



Schafft Deutschland die Energiewende?

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek

Institut für Chemische und
Elektrochemische
Verfahrenstechnik

Neujahrssitzung der BWG

Braunschweig

27. Januar 2024



Foto: National Geographic / Luca Locatelli (2014)



Energiewende Deutschland

Deutschland will **bis 2045 klimaneutral** werden

- 2030 – **80%** des elektrischen Stroms aus Erneuerbaren Energien (EE)
- 2038 – kompletter Kohleausstieg
- 2045 – vollständig klimaneutral

Aktueller (2022) **EE-Anteil** am Energiebedarf

- Elektrischer Strom **46%**
- Gesamte Endenergie **21%**
- Verkehr **7%**

Emissionen (CO₂-Äquivalente, 2022) von **746 Millionen Tonnen**

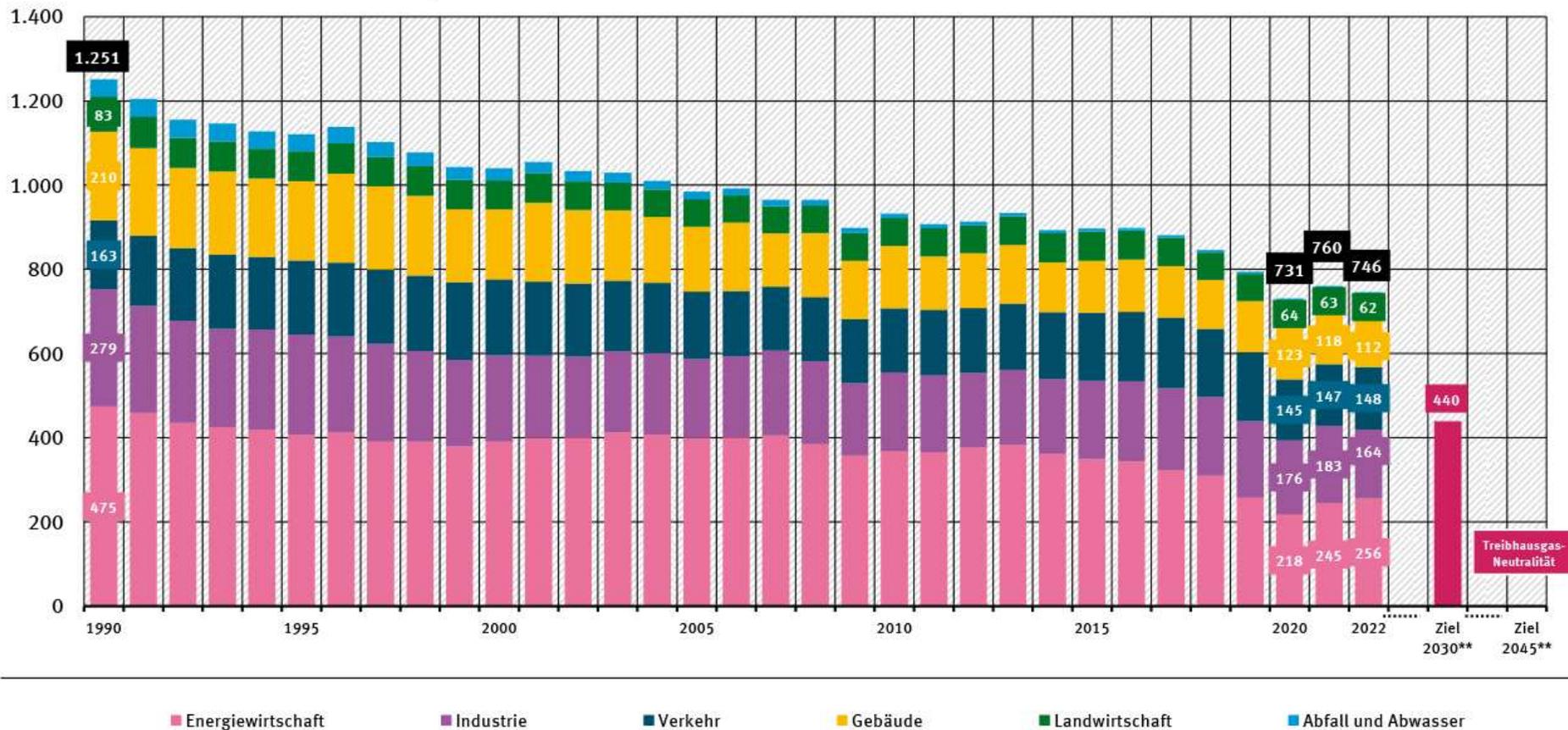


www.kenan-flagler.unc.edu/perspectives/where-the-energy-transition-is-now/



Entwicklung Treibhausgas-Emissionen

Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente



Schafft Deutschland die Energiewende?

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-emission-von-treibhausgasen>

27. Januar 2024

Energiebegriffe

- **Primärenergie** = gesamter Energieeinsatz aller Energieträger (Kohle, Öl, Erdgas, Uran, Wind, Solar, ...)
- **Endenergie** = gesamte Energienutzung nach Umwandlungsverlusten bei den Verbrauchern
- **Energiearten** = Strom, Wärme (Hoch- und Tieftemperatur), Mechanische Energie (z.B. Mobilität)
- **Energieträger** = Strom, Mineralölprodukte, Gase, Fernwärme, ...
- **Sektoren** = Industrie, Haushalte, Verkehr, Gewerbe/Dienstleistungen



Energie und Leistung

Energie = Arbeitsfähigkeit

- „Kraft x Weg“, Einheit Kilojoule (kJ)

Leistung = Arbeit / Zeit

- Einheit Kilowatt (kW) → **kWh** = Energieeinheit

Einige Zahlenwerte

- Nahrung Mensch: **2,3 kWh / Tag** \approx **0,1 kW**
- Wärmebedarf Einfamilienhaus / Jahr: **25.000 kWh**
- Elektrischer Strom D* / Jahr: **484 TWh** =
484.000.000.000 kWh oder **55 GW** = 55.000.000 kW
- Endenergie D* / Jahr: **2490 TWh (30.000 kWh / Kopf)**
oder **284 GW (3,5 kW / Kopf)**

*Werte für 2022

Schafft Deutschland die Energiewende?



