

Neue Mobilität für den Klimaschutz: Batterien, Brennstoffzellen oder E-Fuels?

Reinhard Zellner
Prof. em.
Institut für Physikalische Chemie
Universität Duisburg-Essen

reinhard.zellner@uni-due.de

Vortrag anlässlich der Herbstsitzung des Arbeitskreises Energie
(AKE) der DPG, Bad Honnef, 17./18.10.2019



Motivation und Problemstellung:

Mobilität ist:

- Ein Grundbedürfnis des Menschen und eine Notwendigkeit für Wirtschaft und Freizeit.
- Aus physikalischen Gründen nicht ohne Emissionen zu haben !
- Ein Konflikt mit den Schutzziele Gesundheit und Klima.
- Deutschland hat 1% der Weltbevölkerung, aber fast 3% der CO₂-Emissionen. Wir leben in einer 5 kW Gesellschaft!

Lösungsansätze:

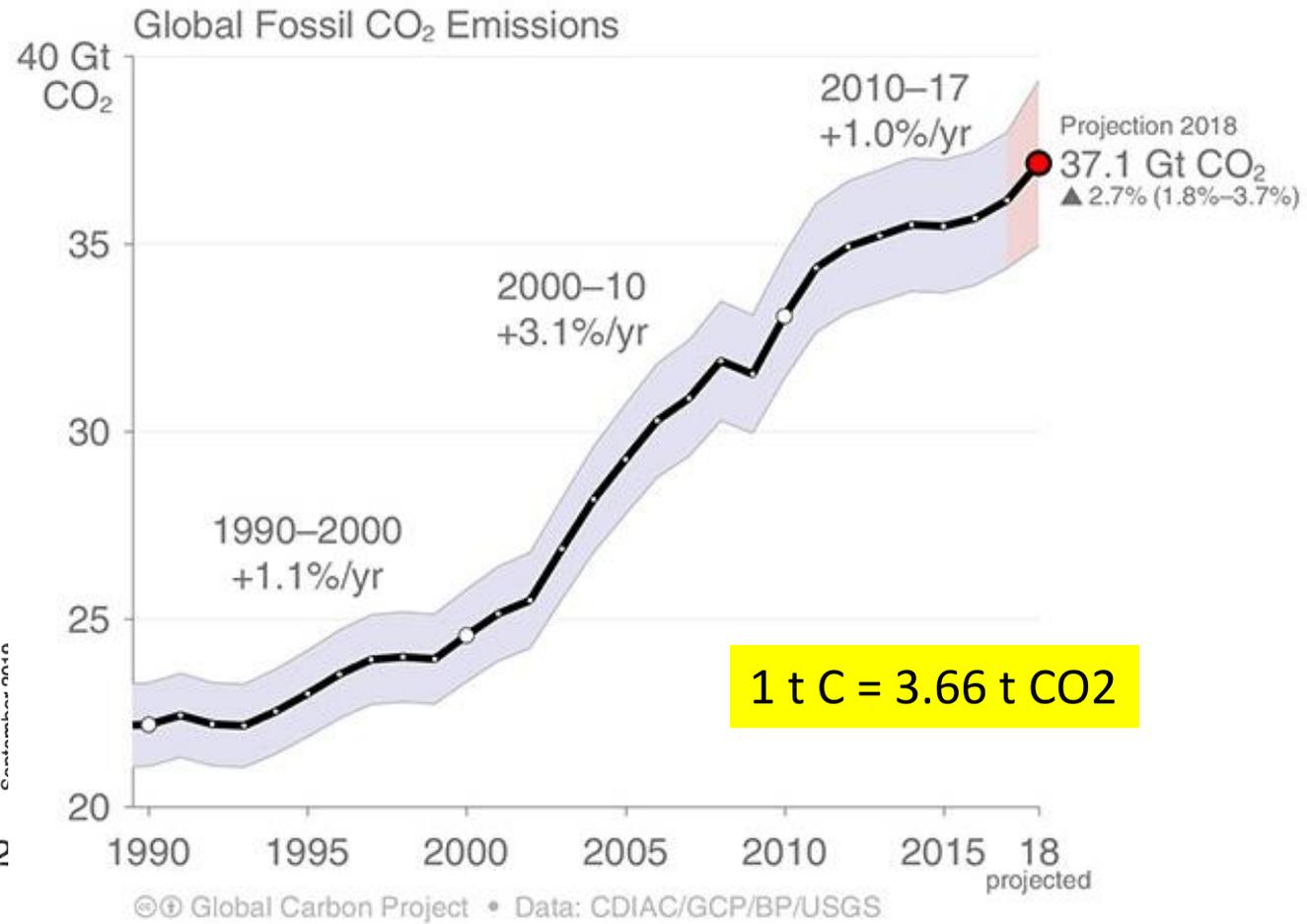
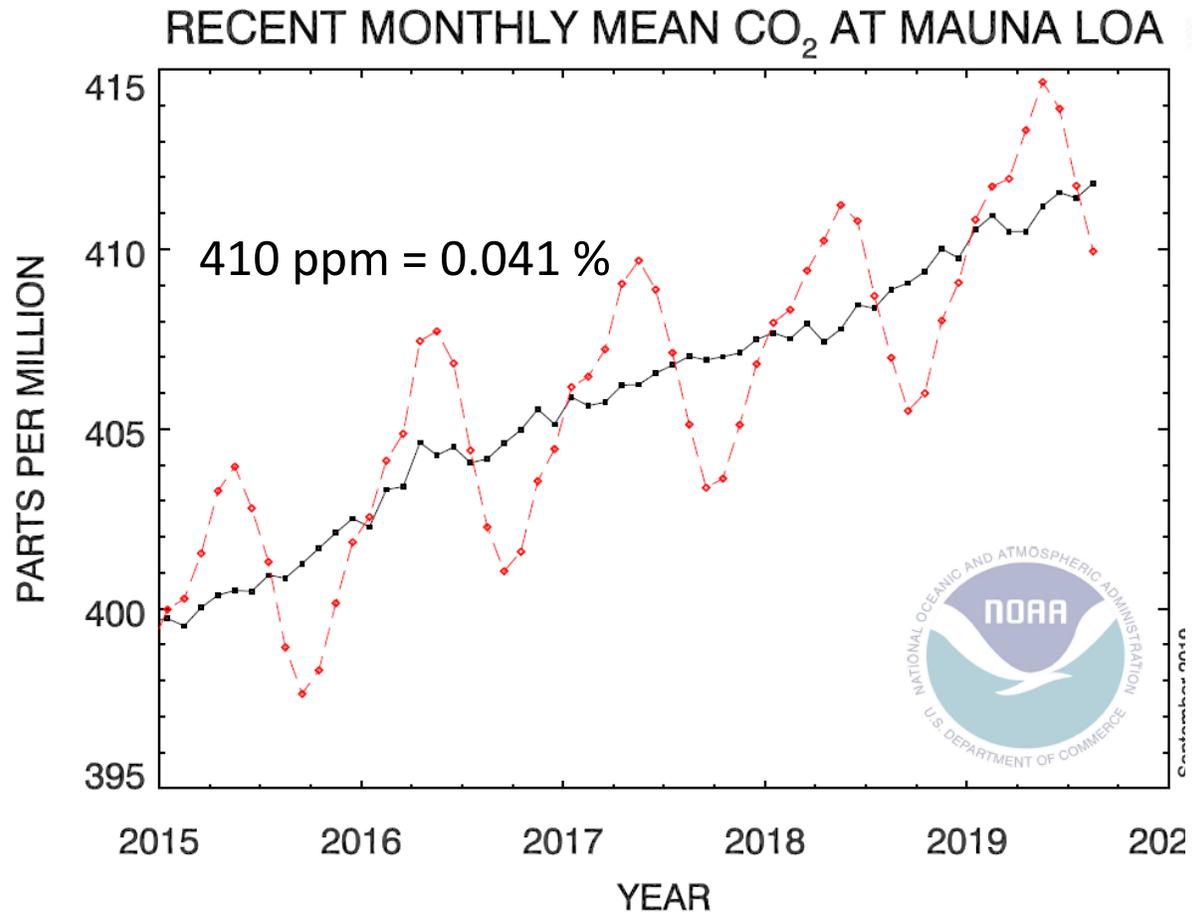
- Verbrennungsmotoren auf der Grundlage fossiler Kraftstoffe können nicht längerfristig geduldet werden (**Notwendigkeit der „Defossilierung“!**)
- Elektroantriebe auf Basis von Batterien bei regenerativer Stromerzeugung werden von der Politik und auch der Industrie favorisiert.
- Allerdings: Es fehlt an kritischer wissenschaftlich-technischer Bewertung und die Würdigung des Potentials weiterer Alternativen wie Brennstoffzellen oder E-Fuels, also einer Wasserstoff-Technologie. **Gehen wir den richtigen Weg?**

Kritik an der deutschen Energiewende:

