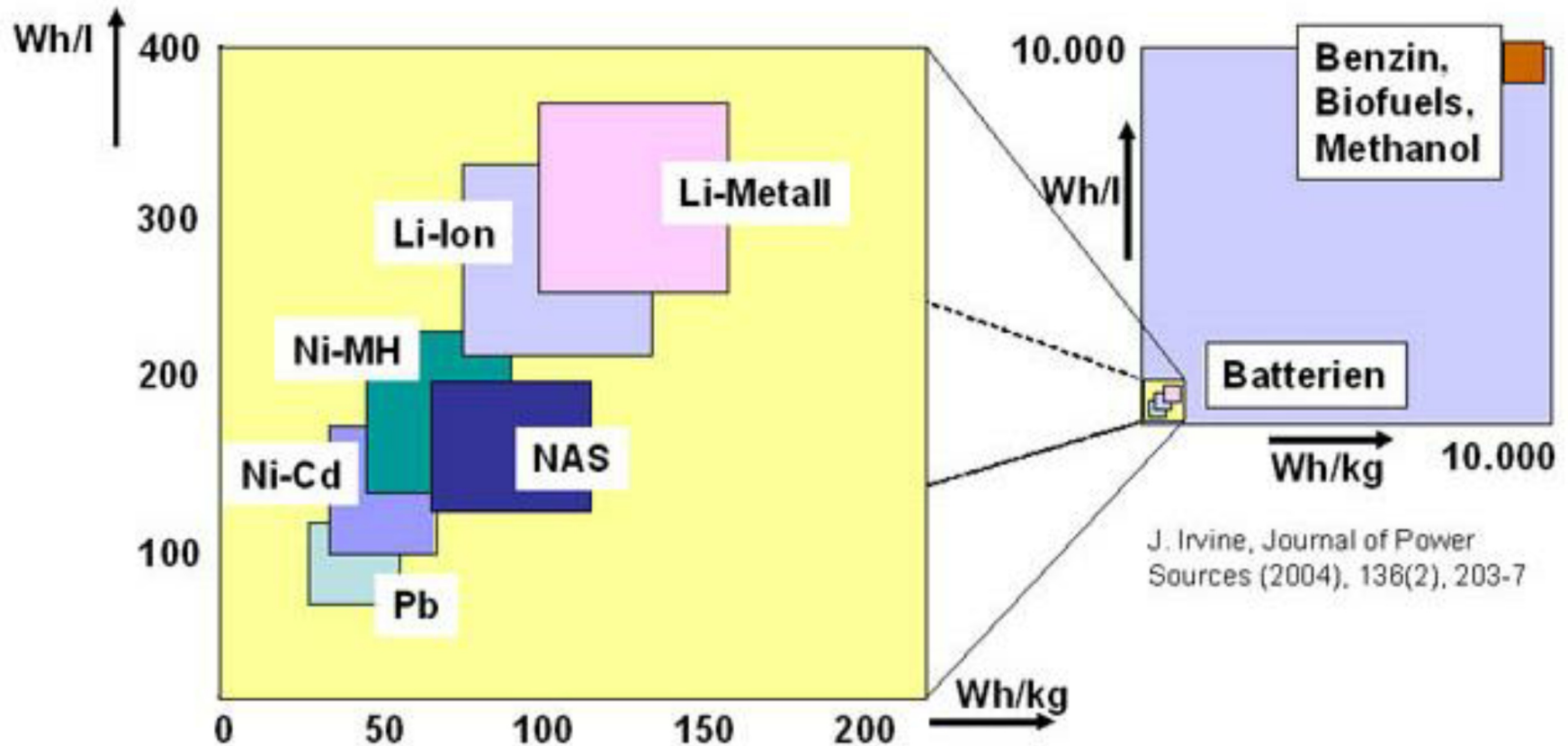


Energiedichte  $E/m$  [Wh/kg] bzw.  $E/V$  [Wh/dm<sup>3</sup>]

Leistungsdichte  $P/m$  [W/kg] bzw.  $P/V$  [W/dm<sup>3</sup>]



