

# Probleme der Energiewende

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

**25.02.2022**

- **Grundlagen**
- **Betrachtungen zum Energieverbrauch**
- **Betrachtungen zur Leistung**
- **Energiespeicher**
- **Elektromobilität**
- **Vorschläge**

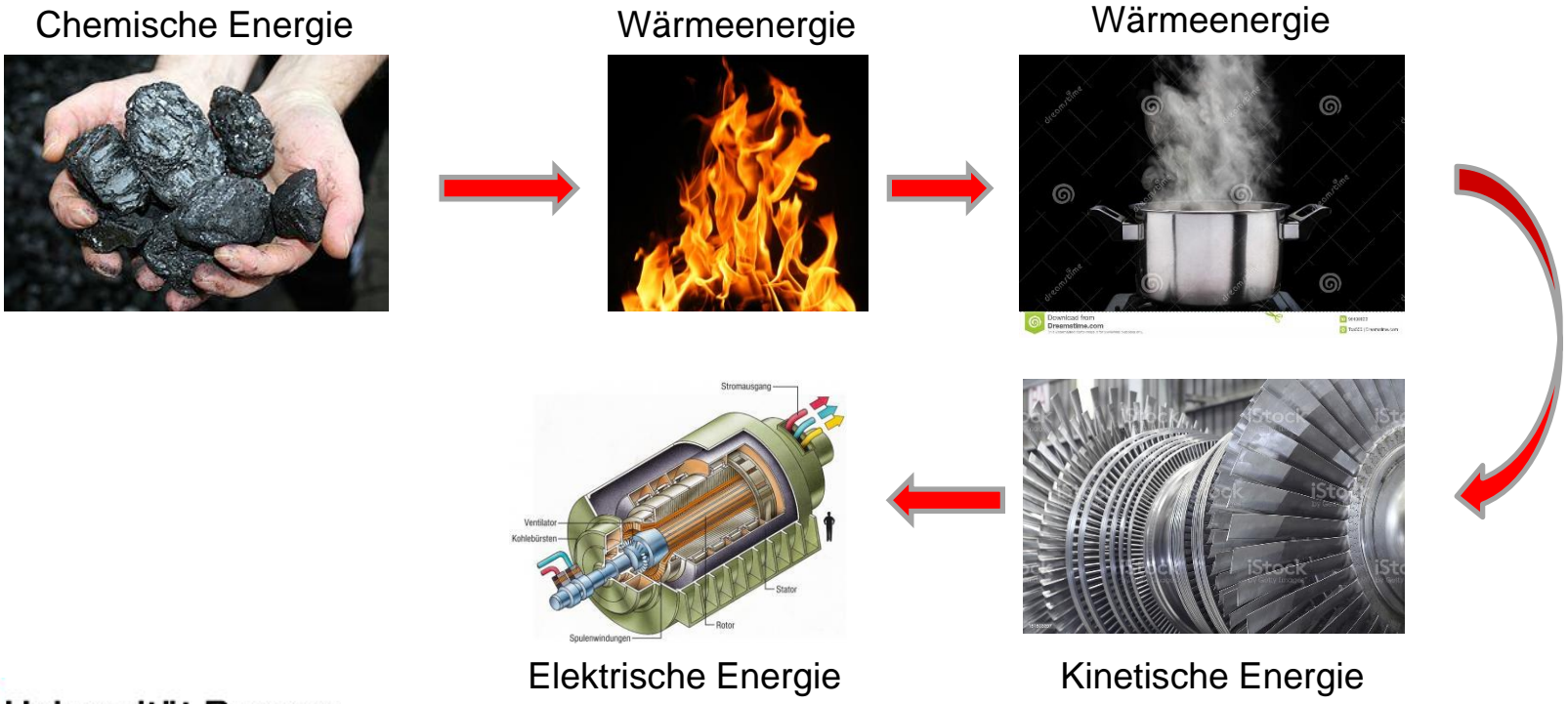
- **Es gibt einen Klimawandel.**
- **Die menschlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen tragen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit wesentlich dazu bei.**
- **Die Verbrennung fossiler Energieträger ist auf Dauer keine Lösung für die Energieversorgung der Menschheit.**

# Was ist Energie?

- **Szenario: Ein Körper mit einer Masse von 1 kg wird um 1 m angehoben**
- Die dazu notwendige Kraft ist das Produkt aus Masse und Erdbeschleunigung:  $F = m * g = 1 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$
- Die verrichtete Arbeit ist das Produkt aus Kraft und Weg:  $E = F * 1 \text{ m} = 9,81 \text{ kg m}^2 / \text{s}^2 = 9,81 \text{ Joule} = 9,81 \text{ Wattsekunden}$
- Aufgrund der Lageerhöhung erhöht sich die potentielle Energie des Körpers. Diese Energieerhöhung ist gleich der verrichteten Arbeit.
- **Unabhängig von der Maschine, mit der die Arbeit verrichtet wird, bleiben Arbeit und Energie immer konstant!**

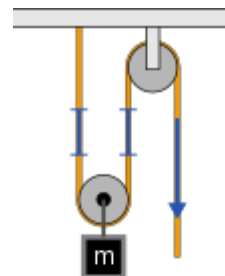
# Energieerhaltung

- **Energie = Arbeit** (Einheit z.B. kWh, MWh, GWh, TWh)
- **Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet, sondern nur umgewandelt werden! Beispiel Kohlekraftwerk:**



# Leistung und Energie

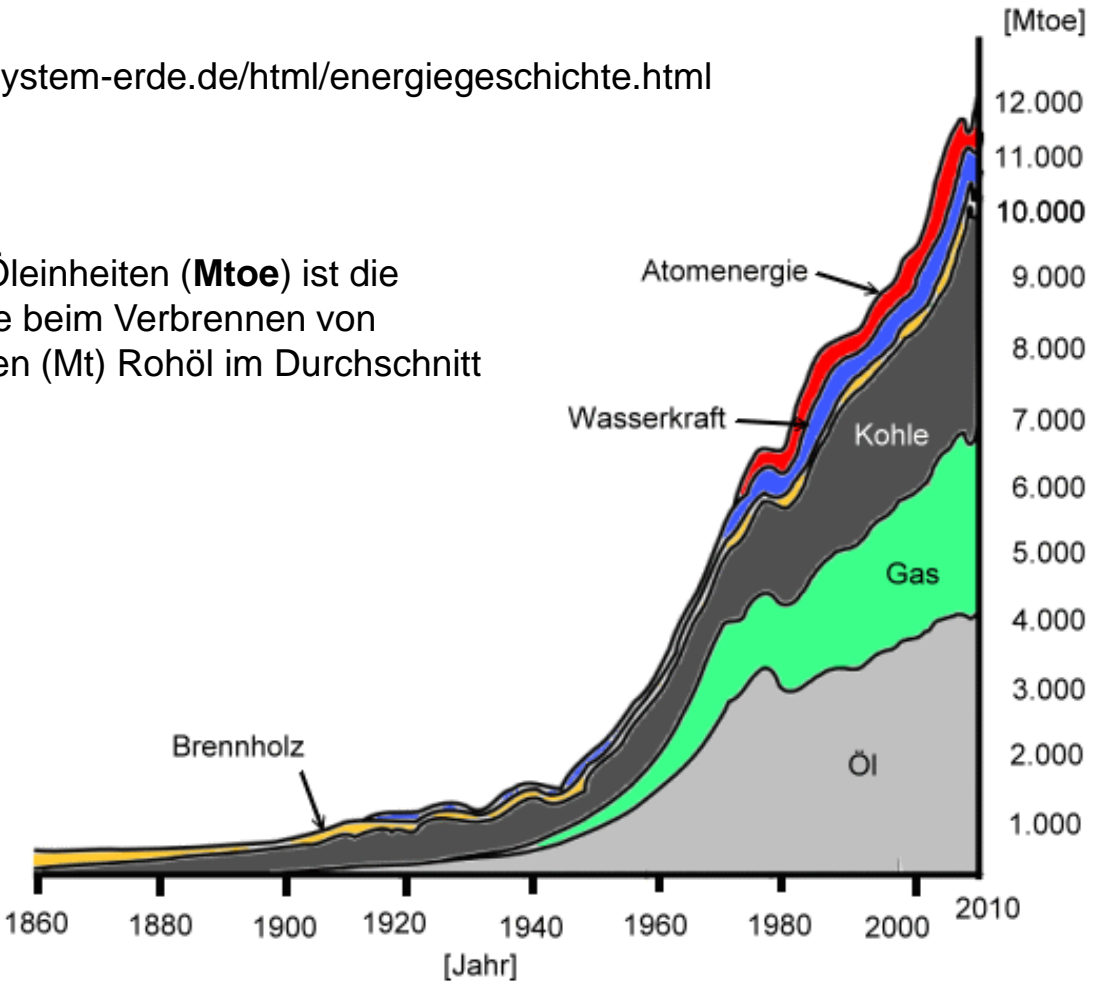
- **Energie = Arbeit** (Einheit z.B. kWh, MWh, GWh, TWh)
- **Leistung = Arbeit / Zeit** (Einheit z.B. kW, MW, GW, TW)
- Der Körper kann doppelt so schnell angehoben werden → doppelte Leistung, aber **die Arbeit bleibt gleich.**
- Der Körper kann mit einem Flaschenzug angehoben werden. Die Kraft halbiert sich, der Weg verdoppelt sich → **die Arbeit bleibt gleich.**