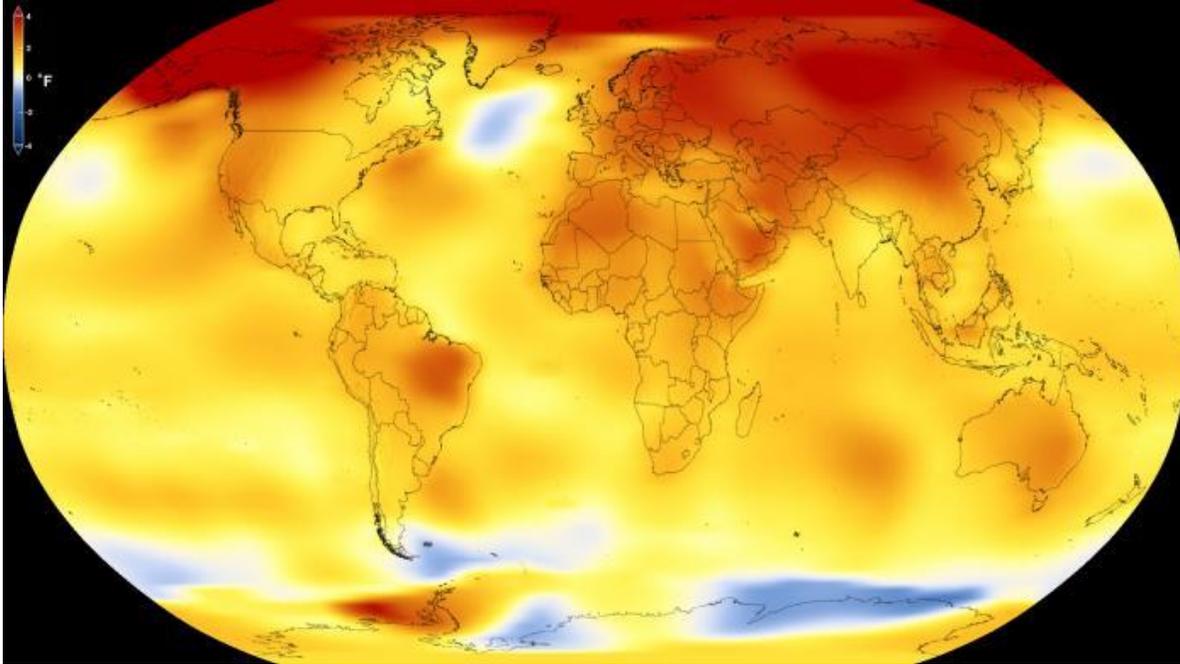
Nach Meinung mancher Experten ist eine Energiewende bis 2050 auch bei „allem nötigen politischen Willen“ kaum erreichbar.

August 2019: 409.95 ppm
August 2018: 406.99 ppm

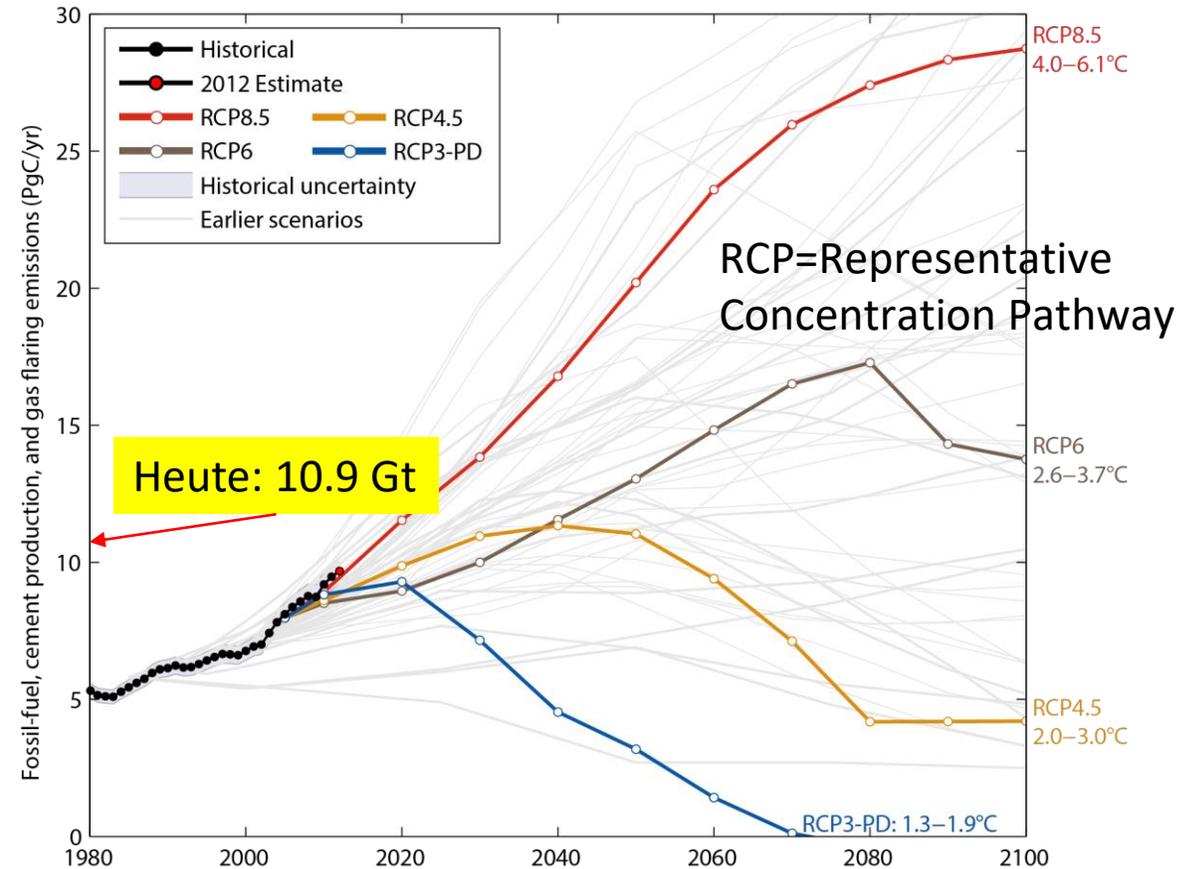
Wir nähern uns der 40 Gt CO₂
= 10.9 Gt C-Emission !



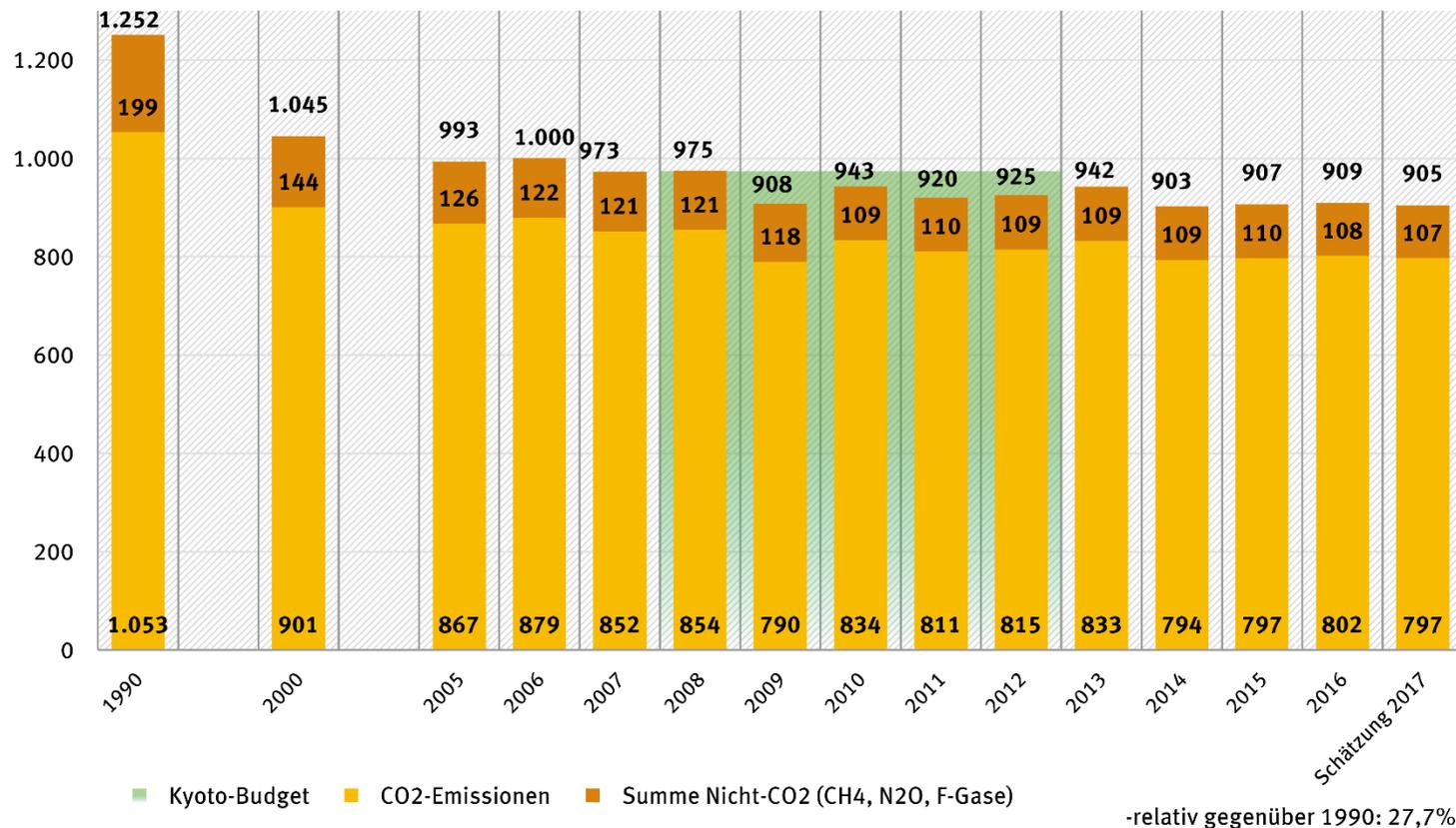
Die Notwendigkeit einer veränderten Mobilität: I. Klimaschutz



Globale Durchschnittstemperaturen 2013-2018
relativ zu 1951-1980



Globale CO₂-Emissionen und Szenarien



Verkehr 2017: 170 Mio.t (21 %) d.h. 2 t p.c. und p.a.

