

Fakten und Mythen zur Energiewende

Prof. Dr.-Ing. Kai Michels
Institut für Automatisierungstechnik
Universität Bremen

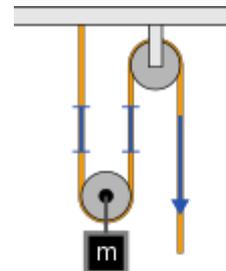
15.11.2024

- **Grundlagen**
- **Energieverbrauch**
- **Leistung**
- **Energiespeicher**
- **Kernkraft**
- **Elektromobilität**
- **Wärmepumpen**
- **Vorschläge**

Leistung und Energie

- **Energie = Arbeit** (Einheit z.B. kWh, MWh, GWh, TWh)
- **Leistung = Arbeit / Zeit** (Einheit z.B. kW, MW, GW, TW)

- Der Körper kann doppelt so schnell angehoben werden → doppelte Leistung, halbe Zeit → **Die Arbeit (Energie) bleibt gleich.**
- Der Körper kann mit einem Flaschenzug angehoben werden. Die Kraft halbiert sich, der Weg verdoppelt sich → **Die Arbeit (Energie) bleibt gleich.**



Energieerhaltung

- Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet, sondern nur umgewandelt werden! Beispiel Kohlekraftwerk:

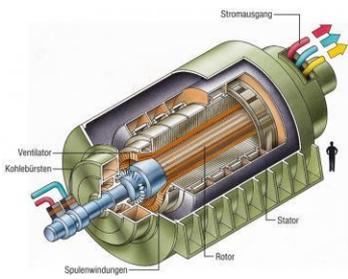
Chemische Energie



Wärmeenergie



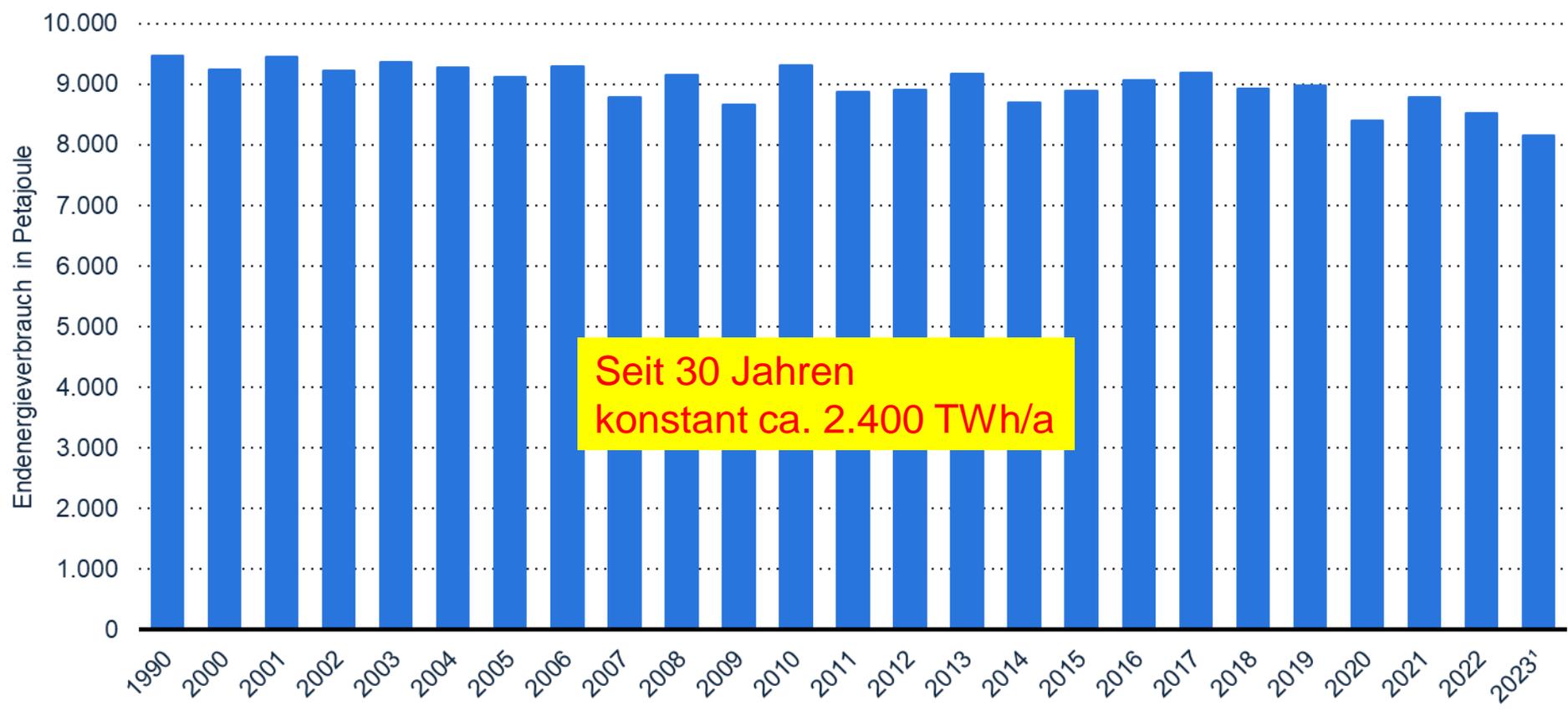
Wärmeenergie



Elektrische Energie

Kinetische Energie

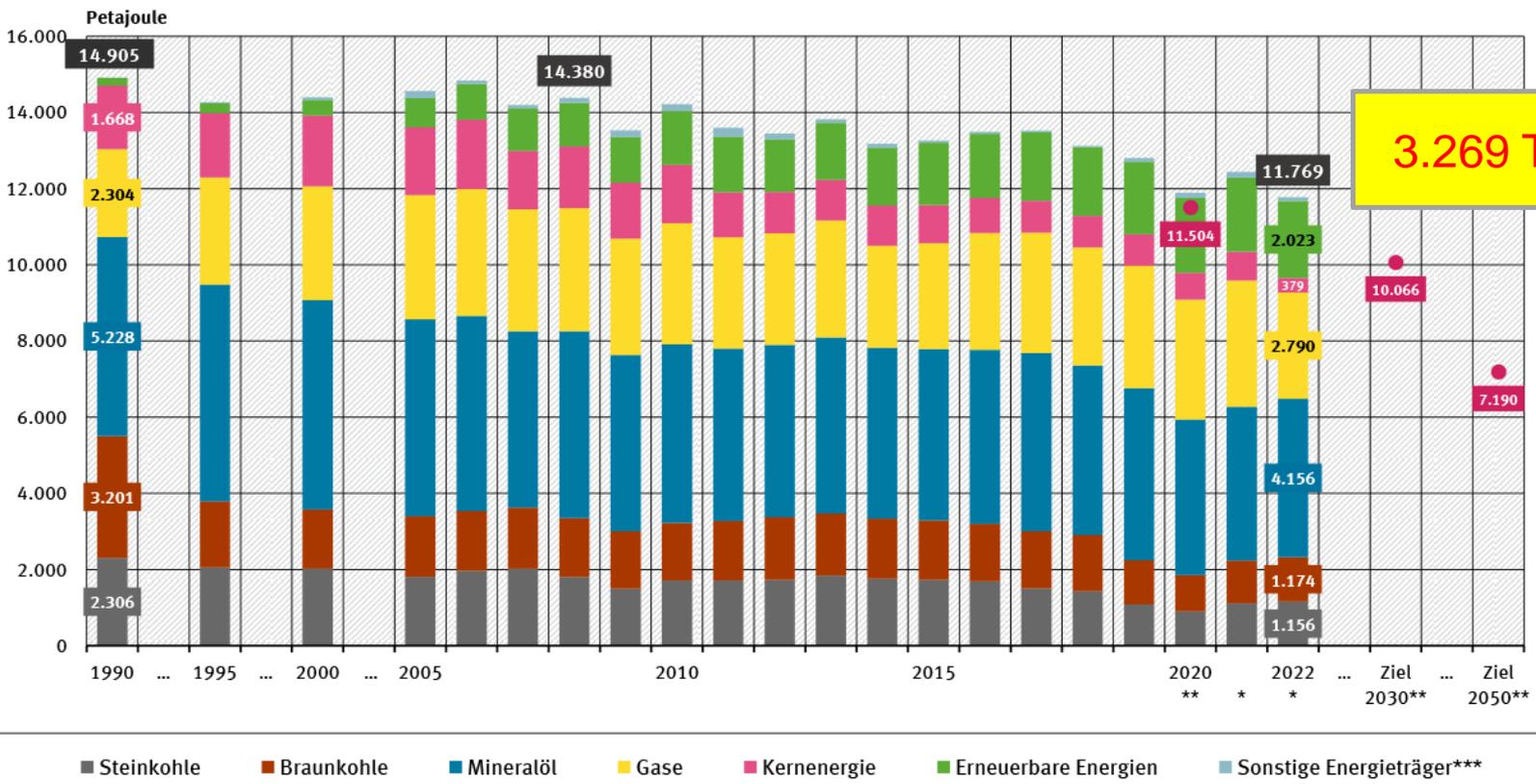
Endenergiebedarf gesamt in D



<https://de.statista.com/statistik/studie/id/6691/dokument/energieverbrauch-weltweit/>