## Energiedichte elektrochemischer Energiespeicher



J. Irvine, Journal of Power Sources (2004), 136(2), 203-7

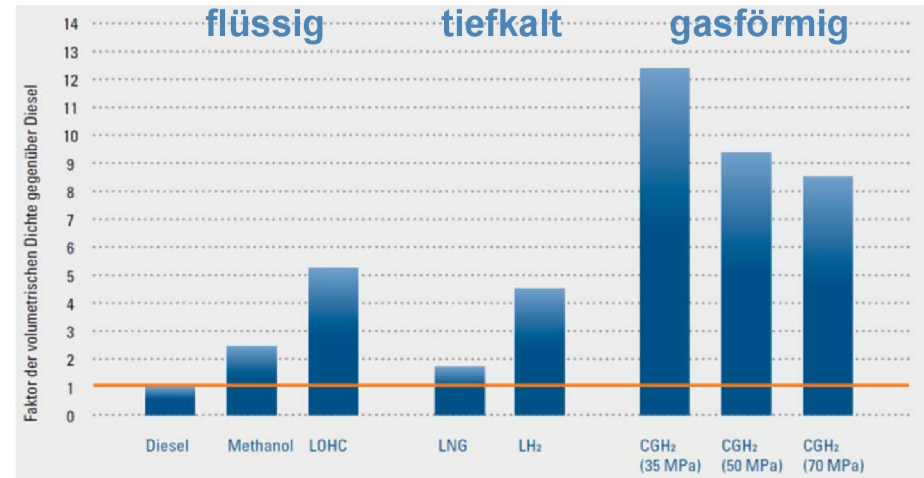
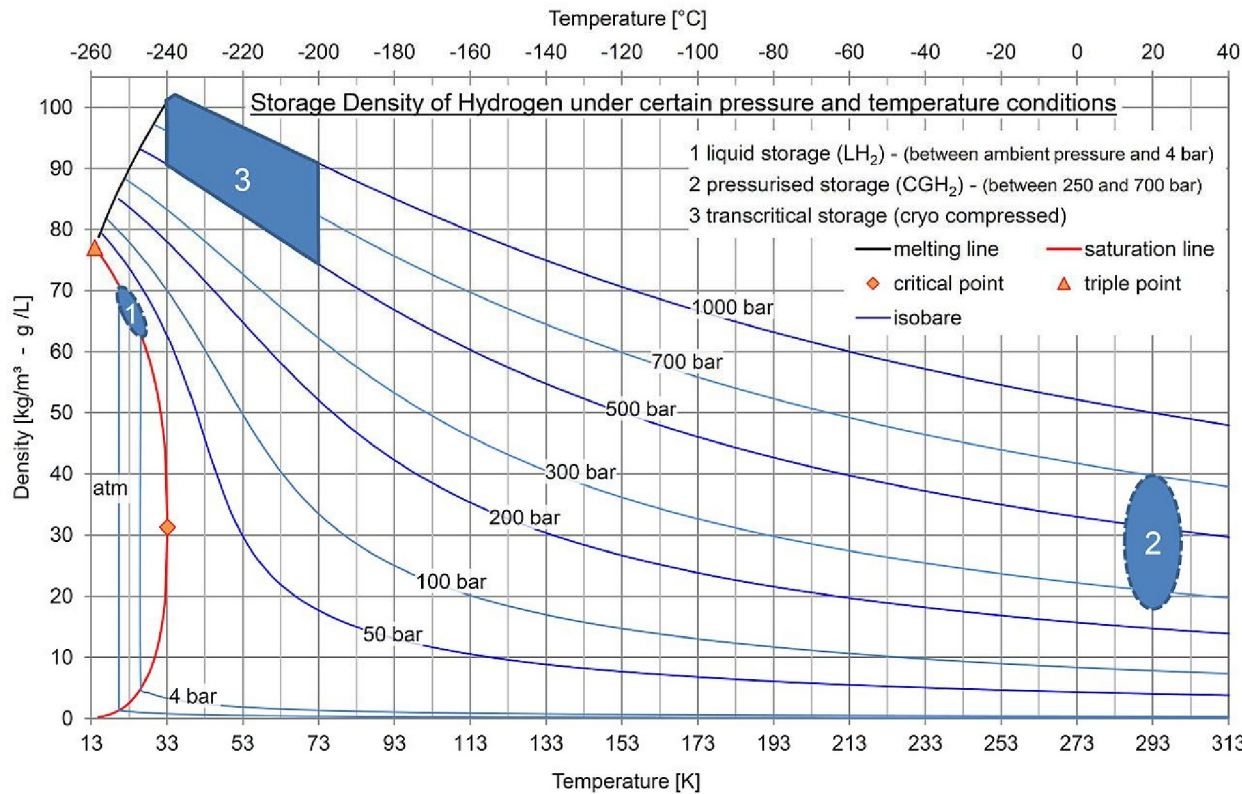
J. Garche, A. Jossen, H. Döring, VDI-Berichte Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik (2002) Band 484, Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, 101-118