Davon:

Flugverkehr 9.6 %

Güterverkehr 30.1 %

Individualverkehr 58.3 %

Pro-Kopf-Gesamt-CO2-Emission: knapp 10 t pro Jahr

N.B. Die -28% seit 1990 sind im Wesentlichen auf den Zusammenbruch der maroden DDR-Industrie zurückzuführen

* alle Angaben ohne Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen

Quelle: UBA Emissionssituation; Stand: 06.03.2018

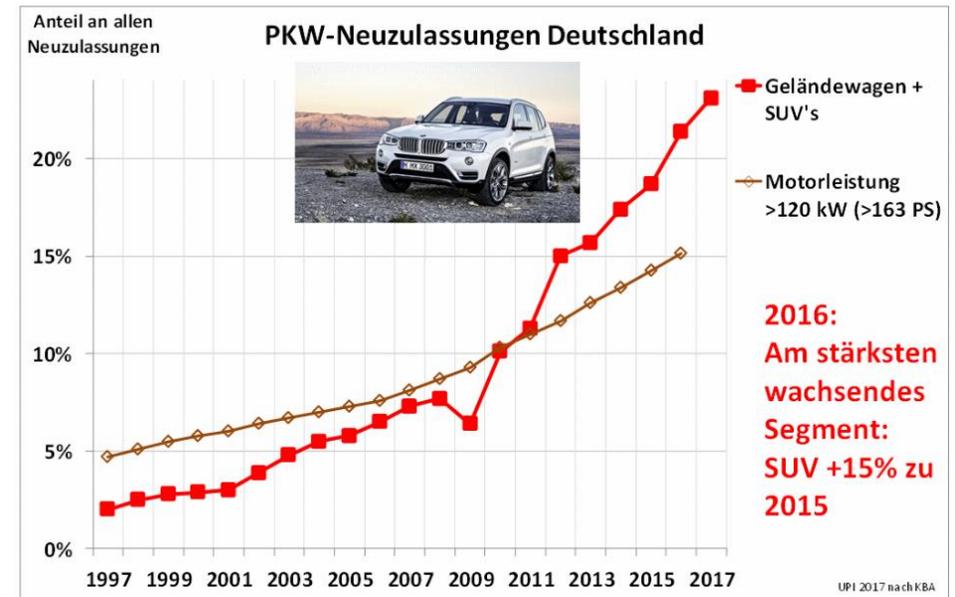
Wegen des Verkehrs sinken die CO2-Emissionen in Deutschland zu langsam.
 „Wir kommen bei der Senkung der Treibhausgas-Emissionen nur langsam voran“.

CO₂-Emissionen von neuen Pkw erstmals wieder gestiegen (EEA, 2018)

	Flotten-Emission in g/km	% - Veränderung
EU (2010-2016)		- 16 %
EU (2017)	118,5	+ 0,3 %
D (2017)	127,1	+ 0,1 %
EU (2021) Ziel	95,0	

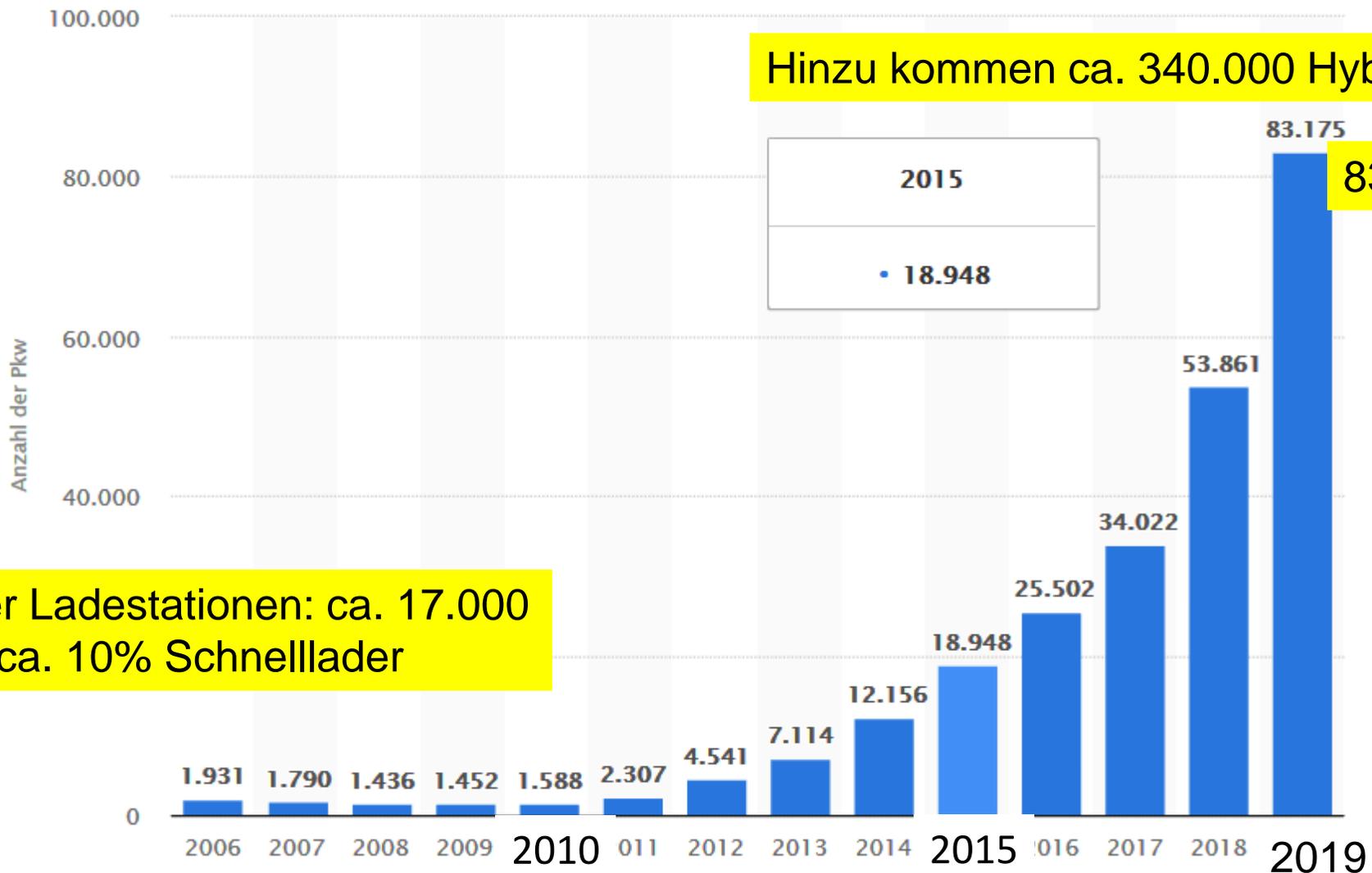
Ursachen:

- Geändertes Kaufverhalten seit dem Dieselskandal
- 2017: 53 % Benziner, 45 % Diesel, 1.5 % Stromer
- Beliebtheit von SUV-Modellen
- Höhere Motorleistungen
- Zunahme der Gesamtzahl



Elektrisch bzw. teilelektrisch betriebene Fahrzeuge auf dem deutschen Markt (2018)

- **Hybrid-Fahrzeuge (HEV)** (schwache und starke Varianten, je nach Leistung der Batterie)
 - Hersteller: Ford, Infiniti, Lexus, Mercedes, Toyota
 - Kraftstoffverbrauch: 4-7 l/100km, CO₂-Emission: 80-150 g/km
 - Batterie wird durch den Verbrennungsmotor oder durch Rekuperation geladen.
- **Plug-In Hybrid-Fahrzeuge (PHEV)**
 - Hersteller: Audi, BMW, Mercedes, Porsche, Volvo, VW
 - Systemleistung: 100-300 kW, Kraftstoffverbrauch: 1.8-3.0 l/100km (wenn die Batterie häufig genug geladen wird!), CO₂-Emission: 40-80 g/km, Batterie wird über Motor oder Steckdose geladen.
- **Reine Batteriefahrzeuge (BEV)**
 - Hersteller: BMW, Ford, Hyundai, Opel, Renault, Smart, Tesla, VW, Audi e-tron (2018), Mercedes EQC (ab 2019)
 - Stromverbrauch: 13-24 kWh/100 km, Reichweiten: 100-400 km
- **Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV)**
 - Hersteller: Hyundai, Toyota, (Mercedes GLC ab 2019)
 - Brennstoffverbrauch: 0.8-0.9 kg H₂/100 km (1 kg H₂ enthält soviel Energie wie 2,8 kg Benzin);
 - Reichweite: 600 km, Preis: 70-80 T€



Zahl der Ladestationen: ca. 17.000
Davon ca. 10% Schnelllader

Entwicklung der Zahl der reinen Elektroautos (BEV) in Deutschland (Statista, nach KBA)