<https://www.ardalpha.de/lernen/telekolleg/faecher/informatik/technologie-1-energieumwandlungen102.html>

27. Januar 2024

Kosten und Preise für Energie (Stand Ende 2023)

Elektrischer Strom (1 kWh)

- Privathaushalte **40 Cent**,
Strombörse Spotmarkt **12 Cent**
- Windstrom Dänemark **3 Cent***

Fossile Energieträger (1 kWh)

- Rohöl (72 US\$ / Barrel) **4,5 Cent**,
Diesel Tankstelle ca. **16,5 Cent**
- Erdgas Börse ca. **3,5 Cent**,
Privathaushalte **12 Cent**

Nahrungsmittel (1 kWh \approx 180 g)

- Weizen Börse ca. **4 Cent**



www.vasner.com/de/heizkosten-sparen/

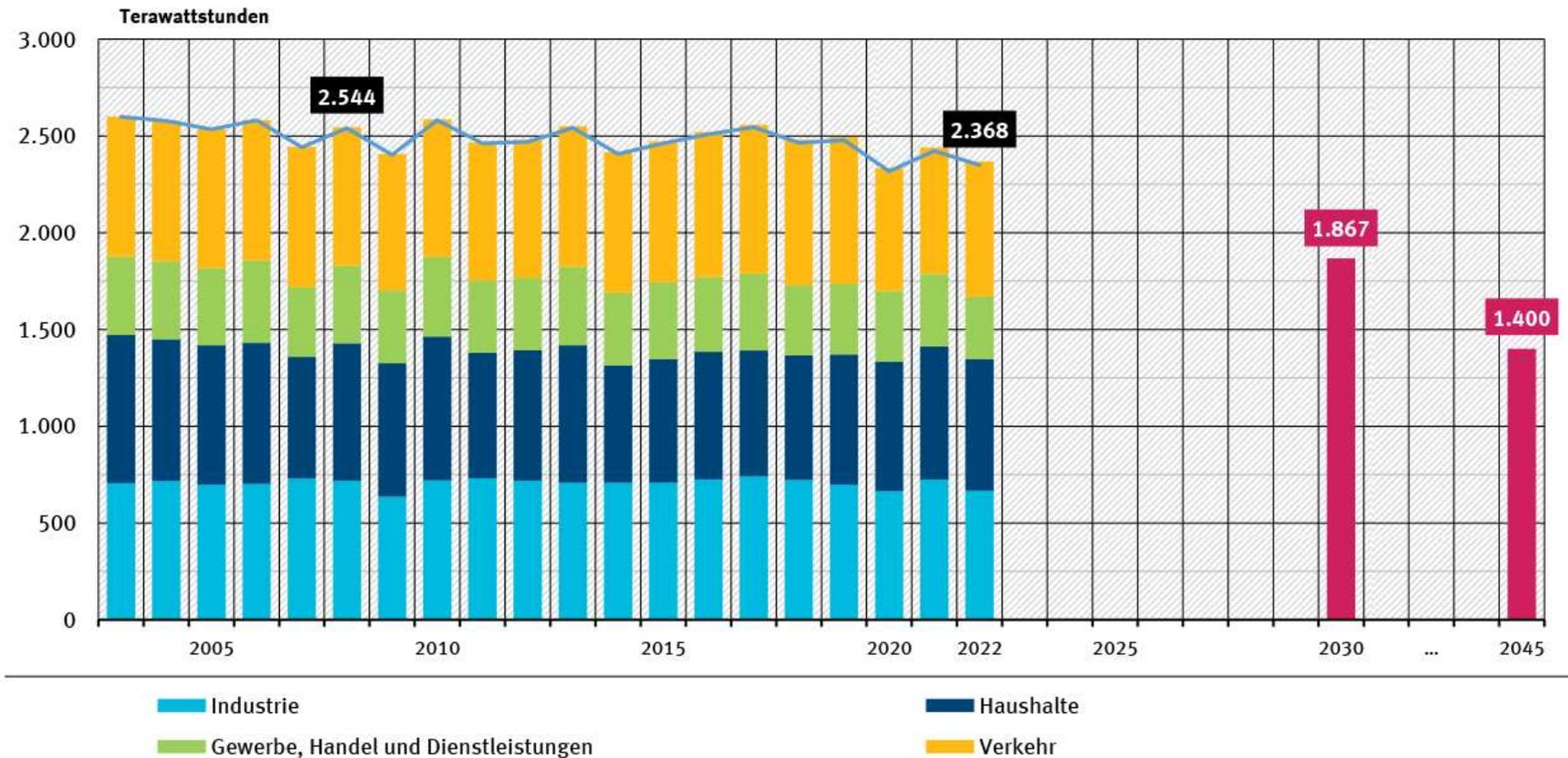


www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/tankstellen-oligopol-wie-benzinpreise-im-wochenverlauf-schwanken-1637698.html

*<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/levelised-cost-of-electricity-calculator>



Entwicklung Endenergiebedarf



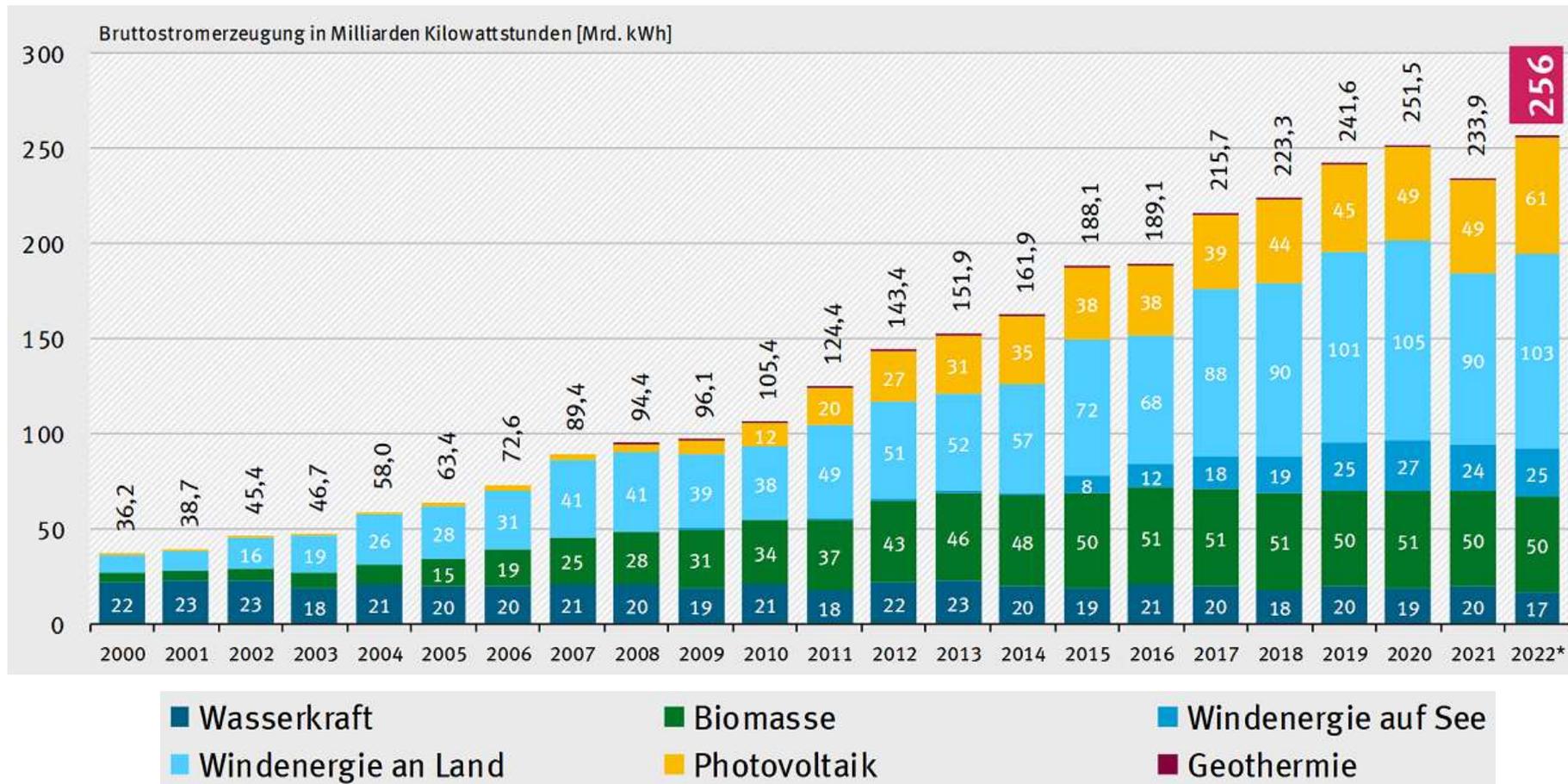
www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren