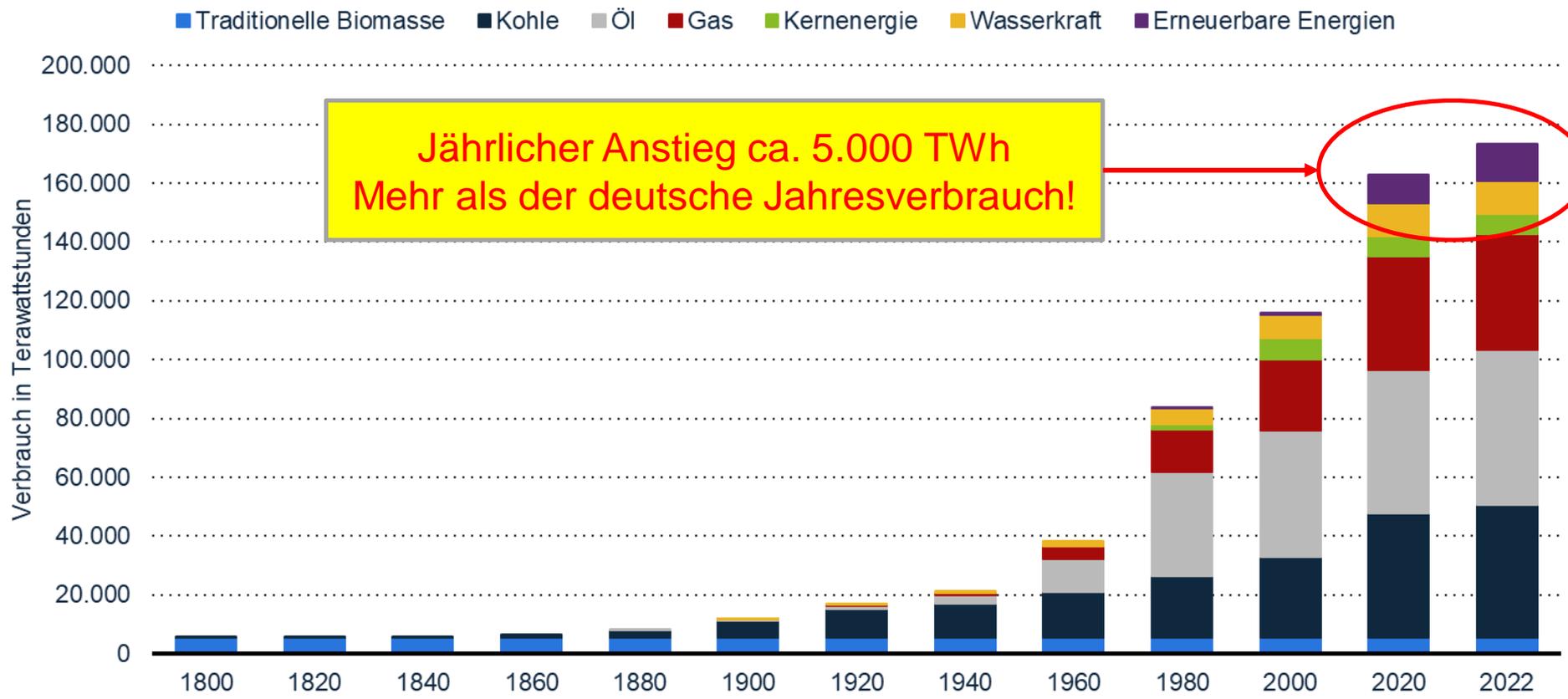
Primärenergiebedarf D.

Primärenergieverbrauch



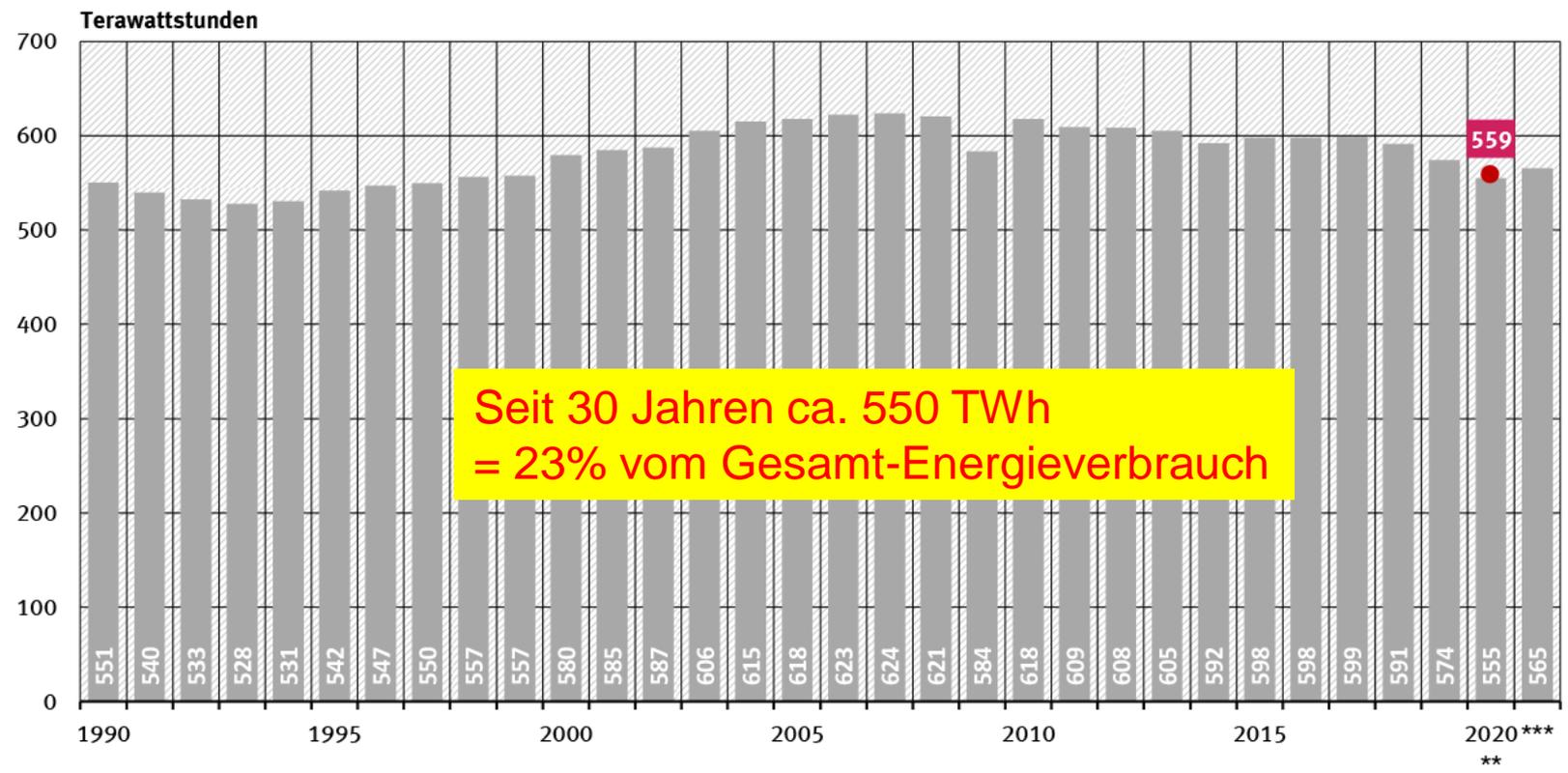
* vorläufig
 ** Ziele des Energiekonzeptes der Bundesregierung: Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2020 um 20% und bis 2050 um 50% (Basisjahr 2008)
 Ziel der Energieeffizienzstrategie 2050: Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2030 um 30% und bis 2050 um 50% (Basisjahr 2008)
 *** sonstige Energieträger: Grubengas, nicht-erneuerbare Abfälle und Abwärme sowie der Stromaustauschsaldo
 Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen: bis 2020: Auswertungstabellen, (Stand 09/2022); 2021: endgültige Energiebilanz 2021 (Stand 03 / 2023); 2022: Primärenergieverbrauch Jahr 2022 (Stand 03 / 2023)

