



Informatik der Systeme – Chapter 12: Klimawandel, Stromsystem, Energiewende

M. Menth, F. Heimgärtner, T. Stüber



#LecturesForFuture

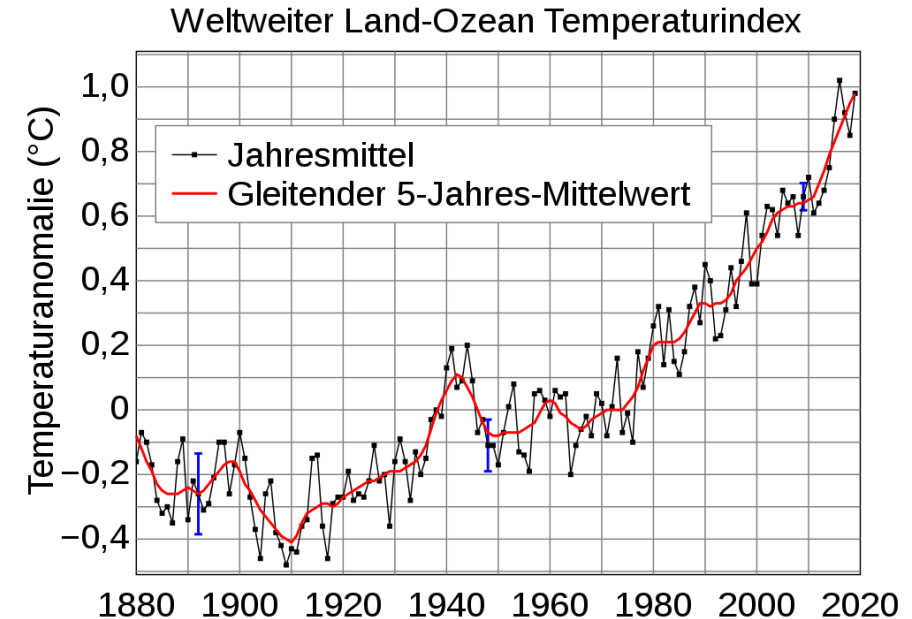
<https://kn.inf.uni-tuebingen.de>



- ▶ Klimawandel
- ▶ Stromnetz
- ▶ Energiewende



- Anstieg der Durchschnittstemperatur auf der Erde
 - Systematische Messungen seit 1880
 - Temperaturanstieg viel schneller als in letzten 66 Mio Jahren
 - Anstieg um 4-5 °C bis 2100 prognostiziert
 - Das geschah sonst nur in einem Zeitraum von 10.000 Jahren
 - Schnellste Erwärmung seit letzter Eiszeit: 1°C/1000 Jahre
 - Quelle:
https://de.wikipedia.org/wiki/Globale_Erw%C3%A4rmung



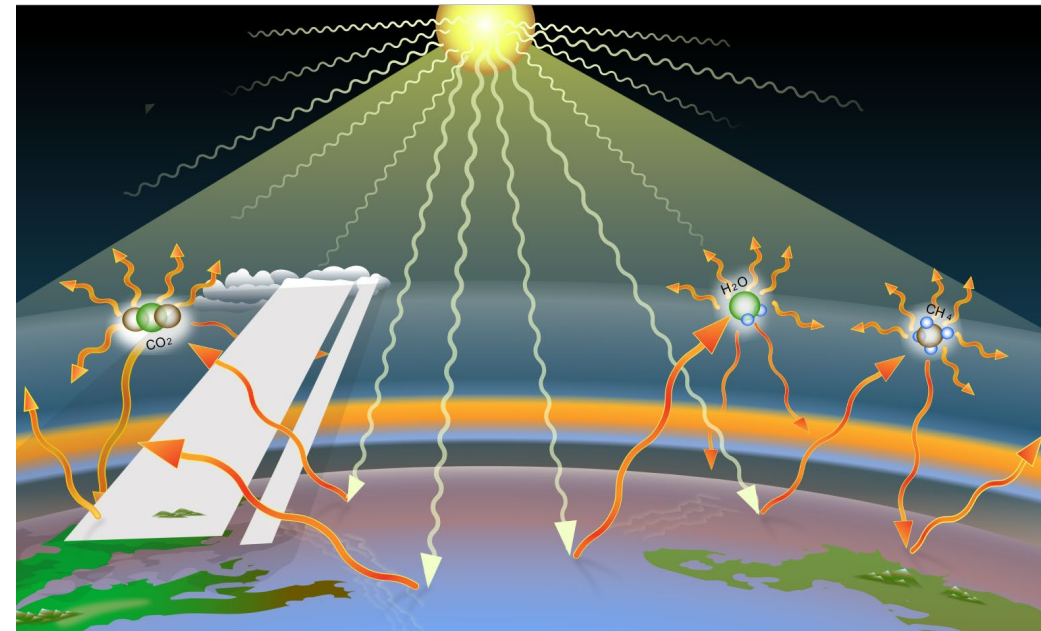
Von NASA Goddard Institute for
Space Studies -
https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/, Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24363898>



► Eigenschaft der Atmosphäre

- Weitgehend transparent für kurzwellige Strahlung von der Sonne
- Wenig transparent für langwellige Infrarotstrahlung die von warmer Erdoberfläche und von erwärmter Luft emittiert wird
 - Hat viele Ursachen, die der Mensch nicht beeinflussen kann
 - Aber vom Menschen verursachte Treibhausgase tragen dazu bei (Reflexion) und verstärken den Effekt

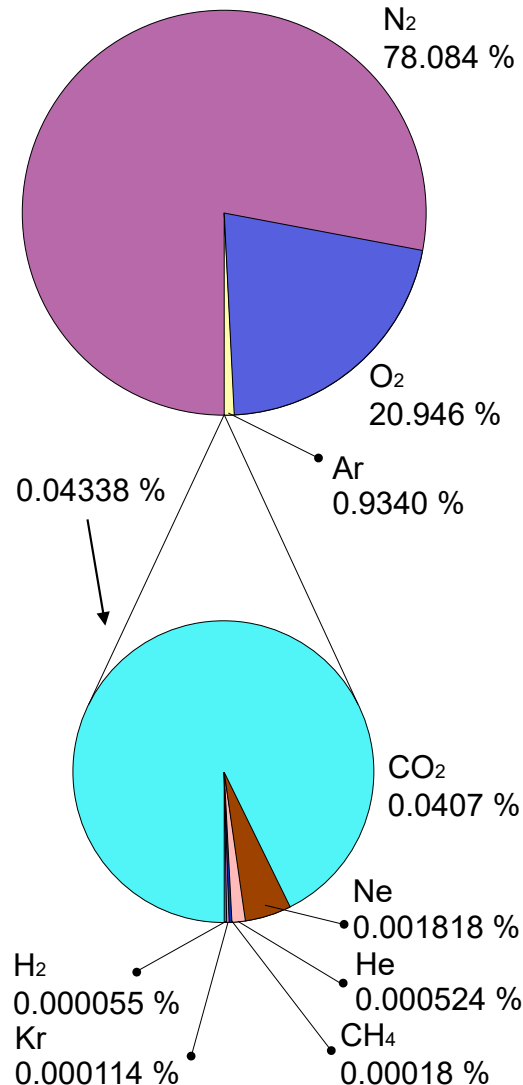
► Folge: Erderwärmung





- ▶ Anthropogene Anreicherung der Erdatmosphäre mit Treibhausgasen, insbesondere
 - Wasserdampf (H_2O)
 - Kohlenstoffdioxid (CO_2)
 - Methan (CH_4)
 - Distickstoffmonoxid (Lachgas, N_2O)

- ▶ Rückkopplungseffekte und Verstärkung des Treibhauseffekts
 - Verminderte Reflexion durch Eis-Abschmelze
 - Ozeane können weniger CO_2 binden
 - Verstärkung von Wasserdampf



- ▶ CO₂-Konzentration in Atemluft gering
 - Trotzdem wichtigstes Treibhausgas
- ▶ Entwicklung der CO₂-Konzentration
 - Vor industrieller Revolution: 280 ppmV (parts per million volumen parts)
 - Heute 400 ppmV
 - Eiskernbohrungen zeigen: Seit 800.000 Jahren war Konzentration nie höher
 - Steigt um 3-4 ppmV pro Jahr
 - Verbrennung aller fossilen Energieträger hätte zur Folge
 - ca. 1600 ppmV
 - Temperaturerhöhung ca. 9-11 °C
 - <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/klimawandel-schon-2025-wird-so-viel-co2-in-der-luft-sein-wie-seit-3-3-millionen-jahren-nicht-mehr-a-fa1d5d50-8275-4323-95d8-fc90bcf0b1d5> (13.7.2020)



► CO₂ Haupterzeuger

- Fossile Energieträger
- Zementindustrie
- Entwaldung
- Verzögerung: Freigesetztes CO₂ trägt erst nach 10 Jahren in Atmosphäre zum Treibhauseffekt bei

► Methan

- Hauptverursacher: Viehhaltung und Landwirtschaft
- Treibhauspotential 25-33 mal höher als CO₂

