



Battery Ageing • Battery Models • Battery Diagnostics • Battery Pack Design • Electromobility • Stationary Energy Storage • Energy System Analysis

Wasserstoff – die Systemperspektive

DPG AKE Frühjahrssitzung Energie – 31.03./01.04.2022

Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer

Chair for Electrochemical Energy Conversion
and Storage Systems



HELMHOLTZ-INSTITUT
MÜNSTER



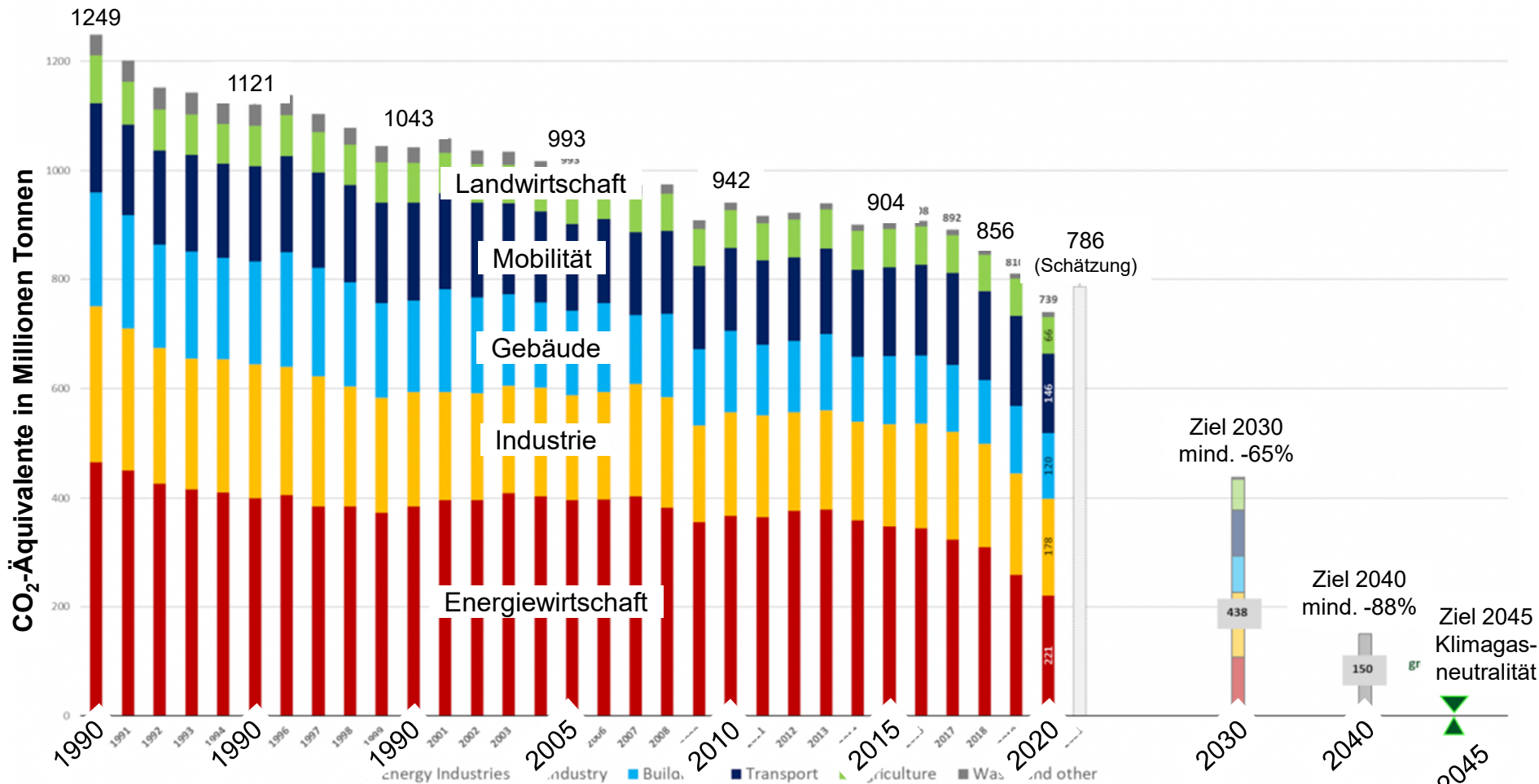
Einige zentrale Ziele der neuen Bundesregierung bis 2030

CO₂-Reduktionsziele bleiben unverändert zu Klimaschutzgesetz von Mitte 2021

- 80% Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung (2020: 50%, 2021: 45,7%)
- Anstieg des Strombedarfs auf 680 bis 750 TWh (2020: ca. 545 TWh)
- Erzeugungsleistung Erneuerbarer Energien (Wind und Photovoltaik) muss gegenüber heute ungefähr verdreifacht werden
- Elektrolyseleistung zur Wasserstoffherzeugung bei 10 GW (Ziel bisher 5 GW)
- Betrieb jeder ab 2025 neu eingebauten Heizung mit mindestens 65% erneuerbarer Energien
- Verschärfter Standard für energetische Sanierung von Bestandsbauten (EU-Vorgaben in Planung)
- 15 Millionen Elektro-PKW auf der Straße (bedeutet über 80% Marktanteil in 2030)

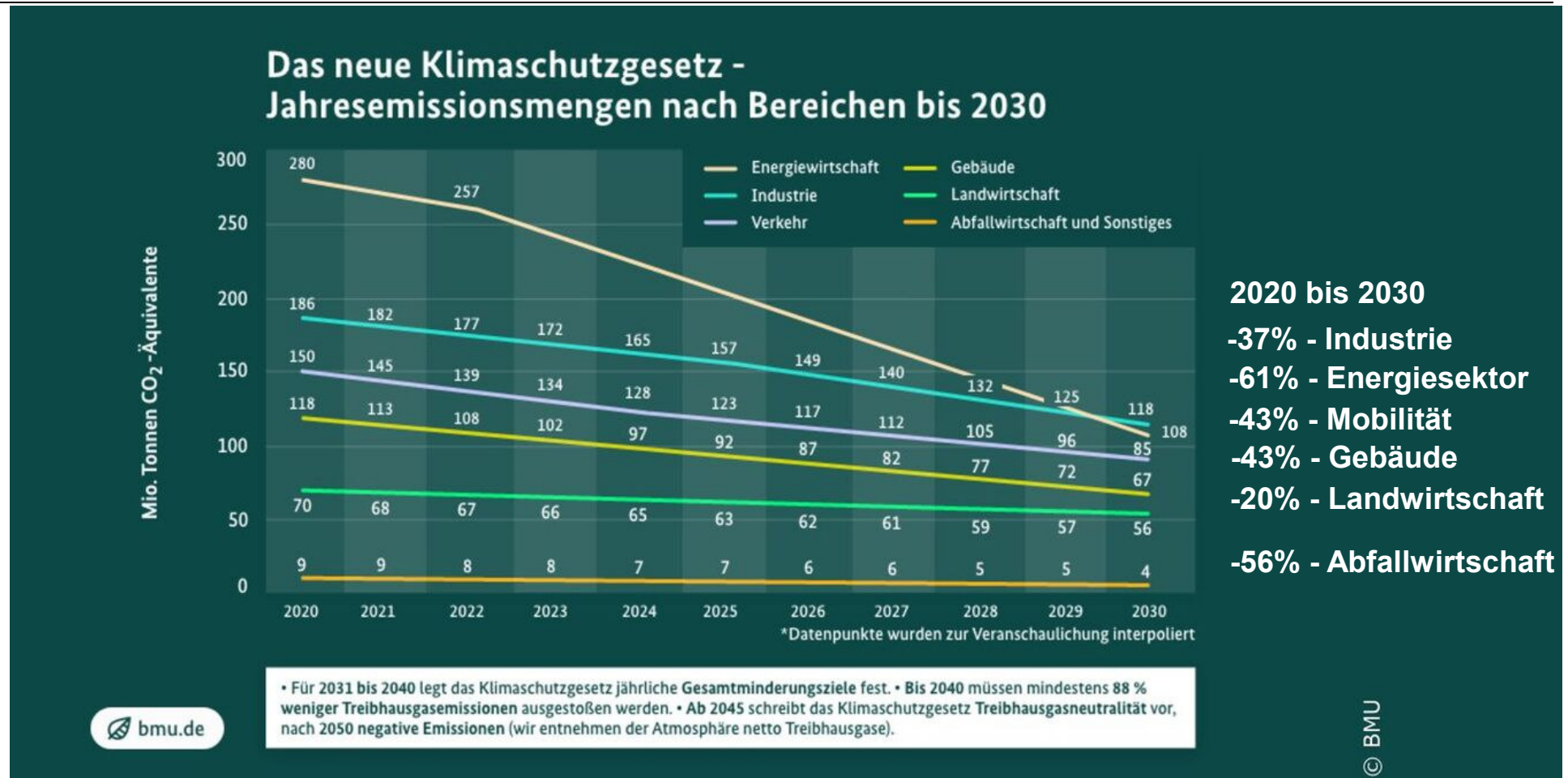


CO₂-Emissionen (1990 – 2020) und Ziele (2021 – 2045) in Deutschland



1) 2030, 2040 and 2045 targets as stated in the Climate Action Law.
 Note: Without emissions from land use, land-use change and forestry (LULUCF). With the 2021 climate law reform, Germany introduced GHG emissions sink targets for this sector (-25mtn t CO₂ eq by 2030, -35mtn t by 2040 and -40mtn t by 2045).
 *) Agora Energiewende in August 2021 estimated that total 2021 emissions would reach 760-812 mtn t CO₂ eq.

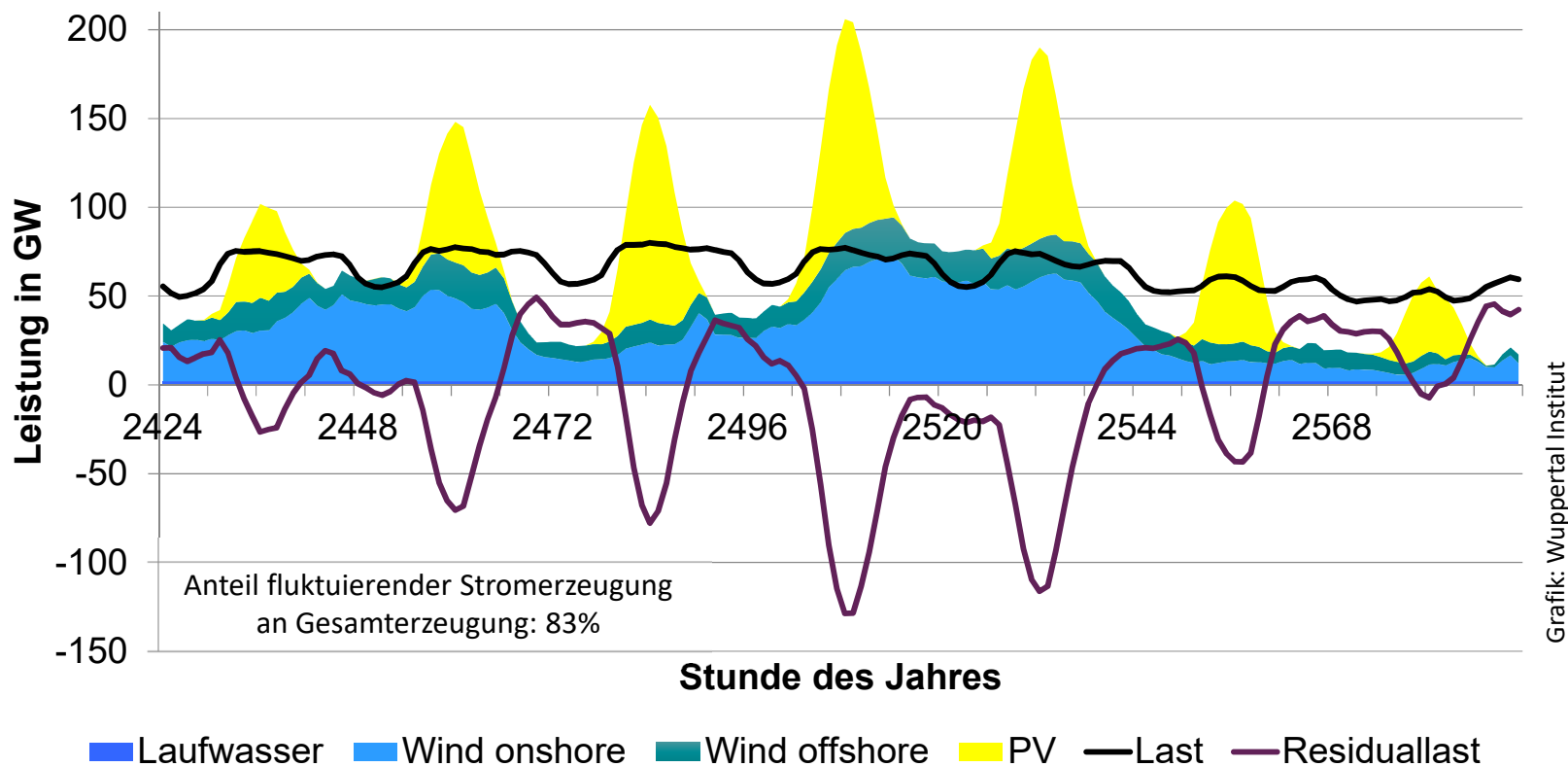
Neues Klimaschutzgesetz für Deutschland – gültig ab Sommer 2021



▪ <https://www.bmu.de/pressemitteilung/novelle-des-klimaschutzgesetzes-beschreibt-verbindlichen-pfad-zur-klimaneutralitaet-2045/>, Stand 12.5.2021