Schafft Deutschland die Energiewende?

27. Januar 2024



Entwicklung EE bei Stromerzeugung



<https://www.umweltbundesamt.de/themen/mehr-gruener-strom-mehr-erneuerbare-waerme-im-jahr>

Windenergie Deutschland

Verfügbarkeit Wind

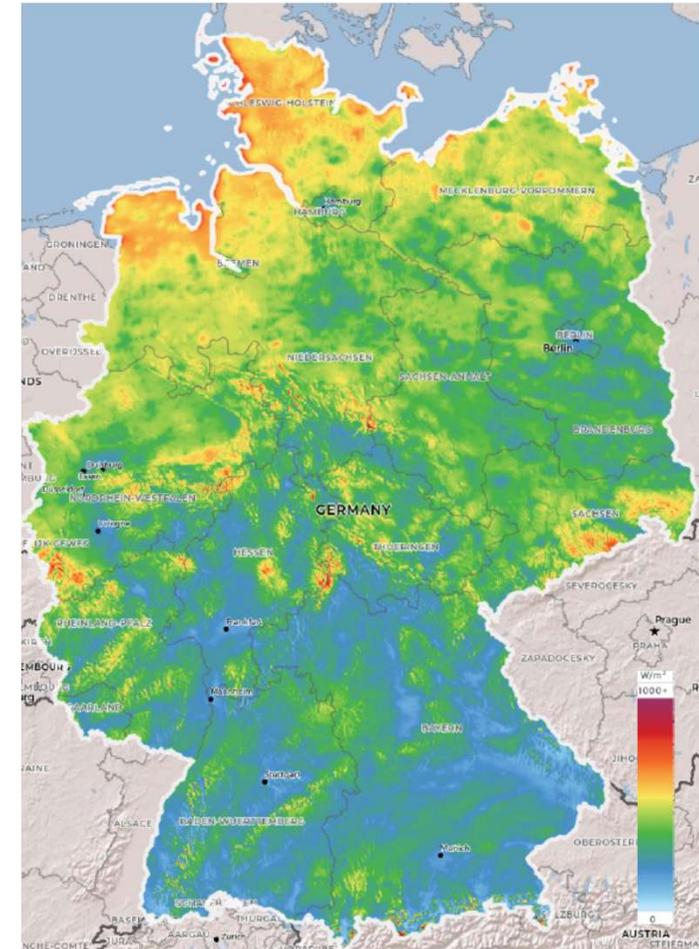
- In Küstenregionen (NI, SH) in 100 m Höhe teilweise > 500 W / m², Offshore deutlich höher
- Deutlich niedrigere Windleistungen in Süddeutschland (BW, BY)

Technologie und Ertrag

- Onshore-Anlagen ca. **5 MW**, Offshore **10 MW**
- Vollaststunden Offshore ca. **3600 (40%)**, Onshore Norddeutschland ca. **2500 (28%)**
- Mittlerer Jahresertrag 2022 (59 GW_p) ca. **6,6 kWh / m²**
- Bei 200 GW_p installierter Leistung ca. **5,3 kWh / m²***

*A. Kleidon, Phys. Unserer Zeit 54 (2023) 142-148

Schafft Deutschland die Energiewende?



globalwindatlas.info/en/area/Germany

27. Januar 2024

Solarenergie Deutschland

Verfügbarkeit Sonne

- In Süddeutschland deutlich höhere Solarstrahlung als im Norden

Technologie und Ertrag

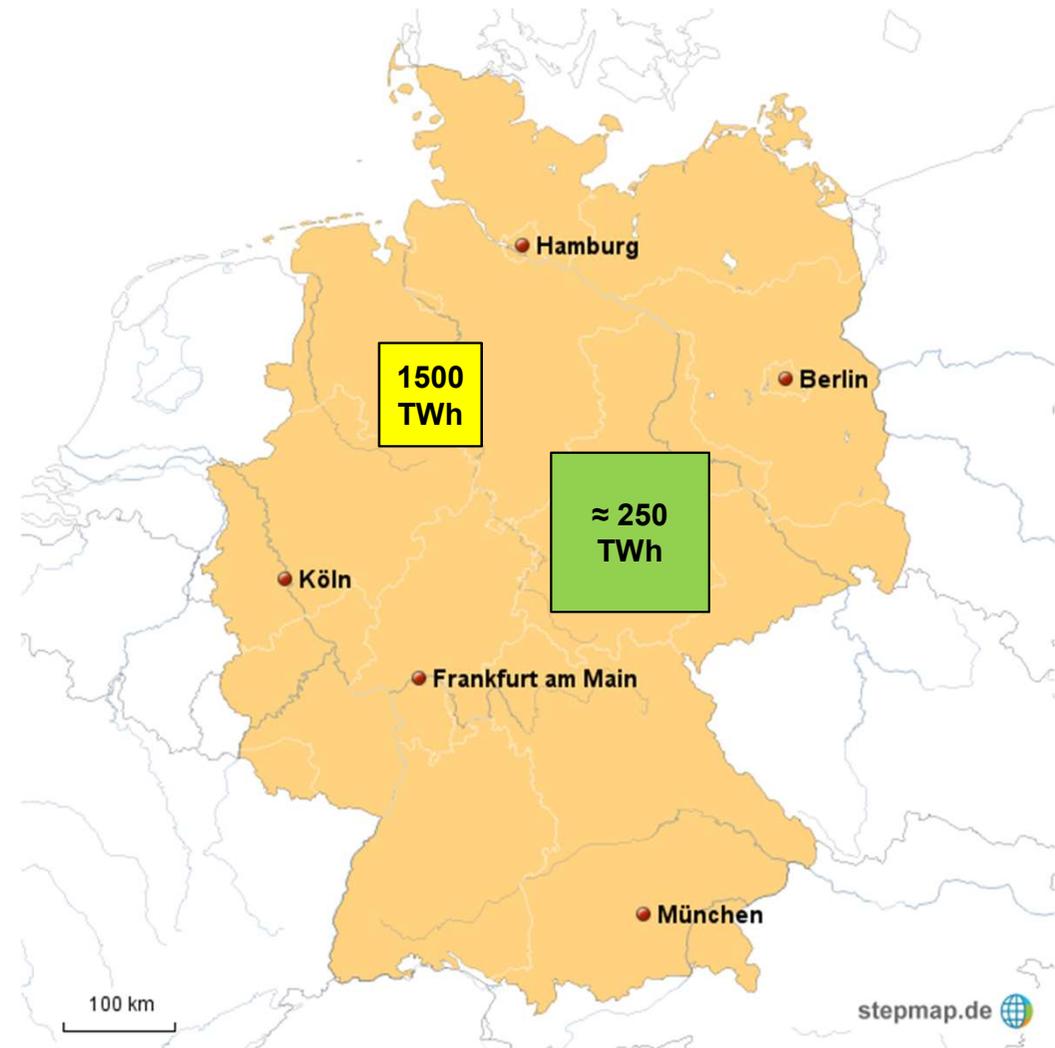
- Standard PV-Solarzellen auf Siliziumbasis mit ca. **20%** Wirkungsgrad
- Vollaststunden Deutschland im Mittel ca. **1000 (11%)**
- Mittlerer Jahresertrag ca. **200 kWh / m²**
- Flächenpotenzial Solarenergie sehr viel größer als bei Windenergie!