# 1 / 45 Energie- und Leistungsdichte

## Energiedichte Wasserstoff

Gravimetrische Energiedichte  $H_2$ :  
 118500 kJ/kg = 33 kWh/kg

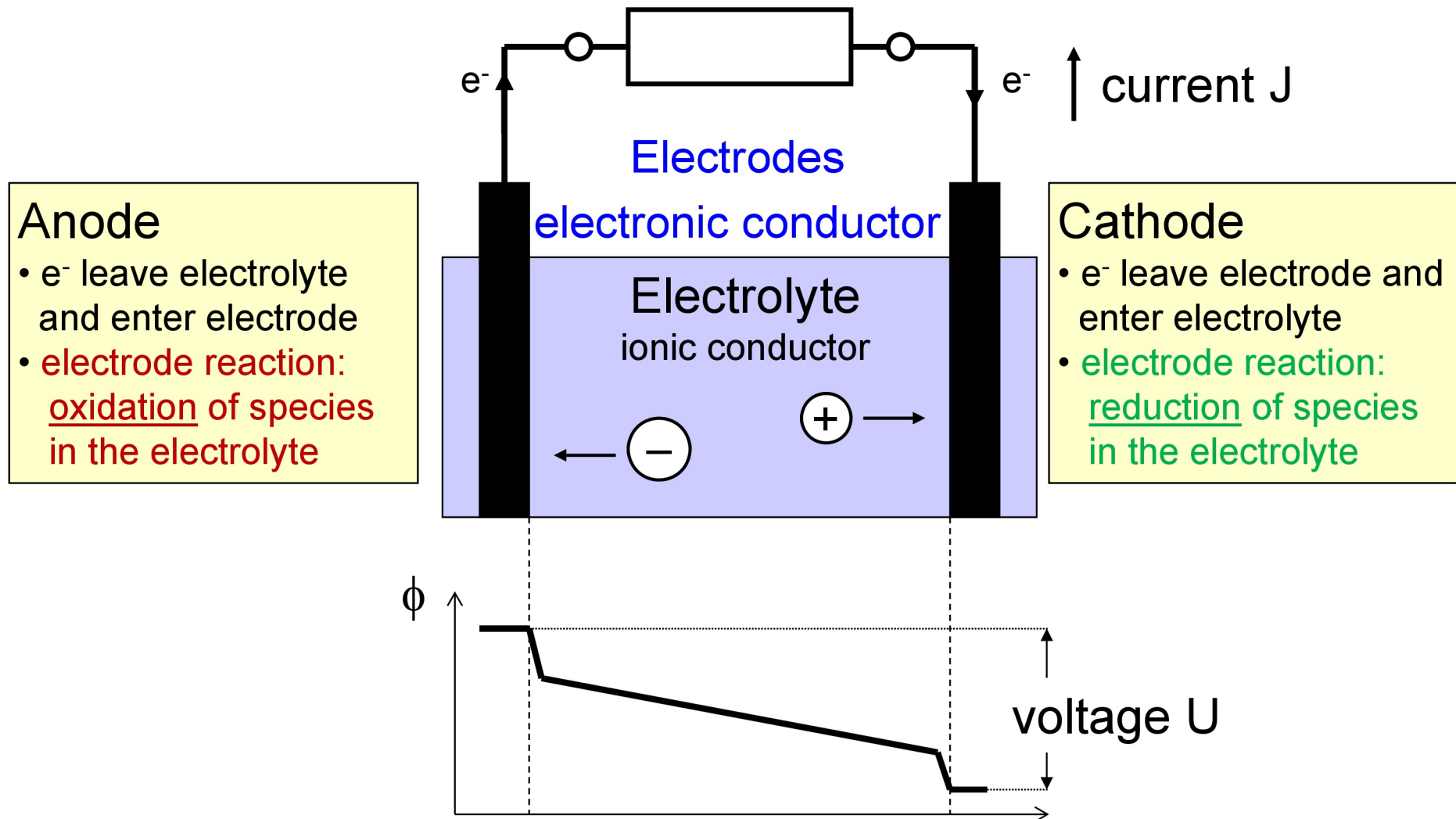
## Dichte von Wasserstoff



Volumetrische Energiedichte  
 NOW Studie „Strombasierte  
 Kraftstoffe für Brennstoffzellen in  
 der Binnenschifffahrt“ (2020)

<http://www.ilkdresden.de/en/service/research-and-development/project/hydrogen-test-area-at-ilk-dresden/>