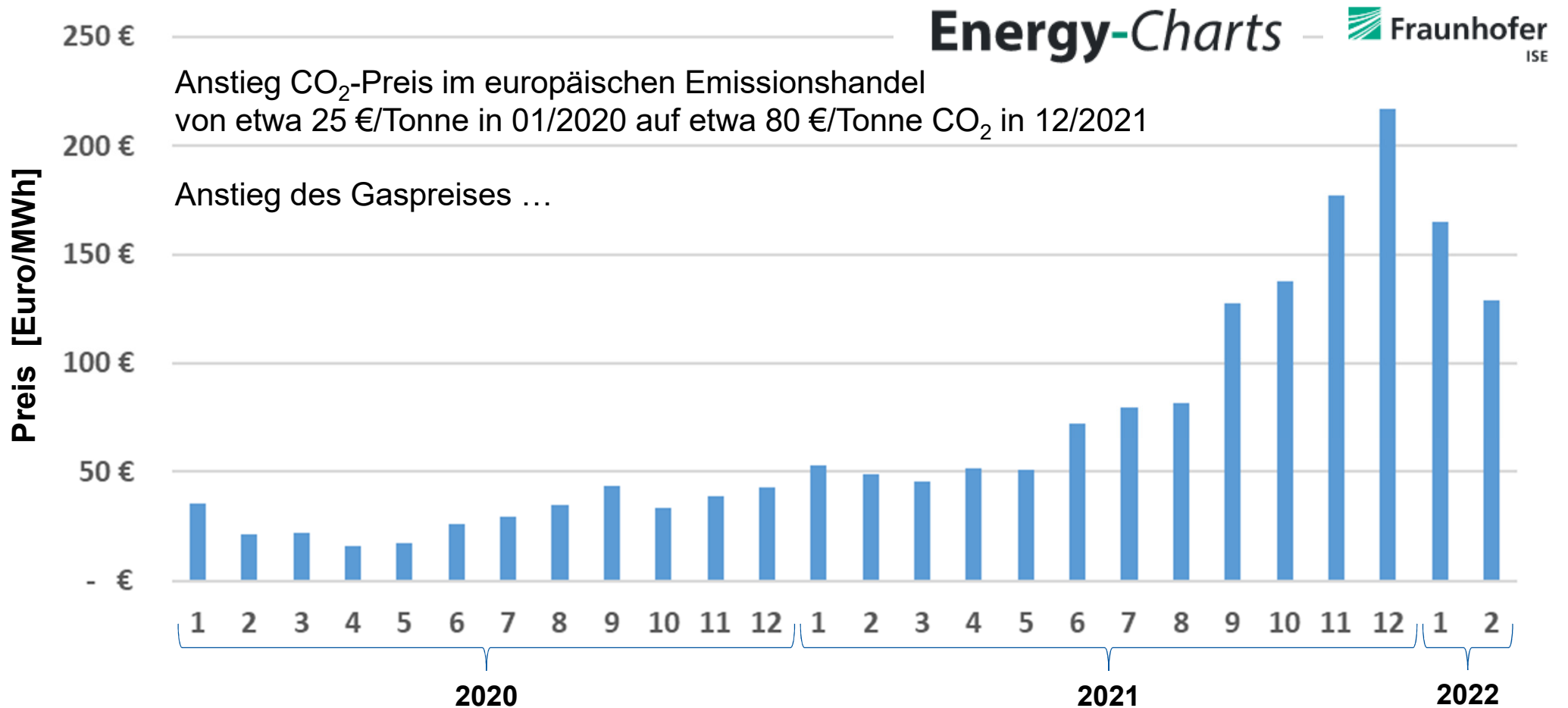
Residuallast

Residuallast: Leistung Verbrauch – Leistung Erzeugung aus erneuerbaren Energien

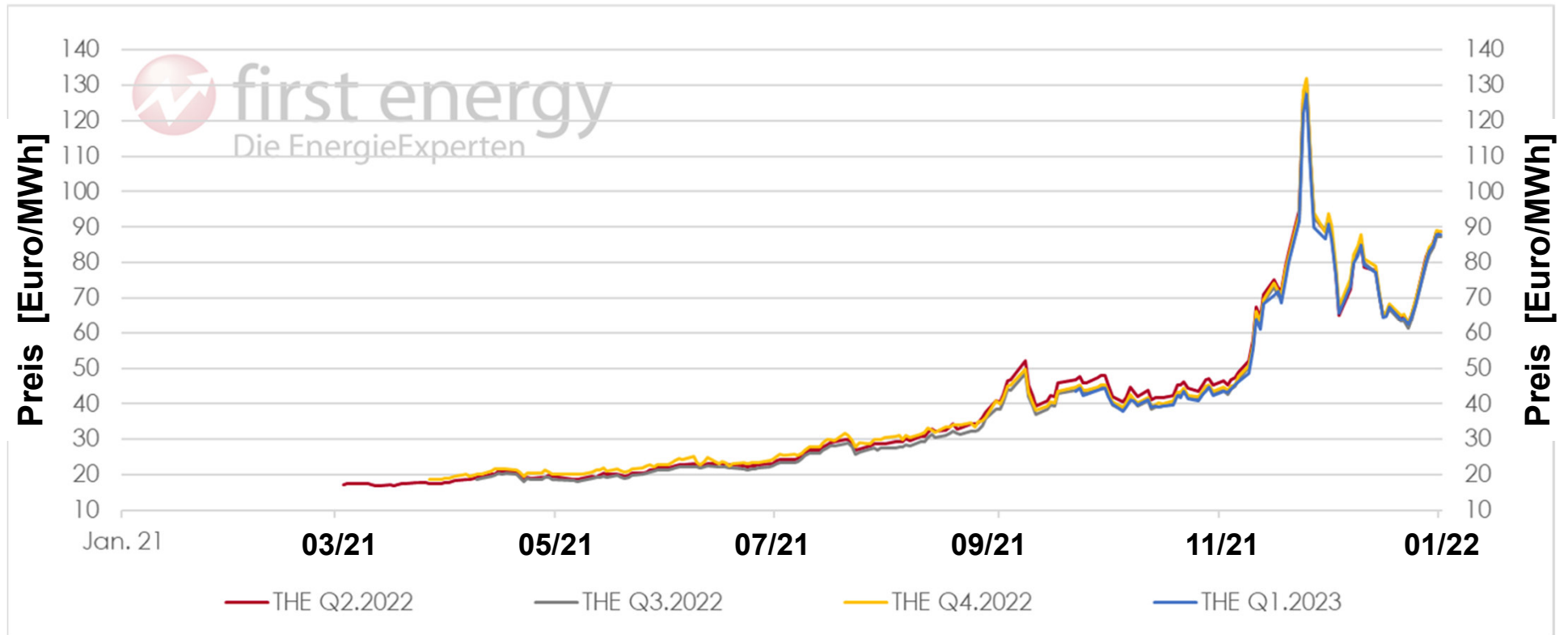


PV: 151 GW, Wind onshore: 82 GW, Wind offshore: 20 GW, Stromverbrauch: 602 TWh, FEE-Anteil: 83 %

Strom Day-Ahead Auktion in Deutschland (gew. Monatsmittel, 01.01.2020 – 14.02.2022)

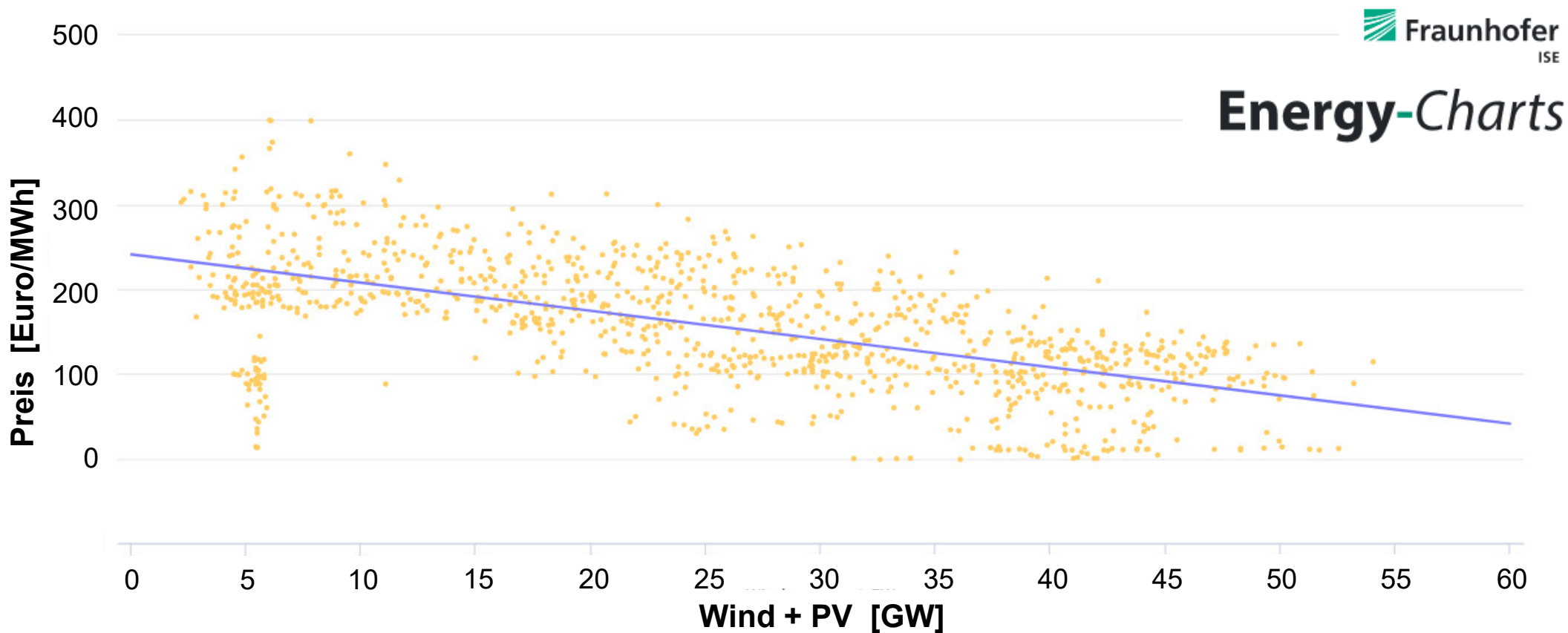


Gaspreisentwicklung - EEX Erdgas-Quartalskontrakte (power future THE | powermarket, März 2021 – Januar 2022)

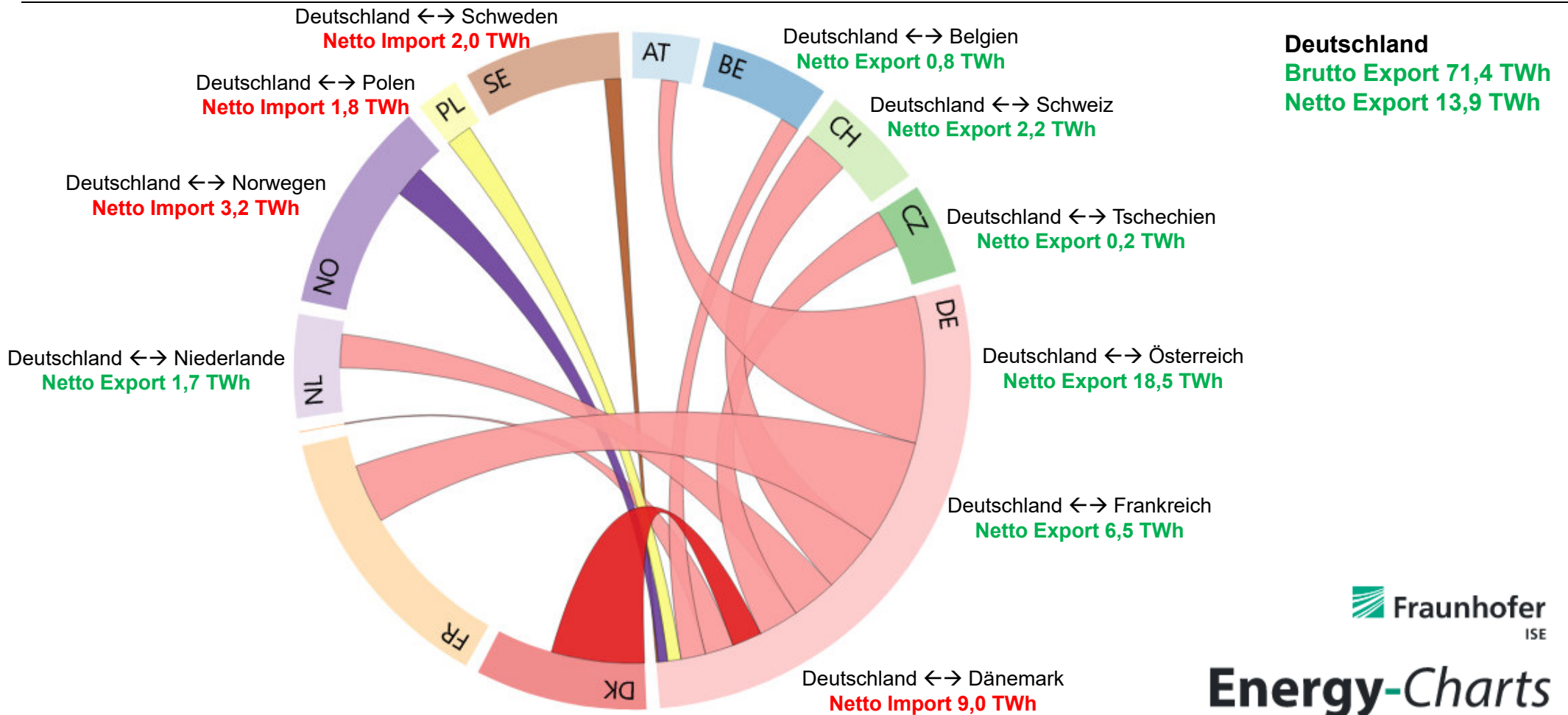


<https://first-energy.net/energieeinkauf/report-gaspreisentwicklung>, 17.02.2022

Strom Day-Ahead Auktion vs. Wind plus PV in Deutschland (01.01. – 14.02.2022)