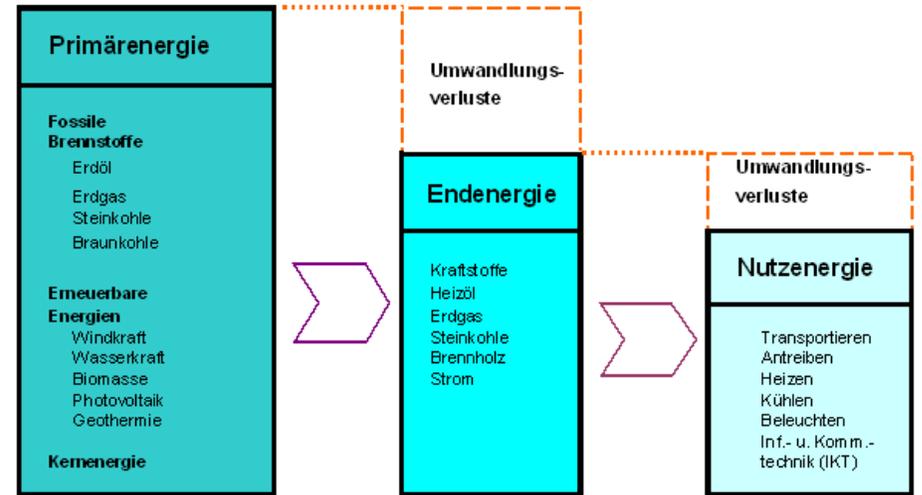
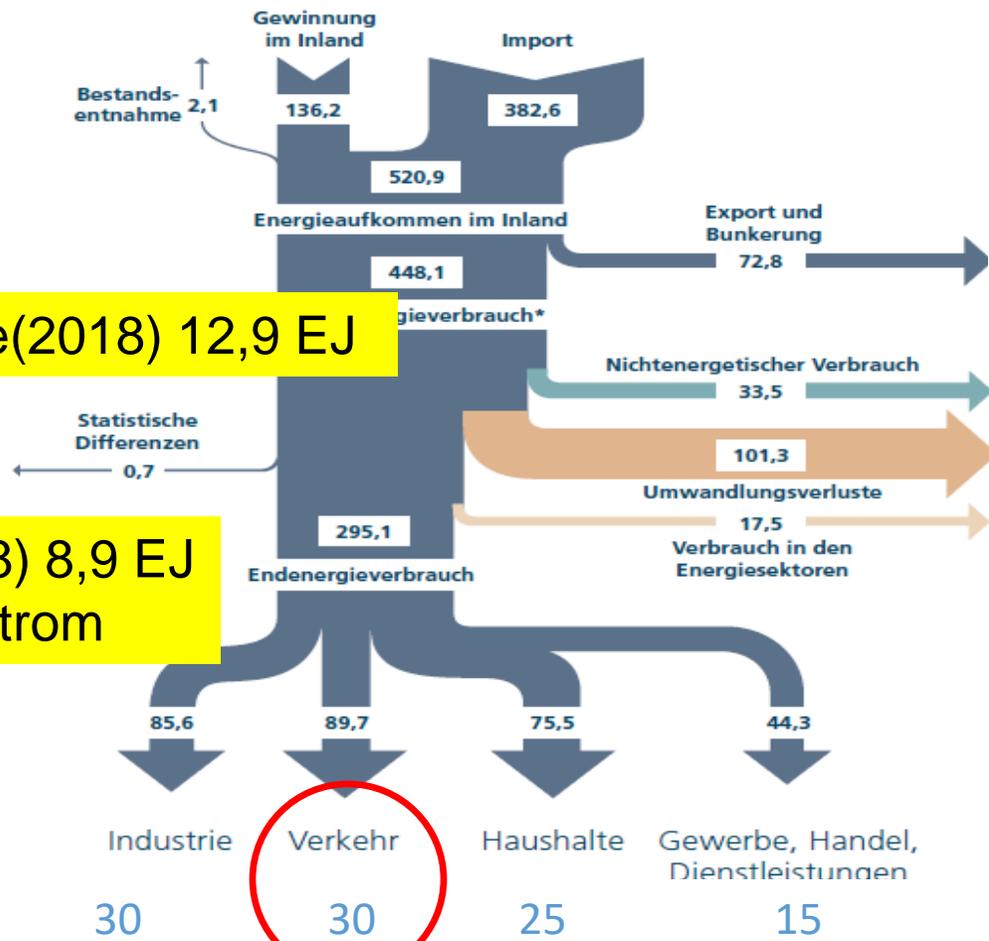


Absatz von Batterie-Elektro- und Plug-in-Hybrid-Automobilen in ausgewählten Märkten weltweit in den Jahren 2015 bis 2019*

„Was wir in jedem Fall brauchen, ist Strom“:

Energieversorgung und regenerative Stromerzeugung in Deutschland

Energieflussbild 2014 für die Bundesrepublik Deutschland in Mio. t SKE



Primärenergie(2018) 12,9 EJ

Endenergie (2018) 8,9 EJ
Davon 21% als Strom

31 % der Primärenergie gehen verloren!
Da im Gegensatz zu den Fossilen, bei den Regenerativen die Primärenergie = Endenergie ist, ist der Anteil der Regenerativen an der Endenergie größer als an der Primärenergie (17 vs. 14 %)

Anteil des Verkehrs an der Endenergie:
30%

Energieflussbild Deutschland 2014 mit Anteil des Verkehrssektors

DER STROMMIX IN DEUTSCHLAND 2018 [NETTO]

Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Deutschland

Konventionelle 59.8%

Erdgas 40 TWh

Erneuerbare 40.2%



Anteil der Erneuerbaren:

- an der Stromerzeugung: 40.2 %*)

- an der Primärenergie: 14.0 %

*) Diese Zahl ist zu groß, weil Leitungsverluste, Eigenbedarf und Netto-Exporte nicht berücksichtigt sind. Besser: 35.6% (siehe Buchal et al. 2019)

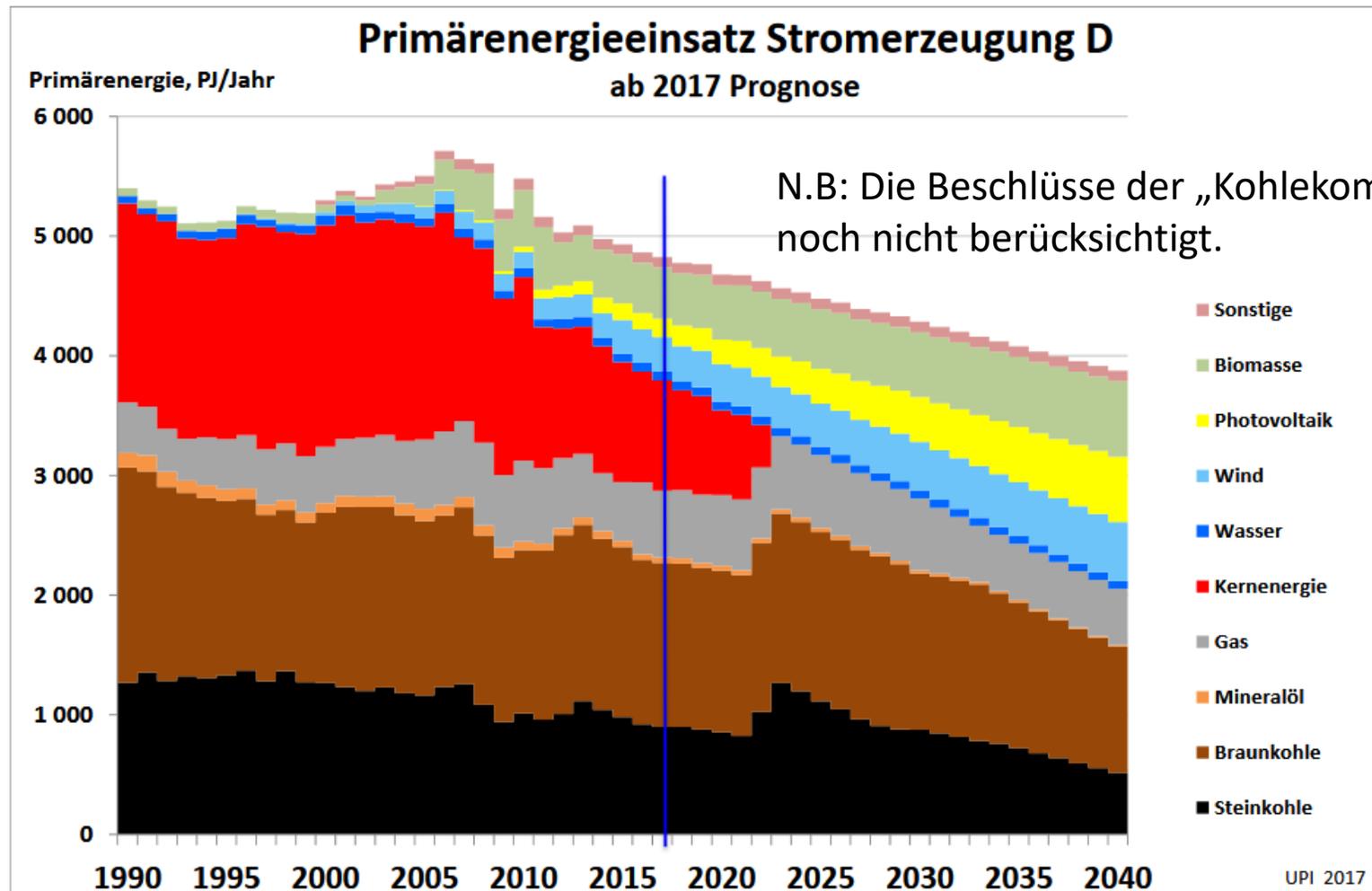
Daten: Fraunhofer ISE 01|2019

1-stromvergleich.com/_7te

CC BY-NC STROM-REPORT

Quelle: Fraunhofer ISE (2019) und Stromreport

$$541 \text{ TWh} = 5,41 \times 10^{14} \times 3,6 \times 10^3 = 1,62 \times 10^{18} \text{ Ws (J)} = 1,62 \text{ EJ} (= 21 \% \text{ der Gesamtendenergie})$$



Quelle: Umwelt und Prognose-Institut Heidelberg, 2017

Windkraft und Solarenergie haben bis heute im Wesentlichen den Rückgang der Kernenergie kompensiert.
D.h.: Wir haben CO2-frei durch CO2-frei ersetzt!