Primärenergiebedarf Welt



Elektr. Energiebedarf in D

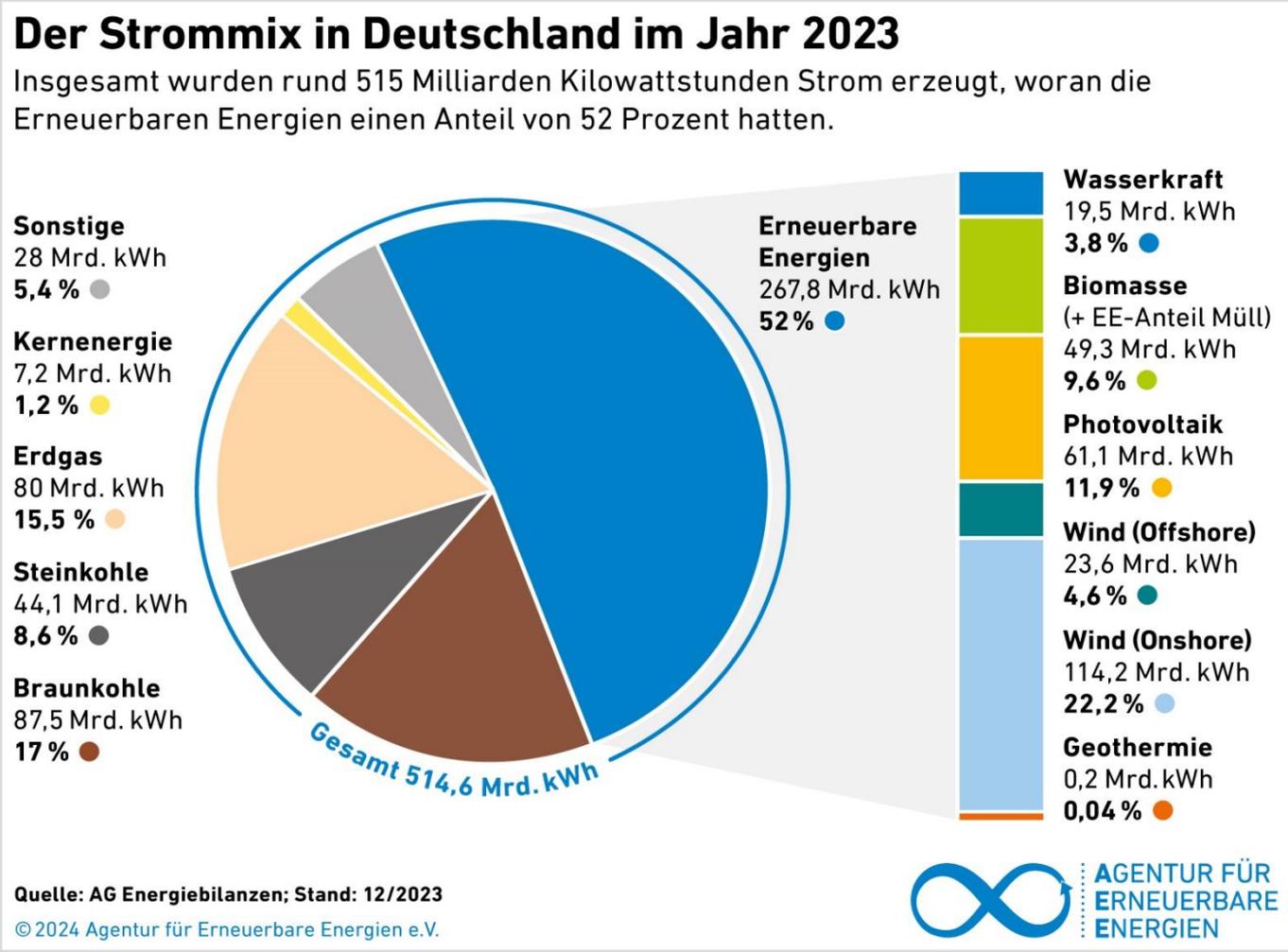
Bruttostromverbrauch*



* einschließlich Erzeugung aus Pumpspeicherkraftwerken, Netzverlusten, Eigenverbrauch, Stromerzeugung aus Pumpspeichern und Stromhandelsaldo
 ** Ziel 2020: Energiekonzept der Bundesregierung 2010: Senkung des Bruttostromverbrauchs um 10 % gegenüber 2008
 *** vorläufig

Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Tabelle Bruttostromerzeugung in Deutschland, Stand 12/2021

El. Energieeinspeisung D



El. Energieeinspeisung D

Aktuelle Zahlen 2023:

Gesamt-Endenergieverbrauch: 2.400 TWh

Erzeugung:

Wind Onshore: 114,2 TWh

Wind Offshore: 23,6 TWh

Photovoltaik: 61,1 TWh

Wind und Sonne insgesamt: 198,9 TWh

Bezogen auf den jährlichen Endenergieverbrauch Deutschlands sind das:

$198,9 \text{ TWh} / 2.400 \text{ TWh} = \mathbf{8,3 \%}$ (Wind und Sonne)

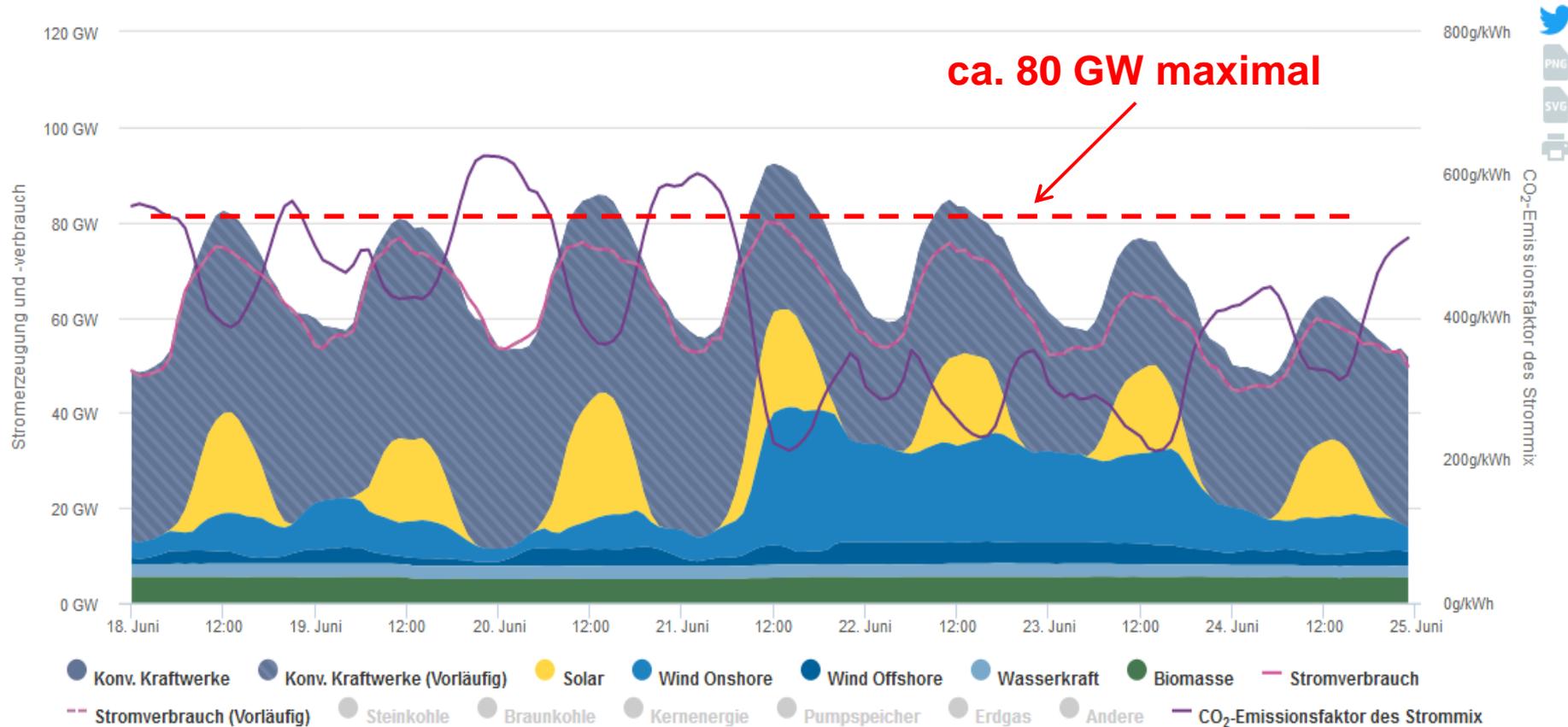
$267,8 \text{ TWh} / 2.400 \text{ TWh} = \mathbf{11,1 \%}$ (alle Regenerativen)