# Primärenergiebedarf Welt

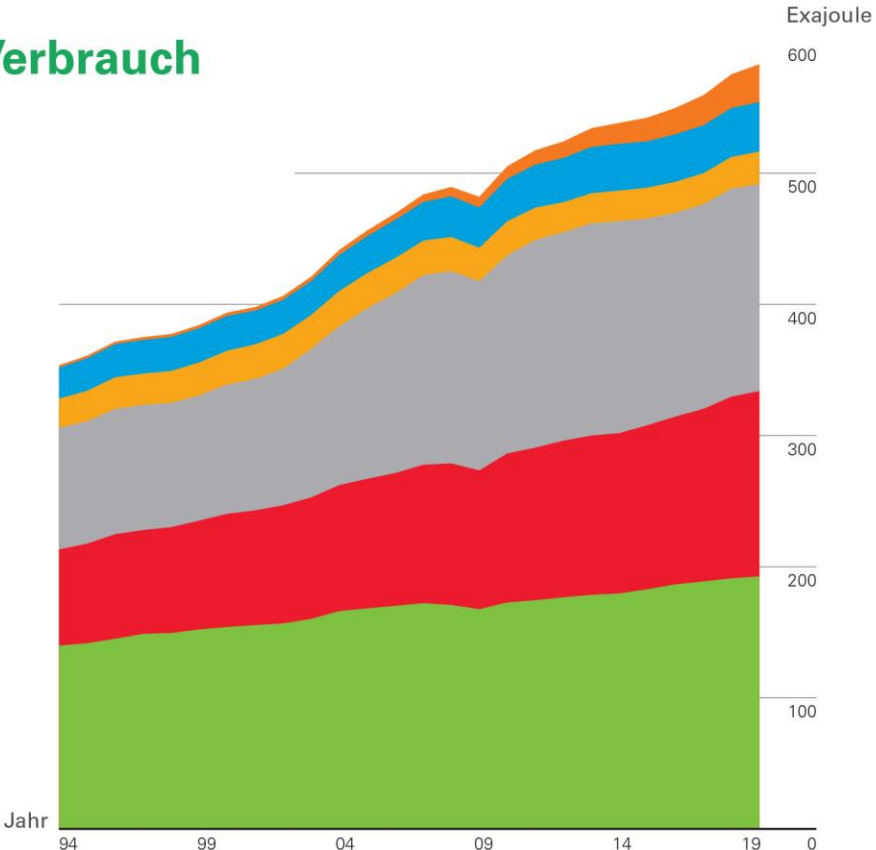
<https://www.oekosystem-erde.de/html/energiegeschichte.html>

Eine Megatonne Öleinheiten (**Mtoe**) ist die Energiemenge, die beim Verbrennen von einer Million Tonnen (Mt) Rohöl im Durchschnitt gewonnen wird



# Primärenergiebedarf Welt

## Weltweiter Verbrauch



Ca. 600 Exajoule =  
 166.667 TWh

Davon Deutschland:  
 Ca. 12 Exajoule = 2%

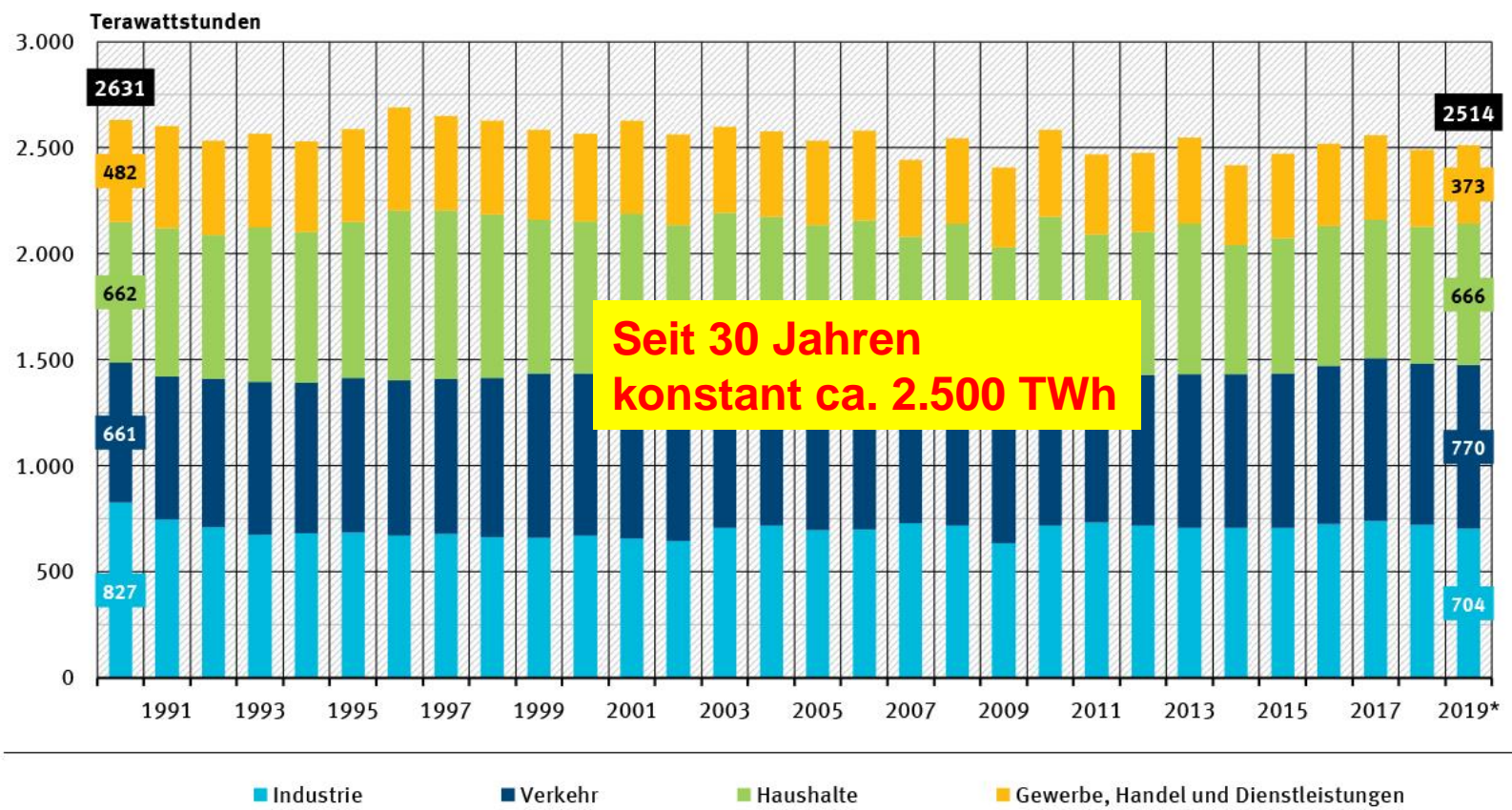
- Erneuerbare Energien
- Wasserkraft
- Kernenergie
- Kohle
- Gas
- Öl