Prognose der Stromerzeugung in Deutschland

CO₂-Bilanz der Stromerzeugung in Deutschland

Kraftwerkstyp	Spez. CO ₂ -Emission g/kWh	Anteilige Stromerzeugung %	Anteilige CO ₂ -Emission g/kWh
Braunkohle	800-1200	24.1	250
Steinkohle	750-1100	14.0	178
Gas	400-550	7.4	48
Wasser	10-40	3.2	1
Photovoltaik	50-100	8.5	5
Wind	10-40	20.2	2
KWK	10-30	13.3	3
Sonstige	20	1.3	1

Gesamt

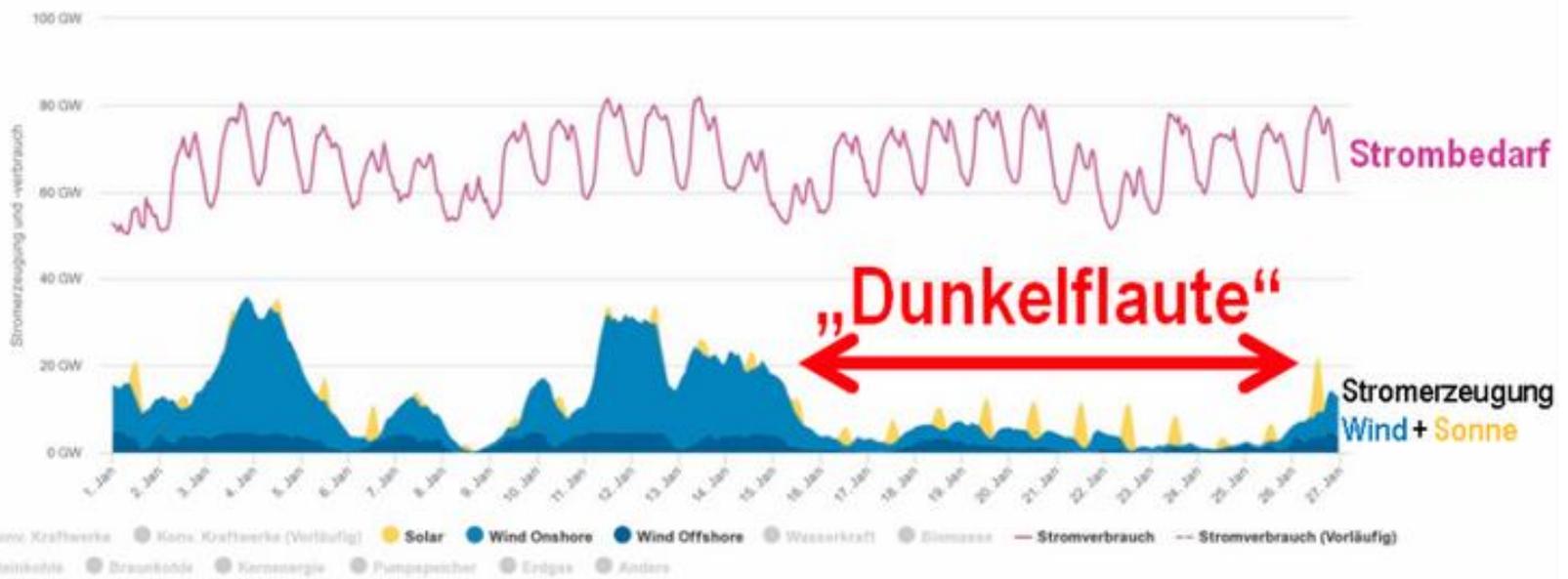
490 gCO₂/kWh

Fazit: **Die CO₂-Emission eines BEV im Betrieb ist nicht „Null“.** Ein Fahrzeug mit 30 kW Leistung würde bei einem Energieverbrauch von 30 kWh (Fahrstrecke: 100 km, Fahrzeit 1h) gut **14.7 kg (=147g/km) CO₂** „ausstoßen“. Dies entspricht einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und einem Verbrauch von 4.8 kg (oder 6 l) Benzin pro 100 km.

Windkraftanlagen in Deutschland in 2018:

- Anzahl: ca. 30.000 (davon 1.200 off-shore)
- Leistungen von je 1-5 MW
- Gesamte installierte Leistung: 56.000 MW
- Auslastungsgrad: 22.9%
- Zahl der Volllaststunden p.a.: ca. 2000

Januar 2017, 10 Tage „Dunkelflaute“: Kaum Stromerzeugung durch Windkraft und Sonne



Elektromobilität:

Stand der Dinge, erfreuliche Entwicklungen
und unangenehme Wahrheiten

Das Problem der Stromspeicherung: Li⁺-Ionen-Batterien



Lithiumcarbonat Li₂CO₃
im Salar de Atacama, Chile



Metallisches Lithium: leicht aber gefährlich
wegen der heftigen Reaktion mit Wasser

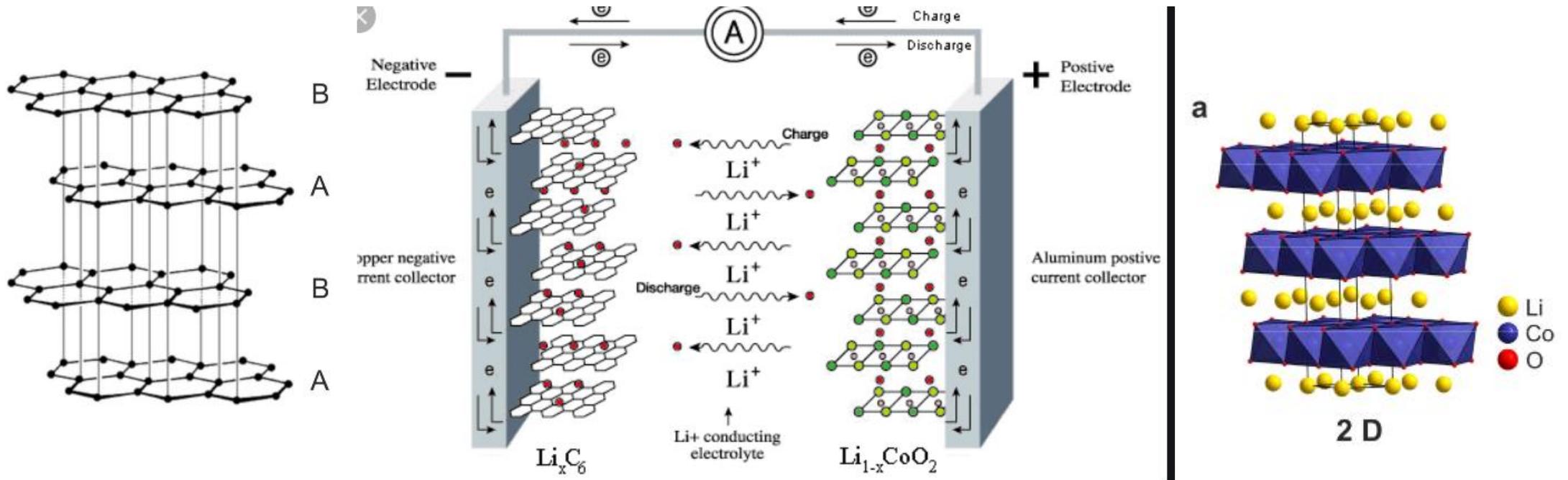
Lithium ist das leichteste und elektropositivste Metall das wir kennen:
Hohe Beweglichkeit, hohe Leistungsdichte, hohe Zellspannung (3.7V)

Li+-Ionen-Batterien

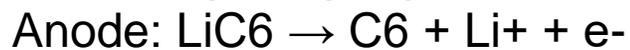
Komponenten:

Cu-Anode/Graphitschicht/Lösungsmittel//Separator//Lösungsmittel/Li_{1-x}(Ni_xCo_yMn_z)O₂/Al-Kathode

Die Energiedichte wird wesentlich durch das Kathodenmaterial bestimmt (Co-Oxid: 180 Wh/kg; LiNiCo-Mischoxid: 240 Wh/kg)



Entladungsvorgang



Energie- und Leistungsdichten und das Problem der Reichweiten Verbrennungsmotor vs. E-Motor

Für eine Strecke von 500 km brauche ein Verbrennungsmotor ca. 40 L oder 32 kg Kraftstoff. (Dichte: 0.8 kg/l; Wirkungsgrad ca. 25 %). Das entspricht einer Energie von $32 \text{ kg} \times 11 \text{ kWh/kg} \times 0.25 = 88 \text{ kWh}$.