- Das Stromnetz kann keine Energie speichern, nur transportieren!
- Im Stromnetz muss immer ein Leistungs-Gleichgewicht herrschen!
→ Die Kraftwerke müssen sich ständig an den Bedarf anpassen



Lastgang Sommerwoche

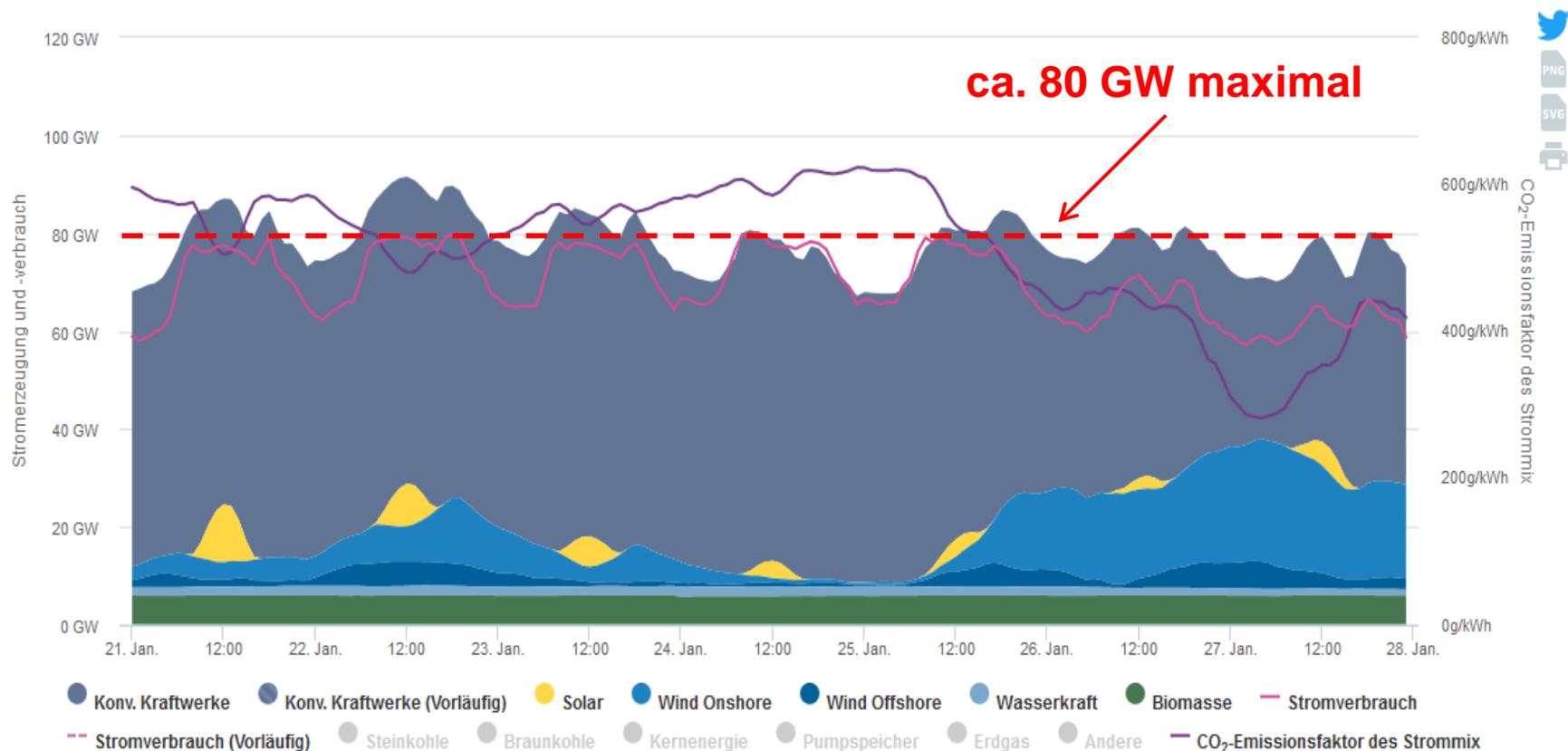
Stromerzeugung und Stromverbrauch



Agora Energiewende; Stand: 22.02.2019, 18:10

Lastgang Winterwoche

Stromerzeugung und Stromverbrauch



Agora Energiewende; Stand: 11.02.2019, 16:10

- **Jahresenergiebedarf Deutschland: 2.400 TWh**
- **Worst Case: Dunkelflaute 2 Wochen ohne Sonne und Wind**
- **Energiebedarf in dieser Zeit: $2.400 / 26 = 92$ TWh**
- **Technologien erforderlich im zweistelligen TWh-Bereich!**

- **Batteriespeicher**
- **Pumpspeicherwerke**
- **Power to Gas**

Batteriespeicher

Lithium-Ionen-Batterien:

- Hoher Materialaufwand (mind. 1 Feststoff-Atom pro gespeichertes Elektron)
- Hohe Umweltschäden bei Li-Abbau
- Hohe Kosten
- Hoher Energieaufwand bei Herstellung (1): bis zu 140 kg CO₂ pro kWh
Ziel 2030: 70 kg CO₂ pro kWh

Autobatterien als Energiespeicher?

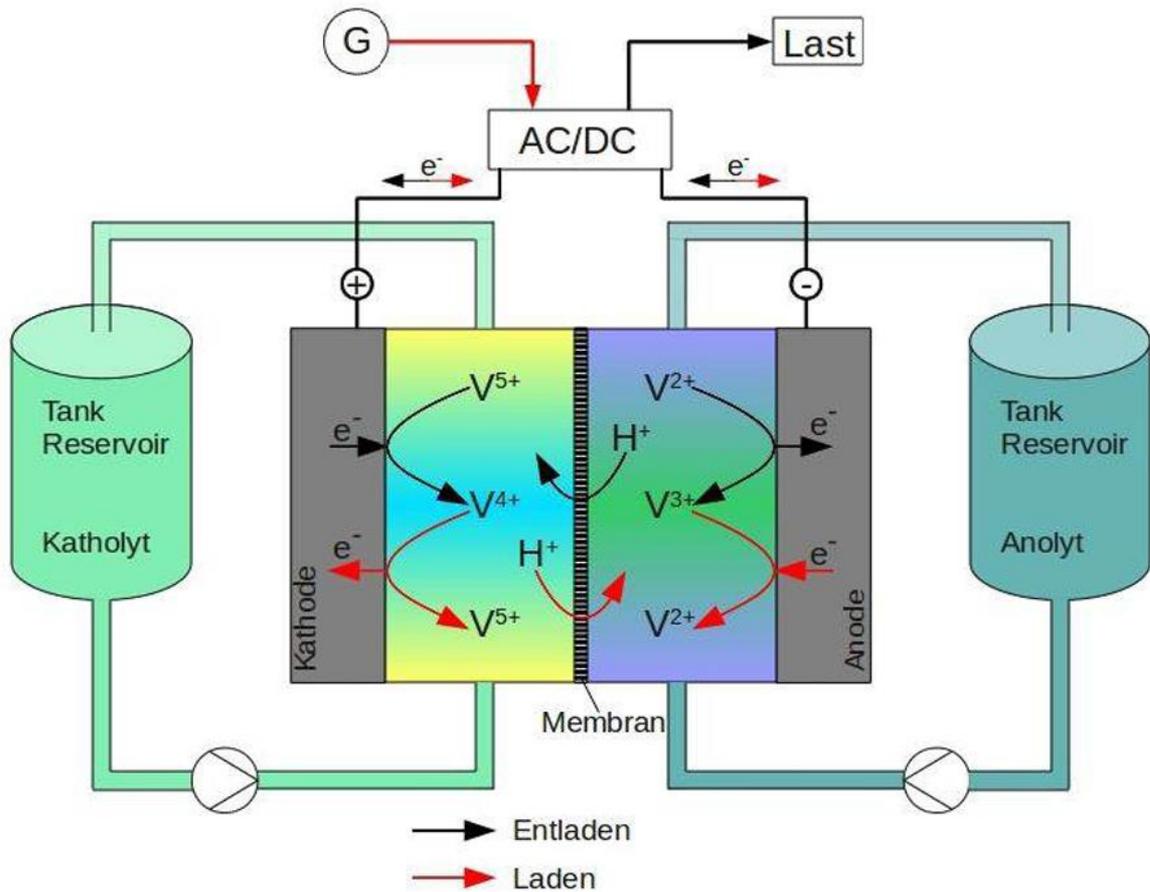
Ca. 50 kWh pro Personen-Kfz → 40 Mio x 50 kWh = **2 TWh (zu wenig!)**