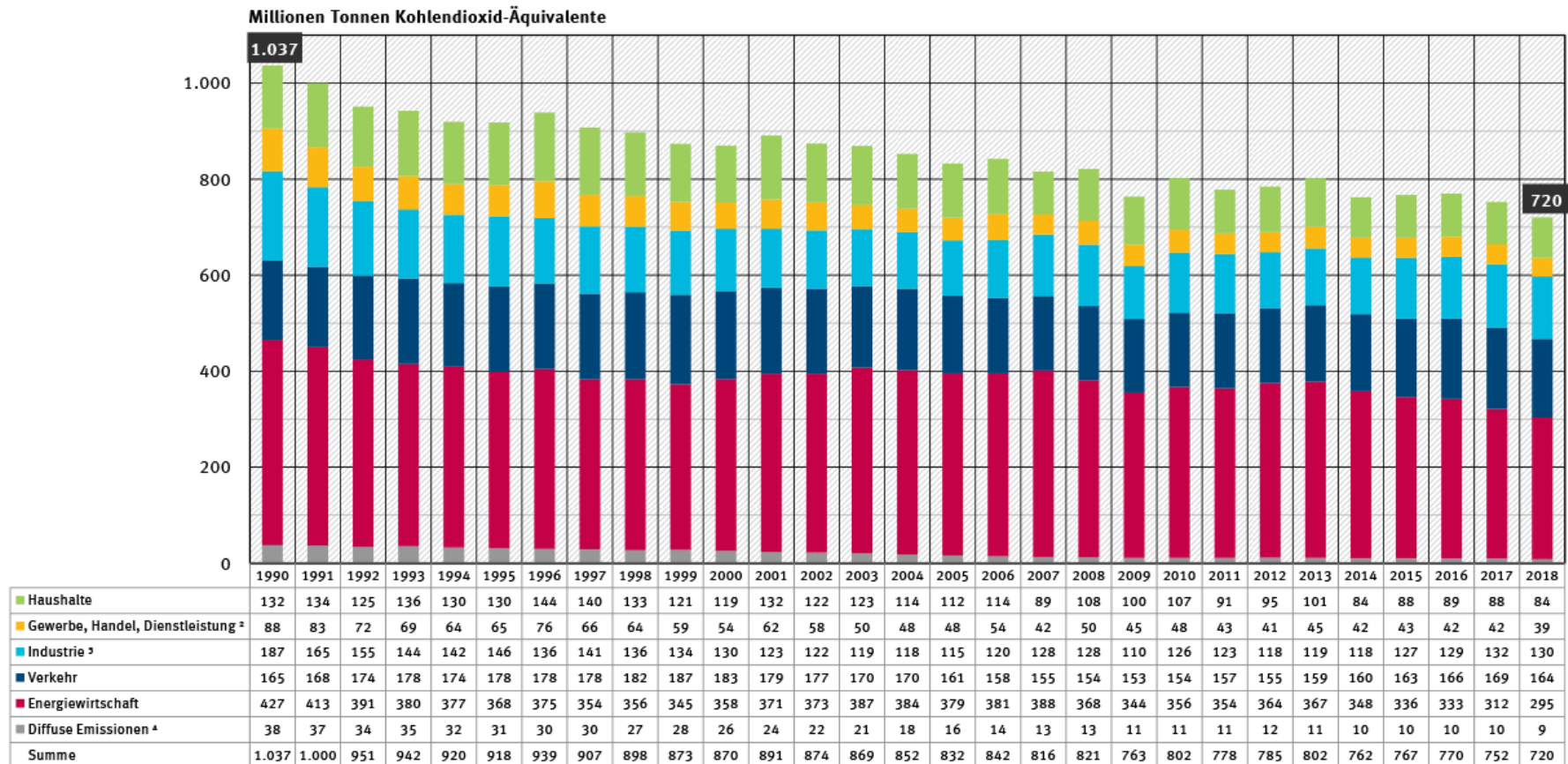
► Argumente, die von „Klimaleugnern“ gerne angeführt werden

- Ozonloch, Sonnenaktivität, Vulkanaktivität, kosmische Strahlung, Abwärme
- Sonnenaktivität nachweislich zu klein um Änderung zu erklären



CO₂-Emission in Deutschland nach Sektor

Entwicklung der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen¹ nach Quellgruppen



¹ in Kohlendioxid-Äquivalenten, berücksichtigt sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O)

² einschließlich Militär und Landwirtschaft (energiebedingt)

³ enthält nur Emissionen aus Industriefeuerungen, keine Prozessemissionen

⁴ durch Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2018, Stand 01/2020



► Extremwetterlagen

- Zunahme von Hitzeextremen (Hitzetote, Waldbrände)

<https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/sibirische-hitzewelle-klimawandel-macht-rekordtemperaturen-in-der-arktis-600-mal-wahrscheinlicher-a-67389176-aae7-45a1-8dc2-6284be7fe2d3> (16.7.2020)

- Starkniederschläge und Überschwemmungen
- Stürme, lokale Kälteeinbrüche

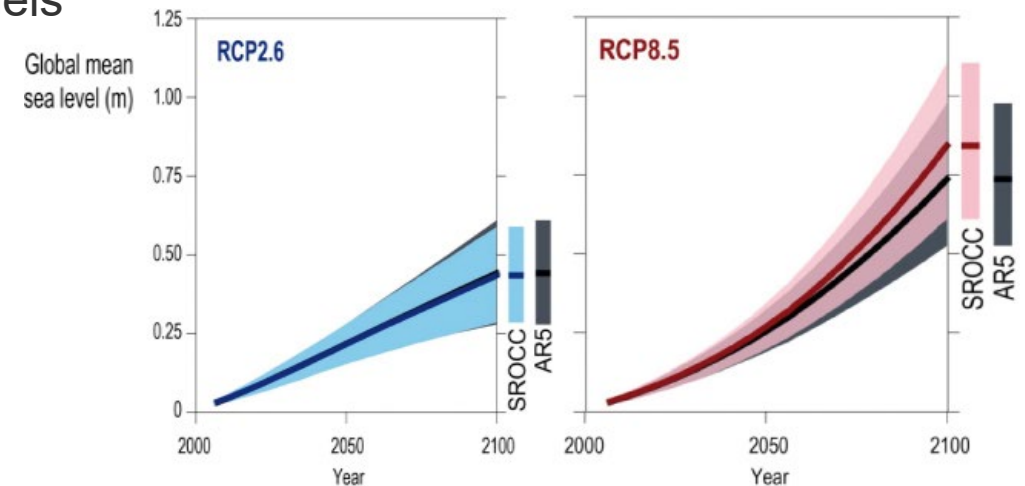
► Dürren

- Reduktion der landwirtschaftlichen Produktivität, Hungersnöte
- Wasserknappheit, Absenkung des Grundwasserspiegels

<https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/grundwasser-bestand-die-konkurrenz-um-wasser-verschaerft-sich-a-6de17ab3-dd47-422c-8781-485c39792e73> (14.7.2020)

► Abschmelzen von Gletschern und der Arktis

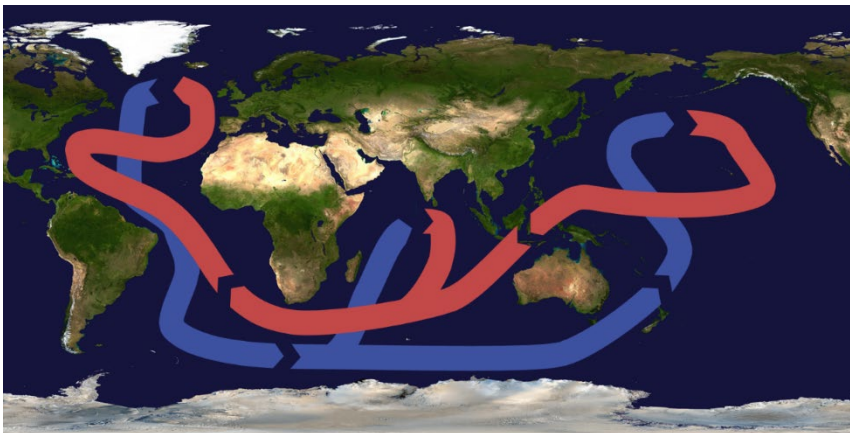
- Erhöhung des Meeresspiegels
- Unbewohnbare Gegenden mit aktuell hoher Bevölkerungsdichte (~100 Mio)



https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Meeresspiegel_der_Zukunft



- ▶ Ausbreitung von Krankheiten, z.B. Malaria
- ▶ Massives Aussterben von Tierarten <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/eisbaeren-koennten-bereits-im-jahr-2100-ausgestorben-sein-a-3e2f424d-100b-40a6-ae34-7bb7d871db6c> (20.7.2020)
- ▶ Politische Auswirkungen
 - Ressourcenkriege, Klimaflüchtlinge
- ▶ Tipping Points durch eintretende Eigendynamik
 - Plötzliche Zustandsänderungen, die nicht mehr umkehrbar sind
 - Verlangsamung der thermohalinen Zirkulation mit Auswirkung auf Golfstrom und Klima in Europa
- ▶ Auch negative Auswirkungen in Deutschland!



Thermohaline Zirkulation

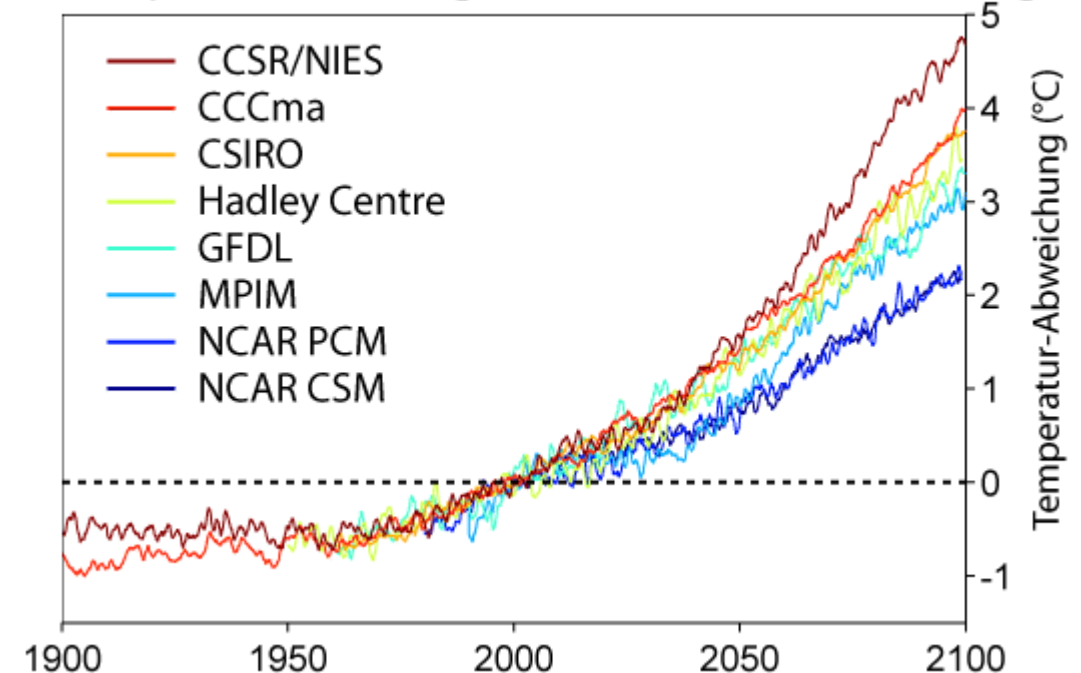
- Tiefenströmung blau
- Oberflächenströmung rot

Von Brisbane - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=138193>



- ▶ Wissenschaft ist sich einig über Effekt
- ▶ Prognosen unterscheiden sich bei Annahmen über Wirksamkeit von Maßnahmen
 - Wahrscheinlichste Erwärmung 3.6 °K bis 2100 (2016)
 - <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/klimawandel-forscher-korrigieren-prognose-zur-erderwaermung-nach-oben-a-2a7772a8-3f68-43ec-b6eb-c678de064cfd> (23.7.2020)
- ▶ Erwärmung um 1.5 °K wird als Grenze gesehen, ab der irreversible Eigendynamik einsetzt
- ▶ Dies ist aber schon fast erreicht:
<https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/klimawandel-kritisches-temperaturziel-des-uno-klimavertrages-koennte-bald-erreicht-sein-a-5eafb5bb-e566-4a46-8e35-db5b915a6eb4> (10.7.2020)