Eine neuere Li+- Batterie hat eine Leistungsdichte von 200 Wh/kg. Um die 88 kWh elektrische Energie bereitzustellen, muss diese Batterie ca. 440 kg wiegen.

N.B. Die gebräuchliche Batterie im Tesla S mit 90 kWh hat 7.600 Einzelzellen und wiegt 540 kg.

In Deutschland gibt es derzeit keine Batteriezellenproduktion. Lithium-Ionen-Zellen werden als „Rohstoff“ aus Asien importiert

The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries

© IVL Swedish Environmental Research Institute 2017

M. Romare und L. Dahllöf

A Study with
and Batterie

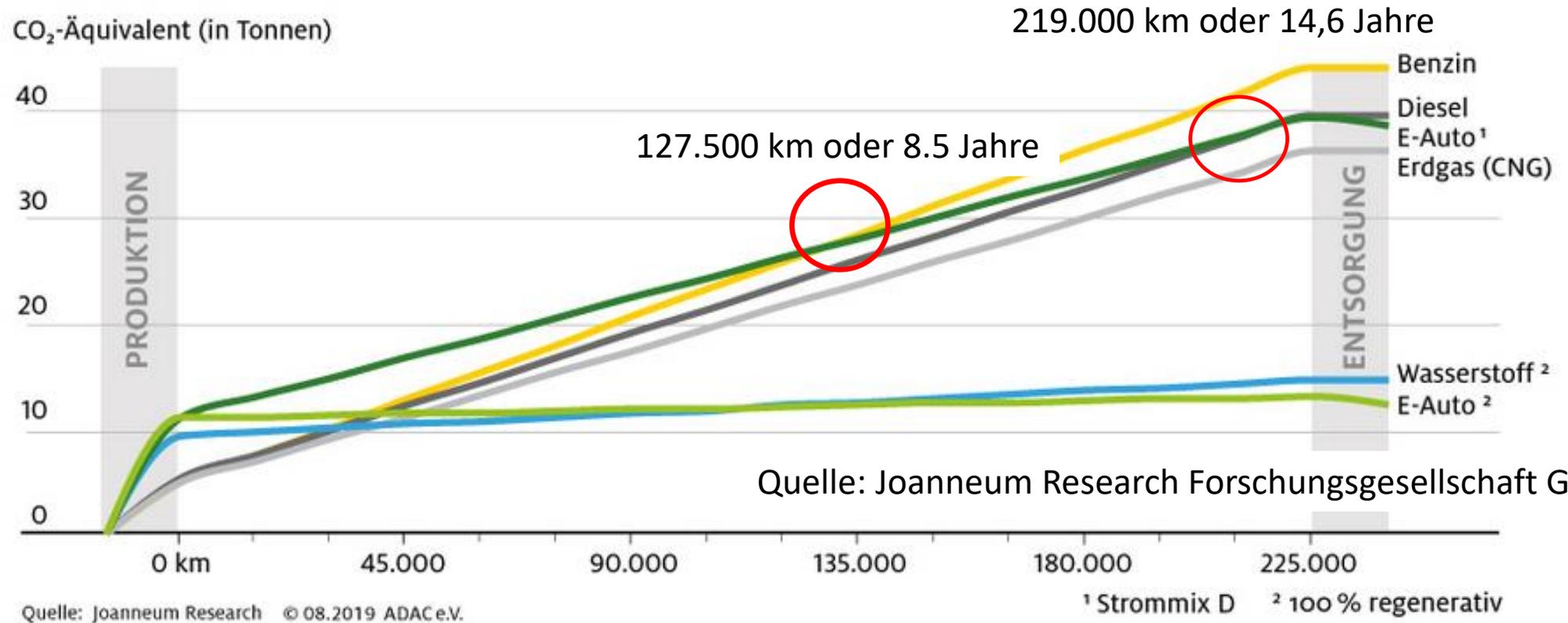
Mia Romare, Lisbeth Dahllöf



Für die **Produktion** einer Li+-Batterie mit einer Kapazität von 50 kWh werden je nach Standort (d.h. verfügbarer Ökostrom) **7.5 - 10 t CO₂**, d.h. **150 – 200 kg CO₂/kWh** freigesetzt. Dies entspricht dem Betrieb eines Verbrennungsmotors mit einem Verbrauch von 6 l/100 km über eine Strecke von 45.000 – 65.000 km oder einer Betriebsdauer von **4.5 – 6.5** Jahren bei einer Jahresfahrleistung von 10.000 km.
Oder: Bei einer Haltbarkeit von 10 Jahren und einer Fahrleistung von 10.000 km/p.a. beträgt die CO₂-Emission **75-100 g CO₂/km**.

Die Ökobilanz der Li+-Batterieherstellung nach IVL (2017)

Der Treibhausgas-Ausstoß eines Autolebens



Fazit: der deutsche Strommix muss sauberer werden.

Aber: Konventionelle Antriebe sind noch lange nicht am Ende (siehe Erdgas-Fahrzeug!)

Klima-Studie des ADAC: Elektroautos brauchen die Energiewende

Li-Ionen-Batterien (LIB): Fortschritte, Entwicklungen und Grenzen

Fortschritte:

- Seit Einführung 1991 Kapazität verdreifacht, Zahl der Ladezyklen (ca.1000) und damit die Haltbarkeit (100-160 Tkm, 8-10 Jahre) deutlich gesteigert, Kosten auf 1/20 (heute ca. \$ 200/kWh) reduziert.
- Probleme: Kobalt-Giftigkeit und Förderungsbedingungen, keine Produktion in D.

Alternativen und zukünftige Entwicklungen:

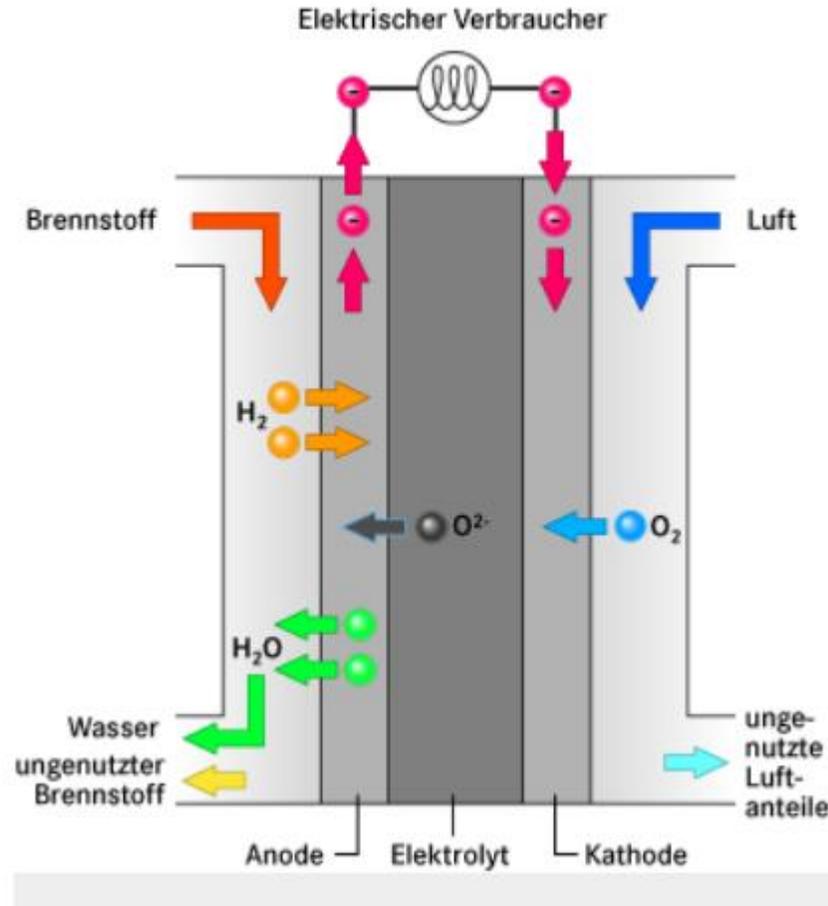
- Ersatzkandidaten für Li sind Na, Mg, Ca. In diesen Fällen benötigt die Kathode kein Kobalt. Energiedichten sind allerdings kleiner.
- Einführung sog. Konversions-Kathoden aus Cu- und Fe-Fluoriden sowie Si. Diese würden das Li⁺ chemisch speichern wobei die gespeicherte Li⁺ Menge 6 mal größer als in konventionellen LIBs.
- Li-Luft-Akkus: Hohe Speicherdichten (11 kWh/kg), techn. Probleme: Verstopfung der porösen Kohlenstoff-Kathode, Beeinträchtigung durch Feuchtigkeit, Bildung von Dendriten an der Anode.

Grenzen der Mobilität mit LIB:

- Ökologie (CO₂-Last) der Batterie-Herstellung.
- Wer bringt die Kosten für den weiteren Ausbau der Ladeinfrastruktur auf (50 Mrd.€)?
- Wie stellen wir die elektrische Leistung bereit, die z. B. 1 Mio. Batteriefahrzeuge bei gleichzeitigem Laden benötigen?