(setzt außerdem voraus, dass alle Kfz zu Beginn der Dunkelflaute voll geladen sind und dann nicht mehr genutzt werden → unrealistisch)

Li-Ionen-Batterien sind als Massen-Energiespeicher ungeeignet!

(1) Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ von Agora Verkehrswende, 2019

Batteriespeicher



**Prinzip der
Redox-Flow-
Batterie**

**Energiespeicherung
in Flüssigkeiten,
Salzkavernen als
Tanks, große
Speicher möglich**

Quelle: Bundesregierung: <http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/Effizienz mit neuen Materialien steigern/>

Batteriespeicher

Redox-Flow-Batterien:

- Wirkungsgrad 80% DC-DC (gut !)
- Lebensdauer 10.000 Zyklen, keine Alterung durch Be- und Entladen (sehr gut !)
- Energiedichte: **30 kWh/Kubikmeter (schlecht !)**

(Erdgas ca. 10 kWh pro Normkubikmeter, bei 200 bar also **2.000 kWh/Kubikmeter**)

Die geringe Energiedichte erfordert sehr große Speichervolumina im Vergleich zum Gas.

Pumpspeicherwerke



PSW Goldisthal

Extrem hoher
Landschaftsverbrauch

Pumpspeicherwerke

Wirkungsgrad: 80% (Grid-to-Grid) (gut !)
Lebensdauer: Maschinenbau, E-Technik 40 a, Bauwerk 100 a (sehr gut!)
Installierte Speicher in D: **38 GWh** (1)

Pumpspeicher in Norwegen? Norwegen hat Wasserkraftwerke, aber kaum Pumpspeicherwerke.

Die Gesamtkapazität von Pumpspeicherwerken ist viel zu gering!

(1) <http://www.bayern-innovativ.de/cluster-energietechnik/energieumstieg/pumpspeicher.pdf>

Kavernen in Salzgestein können geschaffen werden (Ausspülen mit Wasser, Entsorgen der Sole notwendig, Umweltbelastung)

Speicherpotential in norddeutschen Salzstrukturen:

Befüllung mit Wasserstoff:

350 TWh (1)

Befüllung mit SNG (Synthetic Natural Gas):

1.100 TWh (2)

Aktuell bis zu 24 Mrd. Kubikmeter Erdgas gespeichert (3): 240 TWh

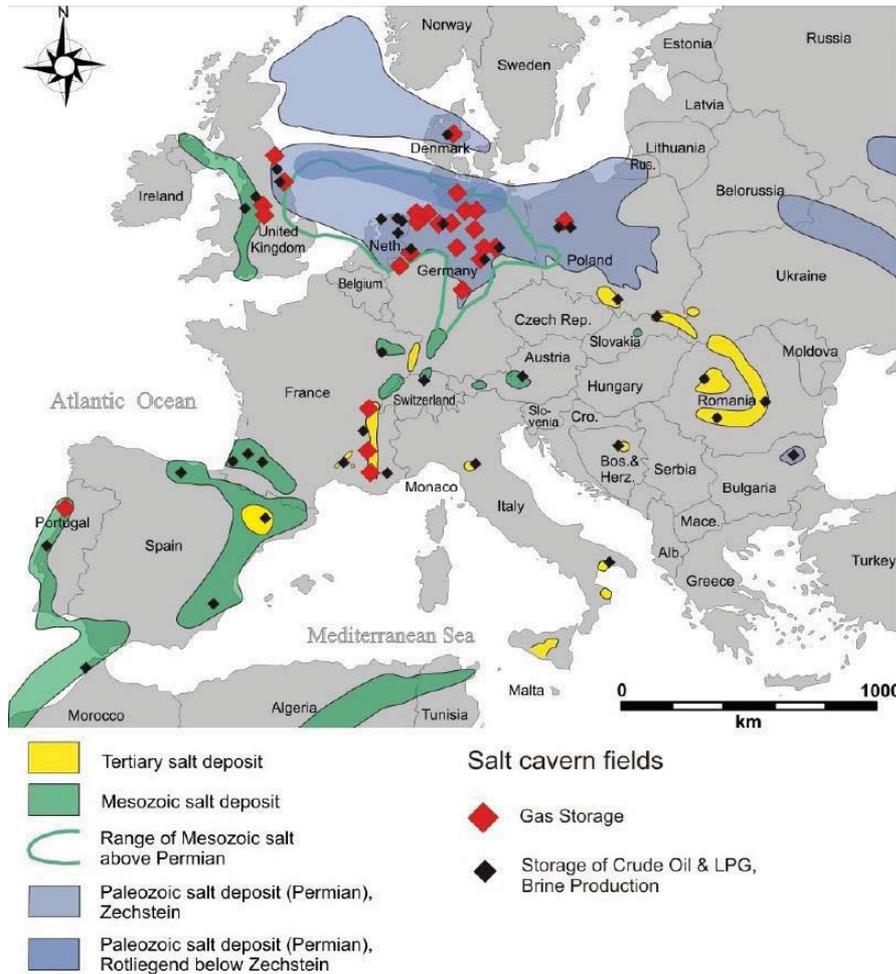
Die benötigten Energiemengen können in Form von Gas gespeichert werden (Wasserstoff oder Methan).

(1) <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/02/2016-02-16-hts-energiespeicher-salz.html>

(2) Ergibt sich aus dem mehr als 3 mal höheren Heizwert von Erdgas/SNG gegenüber Wasserstoff