Projektionen globaler Erwärmung



- ▶ Möglicher Verlauf mit Gegenmaßnahmen
 - Müssen wirkungsvoll sein
 - Best Case: 1.5 °K bis 2100
 - Alle müssen schnell zusammenarbeiten



► Pariser Klimaschutzabkommen

- Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cbereinkommen_von_Paris
- Vertrag zwischen 197 Nationen
- Nachfolge des „Kyoto-Protokolls“
- Am 12.12.2015 auf Pariser UN-Klimakonferenz verabschiedet
- Mittlerweile erkennen alle Nationen den Vertrag an, bzw. wollen noch beitreten – nur die USA möchte austreten
- Ziel: Begrenzung der menschengemachten globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten
- Soll verhindern, dass das Erdklima kippt und eine Heißzeit verursacht, die mehrere Grade über dem aktuellem Temperaturniveau liegt
- Staaten arbeiten eigene Klimaschutzpläne aus

► Ziel der EU: Reduktion der THG-Emissionen um 80%-95% gegenüber 1990

► Deutschland: Klimaschutzplan 2050

- Reduktion gegenüber 1990 um 40% bis 2020, 55% bis 2030, 70% bis 2040 und 80% bis 2050; Aber Konsens, dass 90%-95% das Ziel ist
- Aber: Für das Pariser Abkommen muss es schneller gehen!



► Reduktion der Verbrennung fossiler Energieträger

- Stromerzeugung
 - Kohle, Öl, Erdgas
- Wärmeerzeugung
 - Kohle, Öl, Erdgas
- Verkehr
 - Benzin, Diesel, Autogas



► Energieträger haben unterschiedlichen Heiz-/Brennwert und verursachen unterschiedlich viel CO₂

■ Quellen

- CO₂: <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.523833.de>
- Heizwert: <https://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert>

Brennstoff	Heizwert	CO ₂ -Gehalt (kg CO ₂ /kWh)
Rohbraunkohle	2,2–2,6 kWh/kg	0,407
Rohsteinkohle	7–9 kWh/kg	0,335
Heizöl/Benzin	8,7 kWh/l	0,266
Erdgas	8,6–11,4 kWh/m ³	0,202

► CO₂-Rechner

- <http://www.iwr.de/re/eu/co2/co2.html>
- <https://rechneronline.de/co2-ausstoss/>



- ▶ Quelle: <https://spritrechner.biz/co2-rechner-fuer-autos.html>
- ▶ Klassische Verkehrsmittel
 - Reisebus: 20 g/km pro Person
 - Bahn: 40 g/km pro Person
 - Mittelklasse-Pkw: 150 g/km pro Person
 - Flugzeug: 380 g/km pro Person
 - Ähnliche Quellen mit Auslastungsangabe:
<https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0>
- ▶ Elektro-Pkw
 - Ohne Ökostrom: 100 g/km pro Person
 - Ohne Ökostrom und Leichtbau: 50 g/km pro Person
 - Mit Ökostrom: 7 g/km pro Person
 - Mit Ökostrom und Leichtbau: 4 g/km pro Person
- ▶ Mehr zu Elektro-Pkws
 - Stromverbrauch: 15 bis 30 kWh/100 km
 - Batteriekapazität: 30 bis 110 kWh
- ▶ Großes Einsparpotential durch Elektro-Fahrzeuge, aber
 - Ökostrom-Voraussetzung
 - Produktion der Fahrzeuge erfordert auch Energie
 - Batterien verursachen auch Probleme
 - <https://www.spiegel.de/auto/elektroauto-kaufen-reichweite-laden-kosten-praemie-foerderung-a-08105f59-4a17-4692-8cee-80ce89c3ba57>
(16.7.2020)
- ▶ Es gibt andere Seiten mit anderen absoluten Zahlen
 - <https://www.tu-braunschweig.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=108675&token=9771fcf4b049a113d89ce81e9d60dbd8bfb9382e>
 - <https://www.atmosfair.de/de/kompensieren/flug/>



- ▶ Gaszähler gibt nur m³ an; Umrechnung m³ -> kWh
 - <https://heizung.de/heizung/tipps/umrechnung-m3-in-kwh-kubikmeter-in-kilowattstunden/>
 - Volumen x Heiz-/Brennwert x Zustandszahl = Energiemenge
 - 1000 m³ x 10 kWh/m³ x 0,95 = 9500 kWh
- ▶ Gasverbrauch von Einfamilienhäusern und CO₂-Ausstoß
 - Quelle: <https://www.energieheld.de/blog/energieverbrauch-eines-wohnhauses/#Gasverbrauch>
 - Passivhaus: 2000 kWh/a; 400 kg CO₂/a; 2666 Pkw km
 - Gut gedämmt: 10000 kWh/a; 2000 kg CO₂/a; 13333 Pkw km
 - Mittel gedämmt: 15000 kWh/a; 3000 kg CO₂/a; 20000 Pkw km
 - Schlecht gedämmt: 30000 kWh/a; 6000 kg CO₂/a; 40000 Pkw km
- ▶ Heizperiode nur halbes Jahr
 - Gut (schlecht) gedämmt: 11 (33) kg CO₂/Tag, 73 (219) Pkw km
- ▶ Größere und ältere Gebäude benötigen ein Vielfaches der Energie



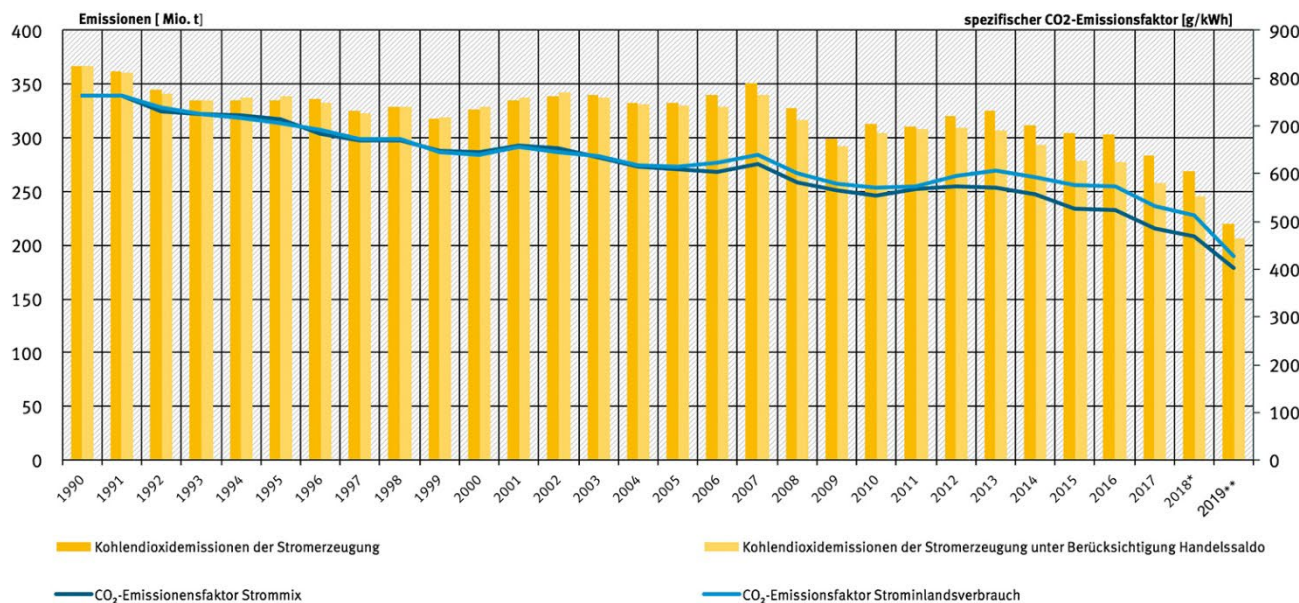
- ▶ Dämmung durch Sanierung
 - Fenster, Dach, Kellerdecke (von unten), Außenfassade (hält 30-40 Jahre)
- ▶ Moderne Heizung und sinnvolle Voreinstellung
 - Brennwerttherme
 - Geothermie (Wärmepumpe, nur bei gut gedämmten Häusern möglich)
 - Hydraulischer Abgleich (sorgt für gleichmäßige Wärmeverteilung)
- ▶ Nachhaltiger Betrieb
 - Moderate Raumtemperatur
 - Niedrige Vorlauftemperatur
 - Reduziert Verluste im Heizsystem aber begrenzt auch Maximaltemperatur in Räumen
 - Nachtabsenkung bei schlecht gedämmten Gebäuden
 - Räume gezielt heizen
- ▶ Viele Unigebäude sind alt und nicht gut gedämmt
 - Temperaturabsenkung während der Ferien
 - Die Uni propagiert das explizit!



► Anteil erneuerbarer Stromquellen steigt seit 1990: **ca. 60% in 2025**

- <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>
- Bundesdurchschnitt kg CO₂/kWh geht zurück
- Wert für 2019: 0,401 kg CO₂/kWh

Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2018 und erste Schätzungen 2019 im Vergleich zu CO₂-Emissionen der Stromerzeugung



2018* vorläufig 2019** geschätzt

Quellen: Umweltbundesamt eigene Berechnungen Februar 2020

Jahr	Kohlendioxid-emissionen der Stromerzeugung (Mio. t)	CO ₂ -Emissionsfaktor Strommix [g/kWh]	CO ₂ -Emissionsfaktor Strominlandsverbrauch [g/kWh]	Kohlendioxid-emissionen der Stromerzeugung unter Berücksichtigung Handelsaldo (Mio. t)
1990	366	764	763	367
1991	361	764	765	361
1992	345	730	739	341
1993	335	726	725	335
1994	335	722	718	337
1995	335	713	706	338
1996	336	685	692	332
1997	325	669	673	323
1998	329	671	672	329
1999	318	647	646	319
2000	327	644	640	329
2001	336	659	656	337
2002	338	654	646	343
2003	340	634	638	338
2004	333	614	617	331
2005	333	610	616	330
2006	339	603	622	329
2007	351	621	640	340
2008	328	581	602	316
2009	299	566	580	292
2010	313	555	570	305
2011	310	568	572	308
2012	321	573	595	309
2013	326	572	606	307
2014	312	557	593	293
2015	304	527	575	279
2016	304	523	572	277
2017	283	485	533	258
2018*	269	468	512	246
2019**	219	401	427	206