## Elektrochemisches System

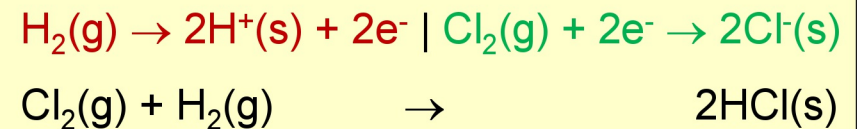
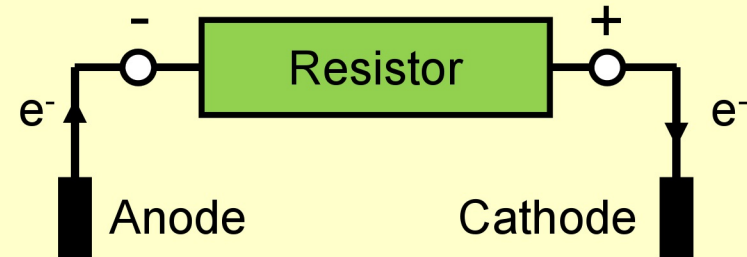


## Galvanische Elemente und Elektrolysezellen

### Galvanic cell

(batteries, fuel cells)

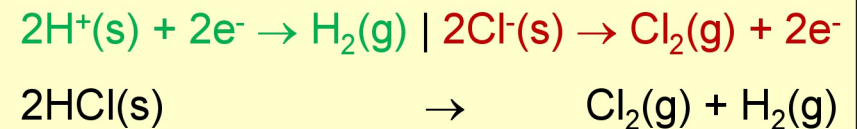
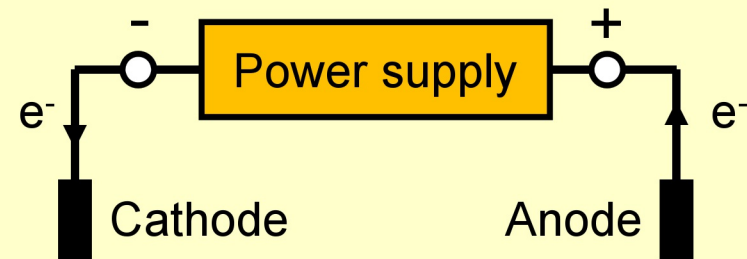
- spontaneous electrochemical reactions upon connection of electrodes
- energy flow:  
chemical energy → electrical energy



### Electrolytic cell

(electrolysis, electrosynthesis)