(3) Angabe des Bundesverbandes Erdgas, Erdöl und Geoenergie BVEG

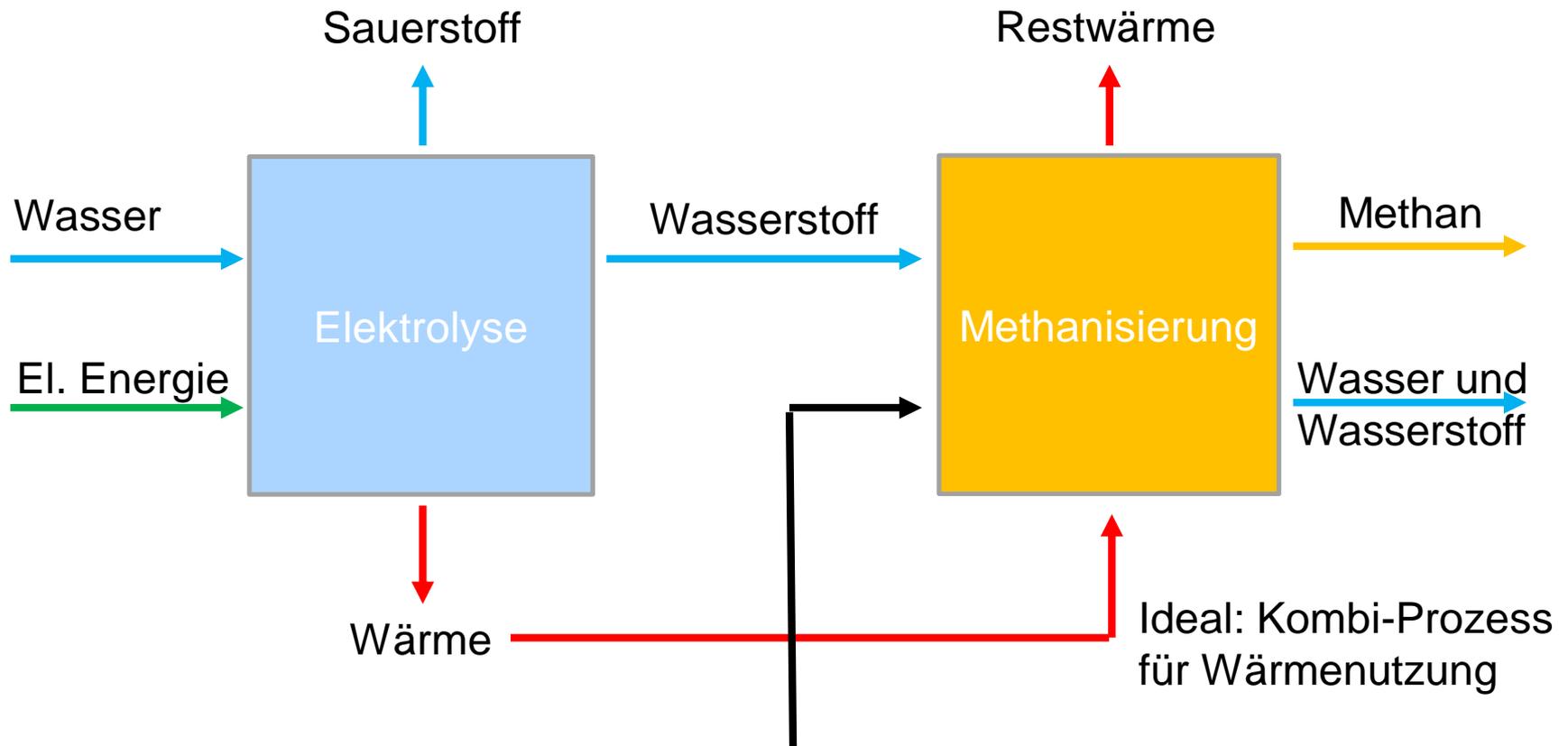
Gasspeicherung



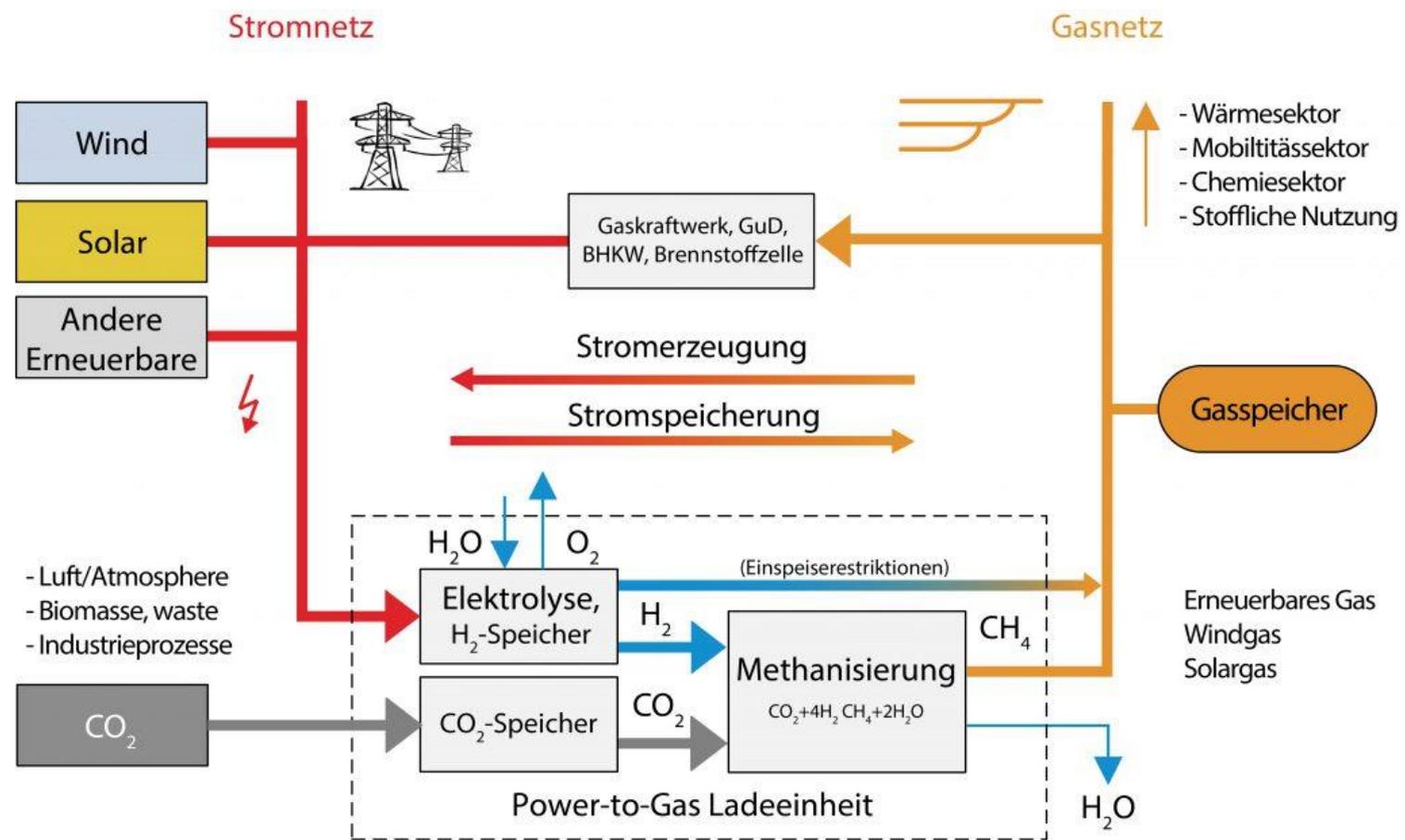
Salzvorkommen und Speicher

Quelle: Stromspeicherpotentiale für Deutschland, Studie des Zentrums für Energieforschung der Universität Stuttgart, 2012