bp Statistical Review of World Energy 2020



# Endenergiebedarf gesamt in D

Endenergieverbrauch nach Sektoren

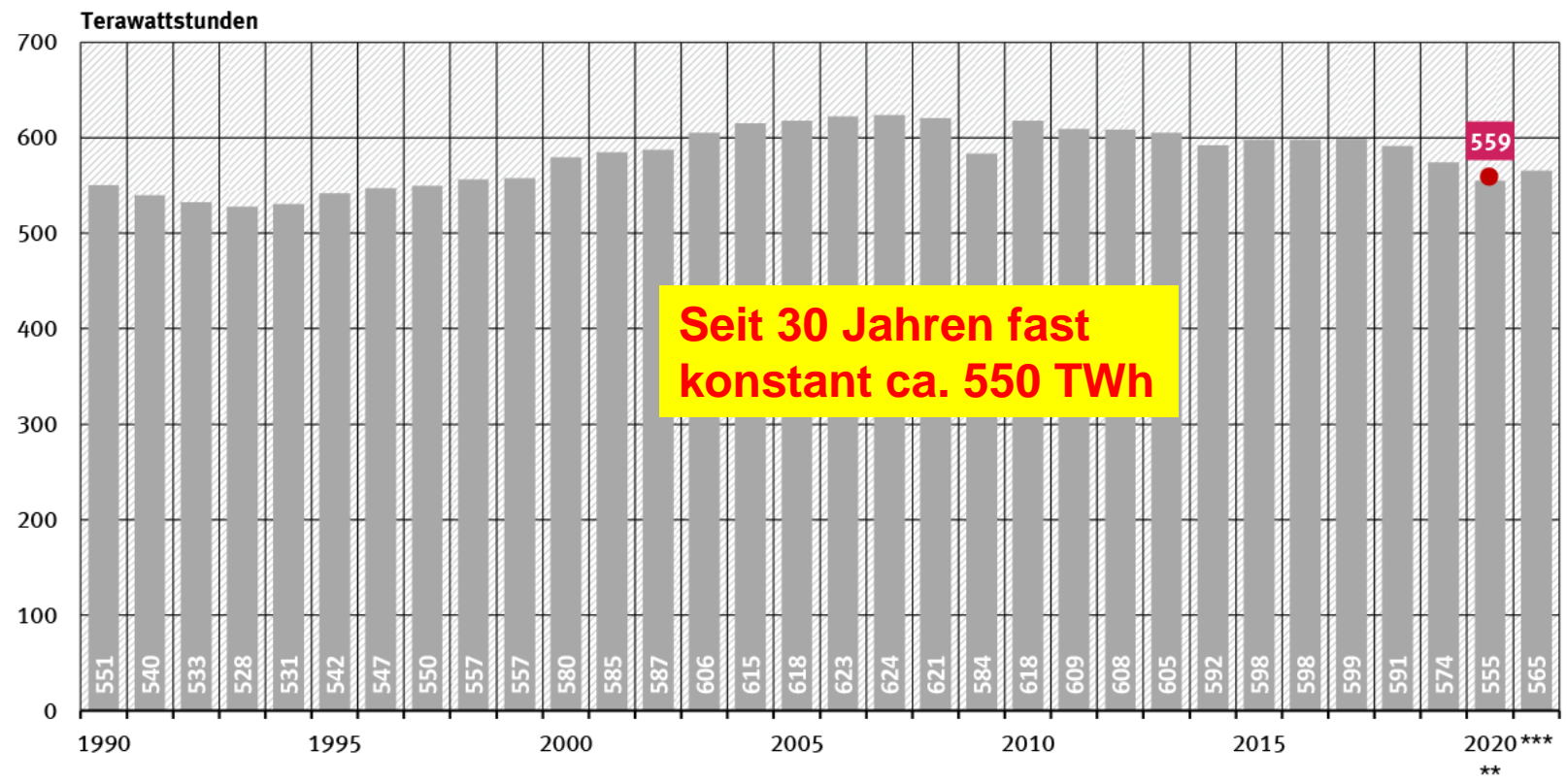


\* vorläufige Angaben

Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2019, Stand 09/2020

# Elektr. Energiebedarf in D

## Bruttostromverbrauch\*



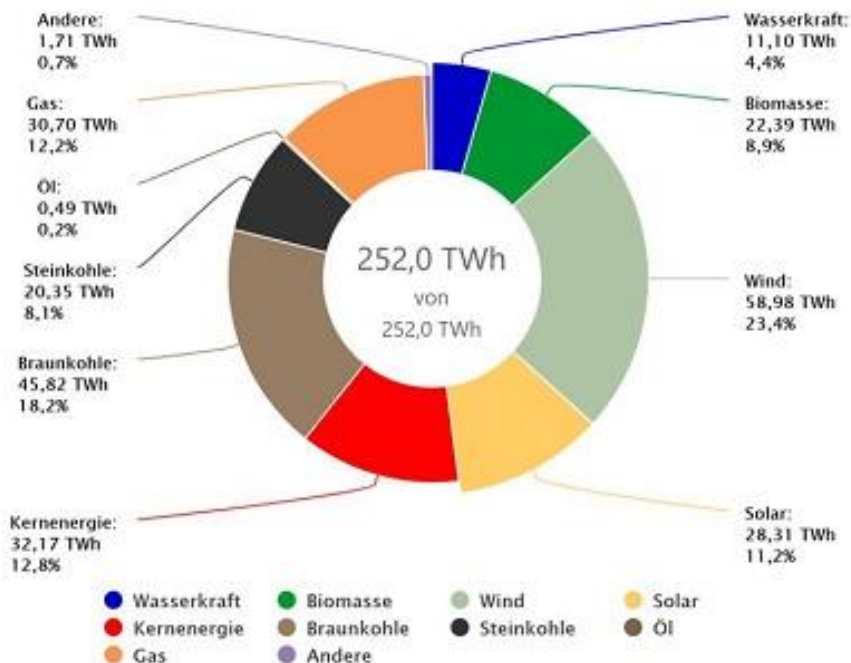
**Seit 30 Jahren fast konstant ca. 550 TWh**

\* 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

## Nettostromerzeugung zur öffentlichen Stromversorgung Erstes Halbjahr 2021

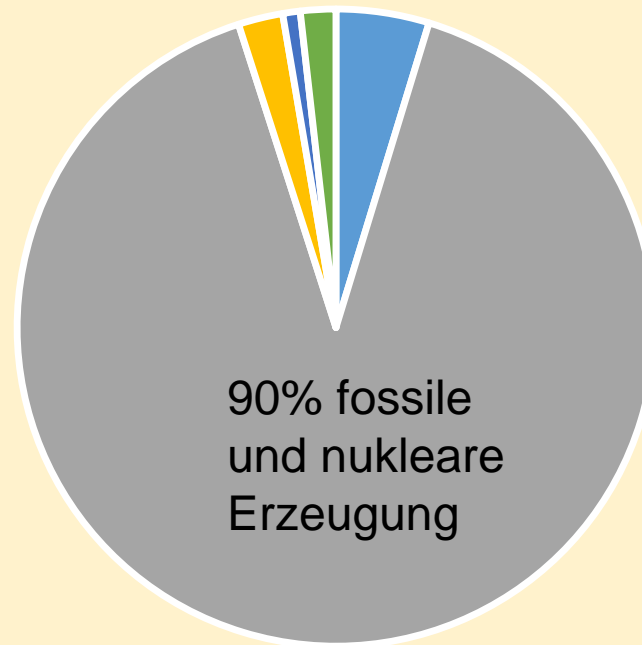
© Fraunhofer ISE/Bruno Burger



Nur ins Stromnetz wird regenerative Energie eingespeist, d.h. diese Grafik enthält die gesamte regenerative Energieerzeugung in Deutschland im 1. Halbjahr 2021.