globalsolaratlas.info/download/germany

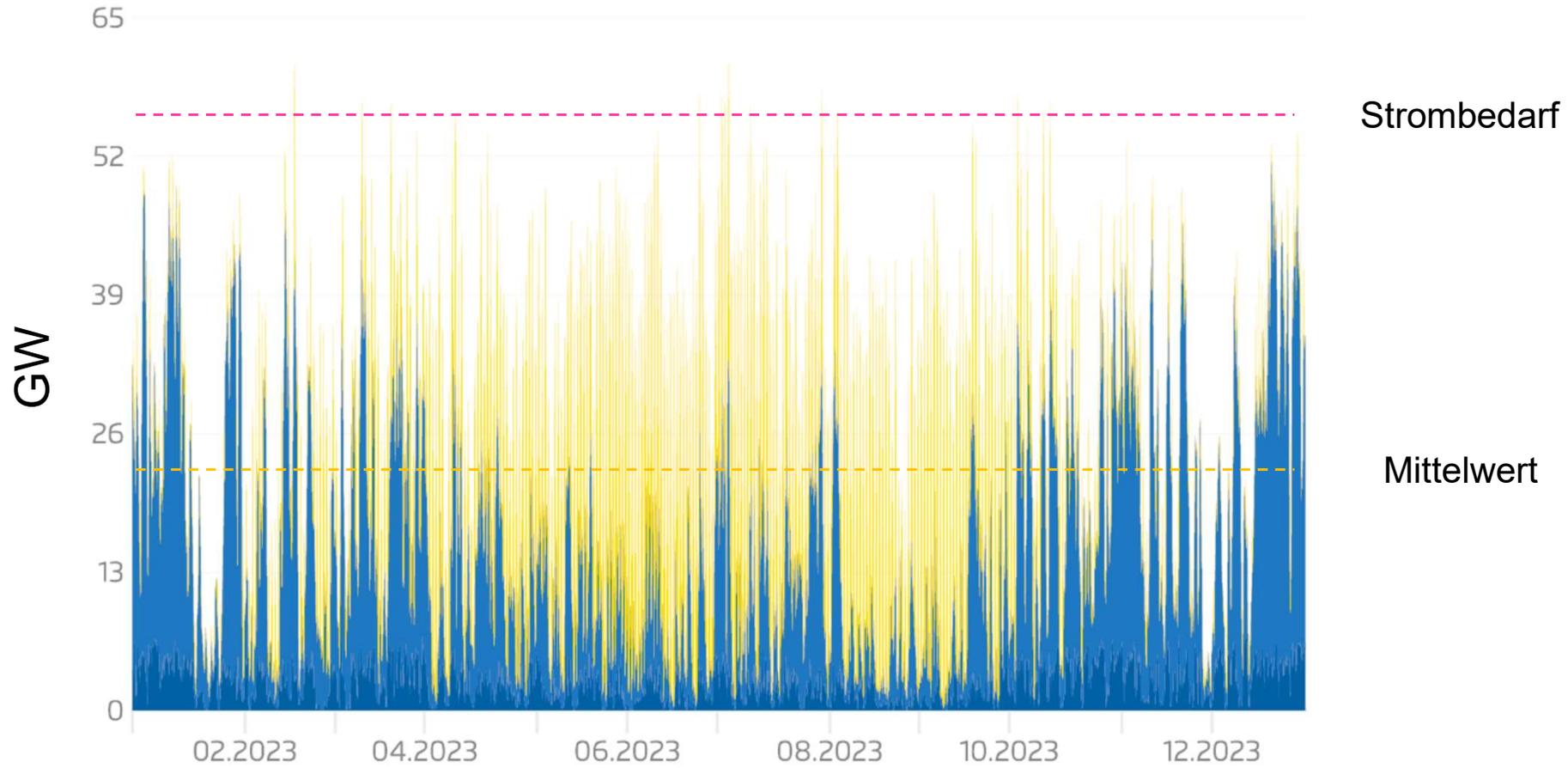
Flächenbedarf Solarenergie

- Angenommener mittlerer Jahresertrag ca. **200 kWh / m²**
- Flächenbedarf für **1500 TWh** ca. **7.500 km²** (87 km x 87 km)
 - Entspricht dreifacher Fläche des Saarlandes
 - Hälfte der Fläche von Schleswig-Holstein
- Energiepflanzen (Biodiesel, Biogas) werden derzeit auf **11%** der landwirtschaftlichen Nutzfläche angebaut
 - 1,8 Mio. Ha oder **18.000 km²** (134 km x 134 km)