Power to Gas: Physik

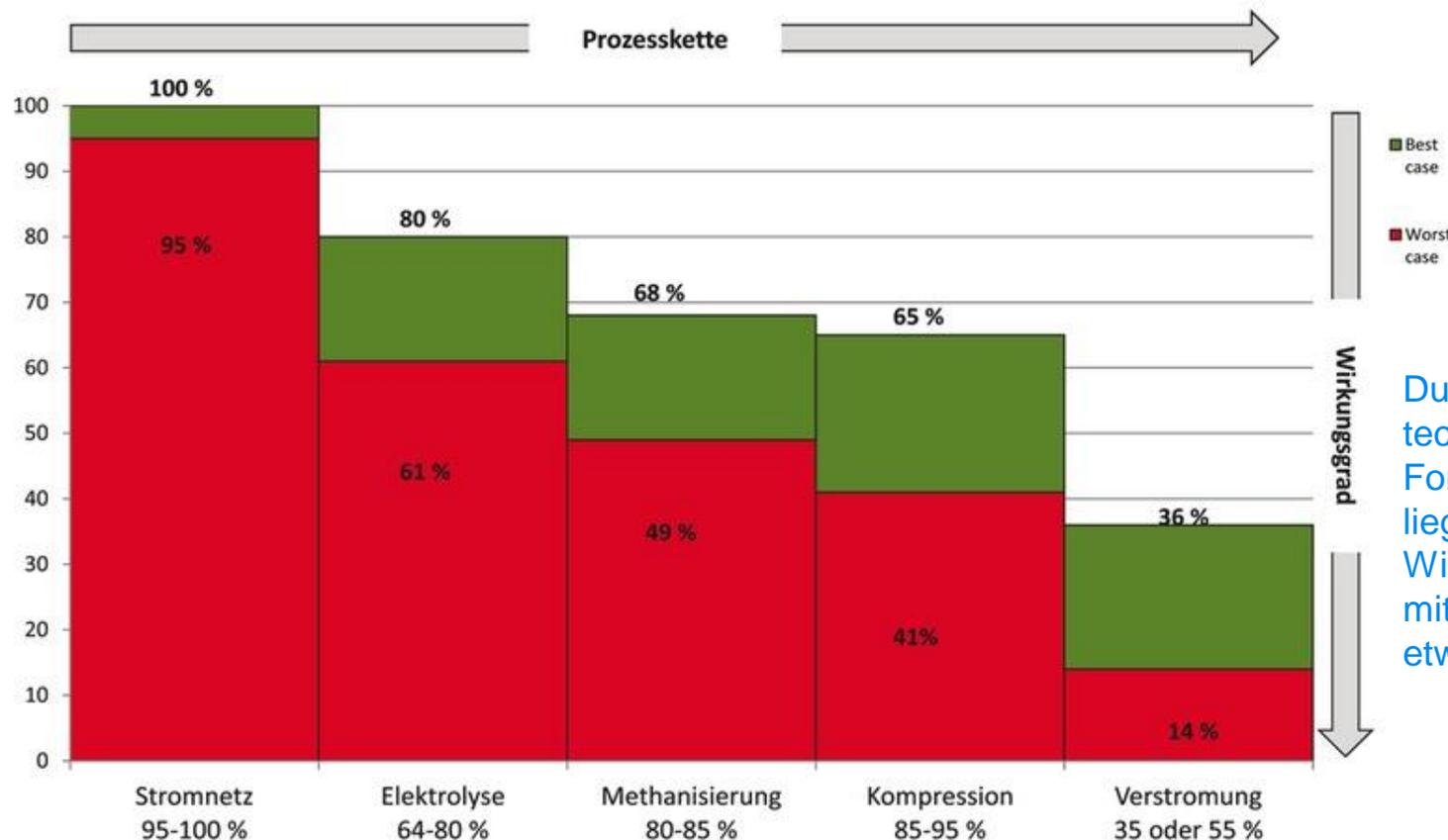


Power to Gas: Konzept



© FENES, OTH Regensburg 2017

Power to Gas: Wirkungsgrad

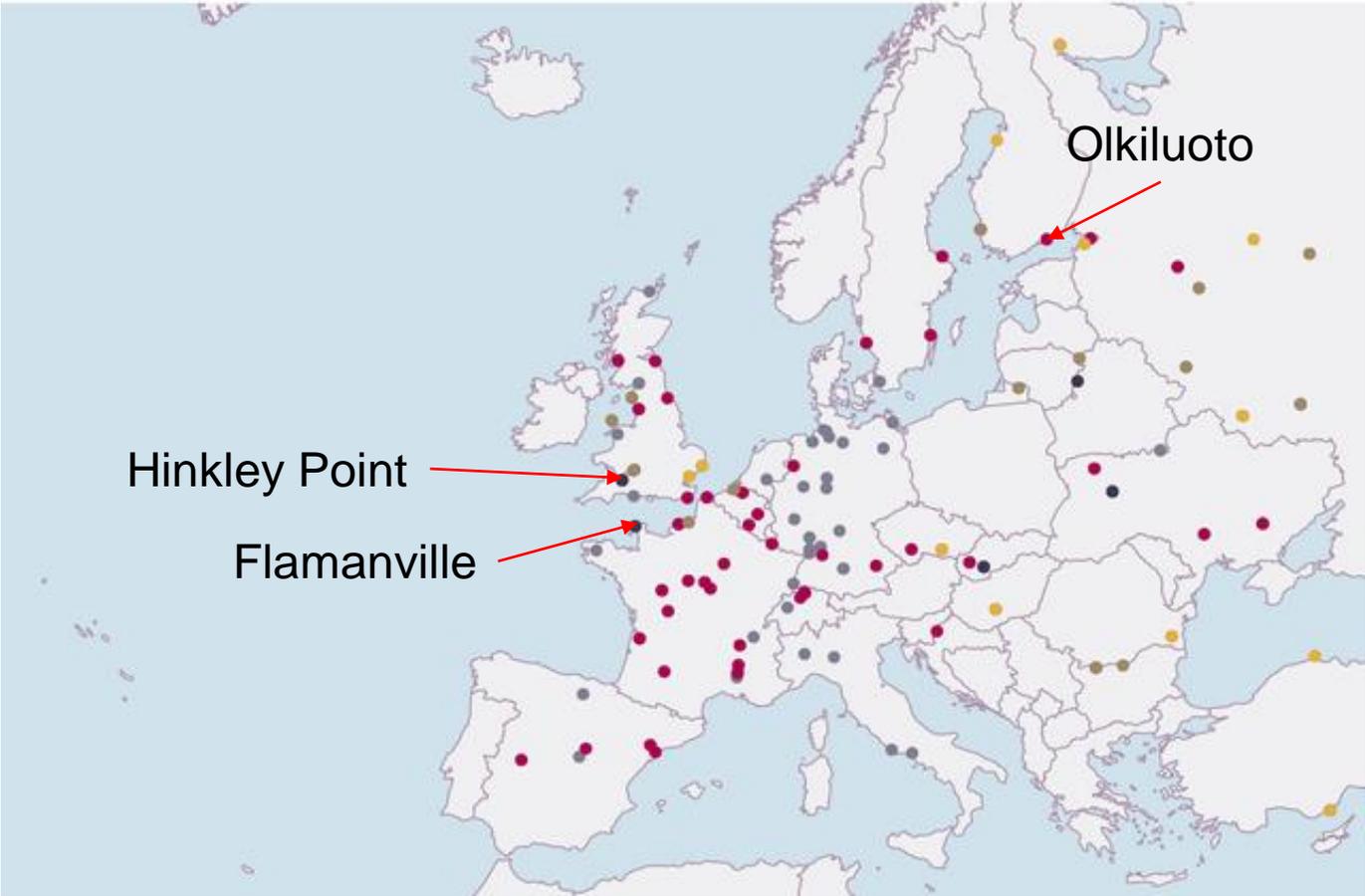


Durch technologische Fortschritte liegen diese Wirkungsgrade mittlerweile etwas höher.

Quelle: <http://www.et-energie-online.de/Zukunftsfragen/tabid/63/NewsId/305/Die-Speicherung-uberschussigen-EEStroms-durch-synthetisches-Methan.aspx>

Kernkraftwerke

● in Betrieb ● in Aussicht ● geplant ● in Bau ● stillgelegt Stand Anfang 2022



Kernkraftwerke Generation III

KKW Olkiluoto-3 (Finnland)

- Leistung: 1.600 MW
- Bauzeit: 17 Jahre (fertig)
- Preis: 3 Mrd. € (Siemens/Areva)
- Kosten: ca. 11 Mrd. €

KKW Flamanville (Frankreich)

- Leistung: 1.650 MW
- Bauzeit: 16 Jahre (im Bau)
- Kosten: ca. 12,7 Mrd. €

KKW Hinkley Point C (England)

- Leistung: 3.260 MW (2 Blöcke)
- Bauzeit: mind. 10 Jahre (im Bau)
- Kosten: mind. 28 Mrd. €

KKWs Südkorea (25 Blöcke)

- Leistung: jeweils ca. 1.000 MW
- Bauzeit: 5-7 Jahre
- Kosten: ca. 5 Mrd. € pro Block

Small Modular Reactors (SMR)

- Leistung: 300 MW
- Kosten: ca. 1 Mrd. € (geplant)

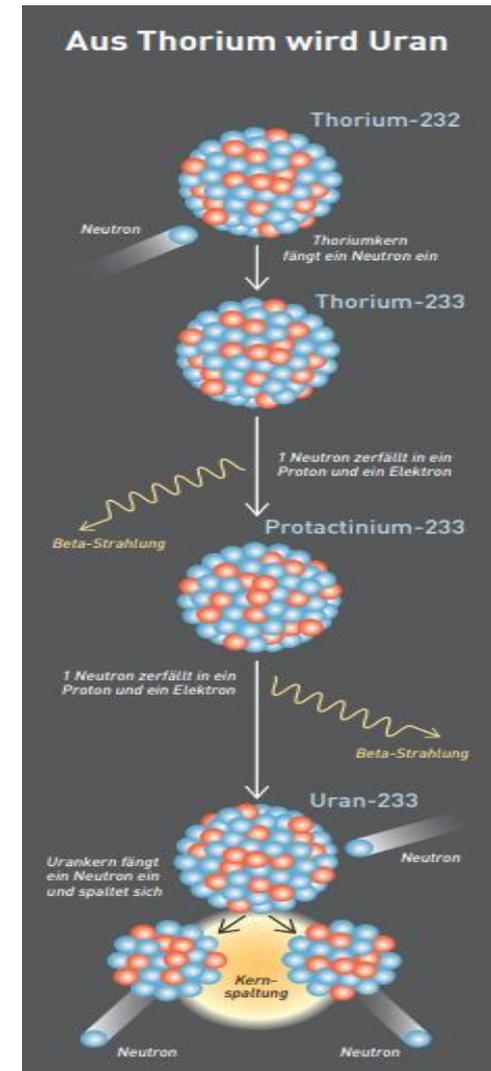
Windenergieanlagen onshore:

- Kosten/Leistung: 1 Mio. € / 1 MW
entspricht 1 Mrd. € pro 1.000 MW
- Betriebsstunden pro Jahr?