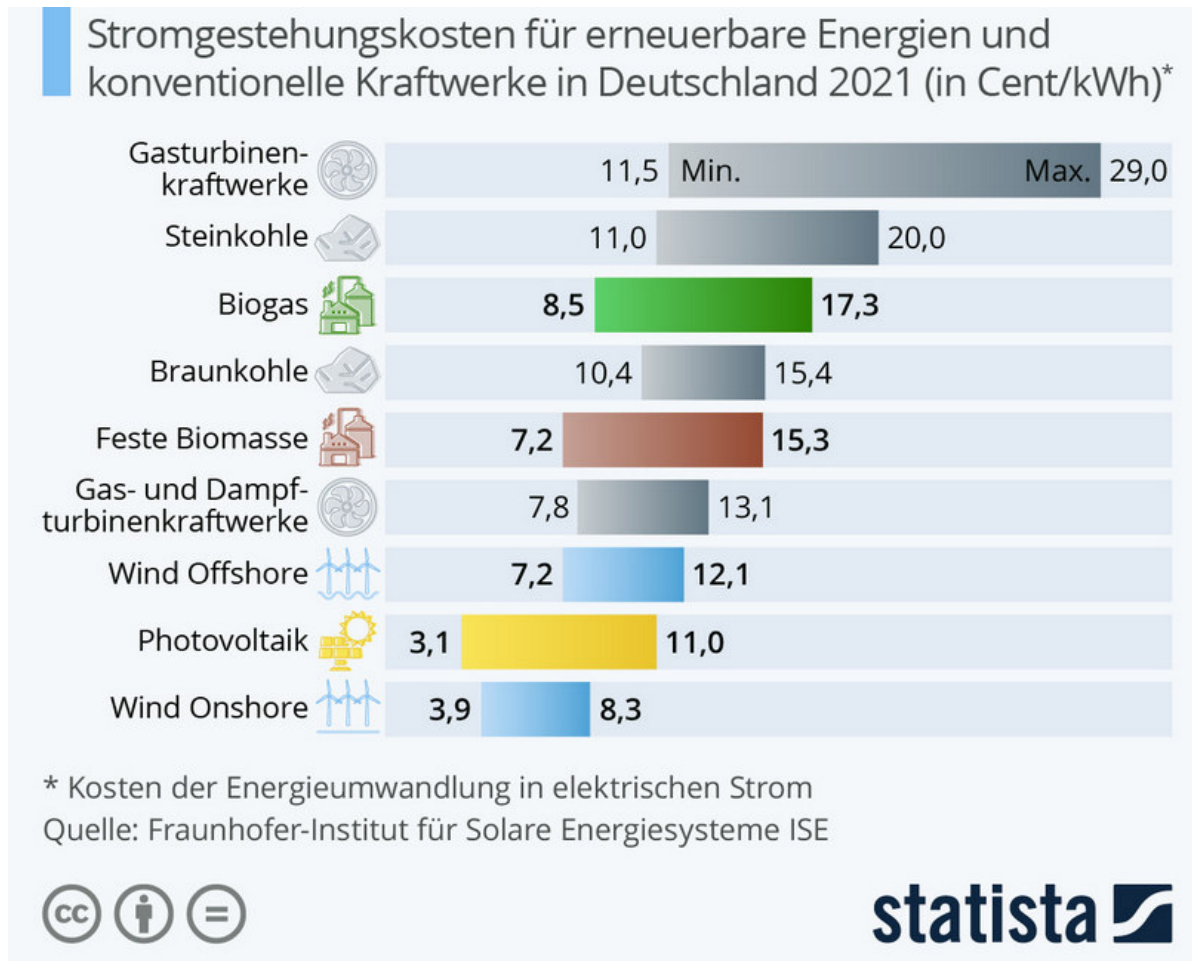
Stromflüsse zwischen Deutschland und seine Nachbarländern in 2021



Fraunhofer ISE

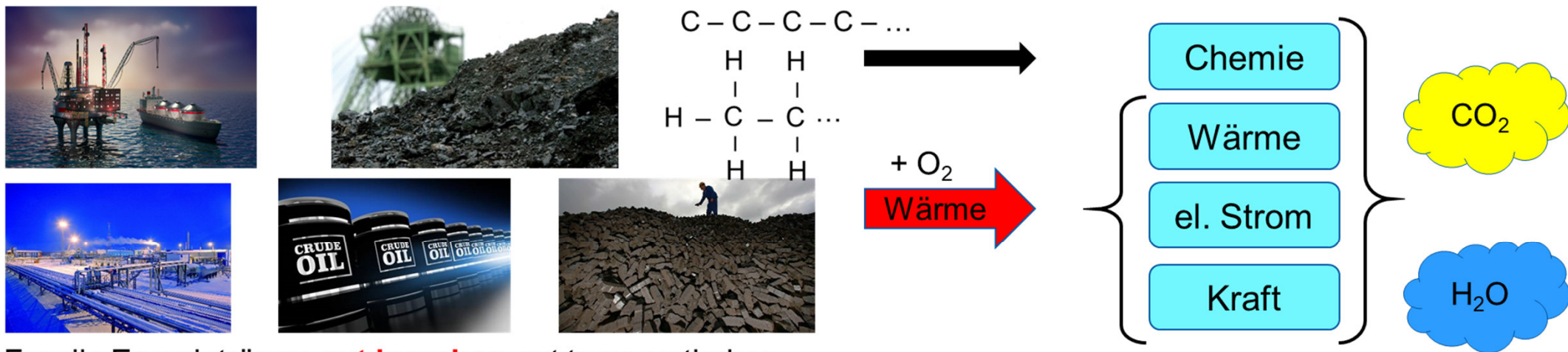
Energy-Charts

Erneuerbare Energie oft günstiger als konventionelle Stromerzeugung

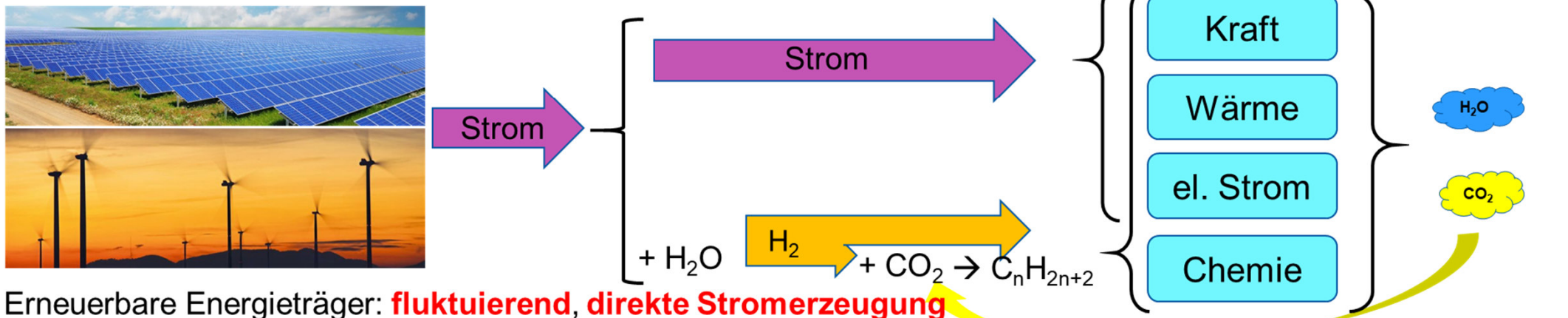


Wandel der Energieträger und Sektorenkopplung

Energieträger heute und morgen

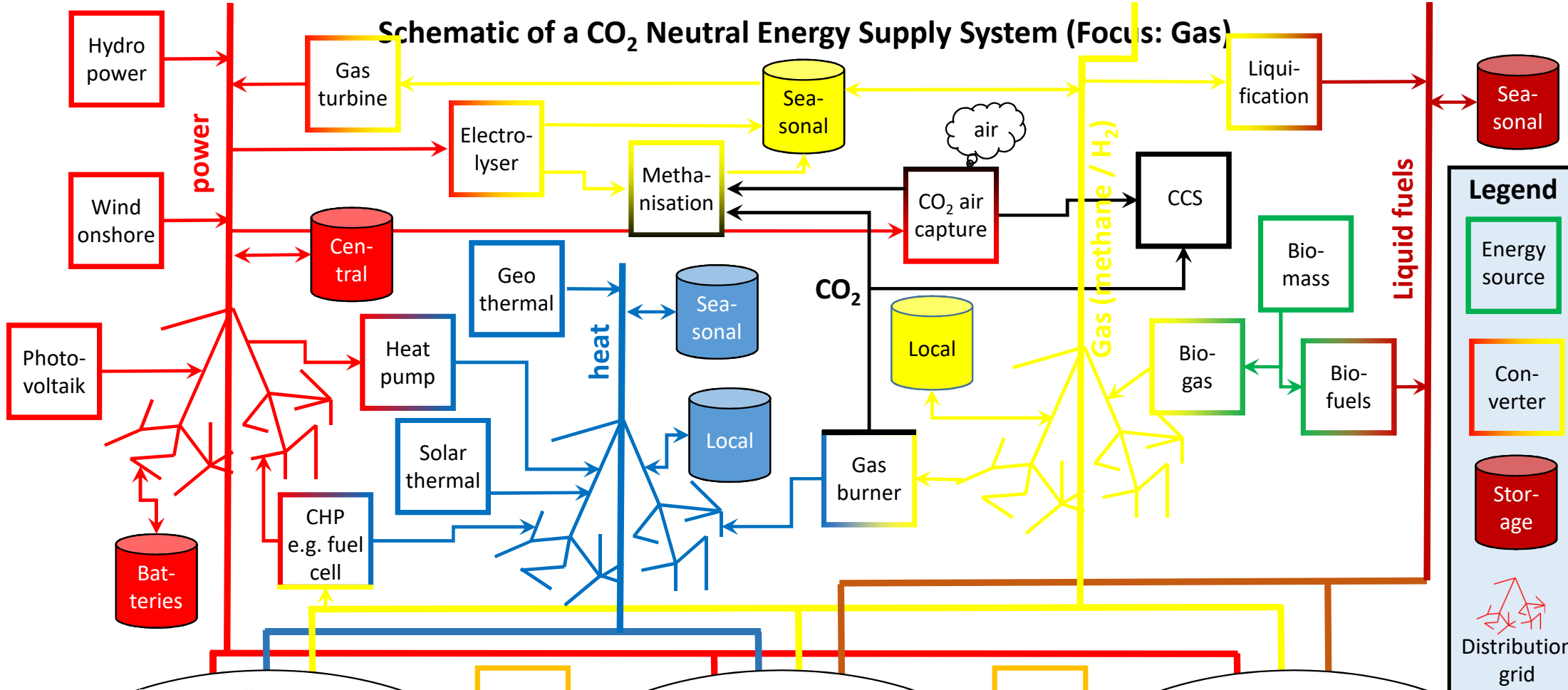


Fossile Energieträger: **gut lagerbar**, gut transportierbar



Erneuerbare Energieträger: **fluktuierend**, direkte Stromerzeugung

Schematic of a CO₂ Neutral Energy Supply System (Focus: Gas)



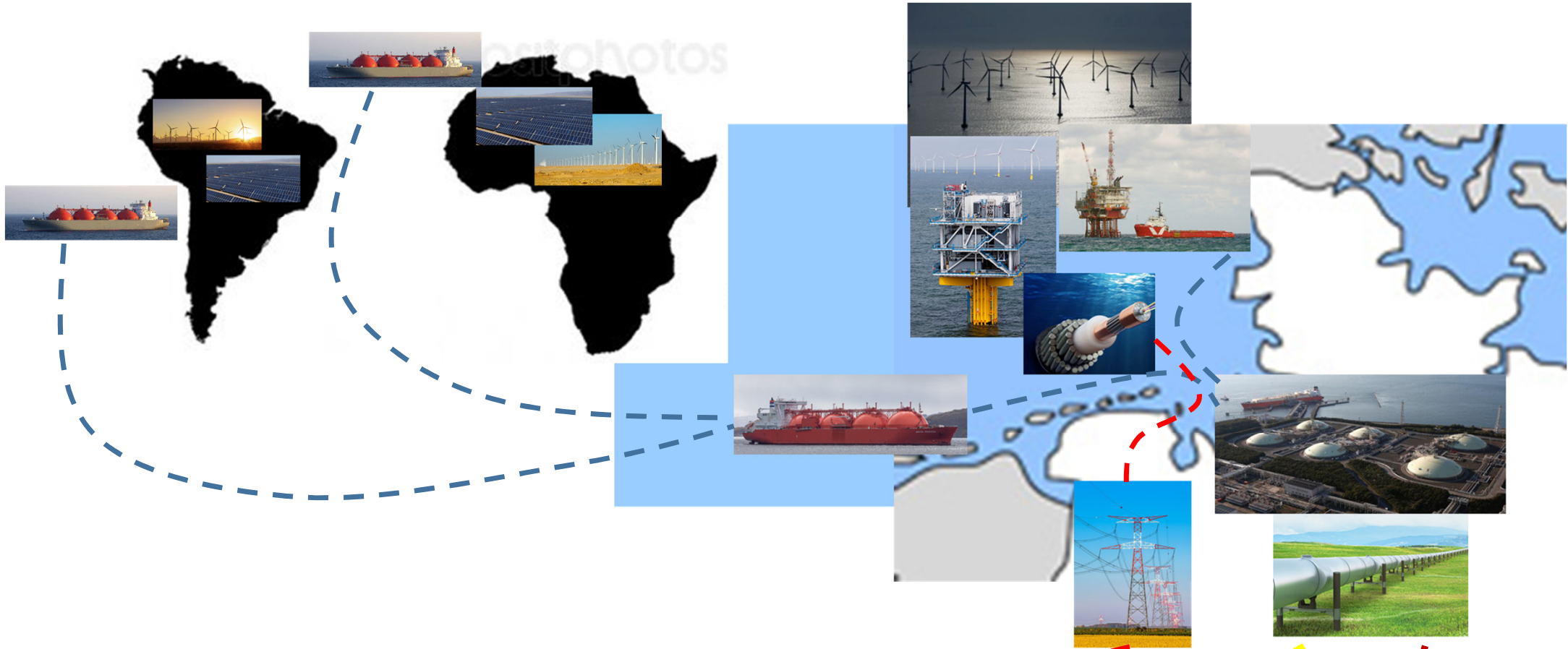
Legend

- Energy source (Green box)
- Converter (Yellow box)
- Storage (Red cylinder)
- Distribution grid (Red arrows)

System Context and Stakeholders

- Energy law** (Residential area icon)
- Resources** (Industrial area icon)
- Energy markets** (Industrial area icon)
- Recycling** (Industrial area icon)
- Vehicle design** (Transportation area icon)

Other elements: Digitalisation, DPG AKE, Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer, 13



power

Gas (methane / H₂)

Liquid fuels

Mit Wasserstoff zum klimaneutralen Industriestandort

In einigen Bereichen unvermeidbar, in anderen Bereichen in Diskussion



Industrie

- Stahlindustrie: Eisendirektreduktion
- Chemische Industrie: Einsatz als Grundstoff, für Ammoniak- und Methanolsynthese
- Prozesswärme