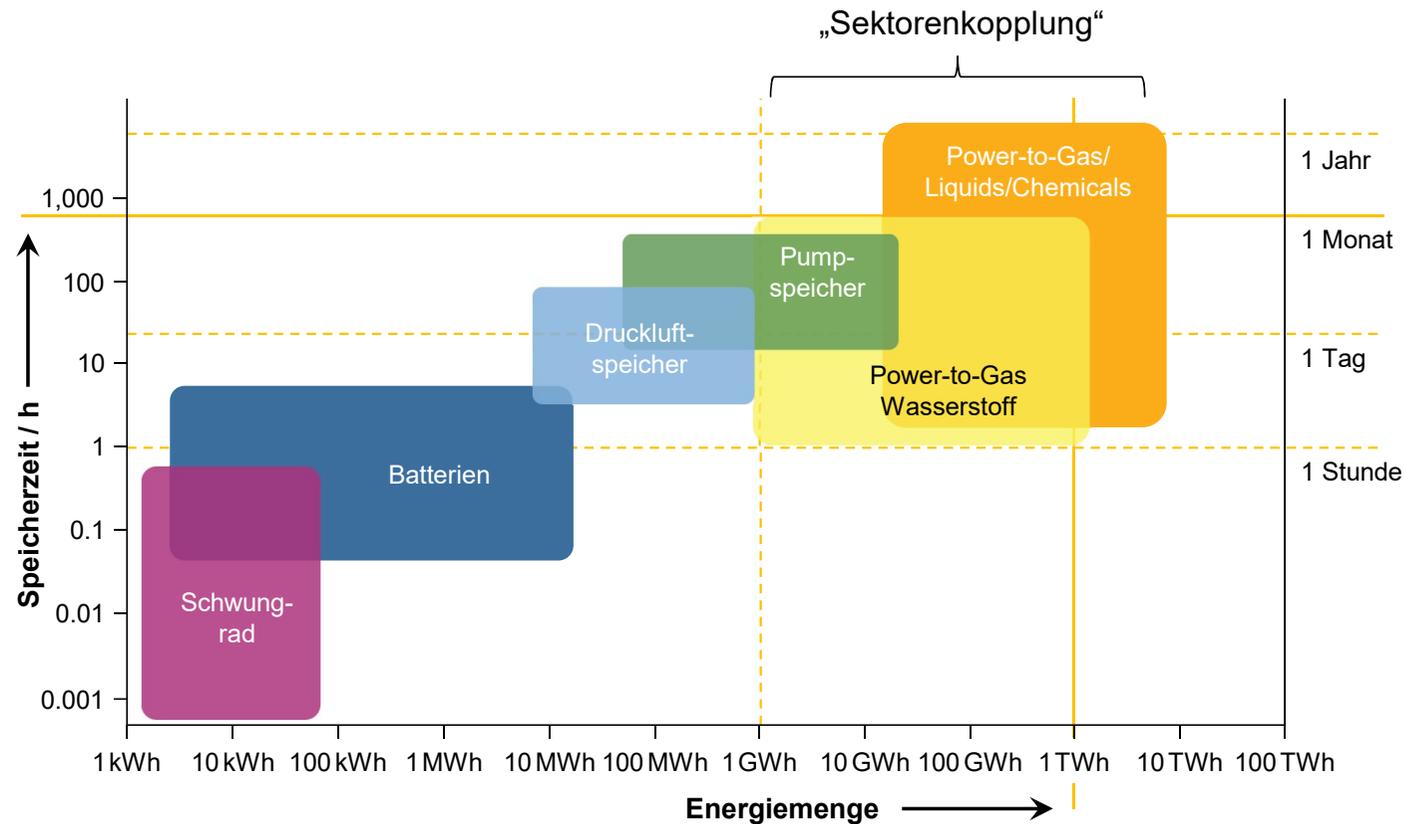
Solar- und Windenergie Deutschland 2023



https://www.agora-energiewende.de/daten-tools/agorameter/chart/today/power_generation/08.01.2024/11.01.2024/hourly



Speicherung elektrischer Energie



Basierend auf: ltm-power.com

Verfügbare Speicher in Deutschland (2023)

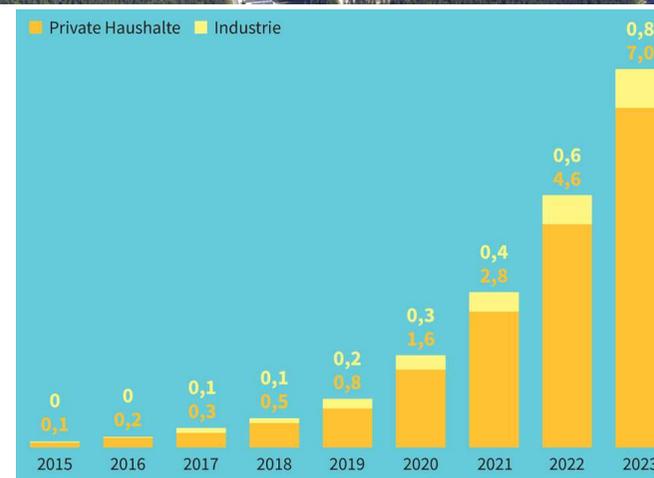
Pumpspeicher

- Max. Leistung **10 GW**
- Speicherkapazität **38 GWh**
- Wirkungsgrad ca. 70%
- Größter Speicher Goldisthal



Batteriespeicher

- Max. Leistung **6 GW**
- Speicherkapazität **12 GWh**
- Wirkungsgrad ca. 85%
- 1 Mio. E-Autos mit je 50 kWh würden **50 GWh** bereitstellen!



www.iwd.de/artikel/erneuerbare-energie-batteriespeicher-koennen-stromnetze-entlasten-601135/

Schlüsselrolle von Wasserstoff für Energiewende

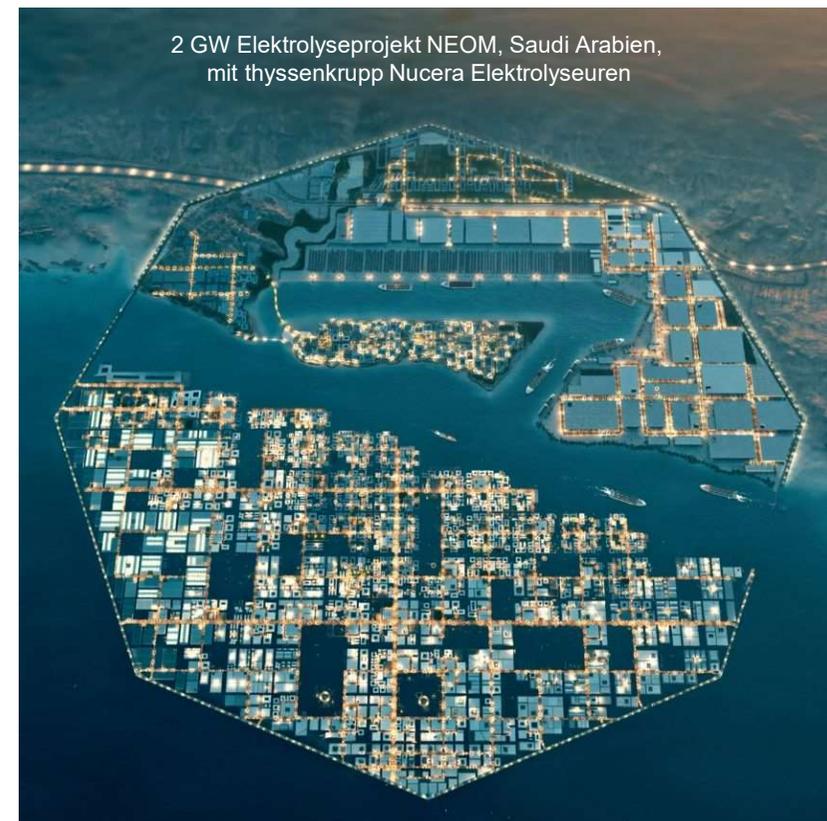
- Rohstoff für die **Chemische Industrie**
 - Ammoniak $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$
 - Methanol $\text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
- **Stahlerzeugung**
 - $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{H}_2\text{O}$
- **Speichermedium elektrische Energie**
 - Rückverstromung in Brennstoffzelle oder Kraftwerk
- Energieträger für die **Mobilität**
 - Brennstoffzelle, synthetische Kraftstoffe (LKW, Züge, Landmaschinen)