# Zwischenfazit Energie

Energieerzeugung in Deutschland 2021

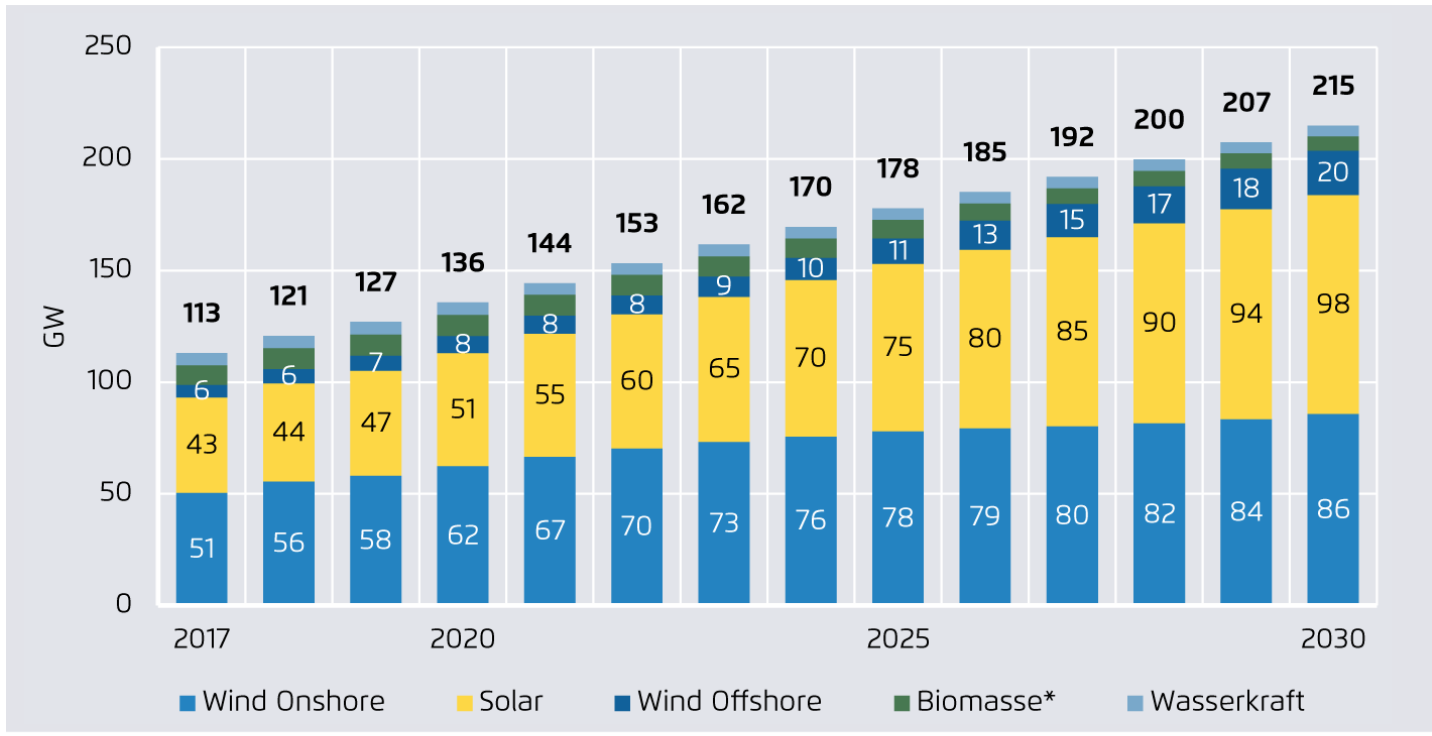


■ Wind ■ Nuklear + Fossil ■ Solar ■ Wasserkraft ■ Biomasse

# Ausbauziele des BMWK

Entwicklung der installierten Leistung der Erneuerbaren Energien auf Basis des vorgeschlagenen Ausbaupfades bis 2030

Abbildung 4



\*inkl. biogenem Hausmüll und Sonstige  
 Eigene Berechnungen auf Basis Öko-Institut (2017)

<https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/stromnetze-fuer-65-prozent-erneuerbare-bis-2030/>

# Ausbauziele BMWK bis 2030

- Die Stromerzeugung soll 2030 zu 65% aus regenerativen Energiequellen stammen. (1) (aktuell ca. 50%)
- Offshore Windenergie von 7,75 GW auf 20 GW installierte Leistung (1)
- Onshore Windenergie von 54,4 GW auf 71 GW installierte Leistung (1)
- Solarenergie von 55 GW auf 98 GW installierte Leistung (2)
- Wachstumspotential Biogas 50 - 100 TWh (3)

(1) <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>, Januar 2022

(2) lt. Ausbauszenario von Agora Energiewende, Vergleichsrechnungen decken sich mit BMWK-Zahlen

(3) Lt. Fachverband Biogas, FAZ vom 20.02.22, sehr positive Annahme

# Ausbauziele BMWK bis 2030

Angewandte Grundrechenarten:

- Wind Onshore von 103,7 TWh im Jahr 2020 (1) auf 135,3 TWh in 2030
- Wind Offshore von 27,3 TWh im Jahr 2020 (1) auf 70,5 TWh in 2030
- Solarenergie von 56,6 TWh im Jahr 2021 (2) auf 100,9 TWh in 2030
- Biomasse/Biogas von 44,8 TWh im Jahr 2021 (2) auf 144,8 TWh in 2030
- Wasserkraft bleibt konstant bei ca. 11,1 TWh (2)

**Entspricht einer Steigerung der regenerativen Energieerzeugung von derzeit 242 TWh pro Jahr auf 462 TWh pro Jahr im günstigsten Fall. Es fehlen weitere**

**2.038 TWh**

(1) <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>, Januar 2022

(2) lt. Fraunhofer ISE / Bruno Burger

- 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



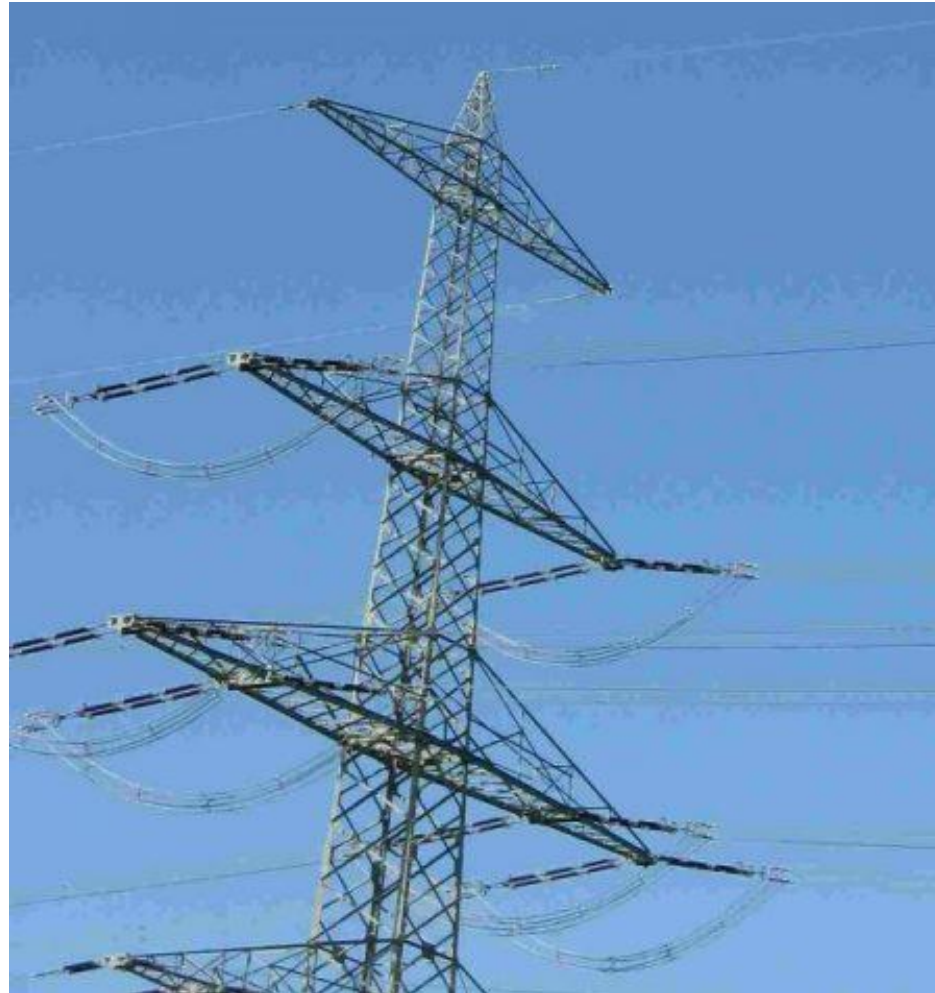


# Stromnetz Deutschland



Man sieht nur die Übertragungsleitungen und die großen Kraftwerksstandorte

# Stromnetz Deutschland



Übertragungs-  
leitung, zu  
erkennen an  
den 3 Isolatoren  
in Reihe

# Energie → Leistung

1 TWh = 1.000 GWh = 1.000.000 MWh = 1.000.000.000 kWh

Durchschnittliche Gesamt-Leistungsaufnahme von Deutschland:

2.500 TWh / 8.760 h = 0,285 TW  
= 285 GW  
= 285.000 MW  
= 285 Mio. kW

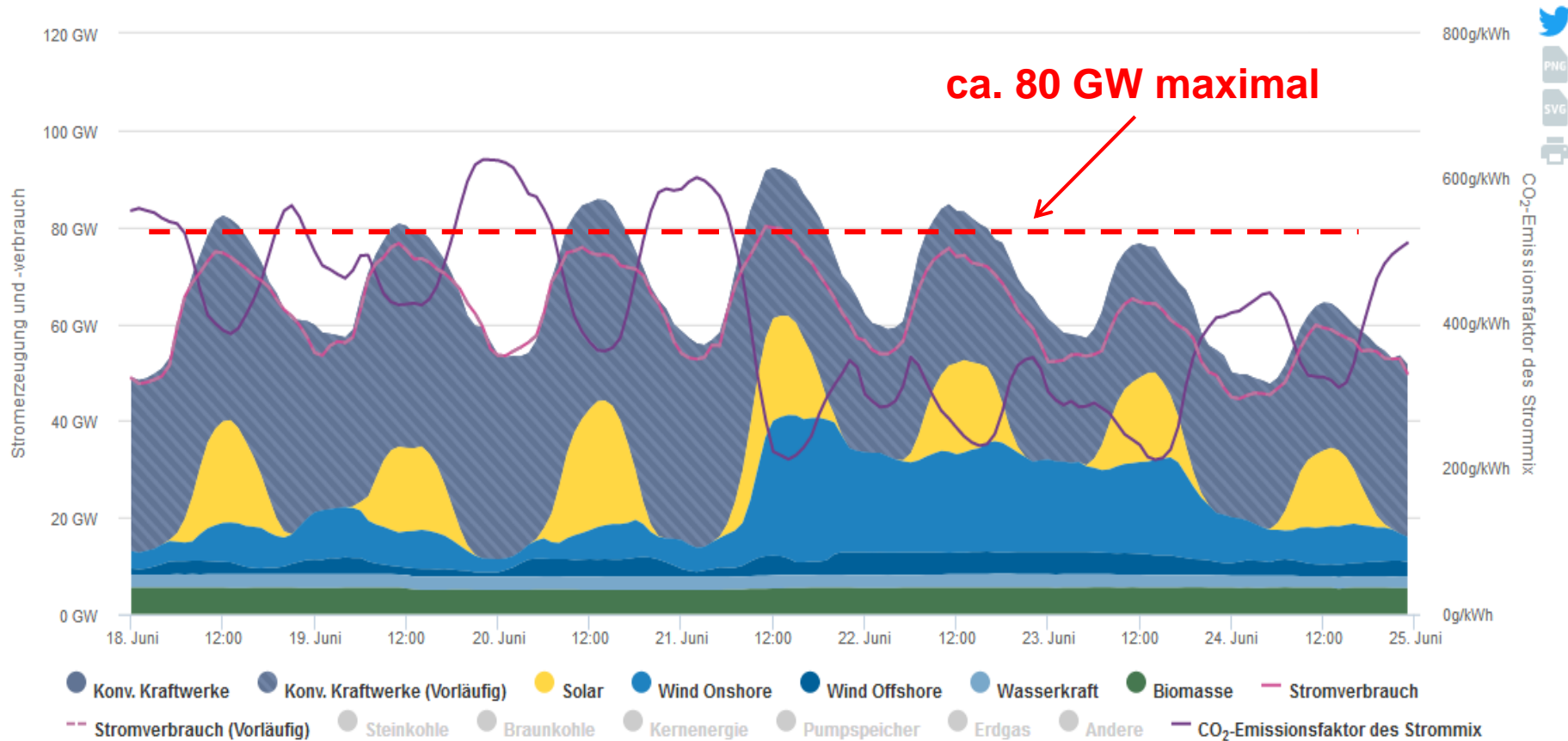
Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme von Deutschland:

500 TWh / 8.760 h = **57 GW** = 57 Mio. kW

1 kW – Leistung eines Zimmer-Heizlüfters  
5 MW – Leistung einer großen Windturbine  
1 GW – Leistung eines großen Kraftwerks (1 Block)