Gewerbe und Privathaushalte

- Raumwärme
- Warmwasser



Verkehr

- Schifffahrt
- Luftfahrt
- Schwerlast
- Schiene
- ÖPNV

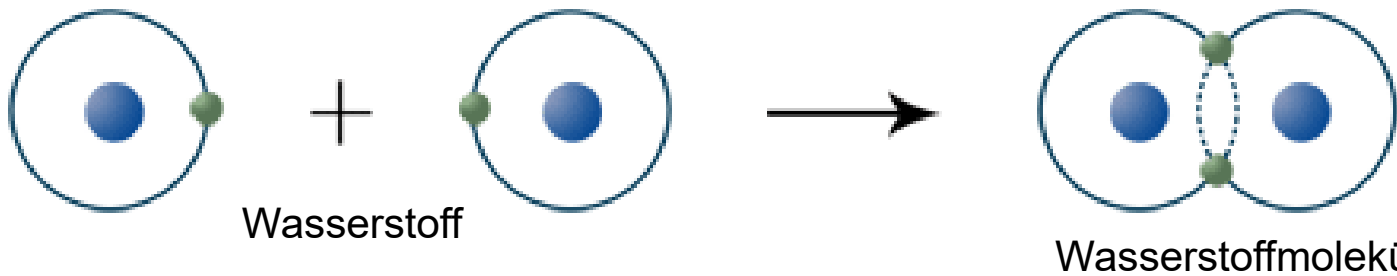


Stromsektor

- H₂ und EE-Methan als Langzeitspeicher

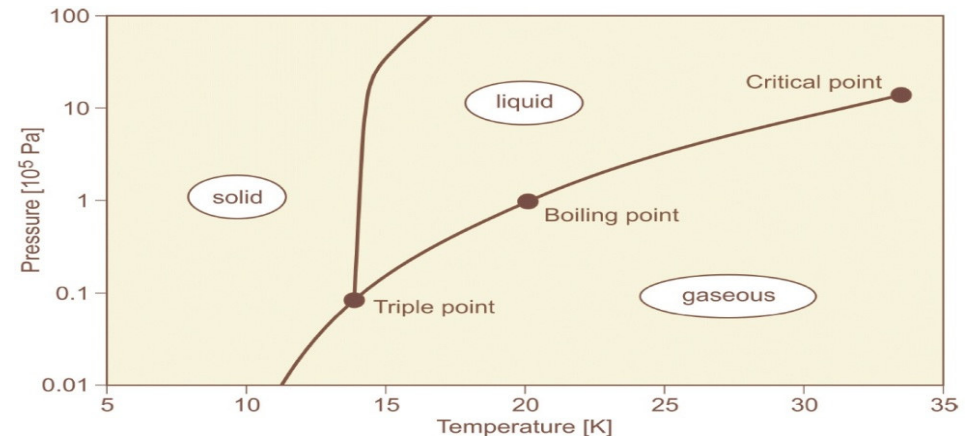
Eigenschaften von Wasserstoff

Eigenschaften von Wasserstoff



$$\Delta_r H^0 = -436.22 \text{ kJ/mol}$$

- Nach Zündung starke Reaktion mit Sauerstoff, Fluor oder Chlor, ansonsten relative stabil und geringe Reaktivität
- Bei hohen Temperaturen hohe Reaktivität mit Metallen und Nicht-Metallen
- Farblos, geschmackslos, geruchlos
- **Siedetemperatur : - 252.9 °C**
- Schmelzpunkt: - 259.2 °C
- Sehr kleines und leichtes Molekül, daher **sehr flüchtig**
- **Diffusion in einige Materialien macht diese porös**



- Wichtige Anomalie im Vergleich mit anderen Gasen:
 - Existiert flüssig nur bei Temperaturen im Bereich des Siedepunkts
 - **Keine Verflüssigung durch Druck möglich**

Eigenschaften von Wasserstoff – Sicherheit

Eigenschaften	Wasserstoff	Methan
Selbstzündungstemperatur	858 K	813 K
Flammtemperatur	2.318 K	2.148 K
Entzündbar in Umgebungsluft	4 – 75 %	5,3 – 15 %
Molekulargeschw. @ 273 K	1.692 m/s	600 m/s
Notwendige Zündenergie	0,017 mJ (@ 30 % H ₂) 0,6 mJ (@ 4 % H ₂)	0,29 mJ
Flammengeschwindigkeit	2,37 m/s	0,52 m/s



http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Hazard_F.svg

Wasserstoff brennt heißer, schneller und entzündet sich bei kritischer Konzentration leichter als Methan, aber durch die hohe Flüchtigkeit sind zündfähige Konzentrationen viel unwahrscheinlicher.

Wasserstoffherstellung und Wasserstoffnutzung

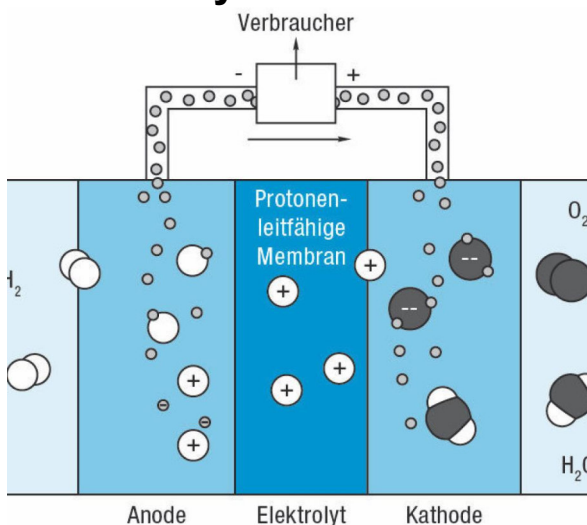
Where hydrogen can come from – „Colours“ of hydrogen

- „grey“ hydrogen : Production from natural gas or other fossil energy carriers (e.g. methane reforming)
- „blue“ hydrogen : Production through electrolysis with electric power from fossil energy carriers and carbon capture and storage (CCS)
- „turquoise“ hydrogen : Production by methane pyrolysis from fossil natural gas in a high-temperature reactor with separation of pure (solid) carbon
- „green“ hydrogen : Production through electrolysis with electric power from renewable energies (e.g. wind power, photovoltaics, hydro power)
- „yellow“ hydrogen : Production through electrolysis with electric power from nuclear power plants

Wasserstoffherstellung – aus Strom (und Wärme) durch Elektrolyse



PEM-Elektrolyseure



28 Elektrolyseure a 760 m³/h H₂ für die Düngemittelherstellung (Zimbabwe)
Gesamtkapazität von 21.000 m³/h H₂, installiert in den Jahren 1972 – 1974

Alkalische Elektrolyseure

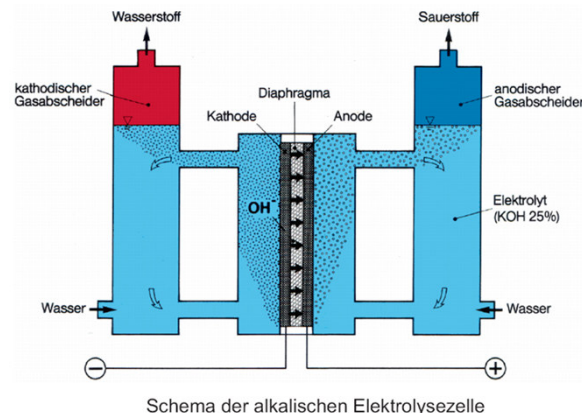


Bild: DLR.

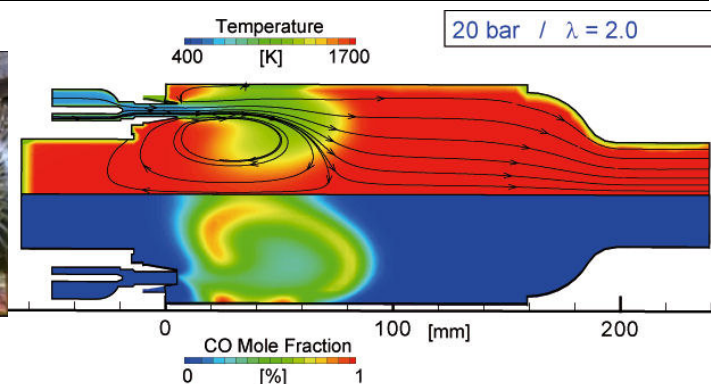
SOEC – Solid Oxide Electrolysis Cell

- Zersetzt Wasserdampf bei 700 bis 1000°C in H₂ oder O₂
- Gleichzeitige Reduktion von CO₂ und CO zur Herstellung von Synthesegas möglich

Energetische Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff



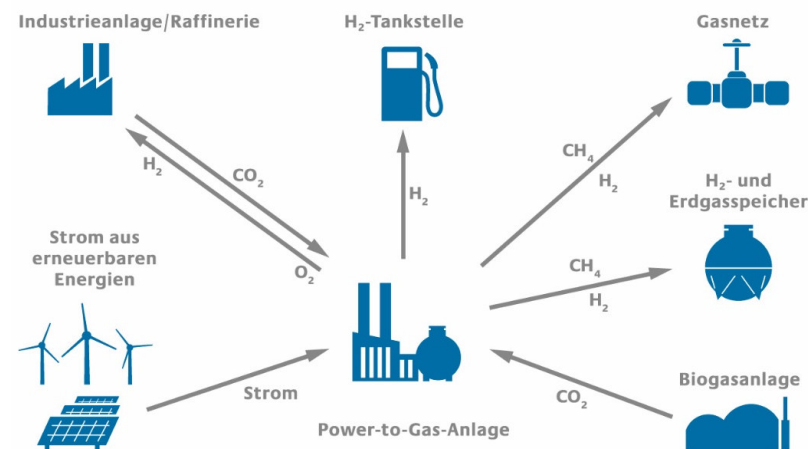
Verbrennen (primär Wärme)



Gasturbine (primär Strom)



Brennstoffzellen (primär Strom)



Power – to – X (primär stoffliche Energieträger)

Wasserstoffbedarf und Wasserstoffangebot

Hydrogen demand for chemical industry in Germany

- German chemical industry uses approx. 17.9m tons/year of crude oil & gas as raw material
 - Assumption: Crude oil consists mainly from Cyclohexane (C₆H₁₂)
 - Carbon (C) has 12 atomic weight units, hydrogen (H) has 1 atomic weight units
 - ➔ Weight share of hydrogen is: $12 \times 1u / (6 \times 12u + 12 \times 1u) = 14,3\%$
 - Assumption: Crude oil includes about 5% impurities
 - Assumption: Pure carbon is available for production of hydrocarbons
- ➔ Hydrogen demand: *(crude oil demand – impurities) x share of hydrogen*
- $$17.9 \cdot 10^6 \text{ tons} \cdot (1 - 5\%) \cdot 14.3\% = 2.43 \cdot 10^6 \text{ tons}$$

Even higher demand of hydrogen if CO₂ is used as carbon source:



How much electrical energy is needed to produce a quantity of hydrogen?

- Energy content of 1 kg hydrogen is 33.33 kWh/kg.
- Efficiency of electrolysis: ~ 75%
- Efficiency of producing hydrocarbons from carbon and H₂: ~ 80%
- Energy demand needed to produce and to process hydrogen to hydrocarbons:
energy content of hydrogen / (efficiency of electrolysis x efficiency of processing to hydrocarbons) =

$$\frac{33.33 \frac{kWh}{kg}}{75\% \cdot 80\%} = 55.55 \frac{kWh}{kg}$$

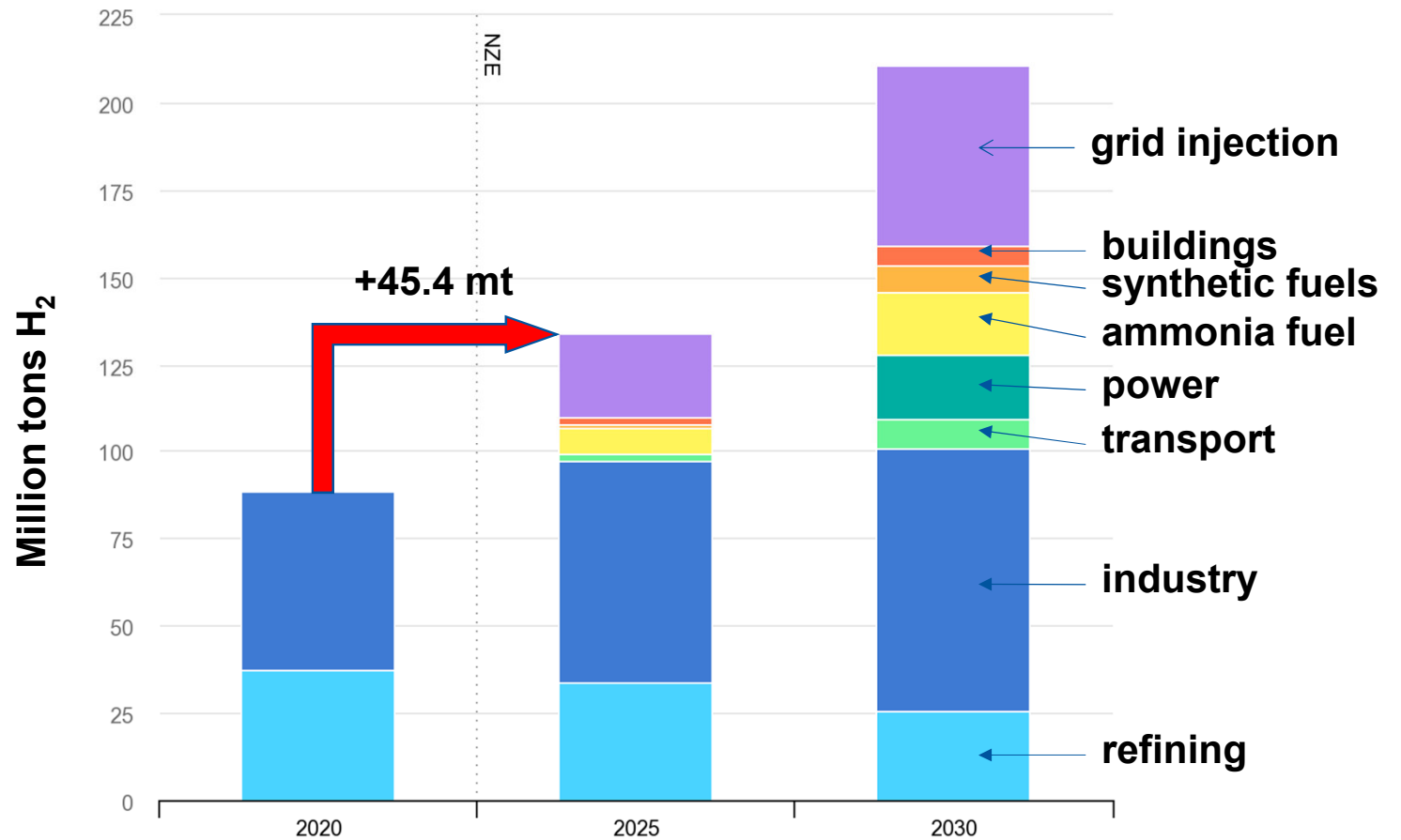
- Total energy demand:
hydrogen demand x energy demand for hydrogen production and processing =

$$3 \cdot 2.43 \cdot 10^6 \text{ tons} \cdot 55.55 \frac{kWh}{kg} = 405 \cdot 10^9 \text{ kWh} = 405 \text{ TWh}$$
$$\equiv \frac{405 \text{ TWh}}{544 \text{ TWh}} = 74.4\% \text{ of German gross power demand}$$