Brennstoffzellen

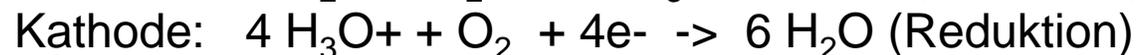
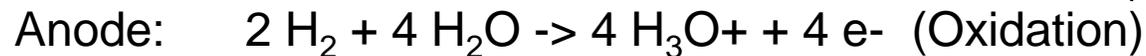
Anode



Kathode mit Kohlenstoffträger und Pt-Katalysator

Gebräuchlich als **PEMFC** (Proton Exchange Membrane FC) oder als **SOFC** (Solid Oxide FC)

Hohes Optimierungspotential durch Verringerung des Pt-Anteils durch gleichmäßiges Aufbringen von Nanopartikeln in einem Protonen leitenden Kunststoff (Ionomer) auf die Kohlenstoffträgersubstanz (Ott et al. Nature Materials, 2019)



Quelle: FZ Jülich

Prinzip der Brennstoffzelle

Wasserstofftank:
350-700 bar H₂ (g)
oder H₂(l) bei -253 °C

Leistung 10 -100 kW,
Zellspannung 0.8-1.0 V.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) auf dem Markt 2019 bzw. mit Marktreife:

1. Hyundai Nexo: seit 2018, SUV, 3 Tanks a 52 l, 700bar, 6.3 kg H₂, Reichweite 760 km
2. Toyota Mirai, seit 2015, 2 Tanks, 700 bar, 5.0 kg H₂
3. Honda Clarity Fuel Cell (nur in Japan und Kalifornien), 2 Tanks, 5.0 kg H₂, Reichweite 590 km
4. Daimler GLC Fuel Cell, 2 Tanks, 4.4 kg H₂, 430 km, zusätzlich Li+Batterie
5. AUDI h-tron, Einführung 2020

N.B.: In Deutschland gibt es derzeit 603 Brennstoffzellen-Fahrzeuge (Preis: 70.000 – 80.000 €) und 71 H₂-Tankstellen.

Wasser + Energie = Wasserstoff + Sauerstoff



$$\Delta H_R = 289.5 \text{ kJ/mol}$$

Verfahren

Reaktion mit Metallen
 $\text{H}_2\text{O} + \text{Zn} \Leftrightarrow \text{H}_2 + \text{ZnO}$

Dampfreformierung
 $2 \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 \Leftrightarrow 4 \text{H}_2 + \text{CO}_2$

Thermische Wasserspaltung mit
thermochemischen Kreisprozessen

Elektrochemische Wasserspaltung

Wasserelektrolyse

Wasserdampfelektrolyse

Energiequelle

Chemische Energie

Chemische Energie

Hochtemperaturwärme

Elektrische Energie

Elektrische Energie

Strom + Wärme

Der Strombedarf bei der Wasserstoff Gewinnung durch Wasserelektrolyse:

$$289.5 \text{ kJ} = 0.080 \text{ kWh}$$

-> Aus 1 kWh werden 12.5 mol H₂ =
0.28 m³ (STP) Wasserstoff gewonnen!

Electricity Well



Well-to-Wheel efficiency BEV: 86 %

Battery electric vehicle

Charger: 93 % Efficiency

Li-Ion-Battery: 93 % Efficiency

Well-to-Wheel efficiency FCEV: 45 %

Hydrogen Production

Fuel Cell electric vehicle

H₂O Electrolysis
80 % Efficiency

H₂-Compressor:
95 % Efficiency

H₂ Fuel Cell: 60 % Efficiency

Fazit Brennstoffzelle und FCEV:

Der Wirkungsgrad von FCEV ist kleiner als bei BEV. Aber:

Wasserstoff ist ein idealer Energiespeicher und kann helfen, die Schwächen der Volatilität der erneuerbaren Energieerzeugung auszugleichen. Die Menge an Überschussstrom aus regenerativen Quellen wächst stark (überschießende grüne Stromspitzen!). Da der hohe Herstellungsenergieaufwand von BEV wegfällt, ist die Klimabilanz von BEV und FCEV vergleichbar*

- Toyota und Hyundai gehen mit großen Schritten voran (700 000 Einheiten pro Jahr bis 2030). BMW hat sich eine Partnerschaft mit Toyota gesichert.
- China fährt die Förderung von BEVs dramatisch zurück und setzt auf H2-Technologie, insbesondere im Lieferverkehr und auf der Langstrecke.
- H2- Technologie ist gut geeignet für die Langstrecke, Lkw, Kreuzfahrtschiffe und Eisenbahnen (dort wo die Elektrifizierung zu teuer ist).

* A. Sternberg, C. Hank, C. Hebling: Treibhausgasemissionen für Batterie und Brennstoff-Zellenautos mit Reichweiten über 300 km.

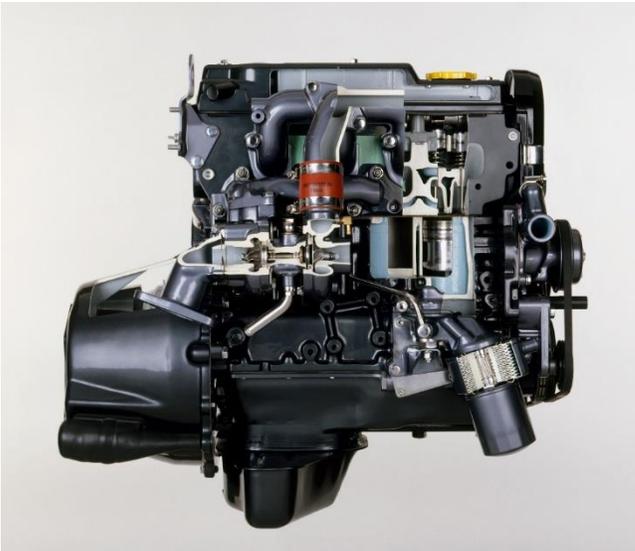
Industriepolitisches Hemmnis in Deutschland:

- Wenn ein mächtiger Konzern wie VW (H. Diess) sich auf den batterieelektrischen Antrieb konzentriert, werden Zulieferer kaum andere Technologien vorantreiben. Allein AUDI will ab 2021 den h-tron quattro in Kleinserie bauen.

Synthetische Flüssigkraftstoffe (Syn-Fuels, E-Fuels, PtL(P2X)-Techniken)

„Nicht Dekarbonisierung –
sondern nur Defossilierung!“

Haben Verbrennungsmotoren
auch noch eine Zukunft?



Gravimetrische Energiedichten von Kraftstoffen in kWh/kg

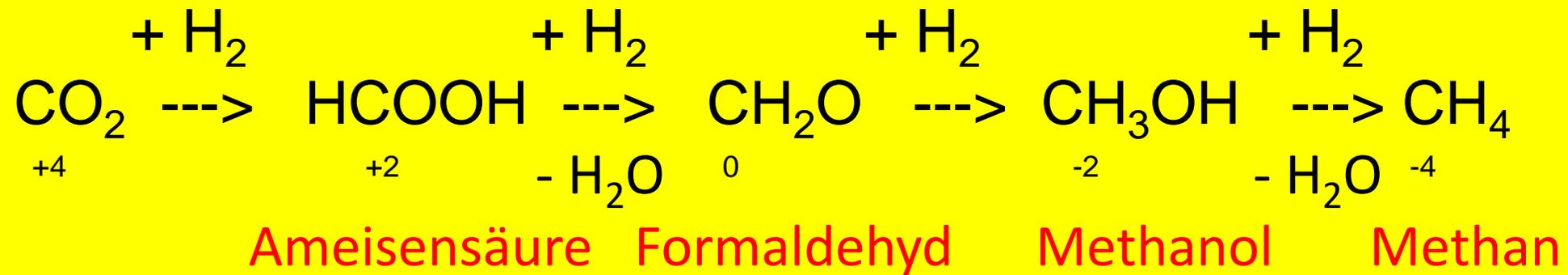
1. Wasserstoff	33.3
2. Rohöl	11.6
3. Benzin	12.0
4. Diesel	11.8
5. Methanol	5.5
6. Methan	13.9
7. Erdgas	10.6-13.1
8. Stadtgas	7.6
9. Li-Ionen-Akku	0.1-0.2

Volumetrisch ist der Diesel ca. 10% effizienter!