# Lastgang Sommerwoche

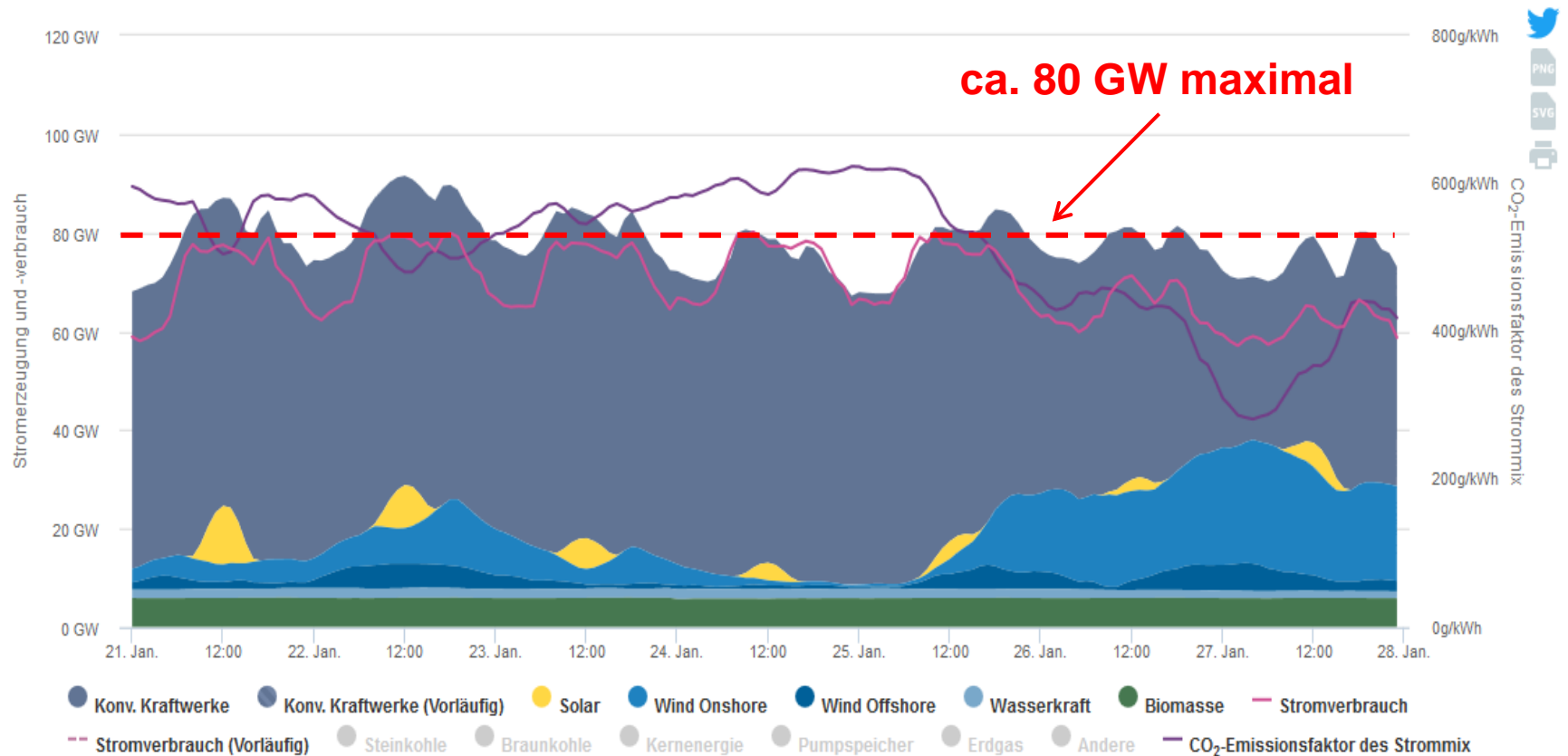
## Stromerzeugung und Stromverbrauch



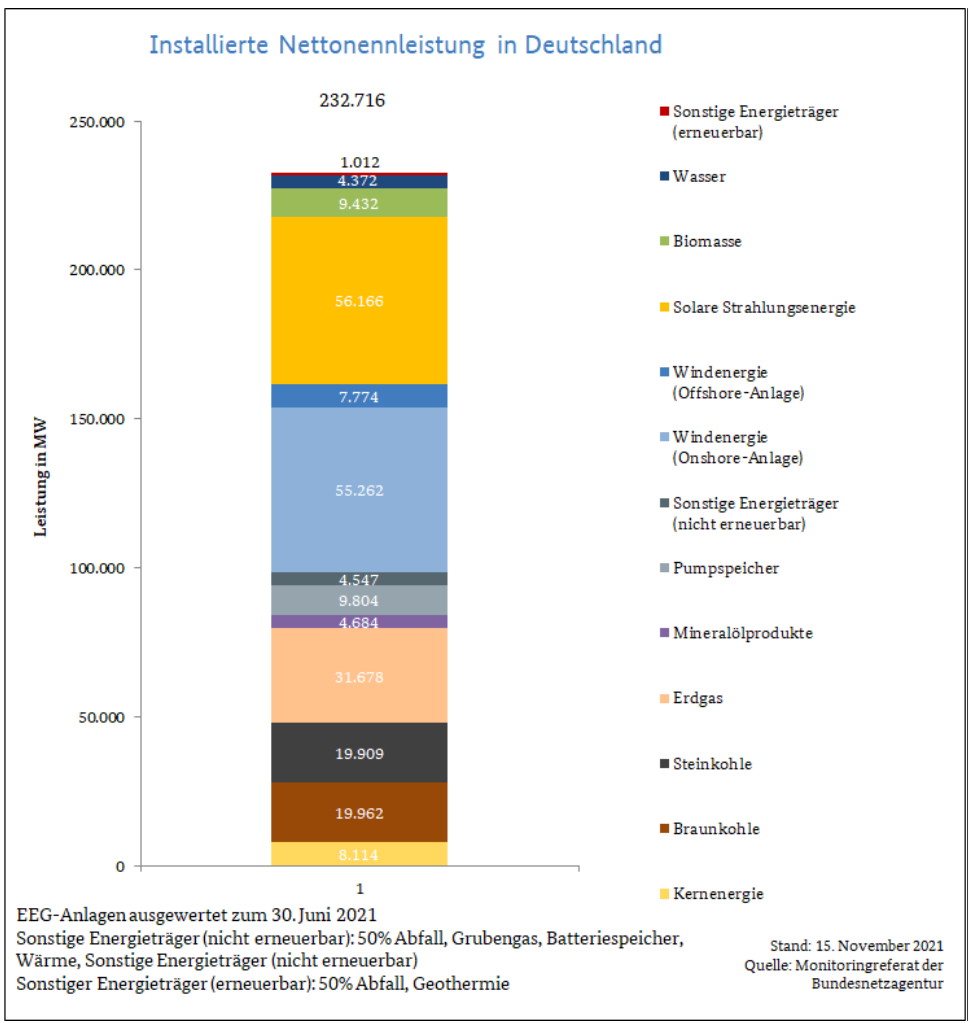
Agora Energiewende; Stand: 22.02.2019, 18:10

# Lastgang Winterwoche

## Stromerzeugung und Stromverbrauch



# Installierte Leistung in D



Sichere Erzeugung in Zukunft (ohne Kohle, Kernkraft, Öl):

- Erdgas: 31,7 GW
- Biomasse: 9,4 GW
- Wasser: 4,4 GW
- Sonstige: 1,0 GW

**Summe: 46,5 GW**

**Bedarf: 80 GW**

**Notwendiger Zubau:  
 mindestens 80  
 Gaskraftwerke je  
 400 MW (Putin???)**

- **Jahresenergiebedarf Deutschland: 2.500 TWh**
- **Worst Case: Dunkelflaute 2 Wochen ohne Sonne und Wind**
- **Energiebedarf in dieser Zeit:  $2.500 / 26 = 96$  TWh**
- **Technologien erforderlich im zweistelligen TWh-Bereich!**

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



# Batteriespeicher

Batterieexperte:

In der Batterieforschung gab es in den vergangenen 150 Jahren praktisch keinen Fortschritt. Erst in jüngster Zeit hat uns die Entwicklung von Lithiumionen-Batterien ein Stück nach vorne gebracht. Doch damit ist die Technologie jetzt nahezu ausgereizt. Es gibt physikalische Grenzen. Bei einer Batterie wird für jedes Elektron, das man speichern will, mindestens ein weiteres ganzes Atom zur Speicherung benötigt. Das macht Batterien zwangsläufig schwer und sehr ineffizient. Lithium ist bereits das leichteste Metall, das es im Periodensystem der Elemente gibt. Es hat dort die Ordnungszahl drei – nach Wasserstoff und Helium. Besser als die heutigen Lithiumionen-Batterien wird man also kaum noch werden können. **Ein paar technische Verbesserungen sind zwar noch drin, aber die machen die Batterien maximal noch um einen Faktor zwei leistungsfähiger. Dann ist das Ende der Fahnenstange erreicht.**

# Batteriespeicher

## Lithium-Ionen-Batterien:

- Hoher Materialaufwand (mind. 1 Atom pro gespeichertes Elektron)
- Hohe Umweltschäden bei Li-Abbau
- Hohe Kosten
- Hoher Energieaufwand bei Herstellung: bis zu 150 kg CO<sub>2</sub> pro kWh

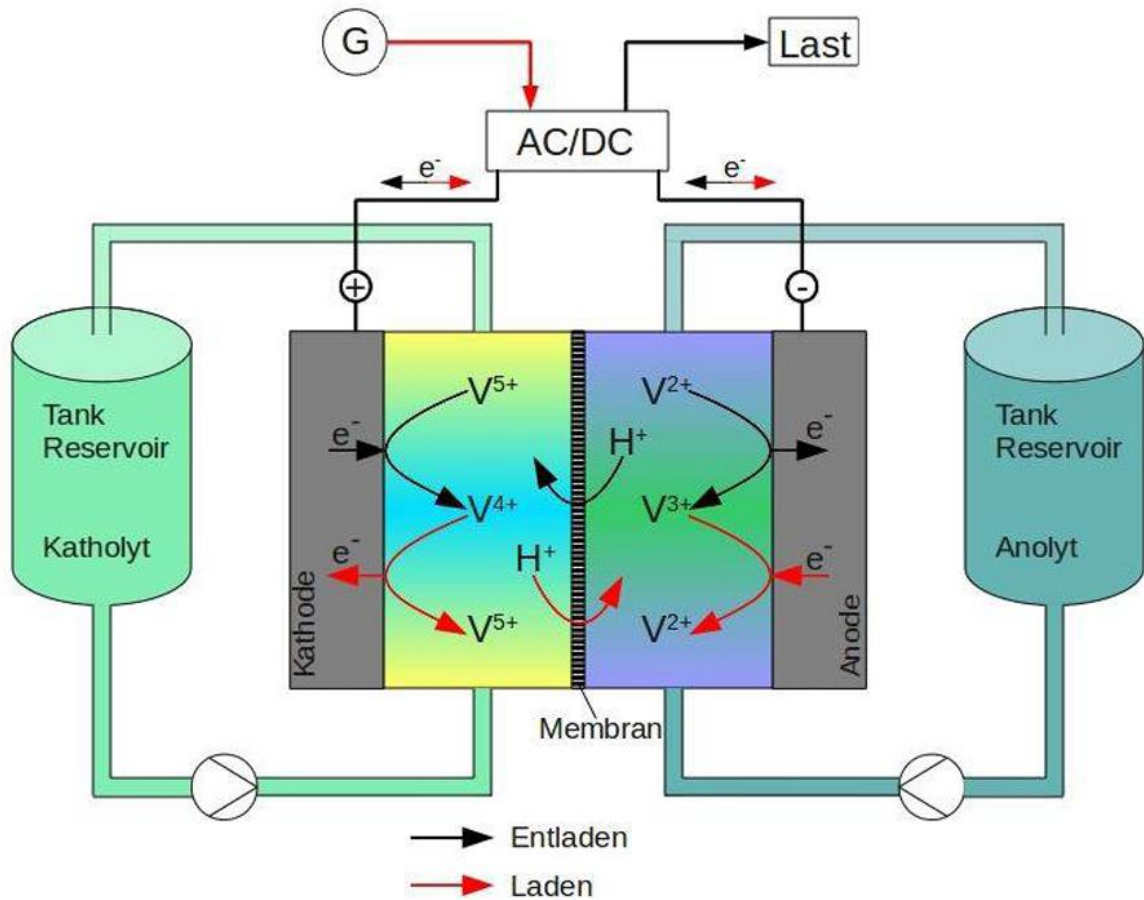
## Autobatterien als Energiespeicher?