2018* vorläufig 2019** geschätzt



Anzahl Personen	Durchschnittlicher Verbrauch	Sparsamer Verbrauch
1	ca. 1500 kWh/a	800 – 1300 kWh/a
2	ca. 2500 kWh/a	1300 – 2100 kWh/a
3	ca. 3500 kWh/a	1700 – 2600 kWh/a
4	ca. 4250 kWh/a	1900 – 2900 kWh/a

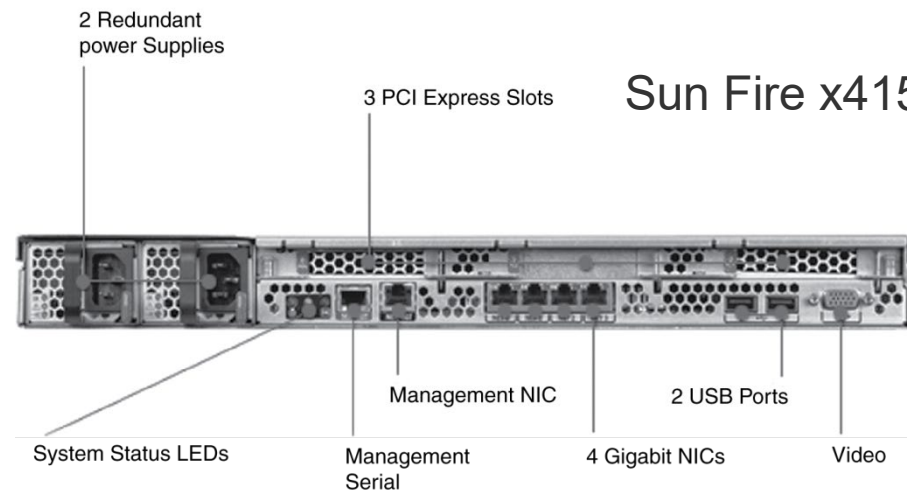
- ▶ Quelle: <https://www.check24.de/strom/stromverbrauch/>
- ▶ Zur Orientierung: 1000 kWh; 401 kg CO₂; 2673 Pkw km
- ▶ Einsparmöglichkeiten
 - Energiesparlampen, effiziente Haushaltsgeräte (Kühlschrank!)
 - Geräte ausschalten, wenn nicht benötigt
 - Kein Standby
 - Achtung bei IoT!



- ▶ Annahme: 401 g CO₂/kWh
 - <https://rechneronline.de/co2-ausstoss/emissionsfaktor.php> verwendet noch 600 g CO₂/kWh
- ▶ Laptop: 20 W
 - Pro Tag: 0,48 kWh, 192 g CO₂; 1,28 Pkw km
- ▶ Desktop: 100 W
 - Pro Tag: 2,4 kWh, 962 g CO₂; 6,4 Pkw km
- ▶ Betrieb eines kleinen Rechnerraums mit 1000 W über die Ferien
 - 336 kWh, 135 kg CO₂, 898 Pkw km
- ▶ Betrieb eines Servers mit 300 W über ein Jahr
 - 2628 kWh, 1054 kg CO₂, 7026 Pkw km
- ▶ Betrieb eines Rechnerclusters mit 500 Knoten à 100 W pro Jahr
 - 438 MWh, 176 t CO₂, 1,17 Mio Pkw km, 11,6 mal mit Flugzeug um die Erde (eher mal 2 oder 3, weil noch Overhead dazukommt)
- ▶ Geräte ausschalten, wenn nicht benötigt!



- ▶ Server equipment built for 19" racks
 - Multiples of 1.75" (1U) high
- ▶ Racks require
 - Lots of energy
 - Lots of cooling



Sun Fire x4150 1U server



- ▶ Datacenters benötigen Energie für
 - Betrieb der Maschinen
 - Kühlung und Sonstiges
 - Overhead kann groß sein
- ▶ Power Usage Efficiency (PUE)
 - Kennzahl für Effizienz von Datacenters
 - Insgesamt benötigte Energie / Energie für Betrieb der Maschinen
 - <https://www.datacenter-insider.de/was-ist-eigentlich-power-usage-effectiveness--pue-a-663864/>
 - Werte von 2 sind durchschnittlich
 - Werte von 1,5 sind effizient
 - Werte von 1,2 oder kleiner sind sehr effizient
- ▶ Große Datacenters (laut Werbung)
 - Üblicherweise niedrige PUE
 - Gute Auslastung (Abschalten nicht benötigter Komponenten)
 - Oft mit erneuerbarer Energie betrieben



Von Festus - Template:Hetzner Online AG, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24777944>



- ▶ Die meisten Öko-Tarife beim Strom helfen nicht
 - Was der eine Kunde rechnerisch mehr an grünem Strom bekommt, kriegt der andere mehr an grauem Strom
- ▶ Es gibt wenige Labels, die nur an Anbieter vergeben werden, die tatsächlich den Ausbau regenerativer Energiequellen fördern
- ▶ Quellen
 - <https://www.codecheck.info/news/Wie-gruen-ist-Oekostrom-wirklich-247258>
 - <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/preise-tarife-anbieterwechsel/ist-ein-tarif-mit-oekostrom-und-oekogas-ueberhaupt-sinnvoll-8207>
- ▶ EEG-Umlage (seit 1.7.22 weggefallen)
 - Jeder Haushalt zahlt 6,4 Cent pro kWh (Stand: März 2019) und somit gut 20 Prozent des Strompreises.
 - Durch dieses System der Förderung gibt es in Deutschland bereits einen hohen Anteil Ökostrom im allgemeinen Strommix – rund 40 Prozent.



- ▶ CO₂-Emission einsparen, wo's nicht wehtut!
 - Auch wenn eigene finanzielle Anreize fehlen:
In der Uni, auf der Arbeit!
- ▶ Heizen wird benötigt – aber in Maßen!
 - Frieren ist nicht gut
 - Schimmel kann entstehen
 - Stoßlüften ist wichtig
- ▶ Geräte ausschalten, wenn nicht benötigt, aber nicht zu oft ein- und ausschalten
 - Könnten kaputtgehen
- ▶ Server nicht ausschalten, wenn
 - Wichtige Dienste drauf laufen
 - Andere Leute drauf rechnen
- ▶ Videokonferenz anstatt Dienstreise?
 - Wichtige Dienstreise notwendig
 - Manchmal Grundlage für Aufträge
- ▶ Forschung ist wichtig
 - Auch wenn sie Energie kostet.
 - Mit Augenmaß?
- ▶ Private Einsparung ist nicht genug
 - Kann das Klima nicht retten
 - Politik muss geeignete Rahmenbedingungen für eine effektive Reduktion der gesamten, globalen CO₂-Emission zu schaffen



► Titel: Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken

- https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf

► Schlussfolgerung

- Vergleich bestehender Studien
- **Herstellung, Betrieb und Entsorgung digitaler Endgeräte und Infrastrukturen verursacht 1,8-3,2% der weltweiten THG-Emissionen**
- Wird v.a. durch viele Endgeräte verursacht
 - Herstellung der Geräte hat steigenden Anteil
 - THG-Emissionen in 2020 durch
 - Endgeräte: 900 bis 1100 Mt CO₂
 - Rechenzentren und Netze: 200 bis 250 Mt CO₂
- Erwartete THG-Emissionen in der nächsten Dekade
 - Deutliche Zunahme
 - Weiter wachsende digitale Infrastrukturen (Rechenzentren, Netze)
 - Mehr Endgeräte
 - Senkung möglich
 - Durch Ausnutzung von Reduktionspotential



- ▶ Wichtigste Hebel zur Reduktion der THG-Emissionen
 - Konsequente Ausschöpfung von bestehenden und neuen Energieeffizienzpotenzialen
 - Betrieb der digitalen Infrastrukturen mit erneuerbaren Energien
 - Verringerung der THG-Emissionen in der Herstellung von Endgeräten
 - Verlängerung der Nutzungsdauer von Endgeräten
- ▶ Verringerung von THG-Emissionen durch IT in anderen Sektoren
 - Energie (Elektrizität und Wärme), Gebäude, Transport
 - Evtl. in der Landwirtschaft (Potential unklar)
 - Konkretes Beispiel: Steuerung der Energienachfrage zugunsten der Integration erneuerbarer Energiequellen (Laststeuerung)
- ▶ Erschließung der Potenziale benötigt zielgerichtete Maßnahmen, koordinierte Umsetzung durch Gesetzgeber, Unternehmen und Privathaushalte



- ▶ <https://www.tecchannel.de/a/server-so-klimaschaedigend-wie-gelaendewagen,1740919>
 - CO₂-Ausstoß der IT 2% vom Gesamt-Ausstoß, soviel wie Luftfahrt
- ▶ Ericsson Studie
 - 1,4% vom Gesamt-Ausstoß und weniger als Luftfahrt
 - <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/industry-lab/reports/a-quick-guide-to-your-digital-carbon-footprint>
- ▶ <https://www.industry-of-things.de/mit-digitalen-technologien-den-co2-ausstoss-begrenzen-a-931369/>
 - Digitalisierung kann zur CO₂ Reduktion beitragen
 - Aber IT selber muss noch effizienter werden
 - 2025 könnten Rechenzentren 20% des Stromverbrauchs verursachen
 - Treiber: IoT, große Datenmengen, KI
- ▶ Prognose: Anteil des Gesamtstromverbrauchs durch Datacenter in US 9% bis 2030
 - <https://www.reuters.com/business/energy/data-centers-could-use-9-us-electricity-by-2030-research-institute-says-2024-05-29/>

KI sagt: IT
verbraucht aktuell
10-11% des Stroms
und verursacht ca.
2% des CO₂-
Ausstoßes.