www.dvgw.de/themen/energiewende/wasserstoff-und-energiewende

Grüner Wasserstoff durch Wasserelektrolyse

- Theoretischer Energiebedarf **40 kWh/kg**
- Wirkungsgrad Elektrolyse ca. **70%**
- Mit Strompreis von 8 ct/kWh: **4,5 €/kg**
- Verschiedene Elektrolysetechnologien verfügbar: Alkalisch (**AEL**), Polymerelektrolyt (**PEMEL**), Hochtemperatur (**HTEL**)
- Bezug von Wasserstoff
 - Eigenproduktion in D
 - Import **Pipeline** (bis 3000 km)
 - Import **Schiff** (H₂ flüssig, Ammoniak, Methanol, ...)



www.dezeen.com/2022/12/21/oxagon-floating-port-city-neom-saudi-arabia/

27. Januar 2024

Energiewende in Sektoren: Haushalte + Gewerbe

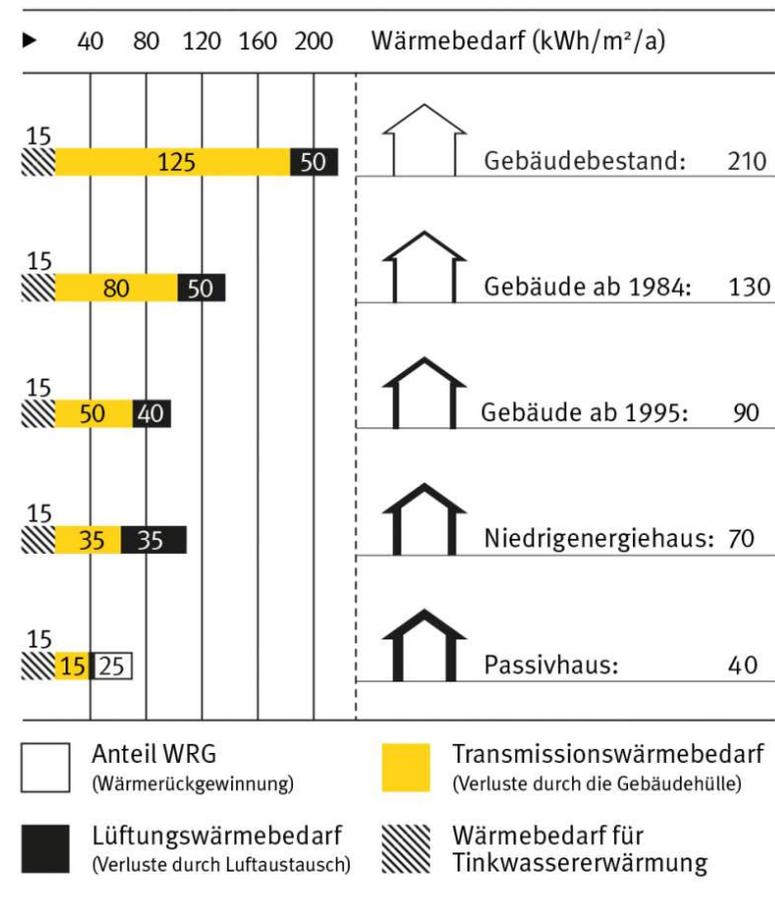
Energiearten

- **70%*** Raumwärme und Warmwasser
- **26%*** Strom (Mechanische Energie, Licht, Internet, Kälte, ...)
- **4%*** Prozesswärme (Hochtemperatur)

Maßnahmen für Energiewende

- Wärmedämmung
- Wärmepumpe für Raumheizung
- Eigenproduktion von Energie (PV, Solarthermie)