Global hydrogen demand by sector in the Net Zero Scenario, 2020-2030

45.4 mt H₂ as green hydrogen would mean:

- 2 TWh electric power
- 400 GW electrolyser @ 5,000 full load hours / year
- 680 GW wind & PV generator @ 3,000 full load hours / year



Source: IEA, *Global hydrogen demand by sector in the Net Zero Scenario, 2020-2030*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-sector-in-the-net-zero-scenario-2020-2030>

Global hydrogen demand by production technology in the Net Zero Scenario, 2020-2030

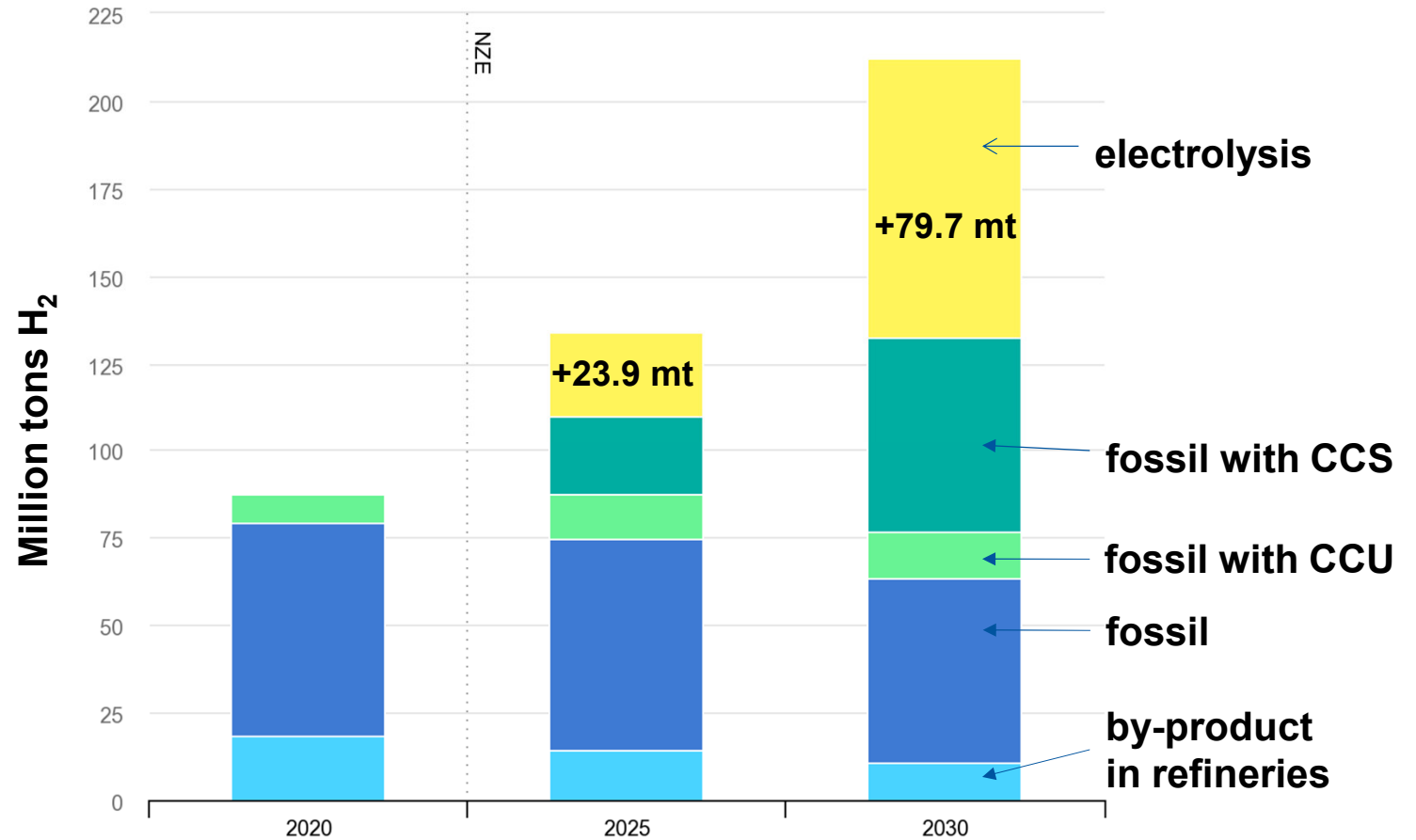
Green hydrogen means

■ for 23.9 mt H₂

- 1,1 TWh electric power
- 215 GW electrolyser
@ 5,000 full load hours / year
- 359 GW wind & PV
generators
@ 3,000 full load hours / year

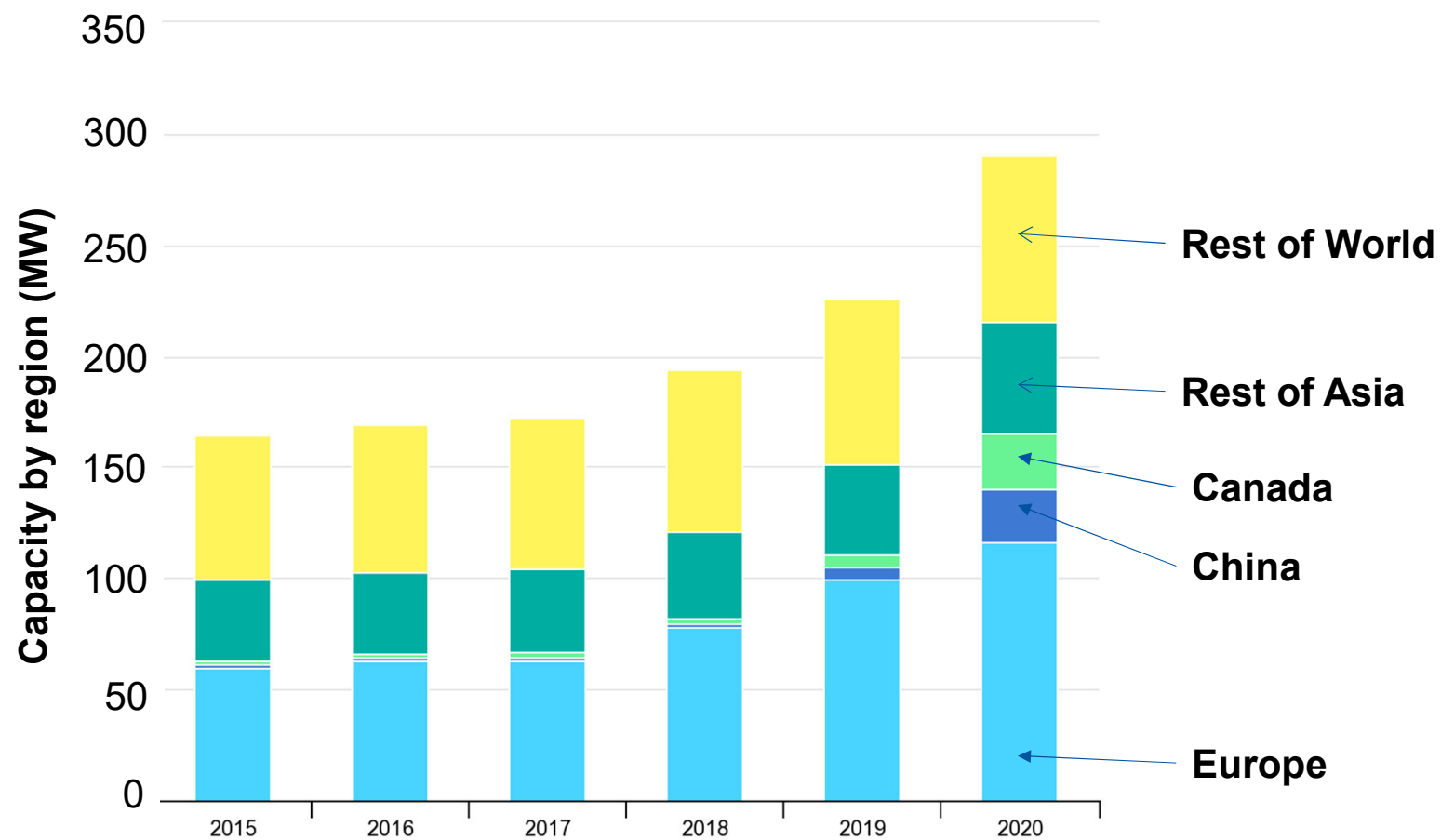
■ for 79.7 mt H₂

- 3,6 TWh electric power
- 717 GW electrolyser
@ 5,000 full load hours / year
- 1200 GW wind & PV
generators
@ 3,000 full load hours / year



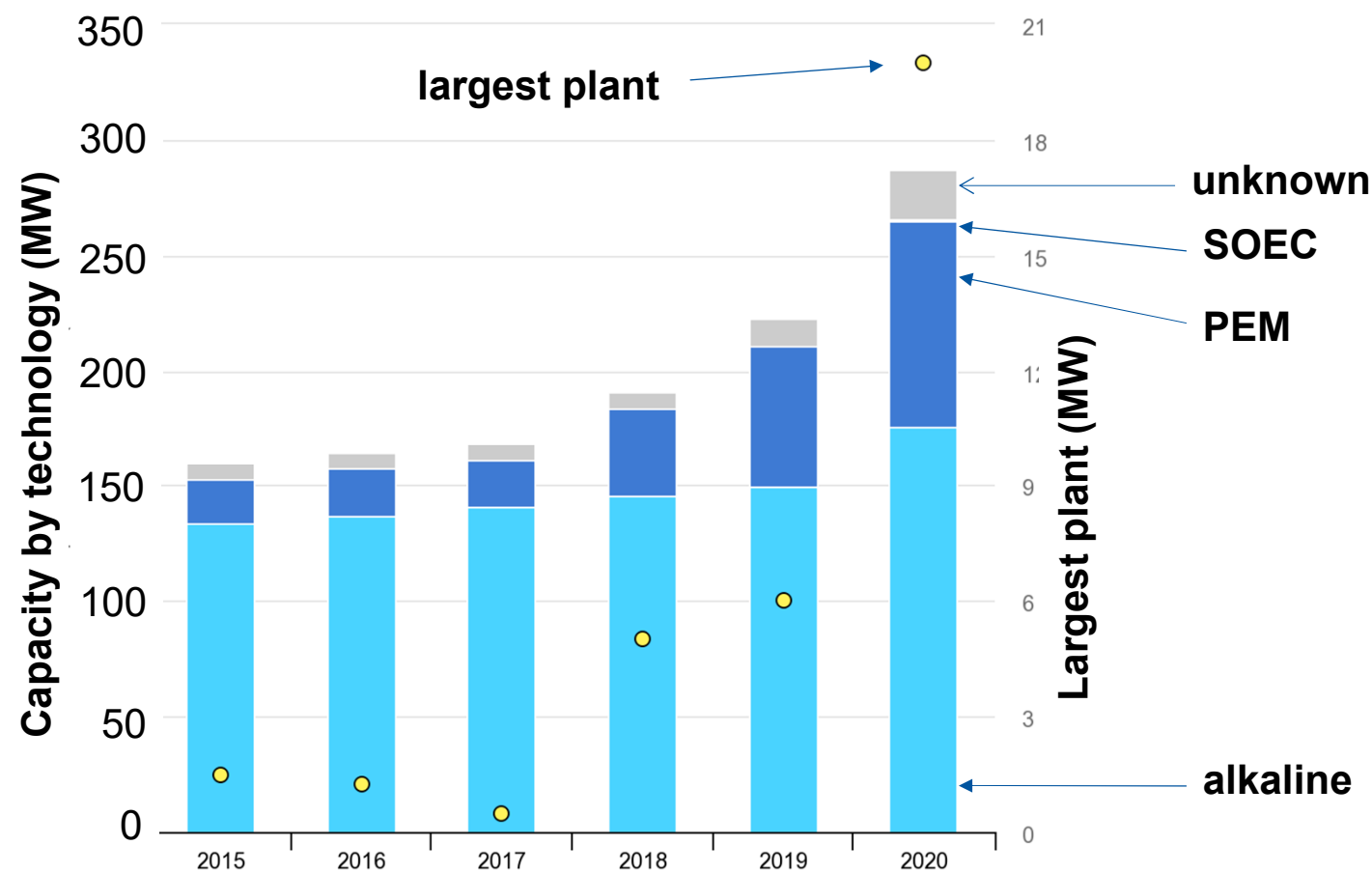
IEA, *Global hydrogen demand by production technology in the Net Zero Scenario, 2020-2030*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-by-production-technology-in-the-net-zero-scenario-2020-2030>

Global installed electrolysis capacity by region, 2015-2020



IEA, *Global installed electrolysis capacity by technology, 2015-2020*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-installed-electrolysis-capacity-by-technology-2015-2020>

Global installed electrolysis capacity by technology, 2015-2020



IEA, *Global installed electrolysis capacity by technology, 2015-2020*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-installed-electrolysis-capacity-by-technology-2015-2020>