- electrochemical reactions induced by external current
- energy flow:  
electrical energy → chemical energy

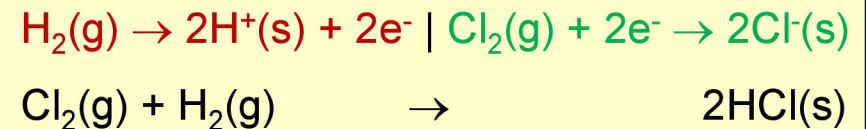
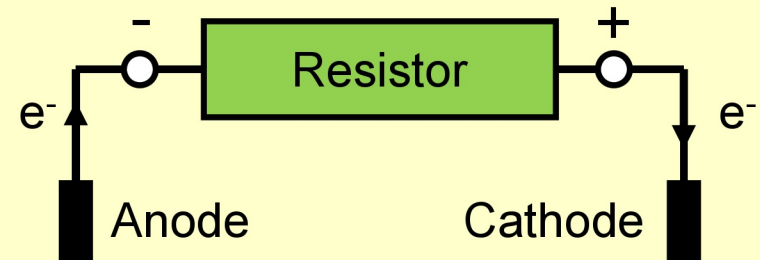


## Galvanische Elemente und Elektrolysezellen

### Galvanic cell

(batteries, fuel cells)

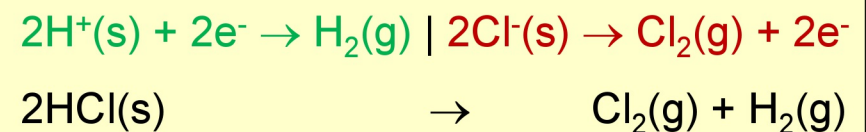
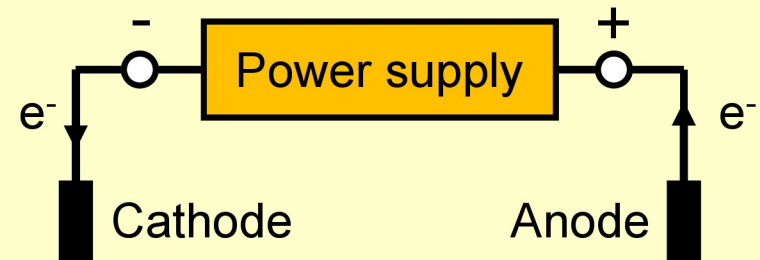
- spontaneous electrochemical reactions upon connection of electrodes
- energy flow: chemical energy → electrical energy