Kernkraftwerke Generation IV

Zielsetzung Generation IV (in Entwicklung):

- Minimieren des radioaktiven Abfalls
- Atommüll mit geringeren Halbwertszeiten
- Möglichst Verwendung alter Uran-Brennstäbe
- Kernschmelzen physikalisch unmöglich machen
- Kein waffenfähiges Plutonium als Nebenprodukt



Kernkraftwerke Generation IV

Kein Überdruck,
 Temperatur 500-1.000 Grad

Brennstoff ist in Salz gelöst,
 Kühlmittel und Medium für
 Spaltung zugleich, je
 heißer, desto weniger
 Reaktion

Kein Kontakt mit Wasser,
 keine Ex-Gefahr durch H

Schmelzsicherung für
 Notfall

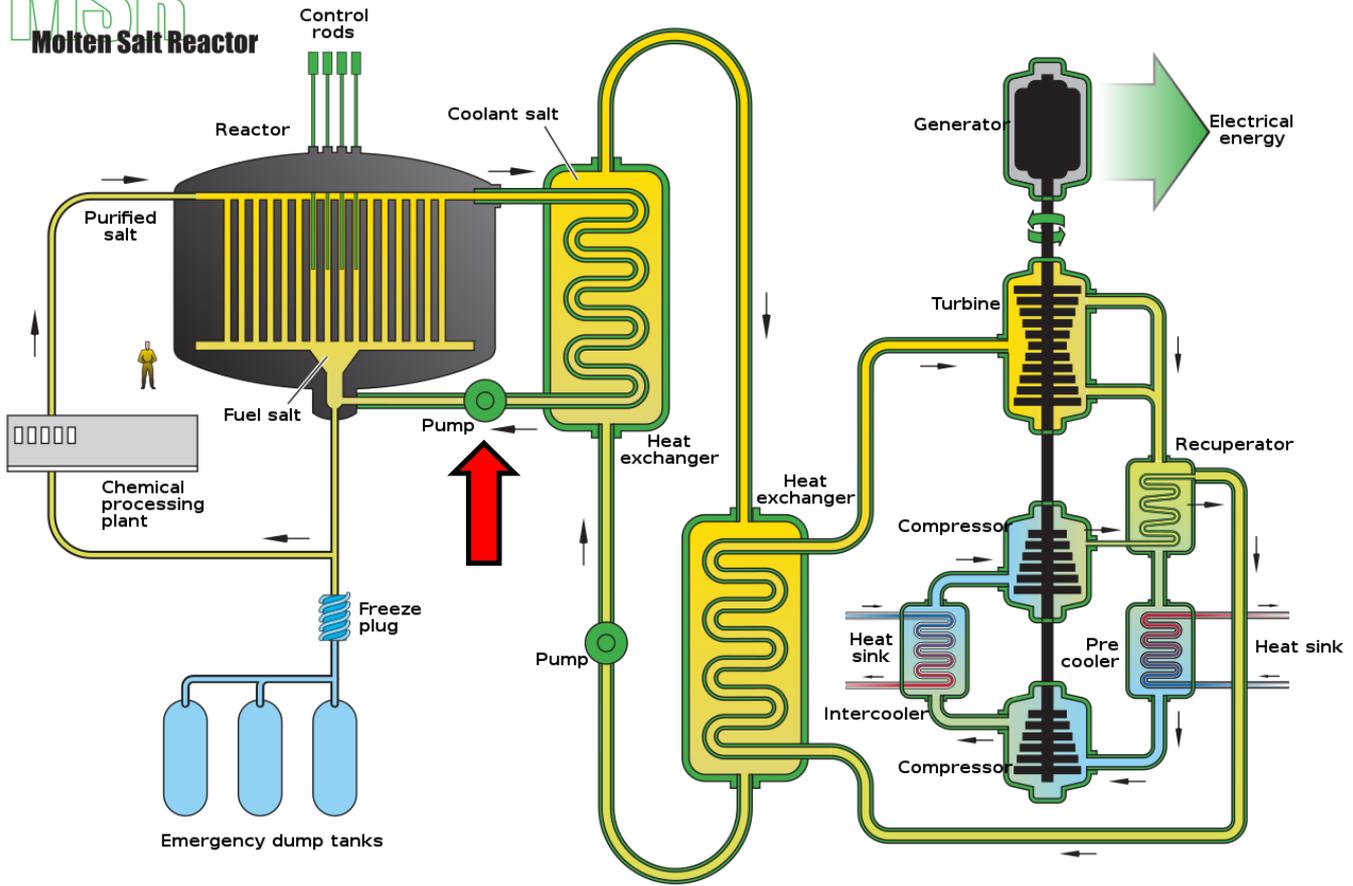
Müll-Halbwertszeit < 200 J.

Kein Plutonium

Keine Kernschmelze

Korrosionsprobleme,
 komplexer Prozess

MSR
 Molten Salt Reactor



Copenhagen Atomics:

- Ein MSR in einem 40 ft Container
- 100 MWth, 560 Grad Celsius
- Salzpumpe ist produktreif
- Erster Testaufbau in der Schweiz hat begonnen
- Größere Stückzahlen vor 2030

Elektromobilität

Verkehrssektor:

- Gesamt-Energiebedarf pro Jahr aktuell ca. 750 TWh
- Davon 1/3 LKW > 2,8 t

- Wirkungsgrad Verbrennungsmotor: ca. 20%
- Wirkungsgrad Batterie + Elektromotor: 80-90%
- Wirkungsgrad Power-to-Gas + Gas- oder Elektromotor: unter 50%

Batterie + Elektromotor haben den höchsten Wirkungsgrad. Aber:

- Deutschland wird sich NIE selbst komplett mit regenerativer Energie versorgen können.
- Energie wird immer in großem Umfang importiert werden müssen.
- Energieimporte sind sinnvoll nur in Form von Gas (H₂ oder Methan) möglich.
- **Wenn die Energie gasförmig vorliegt, warum soll man dieses Gas dann erst wieder verstromen, um die Energie über nicht vorhandene Leitungen zu Ladestationen zu transportieren? Besser: Gasmotoren!**

Verbrauchsverhältnis kWh Privathaushalt Gas/Strom: Faktor 4

Verbrauchsverhältnis im Winter mindestens Faktor 8

Wirkungsgrad Luft-Wärmepumpe im Winter: 250%

Wirkungsgrad Gas-Brennwerttherme: 100%

Mit einer Wärmepumpe erhöht sich im Winter die elektrische Leistungsaufnahme auf 420%

Sämtliche Stromleitungen müssen auf die 4-fache Leitungskapazität ausgelegt werden → ALLES MUSS ERNEUERT WERDEN

Und dann kommen noch die Wallboxen für Elektro-Autos...

Import von LNG

LNG:

Berücksichtigt man die Methanemissionen bei der Gasförderung, den Energieaufwand für Verflüssigung (Kühlung), Transport und Rückvergasung (Erwärmung) sowie den Wirkungsgrad von Gaskraftwerken, dann ist die Stromerzeugung aus LNG schlechter fürs Klima als die Stromerzeugung mit Kohlekraftwerken.

- **Solarzellen-Ausbau massiv vorantreiben**
- **Windenergie-Ausbau umweltverträglich und ökonomisch sinnvoll**
- **Ausbau von Energiespeicher-Kavernen (Gas)**
- **Mobilität mit Wasserstoff- oder Gasmotoren statt Batterieautos**
- **Bestehende Kohlekraftwerke pflegen und optimieren**
- **Energiewende global denken: Solarkraftwerke in der Sahara usw.**
- **Kernkraft neu denken**
- **Auf Kernfusion hoffen (wird aber nichts vor Ende des Jahrhunderts)**

Ende

Vielen Dank für's Zuhören