Ausbauziele Erneuerbare Energien (Wind & PV) in China bis 2030

■ Bestand Ende 2021

- 306 GW Photovoltaik
- 328 GW Windkraftanlagen

■ Aktuelles Großprojekt in der Wüste Gobi

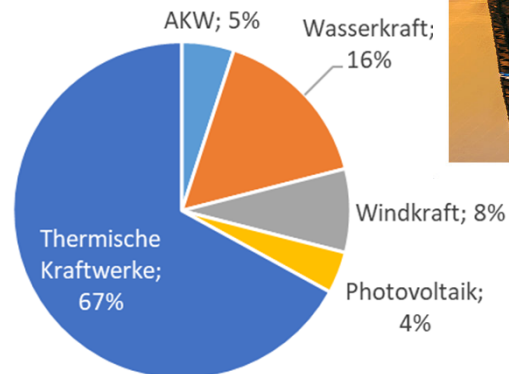
- 450 GW Photovoltaik- und Windkraftanlagen
- Erste Ausbaustufe mit 100 GW begonnen

■ Zielvorgabe für 2030

insgesamt

- mindestens 1.200 GW
Photovoltaik und
Windkraftanlagen

Stromerzeugung in China (2021)



Energiewende im großen Stil

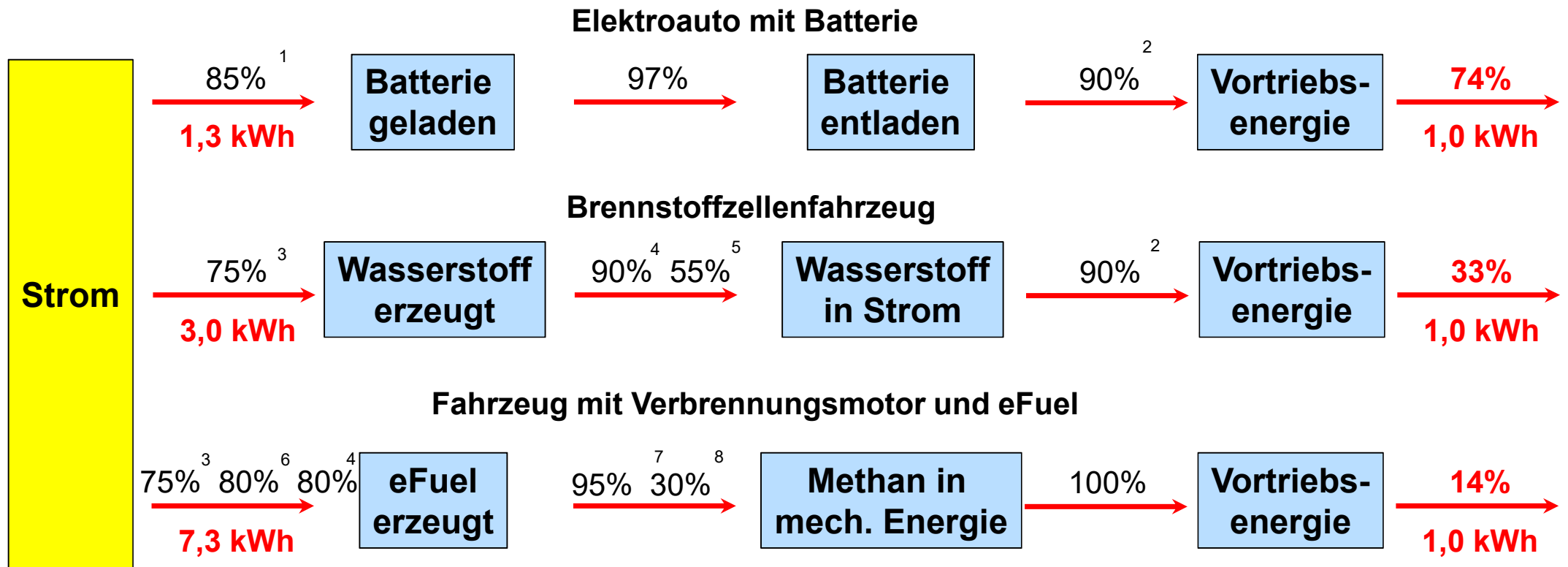
China baut gigantische Solar- und Windparks in der Wüste

DER SPIEGEL



<https://winfuture.de/news,128443.html>

Optionen für eine CO₂-freie Mobilität – Betrachtung beispielhafter Effizienzketten



¹ enthält Netzverluste und Umrichterverluste, moderate Ladeleistungen (1 C)

² Umrichter und Elektromotor

³ Elektrolyseur

⁴ CO₂-Wäsche aus der Luft

⁵ Brennstoffzelle Systemwirkungsgrad

⁶ Methanisierung (Annahme: Konzentrierte CO₂-Quelle)

⁷ Methan Komprimierung und Transport

⁸ realistischer mittlerer Betriebswirkungsgrad Verbrennungsmotor dynamischer Betrieb

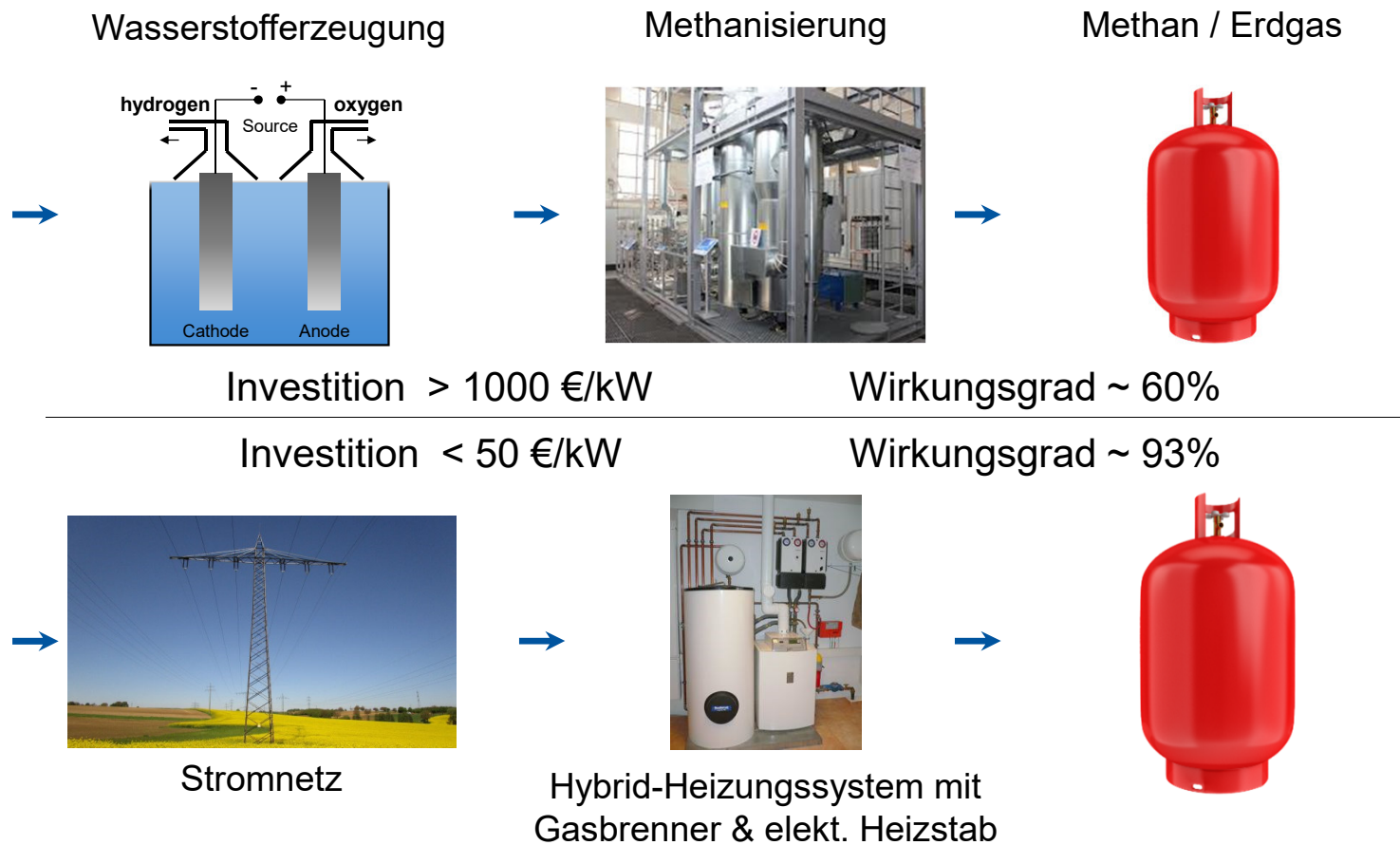
Welche CO₂-Einsparung wird kurzfristig, wenn 1 kWh elektrische Energie aus CO₂-freier Quelle eingesetzt wird?

CO ₂ -Ersparnis [kg/kWh]	Ineffizienz Faktor	Anwendung (berücksichtigt nur die direkte Umwandlung und Nutzung, keine Emissionen in den Vorketten sind berücksichtigt)
1,15	1,0	Ersatz der Stromerzeugung auf Braunkohlekraftwerken
1,12	1,0	Einsatz in Wärmepumpen für Wohnhäuser anstelle von Ölheizung
0,95	1,2	Ersatz der Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken
0,67	1,7	Verwendung in batterie-elektrischen Fahrzeugen anstelle von Verbrennungsmotoren mit Benzin
0,64	1,8	Ersatz der Stromerzeugung aus Gasturbinenkraftwerken
0,38	3,1	Einsatz in batteriegetriebenen schweren LKW anstelle von Dieselmotoren
0,30	3,9	Wasserstoffherzeugung für saisonale Speicherung und Rückverstromung zur Nutzung in batteriegetriebenen Elektrofahrzeugen (statt Benzin)
0,26	4,5	Herstellung von Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge anstelle von Verbrennungsmotoren mit Benzin
0,20	5,8	Rein elektrisches Heizen für Wohnräume anstelle von Erdgasheizungen
0,16	7,4	Herstellung von eFuels und Verwendung in Verbrennungsmotoren anstelle von Benzin

“Power to gas” – Zunächst effizient durch Substitution von Erdgasverbrauch



fluktuierende
Stromerzeugung
(Wind oder PV)



Sources: CCO

Wasserstoffspeicherung und -transport

Speicherung von Wasserstoff

Flüssiggasspeicherung

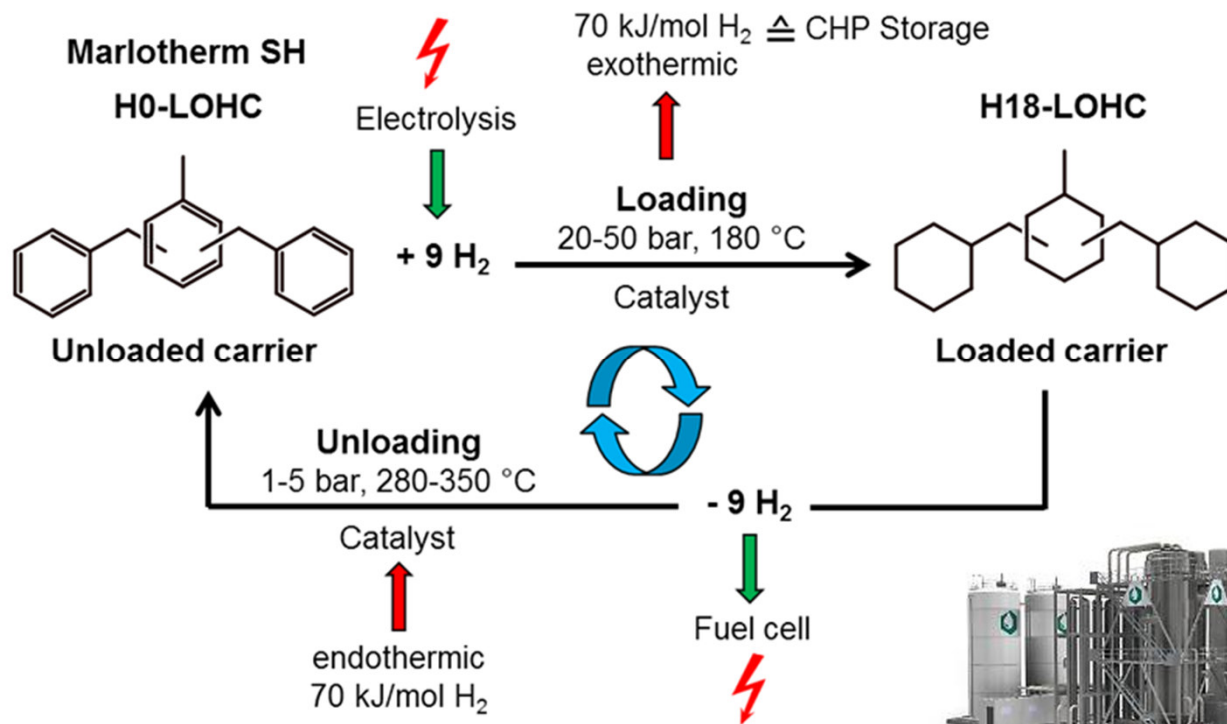
- Temperatur -253°C
- Speicherung meist in offenen Systemen mit Abdampfung von Wasserstoff
- Im PKW maximale Speicherdauer einige Tage



Druckgasspeicherung

- In Fahrzeugen heute bis 700 bar
- Wasserstoff ist ein stark nicht-ideales Gas
- Volumetrische Energiedichte bezogen auf nutzbare Energiemenge im Bereich von Batteriezellen

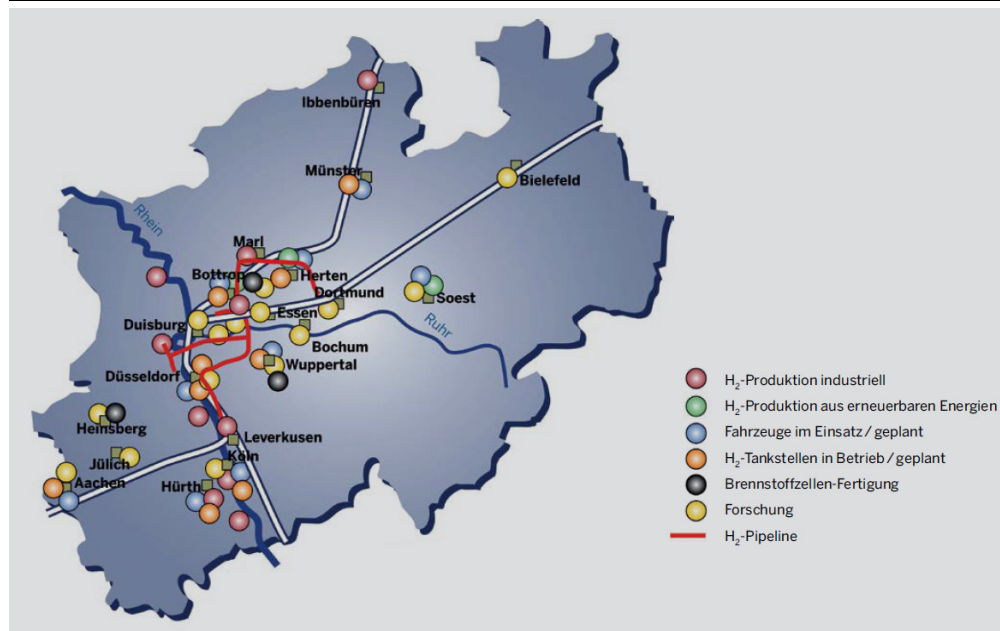
Speicherung von Wasserstoff in einem flüssigen Carrier (LOHC)