▶ Weltweit jährlich

- Etwa 800 Mio. t CO₂ nur durch IT
- Deutschland insgesamt „nur“ 720 Mio. t CO₂

▶ Deutschland in 2018

- 14 Mrd. kWh Strom nur für Rechenzentren
- 55 Mrd. kWh für Netzwerk-Infrastruktur
- Entspricht etwa 33 Mio. t CO₂, mehr als innerdeutscher Flugverkehr

▶ Beispiel Google

- Eigene Angabe: 0,2 g CO₂ pro Anfrage
- 3,45 Mrd. Anfragen täglich

▶ Ca. 1 g CO₂ pro Email

▶ Eine Stunde Videostreaming etwa so wie 1 km Auto fahren

▶ **Auch Informatiker müssen sich mit Klimawandel auseinandersetzen**



- ▶ Verteiltes Währungssystem ohne zentrale Stelle, ohne Banken oder Konten
- ▶ Menge an Bitcoins begrenzt
- ▶ Bitcoins können übertragen werden
- ▶ Nachweis des Besitzes durch kryptografische Verfahren
- ▶ Nutzt Blockchain zum Nachweis getätigter Transaktionen
- ▶ Bestätigung der Transaktionen durch Teilnehmer
 - Sicherheit durch Aufwand für Bestätigungen erreicht
 - Teilnehmer bekommen für Arbeit Bitcoins („Schürfen“)
 - Entspricht Lösen mathematischer Puzzles
- ▶ Schürfen muss aufwendig sein
 - Angreifer muss Mehrheit der Rechenleistung kontrollieren, um Blockchain zu kompromittieren
 - Mehrheit der Rechenpower unbezahlbar
 - Sicherheit basiert auf Aufwändigkeit des Schürfens
- ▶ Schürfen mit Spezialhardware
 - Farmen mit 1000en Grafikkarten und ASICs
 - Hoher Energieverbrauch



► Energieverbrauch für Bitcoins

- Stand November 2018
- Jährlicher Stromverbrauch: 45,8 Mrd. kWh
 - Entspricht 22,9 Mio. t CO₂
 - Ist etwa Hälfte der CO₂-Emission der Schweiz
- Pro Transaktion ~220 kWh
 - 10% des Jahresverbrauchs einer sparsamen 4-köpfigen Familie in Deutschland

► Leistungsvergleich

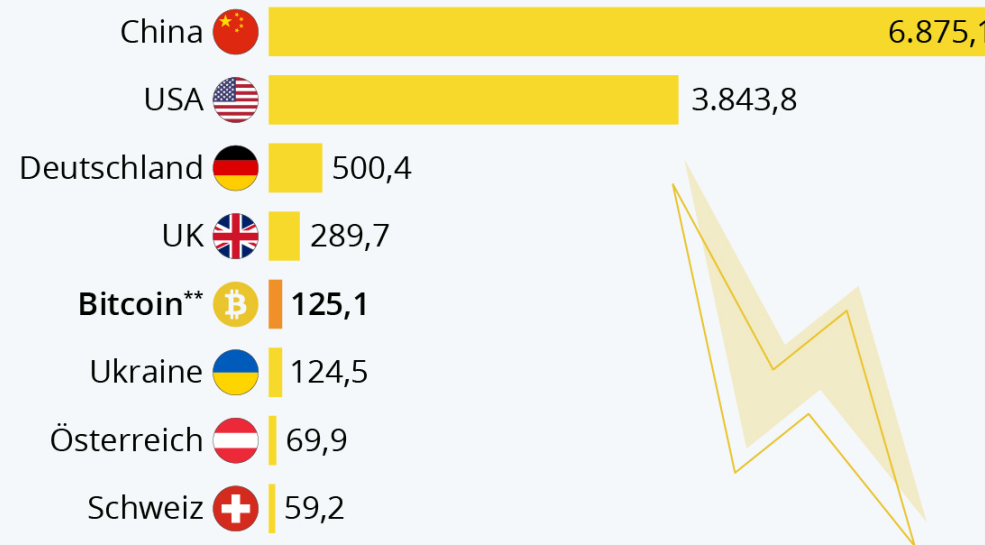
- Visa
 - Ca. 56000 Visa-Transaktionen pro Sekunde
 - Bestätigungszeit wenige Sekunden
- Bitcoin
 - 2-6 Bitcoin-Transaktionen pro Sekunde
 - Bestätigungszeit dauert mindestens 40 min
 - Energieverbrauch pro Transaktion etwa 460000 höher als bei VISA

Informatiker*in, denk nach, ehe du ein neues System baust!
Ist es performant, ist es nachhaltig?



Bitcoins Stromverbrauch übertrifft den der Ukraine

Geschätzter Stromverbrauch pro Jahr (in TWh)*



* Werte für die Länder beziehen sich auf das Jahr 2019 (2020 wo verfügbar)

** Stand: Februar 2022

Quelle: University of Cambridge | Bitcoin Electricity Consumption Index



statista



► Zement

- <https://www.chemietechnik.de/klimabilanz-der-zementindustrie/>
 - Herstellung: 1 kg CO₂ / kg
 - 4-8% der weltweiten CO₂-Emission
- statista: 0,56 kg CO₂ / kg

► Stahl

- Herstellung: 1,7 kg CO₂ / kg
 - <https://www.faz.net/asv/zukunft-stahl-2018/saubere-stahlerzeugung-15636036.html>
 - <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiewende-in-der-industrie.html>
- 5% der weltweiten CO₂-Emission
 - <https://www.trendsderzukunft.de/weniger-co2-dieses-startup-will-die-stahlproduktion-gruener-machen/>

- ▶ Tiere stoßen viel Methan aus, das kann in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden (CO₂e).
- ▶ <https://www.bmu.de/themen/wirtschaft-produkte-ressourcen-tourismus/produkte-und-konsum/produktbereiche/konsum-und-ernaehrung/>
(TK=Tiefkühlprodukt)
- ▶ Halbierung des Fleischkonsums ~ 1,1% der CO₂-Emission in DE 1990
 - <https://www.agrarheute.com/land-leben/faktencheck-so-klimaschaedlich-fleisch-wirklich-542531>

Lebensmittel	CO ₂ e g/kg	Pkw km/kg	Lebensmittel	CO ₂ e g/kg	Pkw km/kg
Gemüse frisch	153	1,02	Milch	940	6,27
Gemüse TK	415	2,77	Joghurt	1231	8,21
Gemüse Konserve	511	3,41	Quark & Frischkäse	1929	12,86
Tomaten	339	2,26	Sahne	7631	50,87
Kartoffeln frisch	199	1,33	Käse	8512	56,75
Pommes-frites TK	5728	38,19	Eier	1931	12,87
Brötchen, Weißbrot	661	4,41	Geflügel	3508	23,39
Mischbrot	768	5,12	Schwein	3252	21,68
Teigwaren	919	6,13	Rind	13311	88,74
Feinbackwaren	938	6,25	Plus für TK-Fleisch	1030	6,87



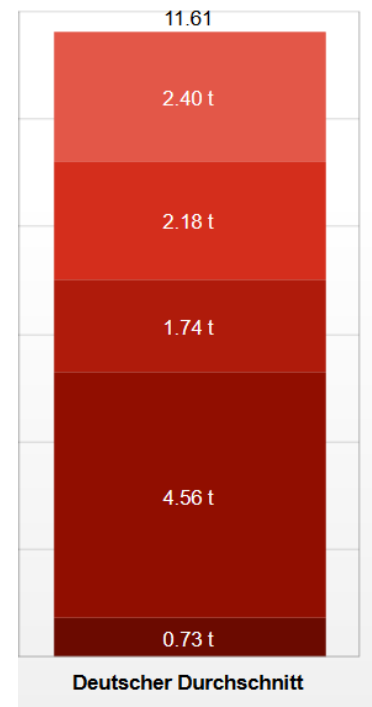
- <http://esu-services.ch/fileadmin/download/annaheim-2019-%C3%96kobilanz-Haustiere.pdf>
(S. 31/55)

Tierart	CO ₂ e t/a	Pkw km/a
Pferd	3,1	20667
Hund	1,0	6667
Katze	0,4	2667
Kaninchen	0,1	667

- Zum Vergleich: Durchschnittliche Jahresleistung pro Fahrzeug in DE ist 13600 km
- https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_inhalt.html?nn=2351536



- Vom Umweltbundesamt: https://uba.co2-rechner.de/de_DE/
 - Mobilität ist nur ein offensichtlicher Teil unseres CO₂-Fußabdrucks
 - Ernährung, Heizung und Strom sind auch signifikant
 - Sonstiger Konsum macht einen Großteil aus



CO₂-Ausstoß

Der *persönliche CO₂-Ausstoß* zeigt Ihnen, wie viel Tonnen CO₂-Äquivalente bei Ihrem heutigen Lebensstil ausgestoßen werden.

Neben CO₂ werden die Treibhausgase Methan und Lachgas berücksichtigt, die mit der entsprechenden Klimawirkung in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden. Außerdem wird die zusätzliche Klimawirksamkeit des Fliegens berücksichtigt.

Um Ihren CO₂-Ausstoß einordnen zu können, wird Ihnen zum Vergleich auch immer der *deutsche Durchschnitt* angezeigt.

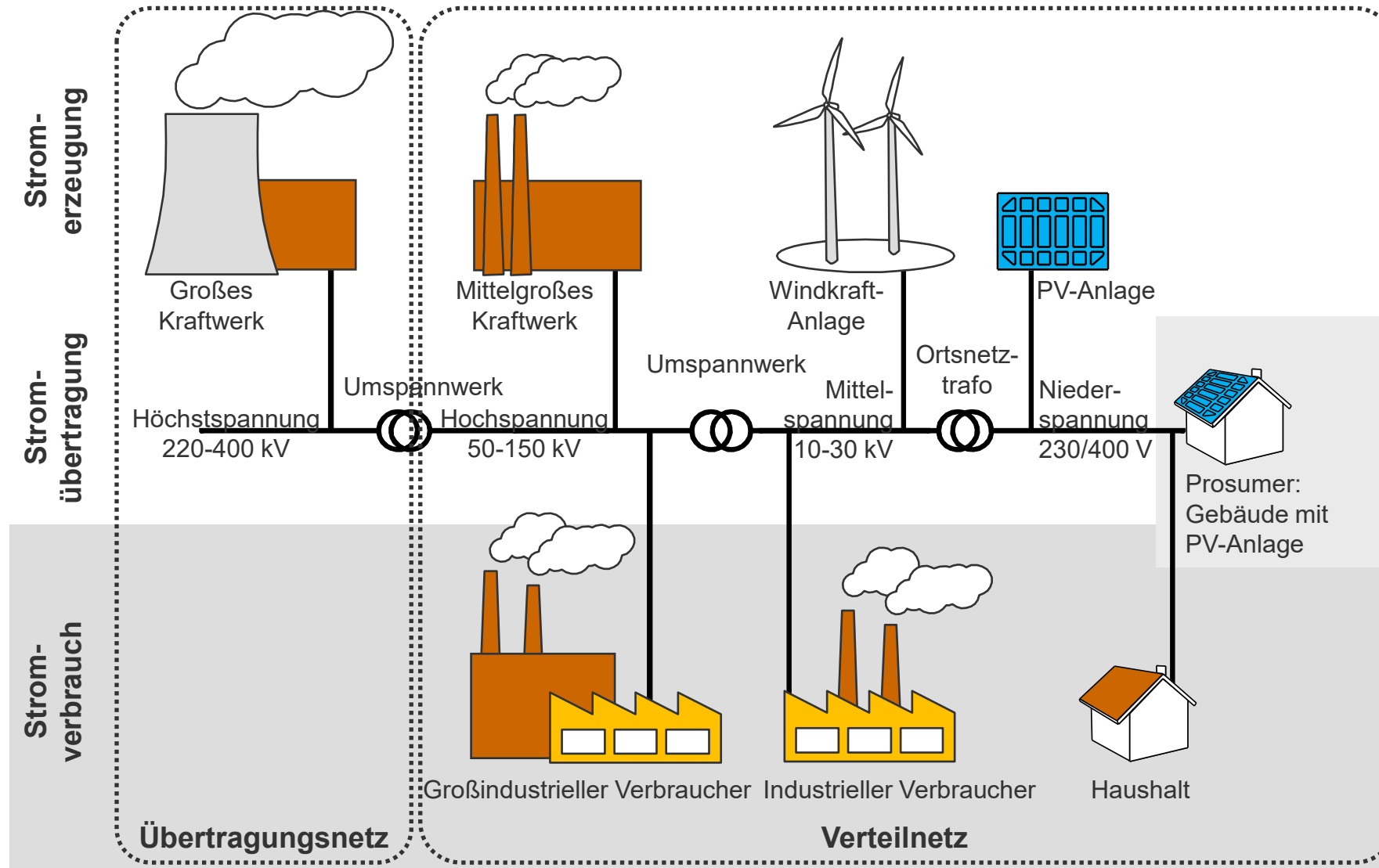
- Heizung & Strom
- Mobilität
- Ernährung
- sonstiger Konsum
- Öffentliche Emissionen