*www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf



www.remeha.de/

Wichtige Rolle von Wärmepumpen

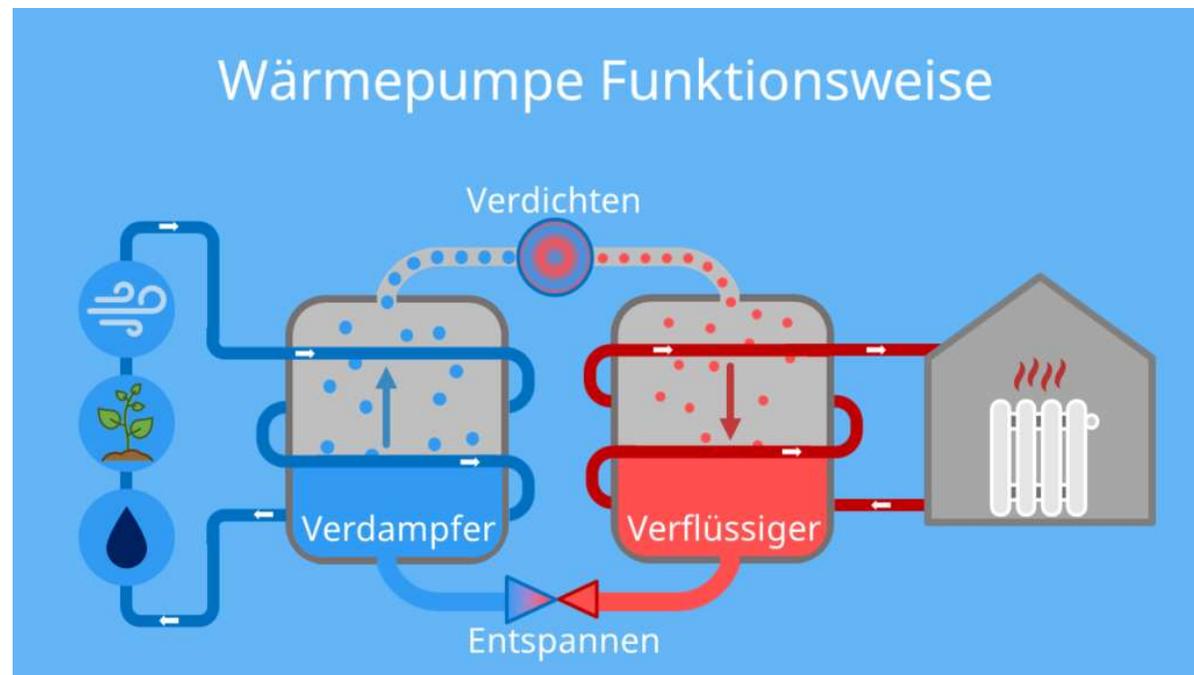
Funktionsweise

- Kraftwärmemaschine, die (elektrische) Arbeit nutzt
- Überträgt Umgebungswärme auf höheres Temperaturniveau
- Vergleichbar Kühlschranks

- Nutzwärme / Arbeit ≈ 3 bis 5

Energiebedarf für Raumwärme

- Wärmepumpe **25%**
- Gas / Öl **100%**
- Wasserstoff **140%**



studyflix.de/ingenieurwissenschaften/warmepumpe-1208

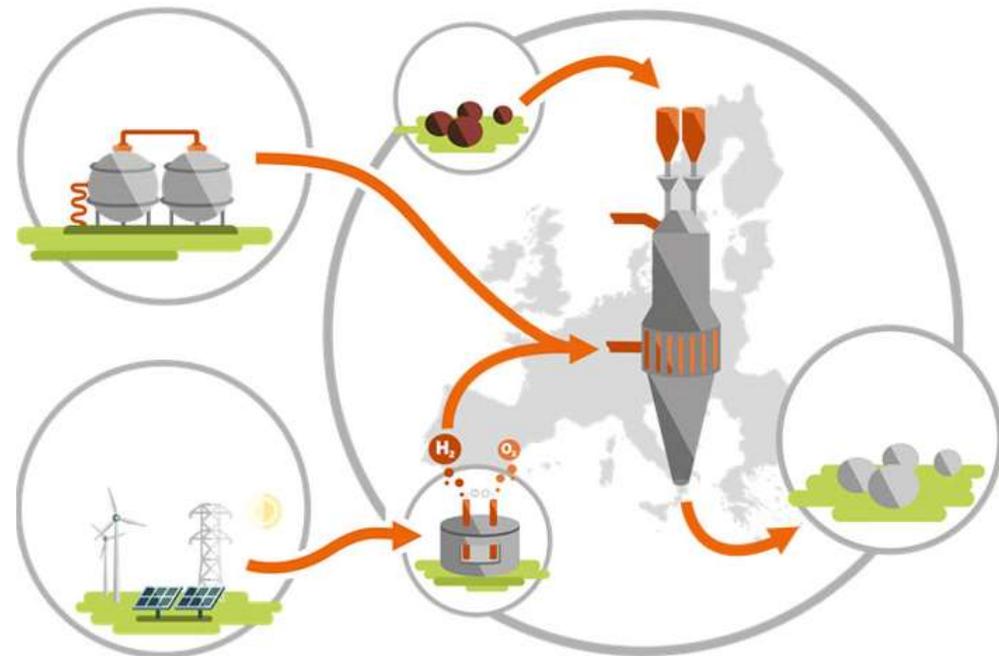
Energiewende in Sektoren: Industrie

Energiearten

- **67%*** Prozesswärme
- **7%*** Raumwärme, Warmwasser
- **26%*** Strom (Mechanische Energie, Kälte, Internet, Licht)

Maßnahmen für Energiewende

- Einsatz von EE für Strom und Prozesswärme
- Effizienzsteigerung
- Wasserstoff (Chemie, Stahl)



*www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf

www.salzgitter-flachstahl.de/de/news/details/salcosr-salzgitter-initiative-zur-co2-reduzierung-bei-der-stahlherstellung-der-zukunft-12650.html

Energiewende in Sektoren: Verkehr

Energiebedarf

- 83%* Straßenverkehr
- 14%* Flugverkehr
- 3%* Schiene

Maßnahmen für Energiewende

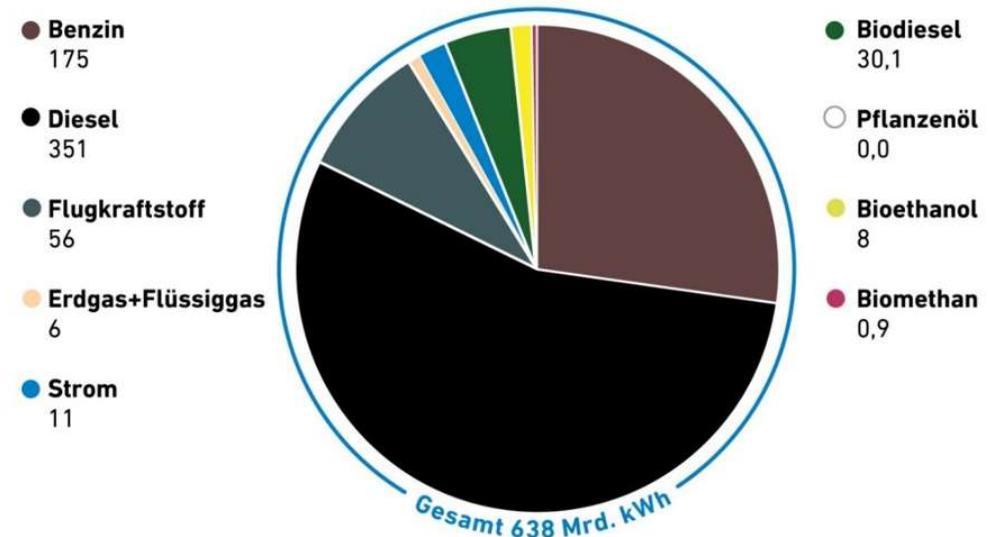
- **PKW:** Batterie-elektrisch
- **LKW:** Batterie oder Wasserstoff
- **Züge:** Elektrisch (H₂)
- **Flugzeuge:** Synthetisches Kerosin (H₂)
- **Schiffe:** Ammoniak, Methanol (H₂)

*www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs

Schafft Deutschland die Energiewende?

Endenergieverbrauch des Verkehrs in Deutschland 2020

in Milliarden Kilowattstunden



unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/endenergieverbrauch-des-verkehrs-in-deutschland

Zwischenfazit Energiewende

Technologische Leitlinien

- Erneuerbare Energien (Solar, Wind) massiv weiter ausbauen
- Enorme Speicherkapazitäten erforderlich
- Import von H₂ vorbereiten
- Infrastruktur aufbauen / verbessern (elektrische Netze, Ladestationen, Gebäude, H₂-Pipelines, Terminals für H₂-Derivate, ...)