- Wasserstoff wird in einem Trägermaterial gebunden
- Gravimetrische Energiedichte etwa 1,9 kWh/kg
- Leicht transportierbar und tankbar
- Trägermaterial muss zurücktransportiert werden



Transport von Wasserstoff in Pipelines



Industrielles Wasserstoffnetzwerk in NRW



Volumetrische Energiedichte etwa 1/3 im Vergleich mit Methan

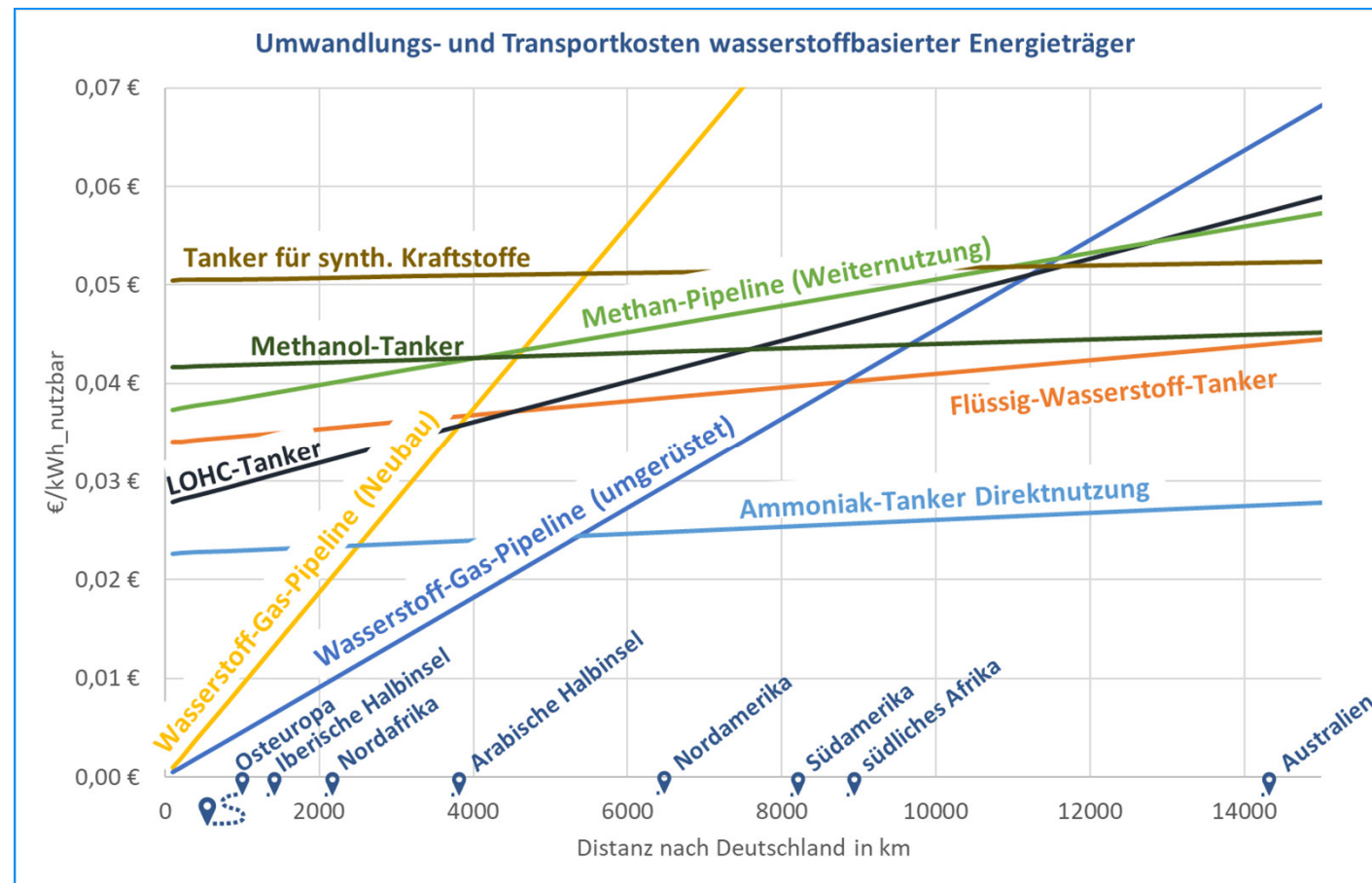
- Beimischung von aktuell bis 10% Wasserstoff ins Erdgasnetz zulässig, Erweiterung auf 20% geplant und technisch möglich
- Neubau von Gaspipelines ist ähnlich wie Stromleitungen auch nicht unumstritten in der Bevölkerung, aber bestehende Leitungsinfrastruktur ist sehr leistungsfähig

ESYS-AG „Wasserstoffwirtschaft 2030“

Möglichkeiten für den Transport von Wasserstoff und dessen Syntheseprodukten nach Deutschland per Schiff oder Pipeline



- **interdisziplinär:** 16 Mitglieder aus Natur-, Ingenieurs-, Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften
- **Leitung:** Prof. Dr. Frithjof Staiß (ZSW Baden-Württemberg)
- **Laufzeit:** Januar 2021 bis Mitte 2022
- Kostenvergleich der Transportoptionen; Ländersteckbriefe zu beispielhaften Exportländern; Analyse technischer, rechtlicher und sozio-ökonomischer Hemmnisse und ableitbare Forschungsfragen;

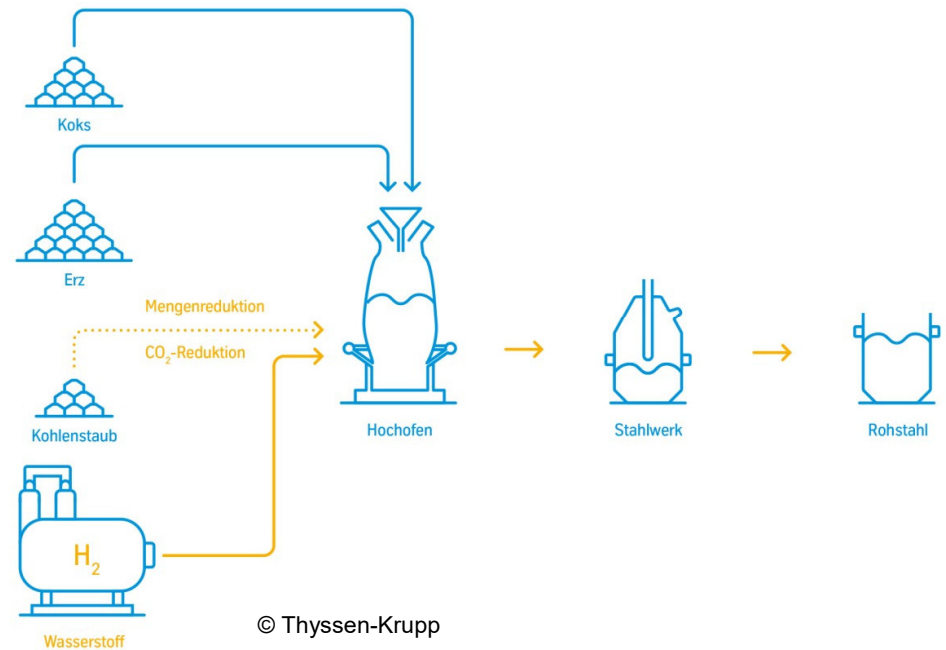


Weitere Anwendungsfelder für Wasserstoff (oder daraus entwickelten Kohlenwasserstoffen)

Wasserstoff in der Industrie – Beispiel Stahlindustrie

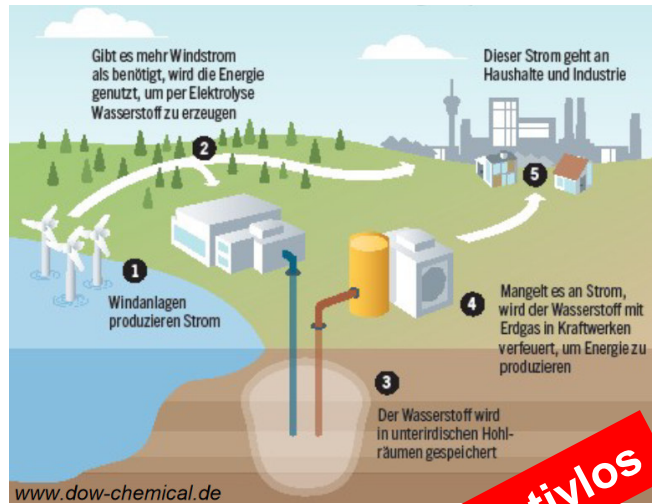


Wasserstoff soll Stahl
sauberer machen



- Komplexität der Umstellung ganzer industrieller Prozesse auf neue Energieträger ist sehr hoch.
- Neu-Qualifikation der Produktqualität von Produkten mit jahrzehnter langer Erfahrung notwendig.

Einsatz von Wasserstoff im stationären Bereich

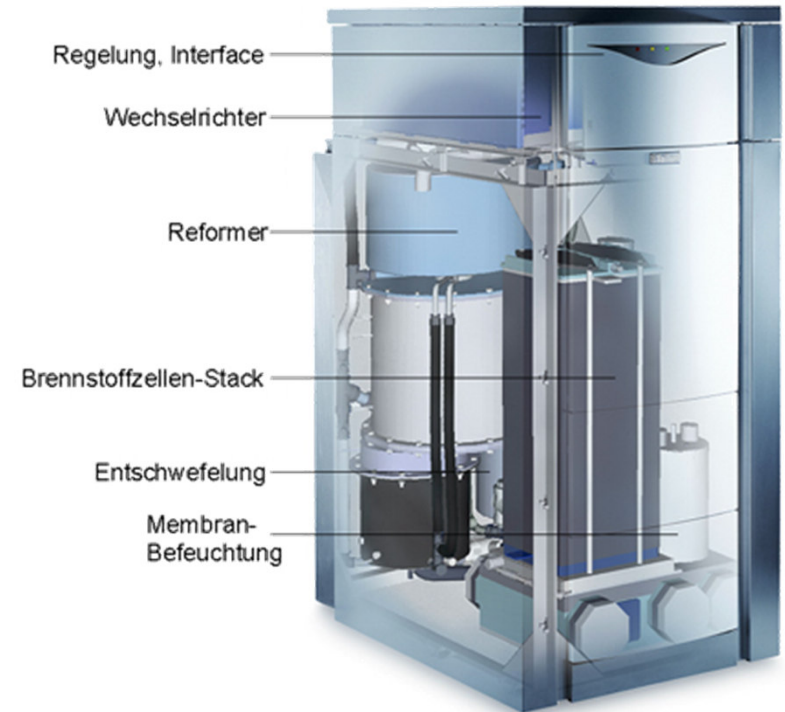


Alternativlos



Kavernenspeicher für Dunkelflauten und saisonale Verschiebung

- Elektrolyseur
- Gasdruckspeicher (auch Alternativen denkbar)
- Rückverstromung (z.B. Gasturbinen, Brennstoffzellen)

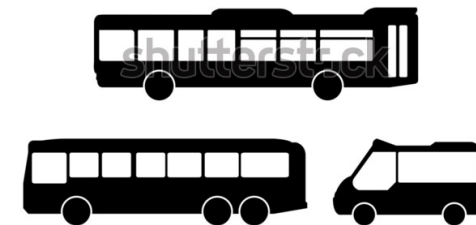
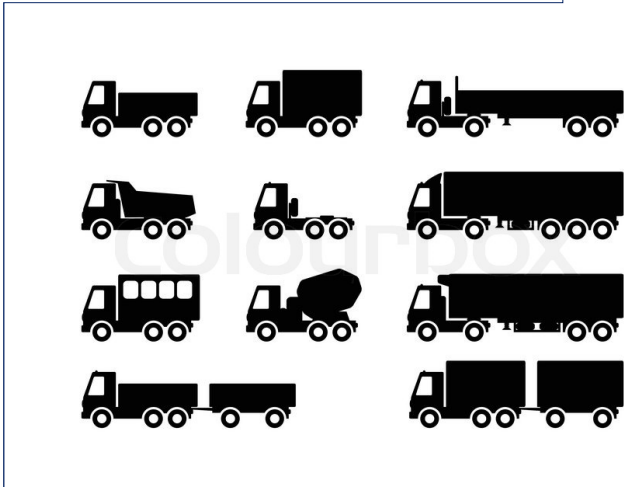


- KWK-Anlagen für Heizanlagen in Einzel- und Appartementshäusern

Wasserstoff im Mobilitätssektor (jenseits PKW)



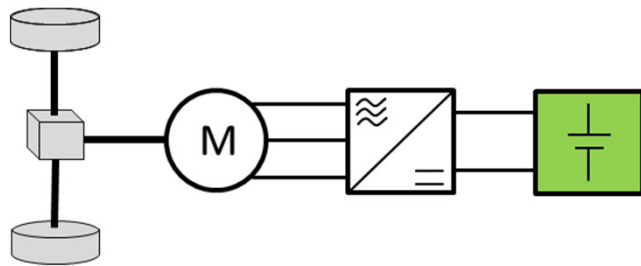
Schiffe und Flugzeuge für Langstrecken mit alternativen Kraftstoffen (Biotreibstoffe, eFuels, Wasserstoff (z.B. über LOHC))