Ca. 40 kWh pro Personen-Kfz → 40 Mio x 40 kWh = **1,6 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!**

# 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/](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**)

**Aufgrund der geringen Energiedichte wäre die Energiespeicherung in anderen Energieträgern viel sinnvoller!**

# Pumpspeicherwerke



# 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)

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

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

**Die Gesamtkapazität von Pumpspeicherwerken ist viel zu gering!**

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

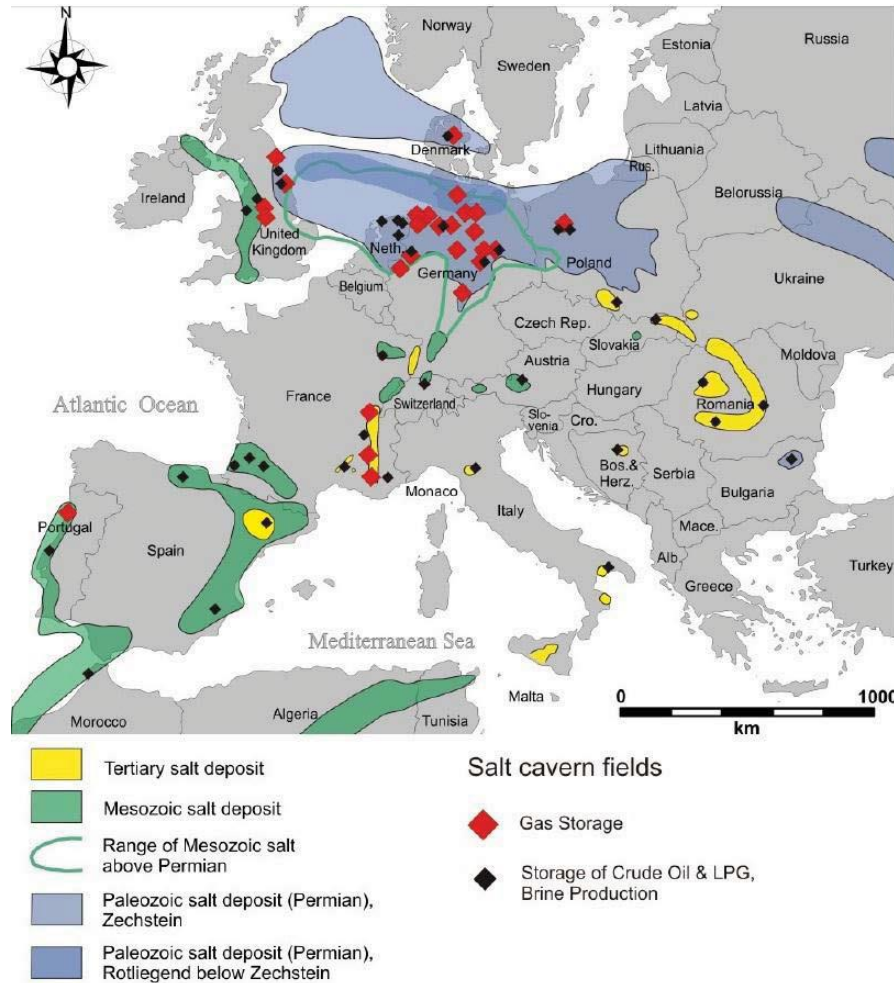
(1) <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/02/2016-02-16-hts-energiespeicher-salz.html>