- ▶ Guter Überblick
<https://www.spiegel.de/wissenschaft/klimawandel-wie-sich-die-welt-erwaermt-und-was-wir-dagegen-tun-koennen-a-ac82d4eb-8154-4f0b-9b26-28299758405f>
- ▶ Warum Wasserstoff-Antrieb für Autos keine Lösung ist
<https://www.youtube.com/watch?v=WBqNS0nQzPY>
- ▶ Grünes Ammoniak – ein alternativer, transportierbarer Energieträger?
<https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/gruenes-ammoniak-dieser-oekologische-energietraeger-schlaegt-sogar-wasserstoff-a-5012251f-35e9-4430-b122-ddaa3d4758f1>



Struktur von Stromnetzen



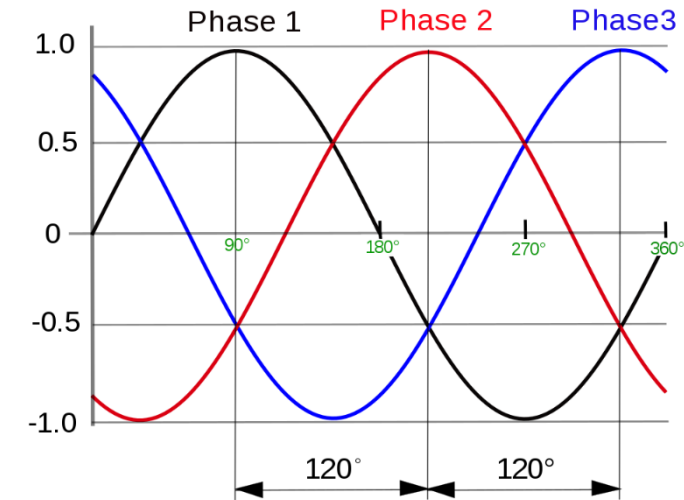


- ▶ Drehstrombasiertes Stromnetz (in Deutschland)
 - Dreiphasen-Wechselstrom
- ▶ Drehstromquellen
 - Synchrongeneratoren
 - Drehzahl entspricht der Netzfrequenz
 - Asynchrongeneratoren
 - Drehzahl abweichend von Netzfrequenz
 - Antrieb der Generatoren
 - Dampfturbinen (Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerke)
 - Gasturbinen oder Gasmotoren (Gaskraftwerke)
 - Wasserturbinen (Laufwasser- oder Speicherkraftwerke)
 - Windräder
- ▶ Gleichstromquellen
 - Photovoltaikanlagen, Brennstoffzellen, Batteriespeicher
 - Einspeisung ins Drehstromnetz über Wechselrichter



► Niederspannungsnetz

- Übertragung von 3 Phasen: L1, L2, L3
 - Sinusschwingungen
- 400 V Dreiphasenwechselstrom
 - Verwendung aller drei Phasen
 - Auch „Starkstrom“ genannt
- 230 V Einphasenwechselstrom
 - Verwendung von nur einer Phase
 - Normaler Strom im Haushalt



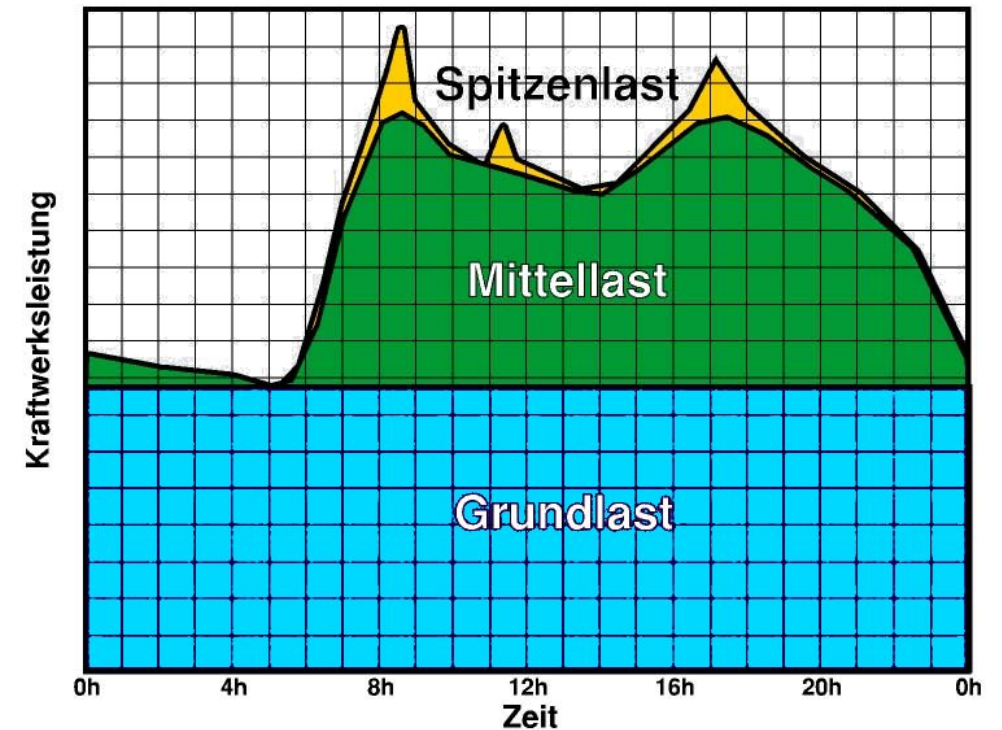
Von User:J JMesserly modification of original svg by User:SiriusA - File:3-fas-spänningar.svg, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5607023>

► Kompakte Hintergrundinfo

- https://www.rotek.at/produkte/pdf-aktuell/Stromerzeuger/Generator_Allgemein_Grundlagen-3P-Netz_Rotek_DE_Bildschirm.pdf



- ▶ Stromerzeugung muss jederzeit dem Stromverbrauch entsprechen
 - (Abzüglich Übertragungs- und Wandlungsverluste)
- ▶ Energiebedarf schwankt im Tagesverlauf
- ▶ Grundlast
 - Lastminimum wird durch Kraftwerke im Dauerbetrieb gedeckt
- ▶ Mittel- und Spitzenlast
 - Schwankender Mehrbedarf muss von flexiblen Kraftwerken gedeckt werden



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Stromnetz_Lastkurve.jpg



- ▶ Dauerbetrieb bei Volllast
- ▶ Leistung nicht oder nur geringfügig regelbar
- ▶ Lange Anfahrzeiten
 - Mehrere Stunden Vorlaufzeit
- ▶ Beispiele
 - Kohlekraftwerke
 - Kernkraftwerke
 - Laufwasserkraftwerke



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kraftwerk-Weisweiler-Luftbild.jpg>



Foto: EnBW / Daniel Meier-Gerber



► Mittellastkraftwerke

- Planbare Zu- und Abschaltung im Tagesverlauf
- Begrenzt regelbare Leistung
- Beispiel
 - Gas-und-Dampf Kombikraftwerke

► Spitzenlastkraftwerke

- Kurzfristig zu- und abschaltbar
 - Wenige Minuten Anfahrzeit
- Schnell regelbare Leistung
 - 20-100% der Nennleistung
 - Bis 20% pro Minute
- Beispiele
 - Gasturbinenkraftwerke
 - Pumpspeicherkraftwerke



Foto: Pixabay



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oberes_Speicherbecken_Eningen.jpg



- ▶ Beschleunigter Ausbau durch Förderung von Kleinanlagen
 - 5-15 kWp, Lebensdauer PV 25-30 Jahre
 - Garantierter Einspeisepreis über die nächsten 20 Jahre
 - Aktuell ca. 8 cent/kWh, nimmt für Neuanlagen in Zukunft ab
 - Interessant in Kombination mit hohem Eigenstromverbrauch
 - Zukauf von Strom teurer als Verkauf
 - Daher oft Installation von Stromspeicher
 - 5-10 kWh, Lebensdauer 10-20 Jahre
- ▶ Mittlerweile viele PV-Anlagen
 - Überproduktion zu manchen Zeiten
 - Stromnetze überlastet
- ▶ Solarspitzengesetz (seit 25.2.25)
 - Keine Einspeisevergütung mehr zu Zeiten negativer Strompreise
 - Kleine Kompensation durch Laufzeitverlängerung
 - Fernsteuerbarkeit der Anlagen
 - <https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/aktuelles/Solarspitzengesetz-in-Kraft-was-aendert-sich-fuer-neue-PV-Anlagen-4233>