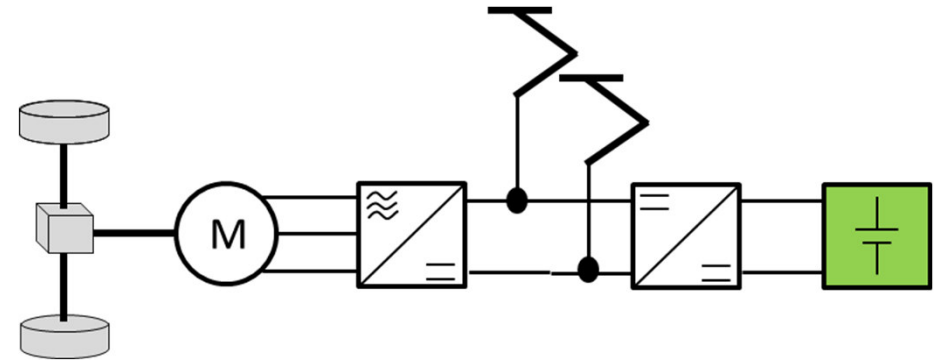
Landwirtschaft, Busse, LKW und Spezialfahrzeuge interessante Anwendungsbereiche für Wasserstoff, aber nicht alternativlos

Example for competing technologies – Topologies for climate-neutral propulsion systems for heavy trucks

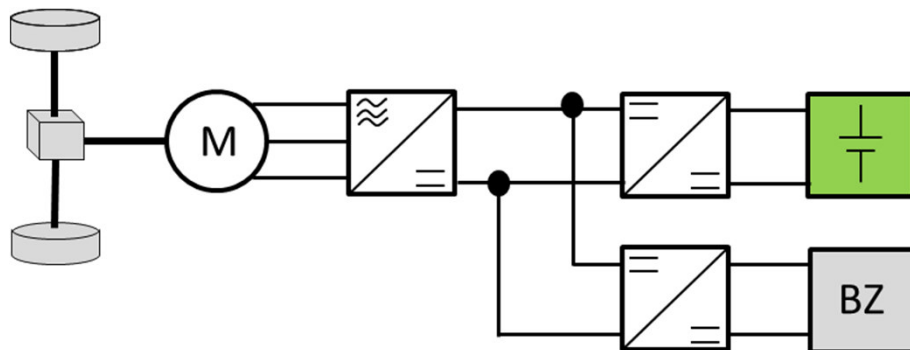
■ Electric drive train with **battery**



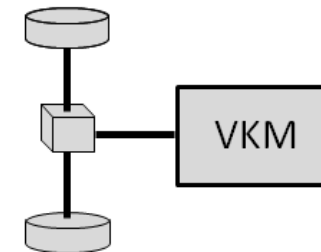
■ Electric drive train with **overhead catenaries**



■ Electric drive train with **fuel cell / hydrogen**



■ Combustion engine with **green synthetic fuel**



Catenary trucks



Quelle: dpa/picture-alliance



Picture: www.siemens.com/presse

Fuel cell trucks



Picture: Toyota Project Portal Hydrogen Fuel Cell Truck



Picture: fuel cell powered heavy truck and trailer is being refueled at Coop's hydrogen station in Hunzenschwil

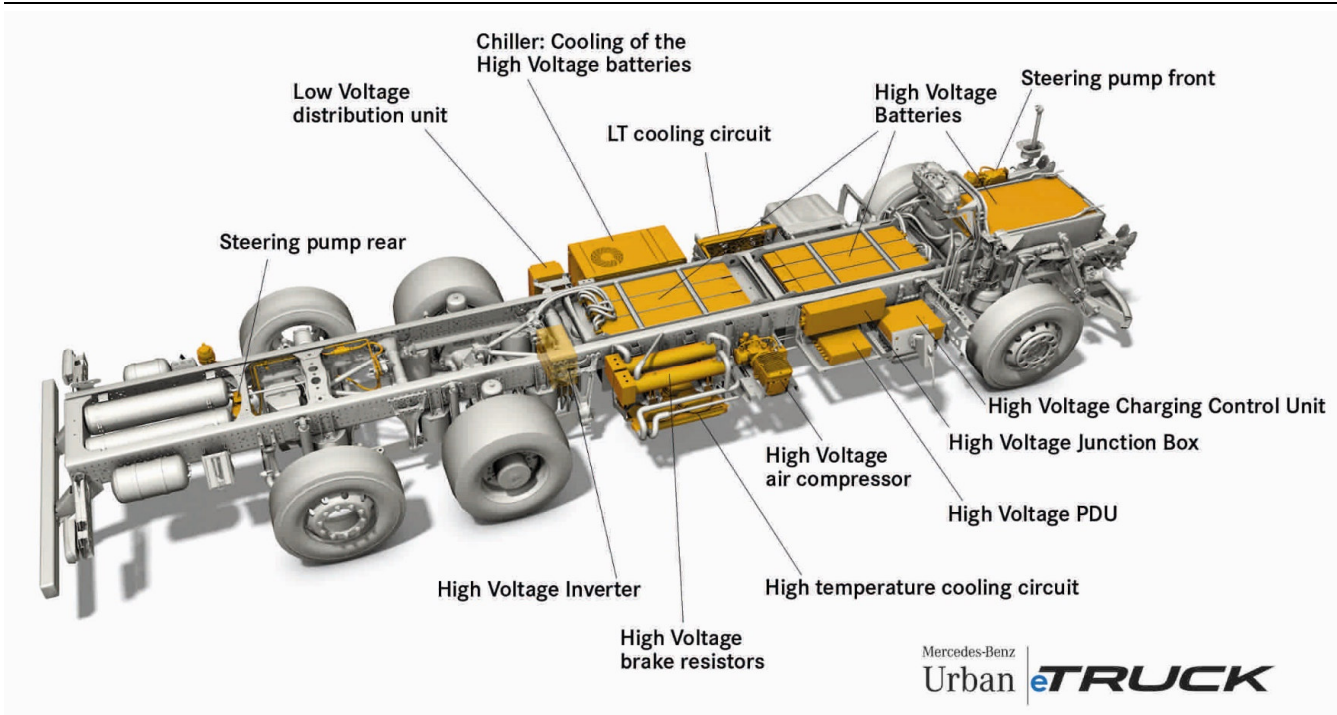


Picture: Hyundai Fuel Cell Electric Truck



Picture: Toyota fuel cell system

Battery electric truck



Quelle: Mercedes-Benz / Daimler

Emission-free heavy trucks

4 options for 40 tons trucks

1. Catenary on highways combined with batteries for the „off-highway“ operation for a maximum of 50 to 100 km
 - ➔ Realisation depends on governmental decisions; concept will work only in countries with high population density
2. Battery electric with high power charging stations alongside highways
 - ➔ Recharging after 4.5 hours; weight of the battery about 3 to 4 tons; power demand for recharging about 700 to 800 kW/truck
3. Fuel cells with hydrogen infrastructure alongside highways
 - ➔ primary energy demand at least 2 times higher, significant less weight, and approx. same volume compared with battery electric
4. Synthetic fuels (efuel) with combustion engine
 - ➔ Total efficiency less than 20%; easy to import from third countries, lowest additional infrastructure demand



Quelle: focus.de



Quelle: eJIT

Emission-free heavy trucks

4 options for 40 tons trucks

1. Catenary on highways combined with batteries for the „off-highway“ operation for a maximum of 50 to 100 km
2. Battery electric with high power charging stations alongside highways
3. Fuel cells with hydrogen infrastructure alongside highways
4. Synthetic fuels (efuel) with combustion engine

Problems with the transformation

- High infrastructure requirements associated with high costs
- Long-term strategy necessary
- Very difficult without agreement with European partners
- Political decision necessary
- "Technology openness" does not help here
- Open question: When will who make a decision and on what basis?

Problematik der Markteinführung neuer Technologien

Herausforderung und Problematik der Einführung einer Wasserstoffwirtschaft

“In einer Welt, in der alles kopiert werden kann, bringt es keinen Vorteil mehr, Erster zu sein.”

Zitat von Prof. Howard Yu, *IMD Business School, Lausanne*
Vortrag bei der acatech-Präsidiumssitzung am 29.08.2019

Bei Investitionen in eine Technologie, die auch langfristig günstiger wird, wird der spätere Investor am Markt immer erfolgreicher sein, als der frühe Investor.

- Technologien für das zukünftige Energiesystem (Photovoltaik, Windkraft, Batterien, Wasserstoff/eFuels) werden durch Economy of Scale und Technologieentwicklung immer günstiger.
- Produktkosten (Strom, Wasserstoff, eFuel) werden stark durch die Investitionskosten bestimmt, spätere Kostensenkung zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit sind kaum möglich.
- Einführung der Technologien ist ohne Absicherung des Ertrags (siehe EEG) in liberalisierten und kartellfreien Märkten kaum möglich.

Beispiel: Batteriegroßspeicher (Utility scale) 1-100 MW, 1-130 MWh



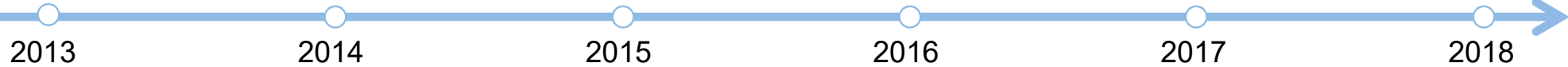
2013 STEAG, Lessy, 1MW 1 MWh



2015 RES, Chicago, 19 MW 8 MWh



2018 Eneco, DE, 50 MW 50 MWh



2014 RES, Ohio, 4MW 2.6 MWh

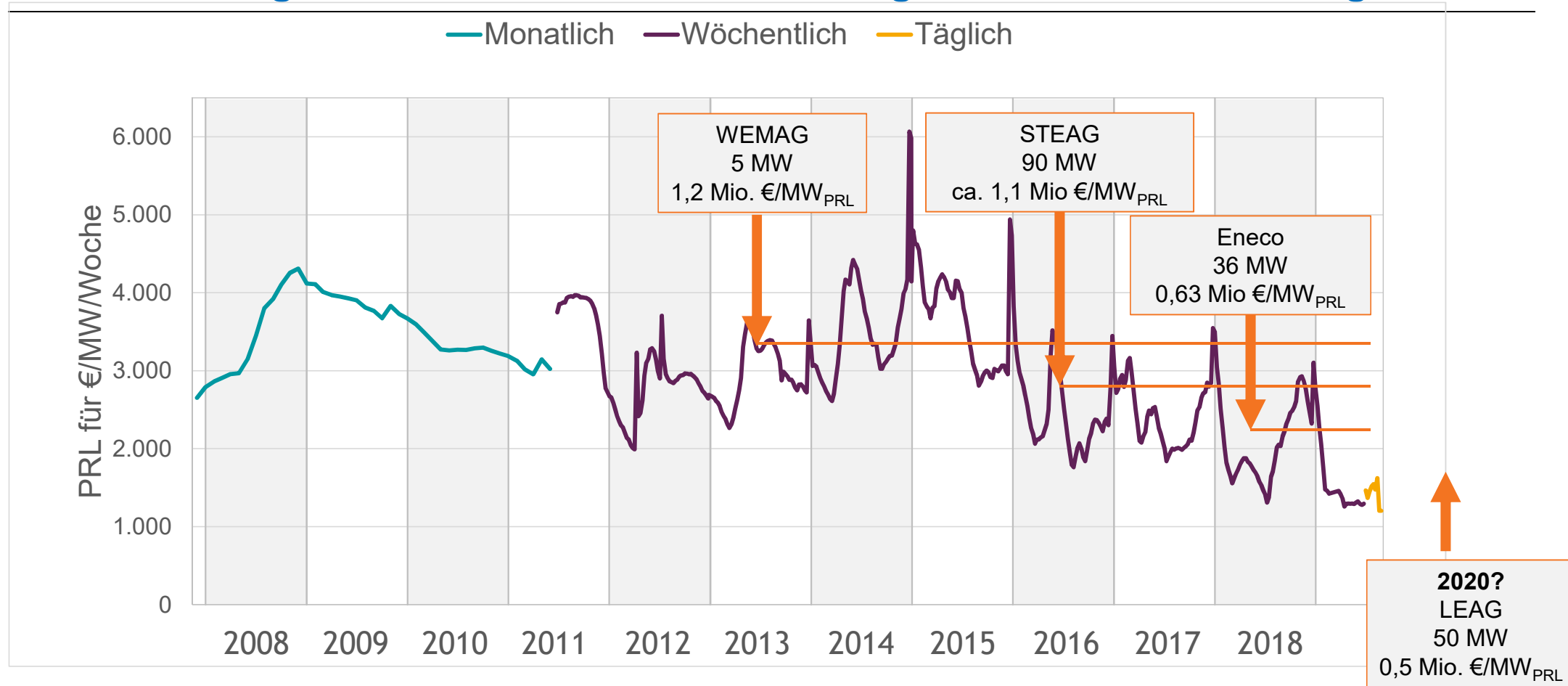


2017 STEAG 6 x 15 MW, 130 MWh



2018 Tesla 100 MW, 129 MWh

Konsequenzen im Markt: Produktpreis (hier: Primärregelleistung (PRL)) sinkt → ältere Anlagen werden unwirtschaftlich lange vor der Abschreibung



Quelle: Dr. Leuthold / RES

Fazit zur Markteinführung neuer Technologien mit Produkthandel im freien Markt

- In einem reinen Handelsmarkt ist der Bau neuer Anlagen quasi nicht möglich
 - Sinkende Technologiekosten bevorzugen immer den, der später investiert
 - Kaum Kostensenkungspotentiale nach Anlagenbau
 - Keine „bankability“ – Batteriegroßspeicher in Deutschland haben in fast keinem Fall eine Bankfinanzierung
- Gleiches Problem ist bei Power-to-X-Technologien zu erwarten (Elektrolyseure zur Wasserstofferzeugung, Anlagen zur Methanisierung von Wasserstoff, Anlagen zur Herstellung von eFuels)
- Erste Generation Anlagen wird mit starker Förderung gebaut werden, danach passiert nichts mehr → keine nachhaltigen Arbeitsplatzeffekte
- Stabile Preise (z.B. durch etwas EEG-ähnliches) für den Aufbau von Kapazitäten im Ausland?
- **Neues Marktdesign ist dringend notwendig!**

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Wir werden sehr viel Wasserstoff brauchen.
- Viel Wasserstoff wird in andere Energieträger umgewandelt werden.
- Schwierigste Transformationsaufgabe ist die Industrie.
- Erhebliche Mengen an Wasserstoff und –derivaten werden importiert werden
- Ausbau der Wasserstofferzeugung aus Elektrolyse muss mit hohem Tempo vorangetrieben werden
- Für viele Bereich wird noch lange kein Wasserstoff zur Verfügung stehen