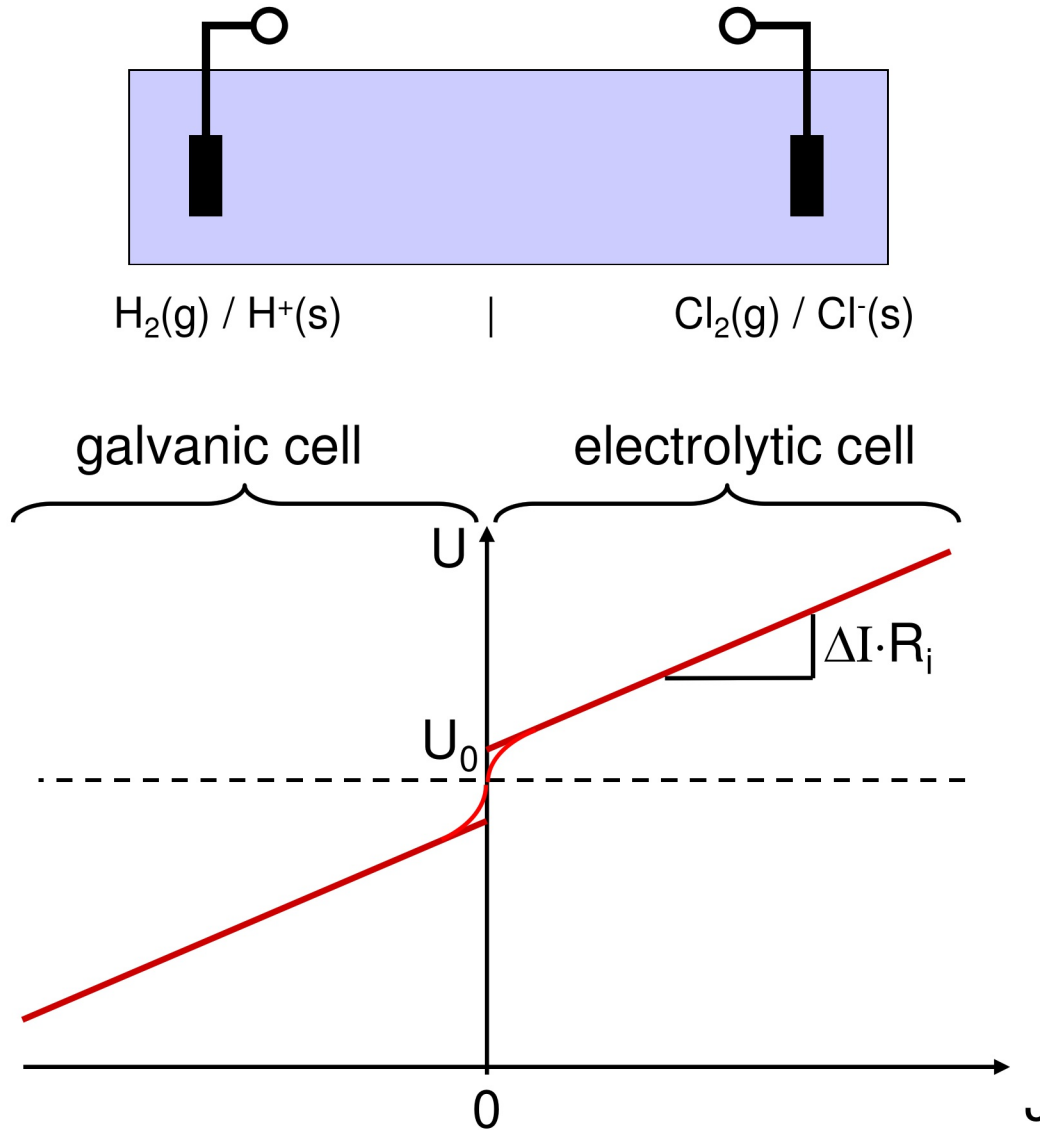


### Electrolytic cell

(electrolysis, electrosynthesis)