8.9 kWh/l

9.8 kWh/l

N.B. 1 kWh = 3.6 MJ



N.B.: Die Zahlen unter den C-Atomen sind deren formale Oxidationsstufen

Die katalytische Hydrierung von CO_2 an Cu, ZnO oder Al_2O_3 Kontakten

Kohlevergasung, Dampfreformierung
von Erdöl, Biomassevergasung



H₂ + CO/CO₂
Synthesegas



CH₃OH

Methanol



Kraftstoffe

E-Fuels

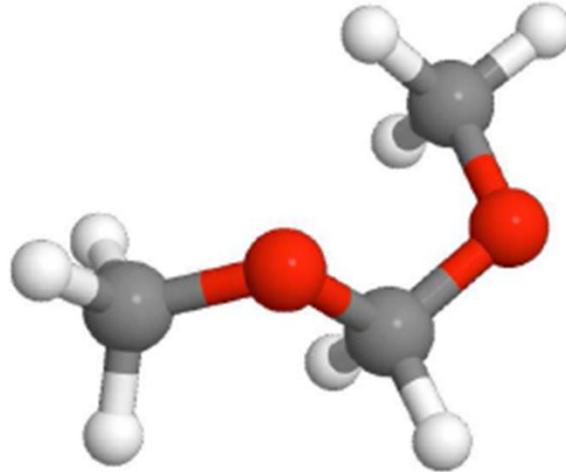
Elektrolyse-Wasserstoff, CCU-Rauchgas,
atmosphärisches CO₂

BMBF-Kopernikus-Projekt P2X
RWTH Aachen, FZ Jülich, DECHEMA
und 60 weitere Partner

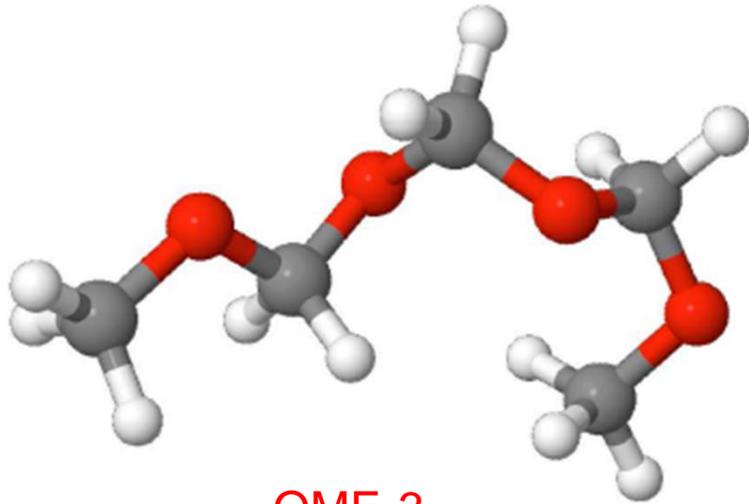
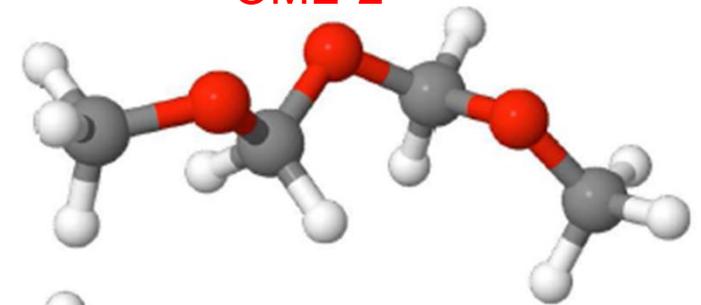


P2X ist eines der vier vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekte, mit denen die größte Forschungsinitiative zur Energiewende in die Umsetzung geht.

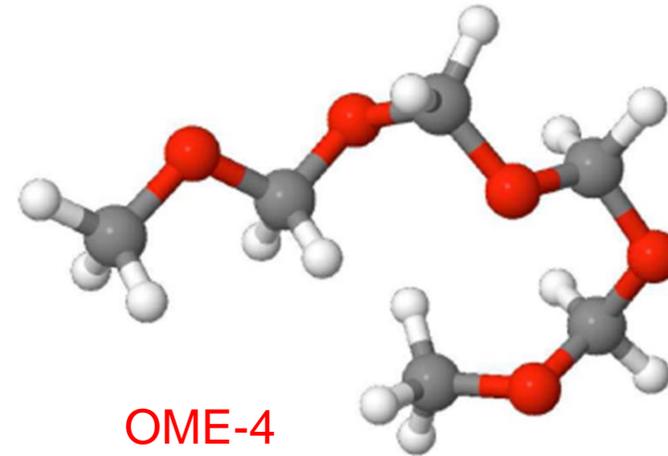
OME-1
(2 CH₃OH + CH₂O -> OME-1 + H₂O)



OME-2



OME-3



OME-4

Diesel ähnlich, umweltverträglich, CO₂-neutral, unproblematische Lagerung und Verteilung

Oxymethylenether (OMEs) als PtL-Kraftstoff für Verbrennungsmotoren

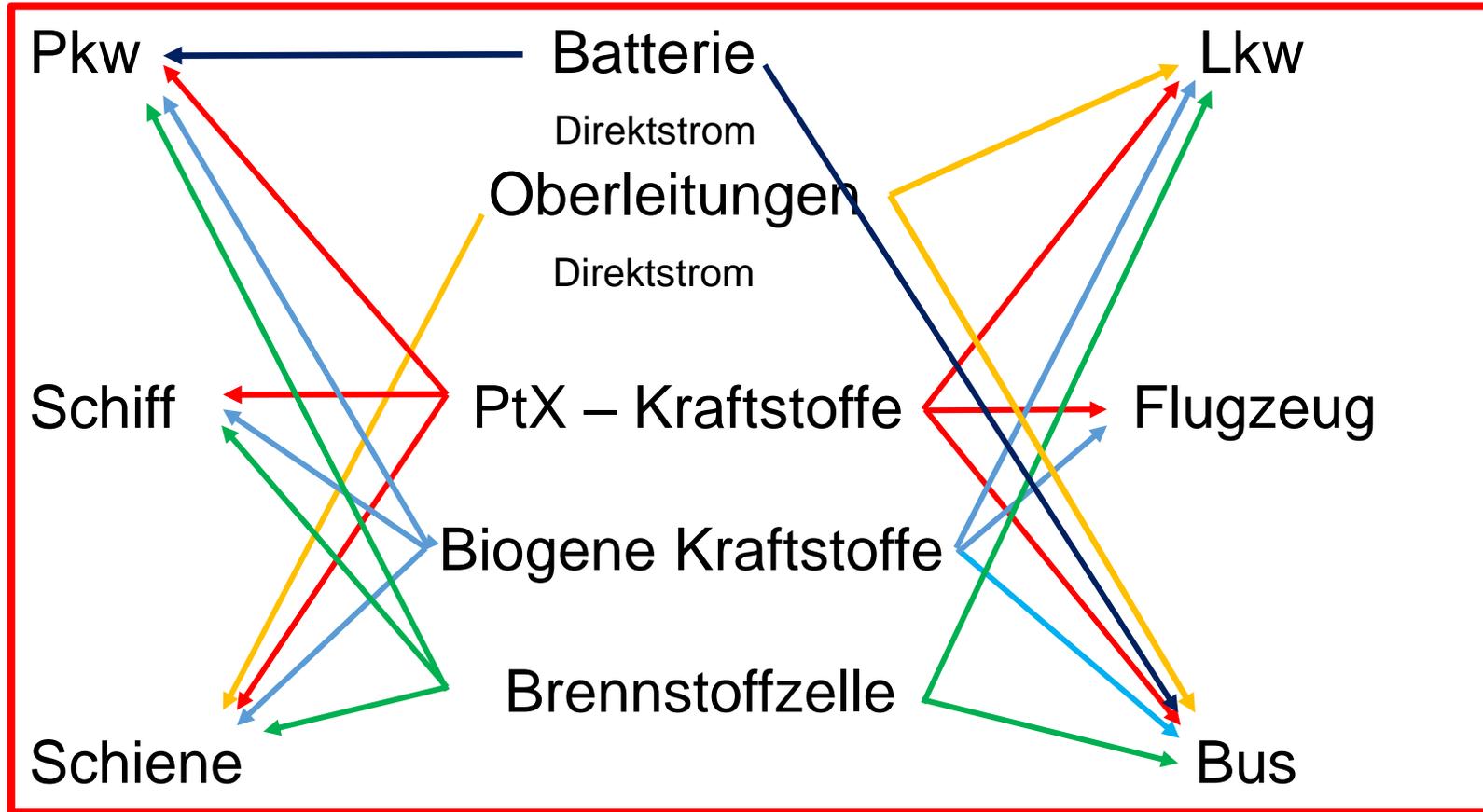
Überschussstrom, H₂-Erzeugung und synthetische Kraftstoffe

- Die Herstellung der benötigten E-Fuels erfordert in großem Umfang Strom aus erneuerbaren Quellen. Schon heute werden Strommengen erzeugt, die abgeregelt werden müssen. In 2017 waren dies etwa 4,7 TWh (1%).
- Aus 1 TWh Strom kann über Elektrolyse ca. 200 Mio. Nm³ Wasserstoff und daraus ca. 90.000 Jahrestonnen Methanol (oder ca. 40.000 t Benzin) hergestellt werden.
- Für 2030 ergäbe sich bei einer geschätzten abgeregelten Strommenge von 100 TWh eine Jahresproduktion von maximal 4 Mio. t Kraftstoff*.
- **Fazit: Effiziente PtL-Techniken verlangen Standorte mit hohem und preiswertem Stromangebot. Warum nicht die sonnenreichen EU-Staaten sowie die heutigen Öllieferanten der arabischen Welt dazu bringen, regenerativ H₂ und E-Fuels zu erzeugen? (DESERTEC)**

* N.B: Der Kraftstoffverbrauch von Pkw 2017 in Deutschland betrug 26 Mio.t Diesel + 21 Mio.t Benzin

Herausforderungen für die Erzeugung von E-Fuels

Verkehrsträger Mögliche Technologien Verkehrsträger



Nach: OPTIONEN FÜR EIN NACHHALTIGES ENERGIE- SYSTEM MIT POWER-TO-X TECHNOLOGIEN, F. Ausfelder, H. Dura, Hrg. 2019

Mögliche Antriebstechnologien verschiedener Verkehrsträger

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