Quelle: pixabay



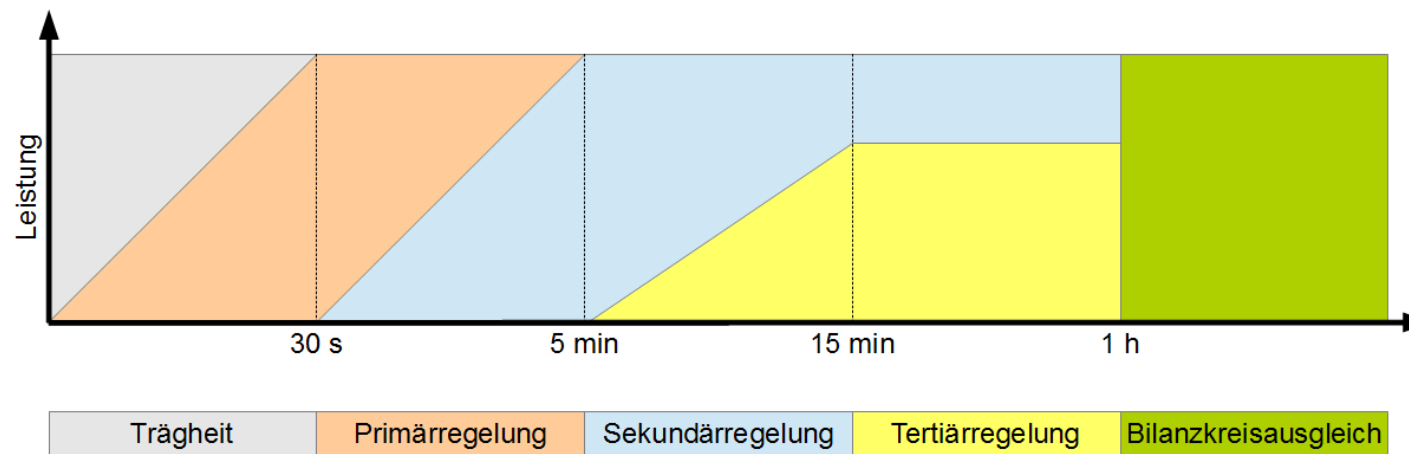
- ▶ Verhältnis von Einspeisung und Verbrauch wirkt sich auf Netzfrequenz aus
 - Sollfrequenz: 50 Hz
 - $> 50 \text{ Hz}$ → zu viel Einspeisung
 - $< 50 \text{ Hz}$ → zu viel Verbrauch

- ▶ Abweichung wird durch Einsatz von Regelleistung kompensiert
 - Toleranz: $\pm 20 \text{ mHz}$
 - Positive Regelleistung
 - Zuschaltbare Erzeuger
 - Abschaltbare Verbraucher
 - Negative Regelleistung
 - Abschaltbare Erzeuger
 - Zuschaltbare Verbraucher



► Regelleistung

- Primärregelung
 - Automatische Bereitstellung innerhalb von 30 s bei Frequenzabweichungen
- Sekundärregelung
 - Bereitstellung innerhalb von 5 min nach Abruf
- Minutenreserve
 - Bereitstellung innerhalb von 15 min nach Abruf



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schema_Einsatz_von_Regelleistung.png CC-BY-SA 3.0 DF5GO

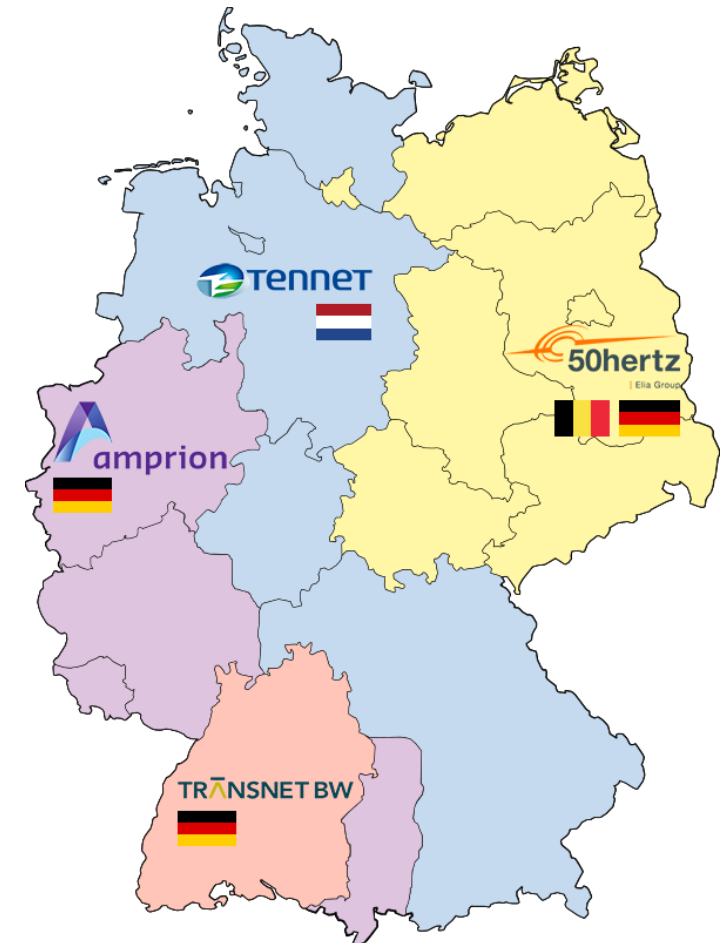


► Netzregelverbund

- 4 Regelzonen der Übertragungsnetzbetreiber
- Unterteilung der Regelzonen in Bilanzkreise

► Bilanzierung und Ausgleich

- Ausgleich innerhalb der Bilanzkreise
- Ausgleich zwischen Bilanzkreisen einer Regelzone
- Ausgleich zwischen Regelzonen im Netzregelverbund
- Einsatz von Sekundärregelleistung und Minutenreserve



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Regelzonen_mit_Übertragungsnetzbetreiber_in_Deutschland.png
CC-BY-SA 3.0 Francis McLloyd



► Bilanzkreis

- Kleinste Einheit des Energiesystems in der Einspeisung und Entnahme ausgeglichen sein sollen

► Bilanzkreisverantwortlicher (z.B. Stadtwerk)

- Erstellt Prognose über Erzeugung und Bedarf im Bilanzkreis
- Kauft oder verkauft Strommengen an den Energiemärkten
- Meldet „Fahrplan“ an den Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB)

► Fahrplanabweichungen

- Regelenergie zum Ausgleich wird ggf. durch ÜNB angefordert
- Angefallene Kosten für Regelenergie werden als „Ausgleichsenergie“ auf die jeweiligen Bilanzkreise umgelegt



► Terminmarkt

- Langfristige Lieferverträge (Monate bis Jahre vor Lieferzeitpunkt)

► Spotmarkt

▪ Day-Ahead-Handel

- Auktion am Vortag der Lieferung
- Handel in Stundenblöcken
- Markträumungspreis
 - Preis des höchsten bezuschlagten Gebots gilt für alle

<https://flex-power.energy/de/school-of-flex/strompreisbildung/>

▪ Intraday-Handel

- Echtzeithandel von 60- und 15-min-Blöcken
- Bis 5 min vor Lieferzeitpunkt
- Pay-as-bid

► OTC-Handel

- Außerbörslicher Stromhandel (Over-the-Counter)
- Bilaterale Verträge bis 15 min vor Lieferzeitpunkt
- Hintergrundinformation: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/otc-handel>

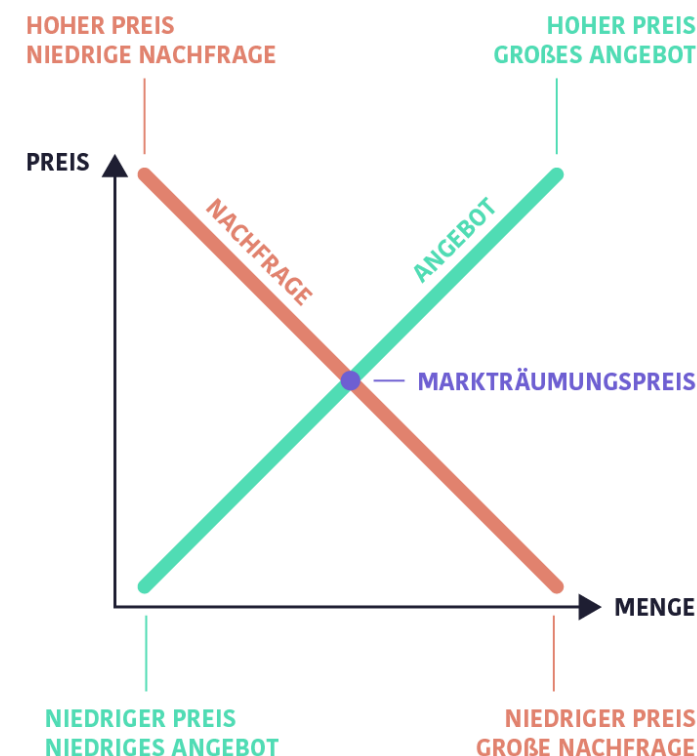


Markträumungspreis / Market Clearing Price (MCP)

- ▶ <https://www.bdew.de/online-magazin-zweitausend50/geld/strom-und-energie-warum-dieser-preis/>
- ▶ <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/merit-order>
- ▶ Das Merit-Order Prinzip (engl. Reihenfolge der Vorteilhaftigkeit)
 - Ordne die Energienachfragen fallend nach dem Preis, den Käufer bereit sind zu zahlen
 - Ordne die Energieangebote steigend nach dem Preis, den Erzeuger bereit sind zu akzeptieren
 - Der Schnittpunkt der Kurven ergibt den Markträumungspreis, zu dem jegliche Energie dann ge-/verkauft wird.
 - Niedrigere Nachfragen und höhere Angebote werden nicht bedient.
- ▶ Anmerkungen
 - Das Merit-Order Prinzip ist keine gesetzliche Vorgabe, sondern beschreibt wie sich ein kurzfristiger Stromhandel verhält.
 - Das Merit-Order-Prinzip berücksichtigt nur die laufenden Produktionskosten – die sind bei erneuerbaren Energien sehr gering, so dass die Erneuerbaren die „grüne Kurve“ nach rechts schieben.
 - Teurer Gas-Strom führt in der Dunkelflaute zu hohen Strompreisen.