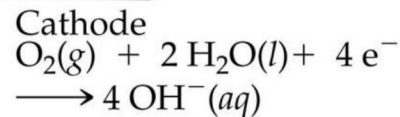
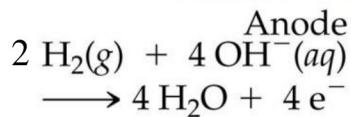
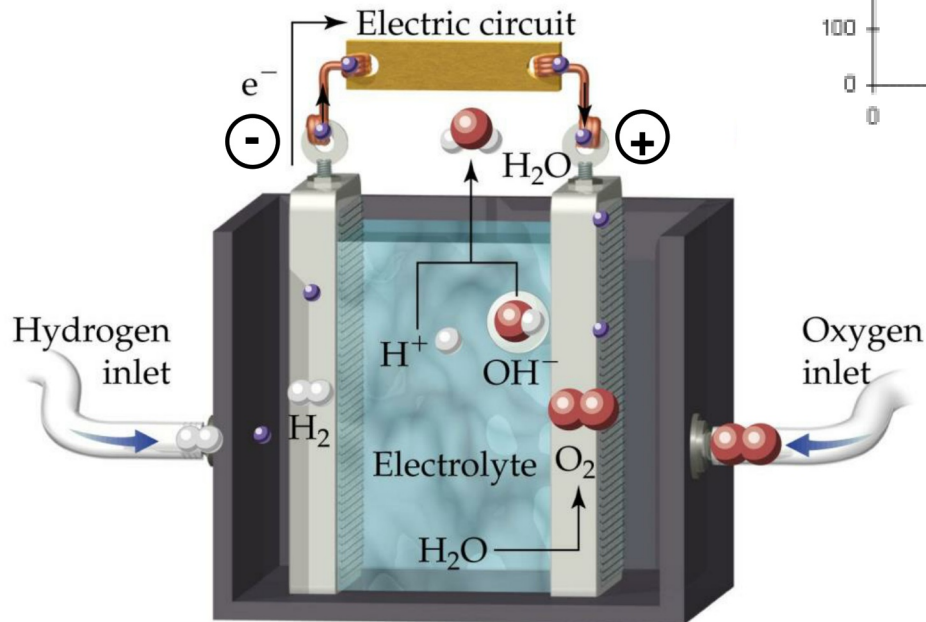
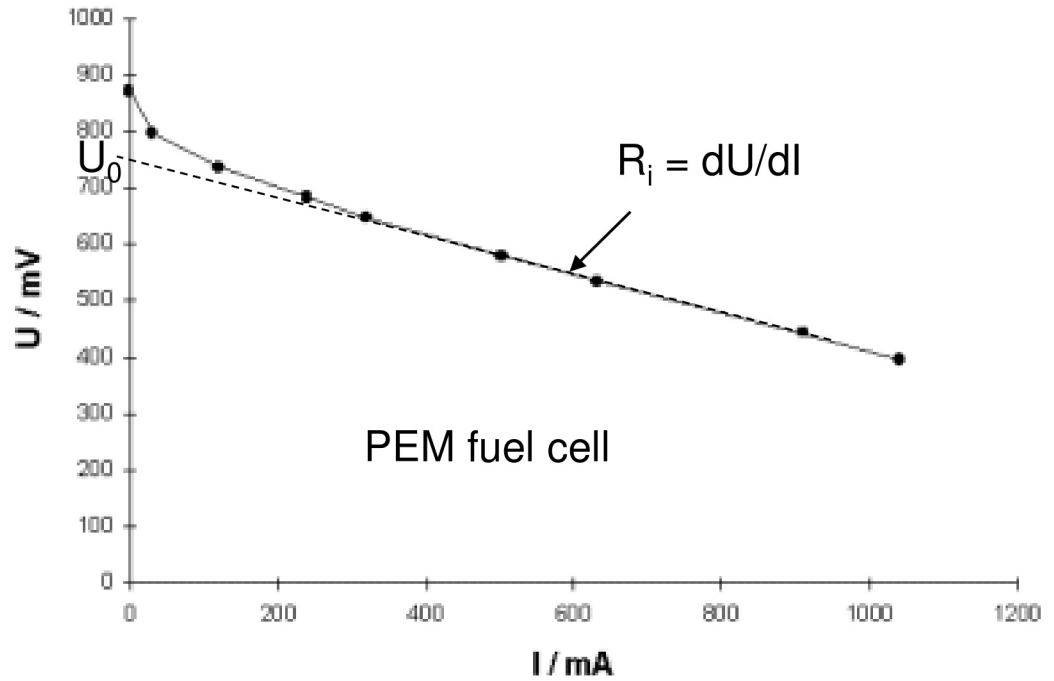
- electrochemical reactions induced by external current
- energy flow: electrical energy → chemical energy