Energieautarkie vs. Import

- Autarkie physikalisch möglich
- Wegen fehlender Akzeptanz (und Wirtschaftlichkeit?) voraussichtlich nicht erreichbar



www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html

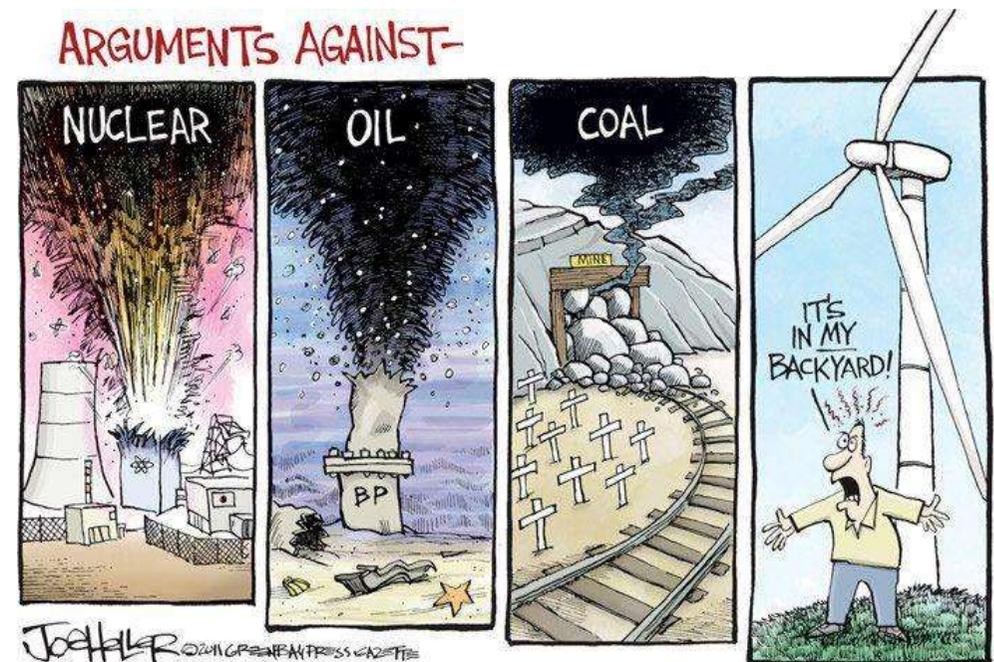
Akzeptanz der Energiewende in Deutschland

Abstrakte Grundeinstellung

- Problem Klimawandel wird von großer Mehrheit erkannt
- Zustimmung für Maßnahmen zur Energiewende ist sehr hoch

Konkrete Bereitschaft zur Umsetzung

- Finanzieller Mehraufwand wird nicht akzeptiert
- Schuld sind die anderen (Industrie, China)
- Energiewende ja, aber „not in my backyard“
- Allgemeine „Veränderungerschöpfung“
- Zunehmend aggressive Durchsetzung von Partikularinteressen



<https://hellertoon.com>



Beispiel „Habecks Heizhammer“



www.energie-experten.org/news/heizungsgesetz-kritik-laesst-waermepumpen-markt-einbrechen

Schafft Deutschland die Energiewende?

27. Januar 2024

23



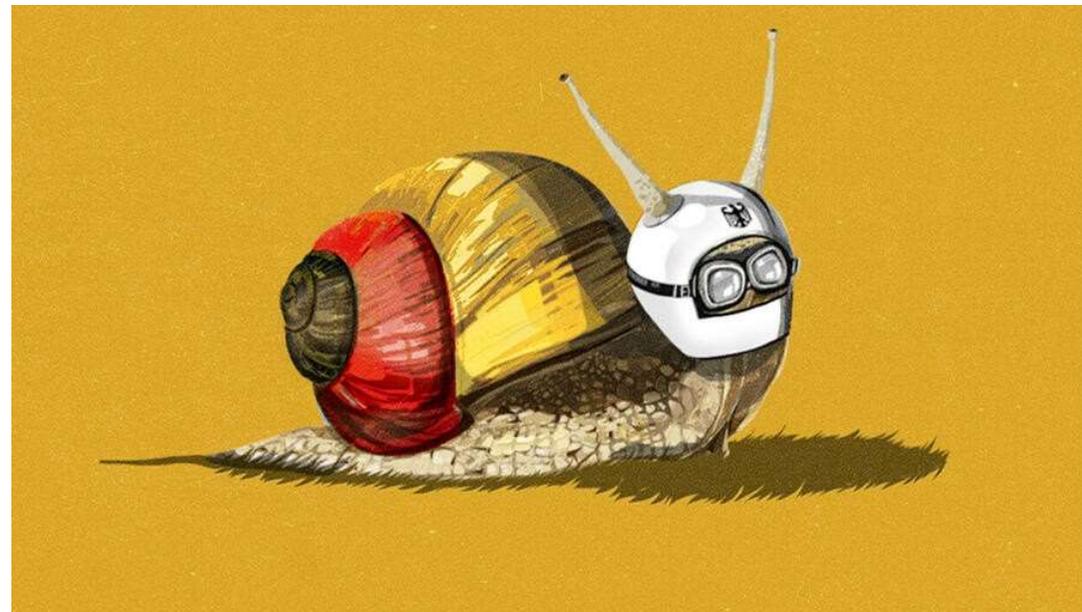
Der Zeitfaktor – „Deutschlandgeschwindigkeit“

Beispiele

- Durchschnittliche Zeitdauer für Inbetriebnahme von Windprojekten **8 Jahre**
- Südlink-Trasse: Beginn der Planung **2013**, Inbetriebnahme **2028**
- Flughafen BER, schnelles Internet, Stuttgart 21, Digitalisierung der Verwaltung, ...

Ursachen

- Überregulierung
- Föderalismus
- Not in my backyard



www.linkedin.com/pulse/die-wahrheit-über-neue-deutschland-geschwindigkeit-sebastian-matthes

Zusammenfassung

- Die Energiewende ist alternativlos, um den Klimawandel zumindest zu verlangsamen
- Solarenergie (und andere „erneuerbare“ Energien) sind ausreichend verfügbar
- Technische Lösungen für eine klimaneutrale Gesellschaft existieren
- Aber: radikale Transformation, teuer, viele Detailfragen und sehr wenig Zeit
- Deutschland ist überreguliert und langsam
- Die Akzeptanz in der Bevölkerung ist bisher nicht sehr groß
- Weitere harte gesellschaftliche Auseinandersetzungen sind vorhersehbar



letztegeneration.org/demo-in-erding/



jungfreiheit.de/politik/deutschland/2023/kritik-an-demo-in-erding/

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