(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

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

# Gasspeicherung

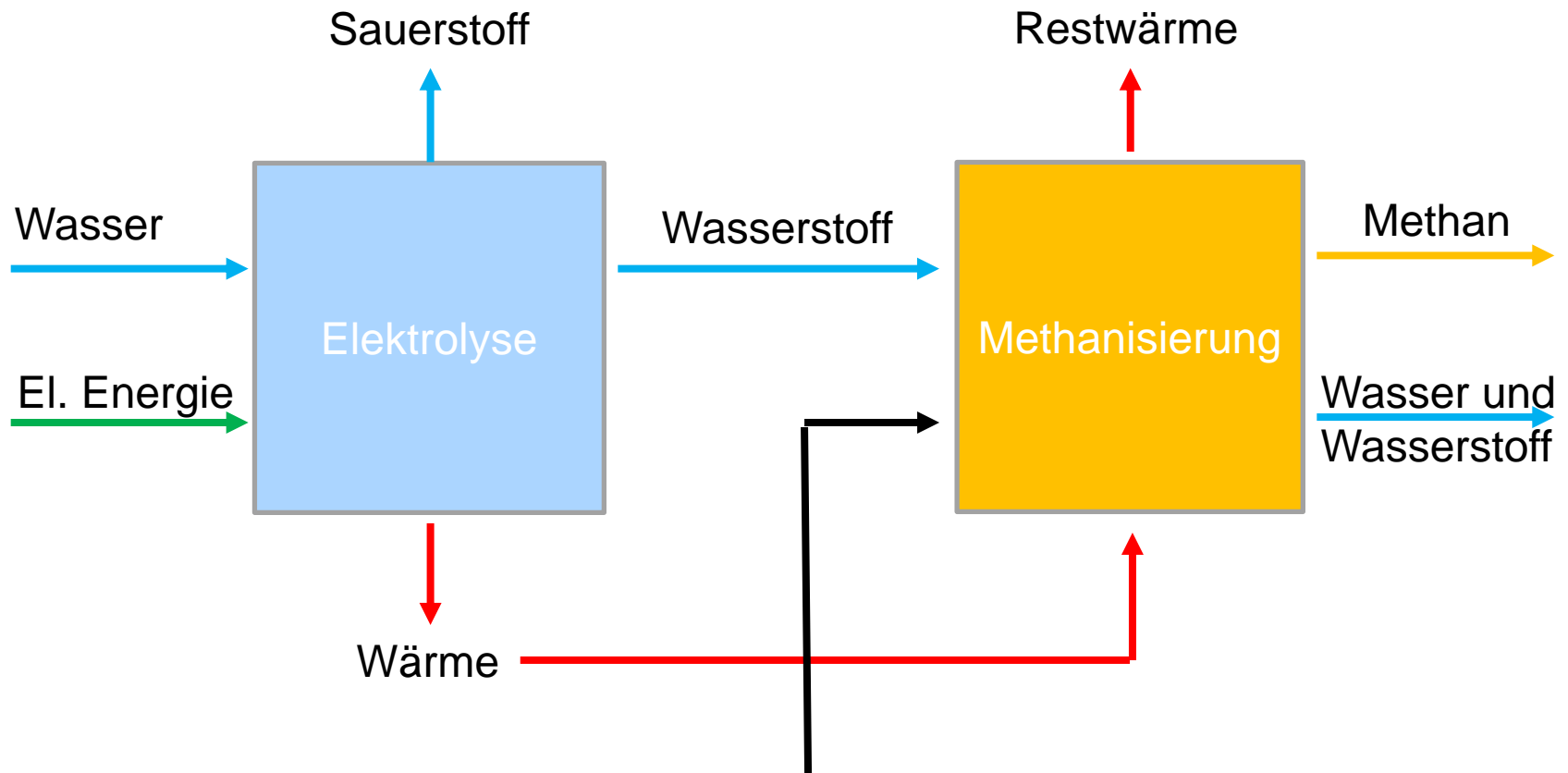


## Salzvorkommen und Speicher

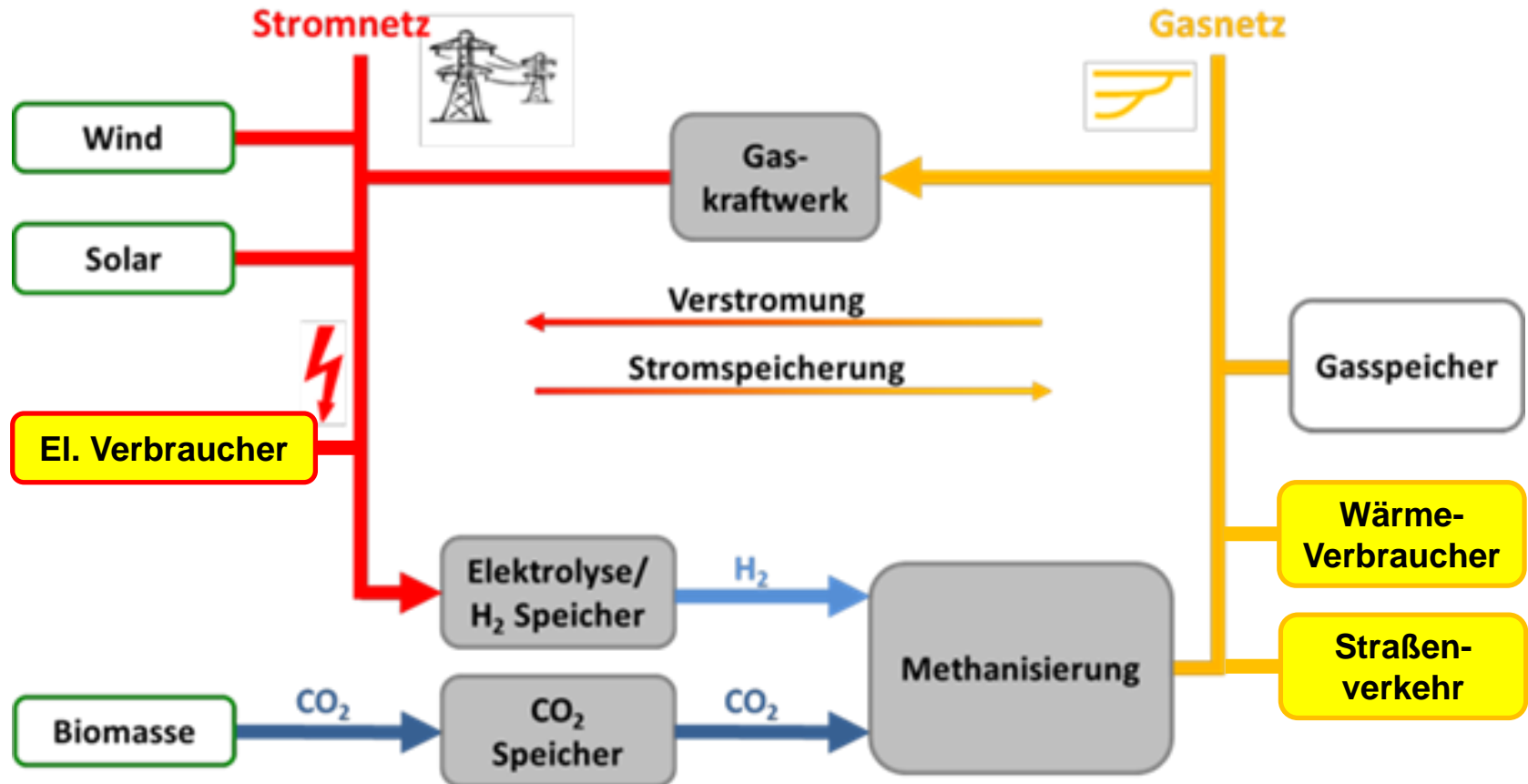
Quelle: Stromspeicherpotentiale für Deutschland, Studie des Zentrums für Energieforschung der Universität Stuttgart, 2012



# Power to Gas: Physik

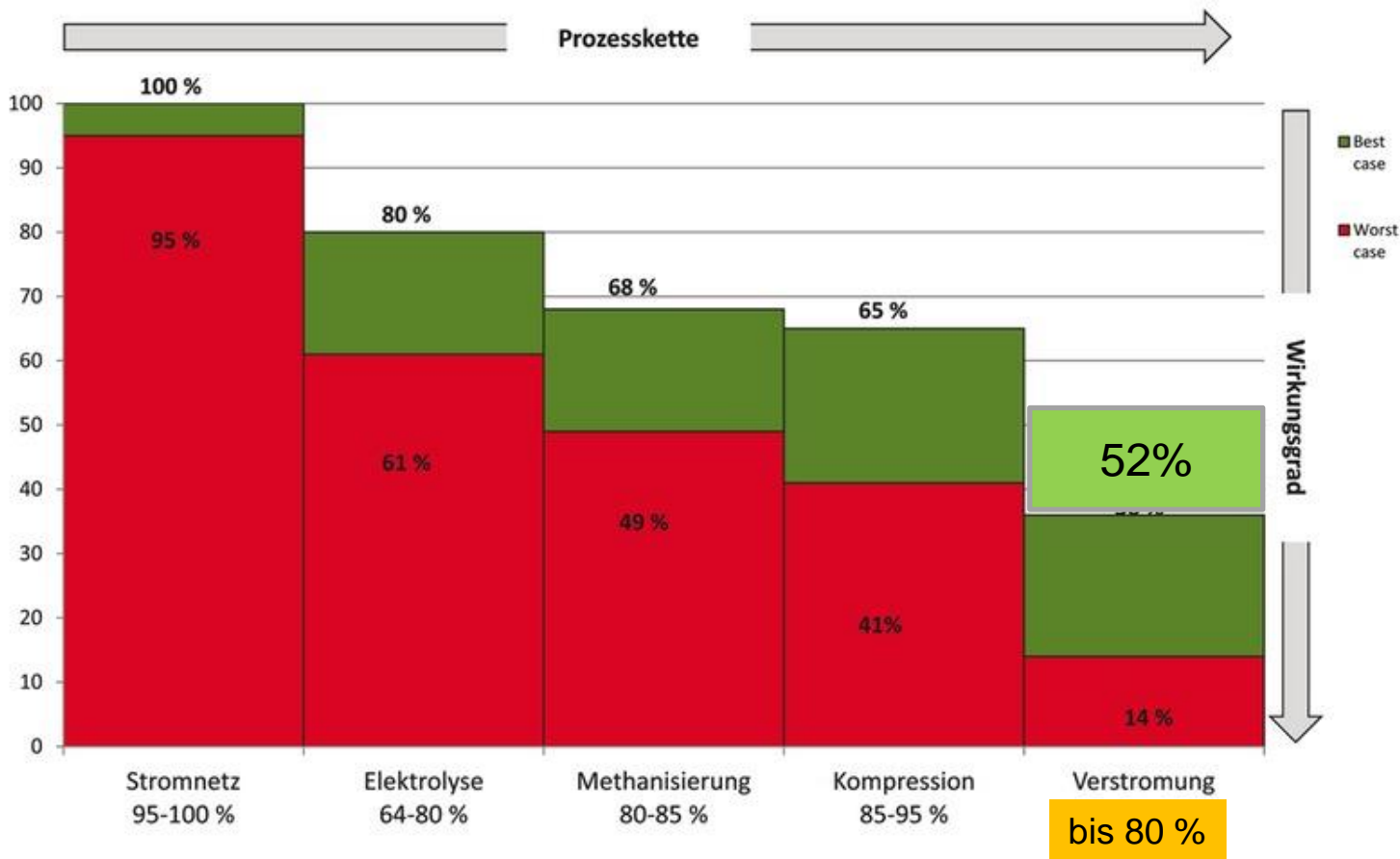


# Power to Gas: Konzept



Quelle: <https://www.solarify.eu/2013/05/01/bmu-fordert-power-to-gas-forschung/>, ergänzt

# Power to Gas: Wirkungsgrad



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

# Energiespeicher D aktuell

Betrachtung hier nur für elektrische Energie. Vorhandene Gasspeicher dienen der Absicherung der Wärmeversorgung und sind hier nicht berücksichtigt. Pumpspeicherwerke in Österreich mit Lieferverträgen nach Deutschland sind ebenfalls nicht berücksichtigt.

Pumpspeicher:	38	GWh
Batteriespeicher:	2	GWh (2019)(1)
Druckluftspeicher (Huntorf):	0,65	GWh

Bei 67,9 GW durchschnittlicher Verbrauchsleistung und einem Rückverstromungs-Wirkungsgrad von 90% reicht das für

## 32 Minuten

(1) ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN 71. Jg. (2021) Heft 3

# 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 hat den höchsten Wirkungsgrad. Aber:

- Deutschland wird sich NIE selbst komplett mit regenerativer Energie versorgen können.
- Energie wird in großem Umfang importiert werden müssen.
- Energieimporte sind sinnvoll nur in Form von Gas (H<sub>2</sub> oder Methan) möglich.

**Der Wirkungsgradvorteil von Batterien ist obsolet, weil die Energie sowieso schon in Form von Gas vorliegt!**

- **Ausbau von Energiespeichern**
- **Elektromobilität mit Wasserstoff+Brennstoffzellen statt Batterien**
- **Abschalten von Kraftwerken nur dann, wenn Ersatz bereit steht**
- **Energiewende global denken: Solarkraftwerke in der Sahara usw.**
- **Kernkraft neu denken (Thoriumreaktoren)**
- **Auf Kernfusion hoffen**