# 1 / 48 Galvanische Elemente

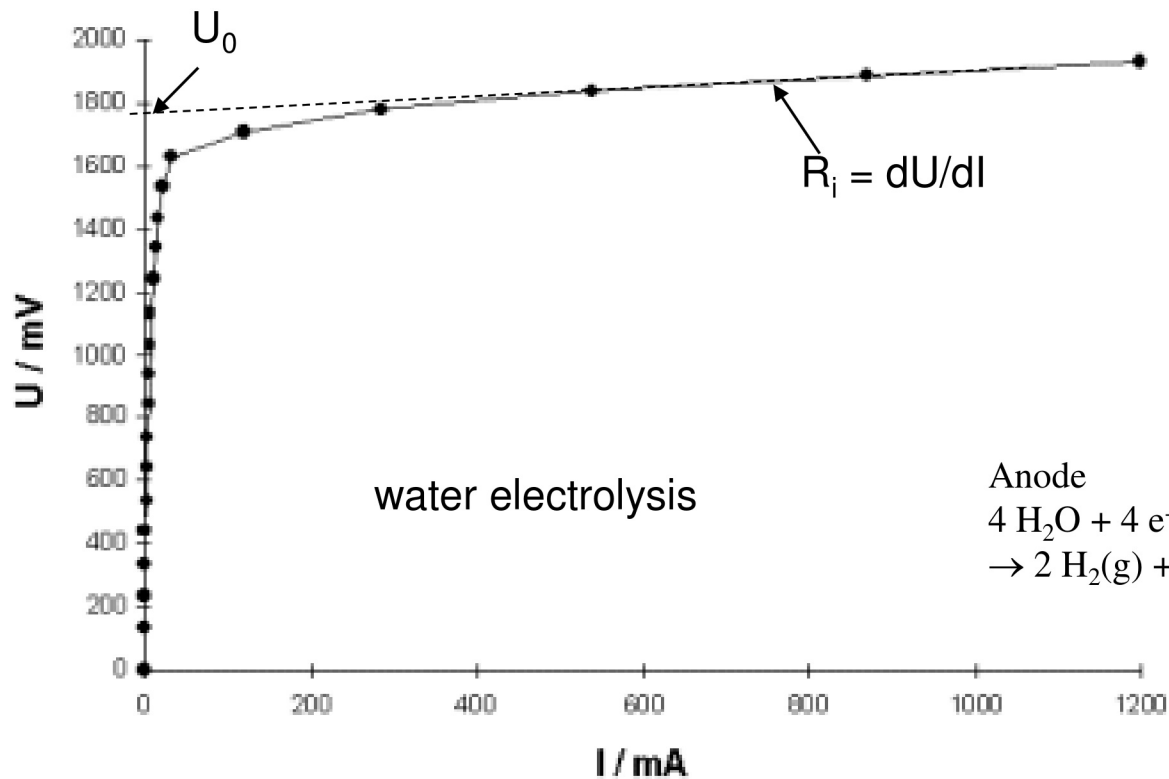
- spontaneous electrochemical reactions upon connection of electrodes
- energy flow: chemical energy → electrical energy
- examples: batteries, fuel cells





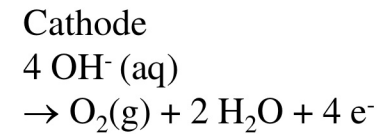
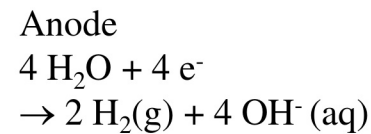
# 1 / 49 Elektrolysezelle

- electrochemical reactions induced by external current
- energy flow: electrical energy  $\rightarrow$  chemical energy
- examples: water electrolysis, electroplating



⊕

⊖



# 1 / 51 Zusammenhang Ladung - Stoffumsatz

---

1. Faradaysches Gesetz:

Stöchiometrisches Verhältnis zwischen Elektronenfluß und umgesetzter Stoffmenge

$$Q = I \cdot t = \Delta m \cdot n \cdot e_0 \cdot N_A$$

$e_0 \cdot N_A \equiv F = 96494 \text{ C mol}^{-1}$ ; Faraday Konstante

$n \equiv$  Anzahl umgesetzter Elementarladungen pro Formeleinheit

$\Delta m \equiv$  umgesetzte Stoffmenge in Mol

Beispiel  $\text{H}_2$  Elektrolysereaktion:



Pro  $\text{H}_2$  Molekül  $2 \text{e}^- \rightarrow n = 2$

$\rightarrow 1 \text{ Mol H}_2 (\approx 2\text{g})$  entspricht  $Q = 192988 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 53.6 \text{ h}$