PREISFINDUNGSVERFAHREN NACH DEM MERIT-ORDER-PRINZIP

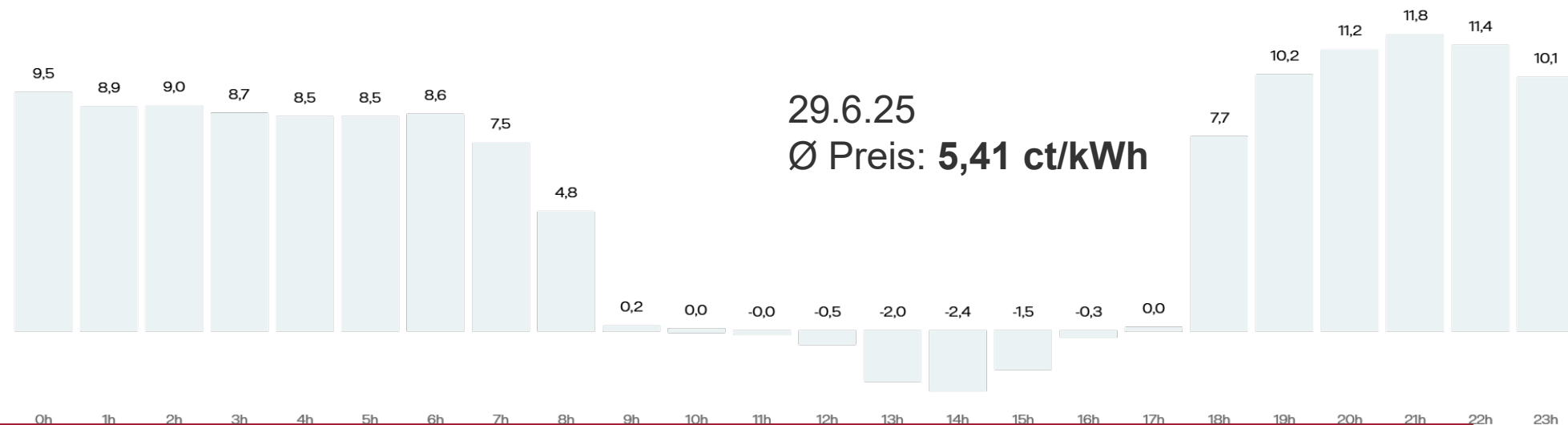
Im Zusammenspiel von preisabhängigem Angebot und Nachfrage entsteht der Markträumungspreis.





Strompreise am Day-Ahead-Markt

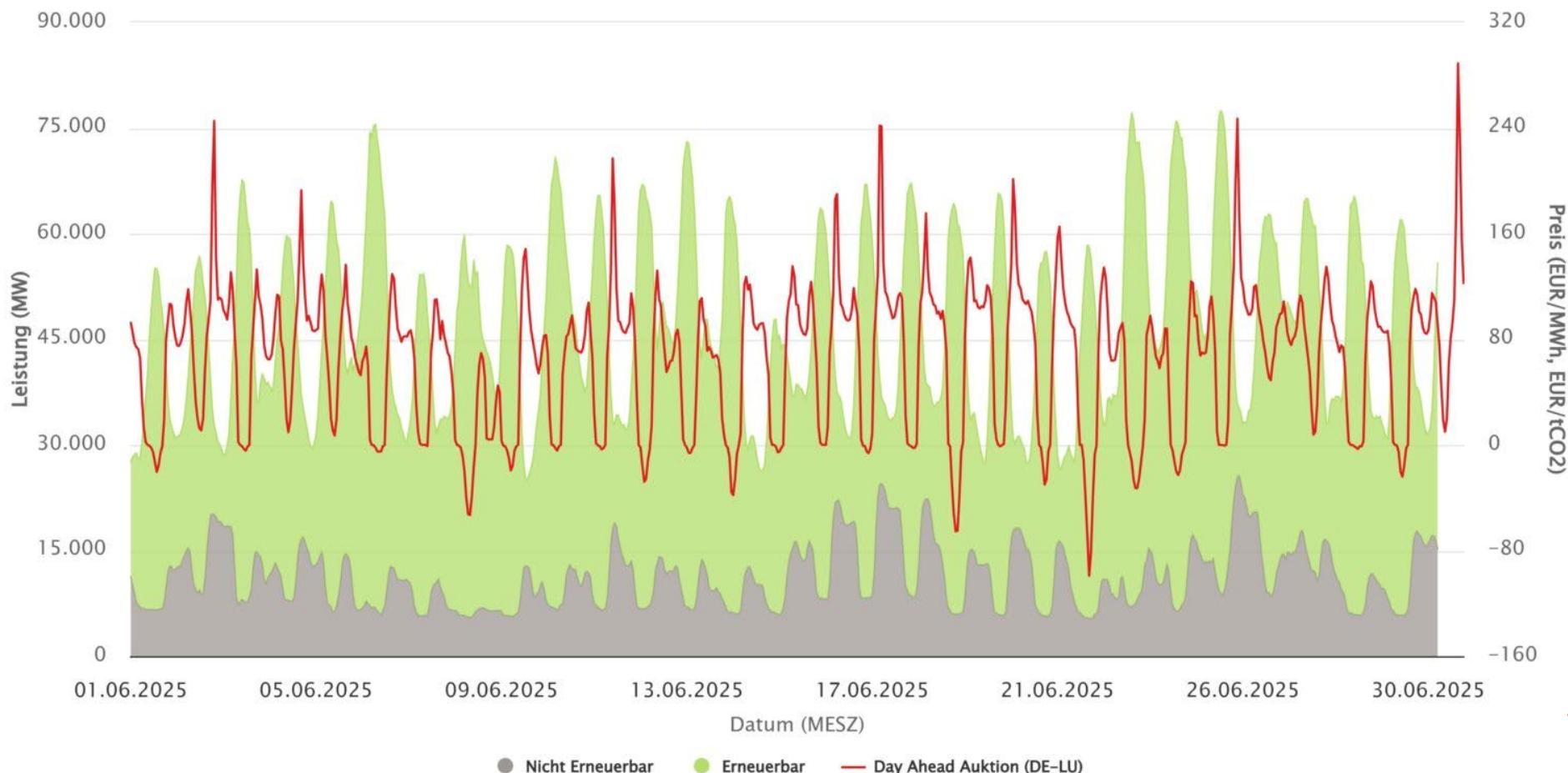
► Quelle: <https://www.vattenfall.de/strom/tarife/oekostrom-dynamik-boersenpreise>



Negative
 Strompreise möglich,
 v.a. an
 Wochenenden und
 an Tagen mit starker
 Sonneneinstrahlung



Stromproduktion und Börsenstrompreise in Deutschland im Juni 2025



Energy-Charts.info; Datenquelle: ENTSO-E, Netztransparenz, EPEX SPOT; Letztes Update: 30.06.2025, 10:12 MESZ

Day-ahead-Strompreise in 389 Stunden negativ im ersten Halbjahr

Im Juni kamen weitere 141 Stunden mit negativen Börsenstrompreisen hinzu. Der Wert lag nur marginal unter dem Rekord vom Mai. Allein im ersten Halbjahr gab es fast so viele Stunden mit negativen Day-ahead-Strompreisen wie im gesamten Jahr 2023.

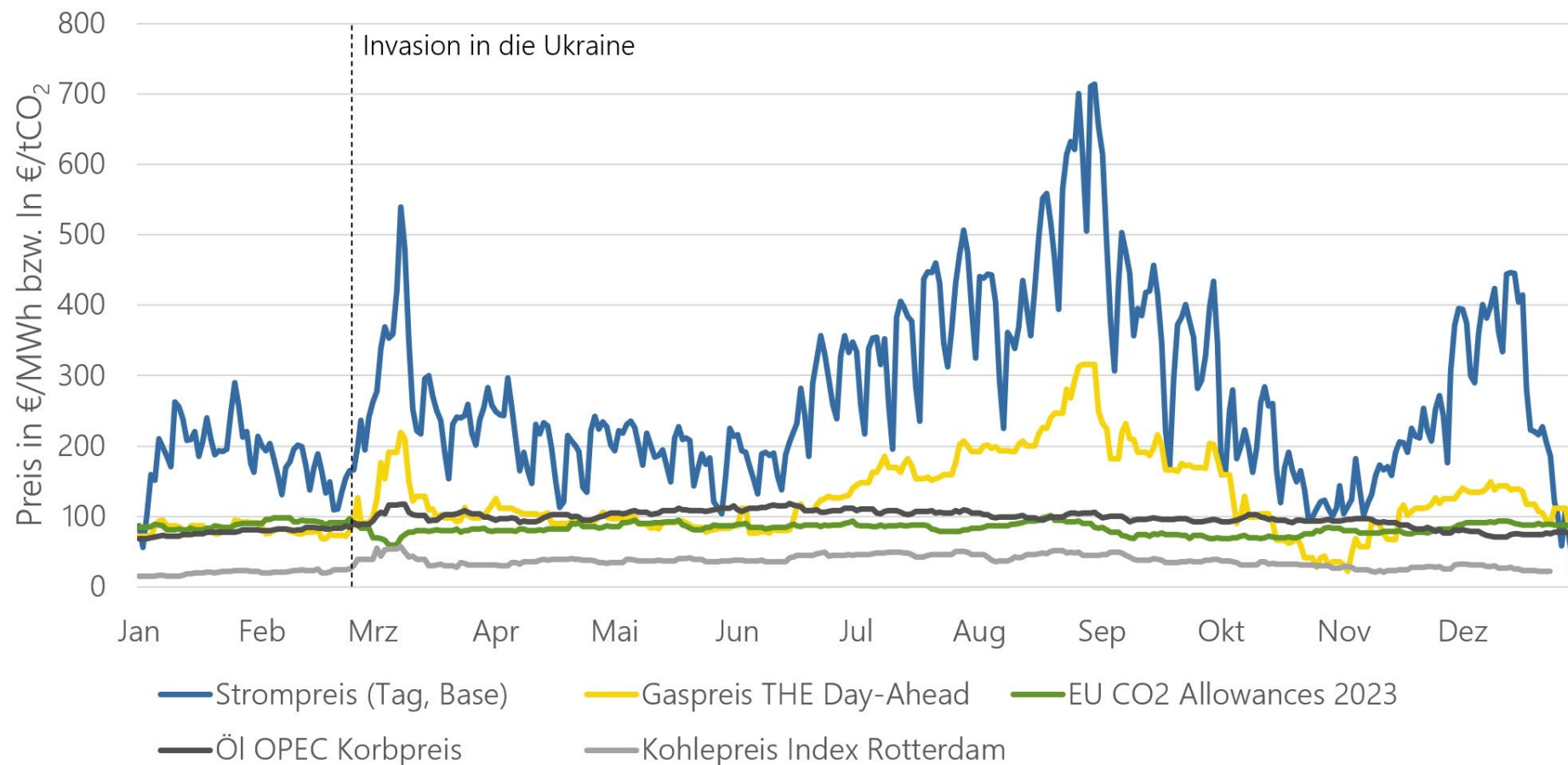
Energy-Charts: https://www.energy-charts.info/charts/price_spot_market/chart.htm?l=de&c=DE&legendItems=3x0r0&interval=month&year=2025&month=06

<https://www.pv-magazine.de/2025/06/30/day-ahead-strompreise-in-389-stunden-negativ-im-ersten-halbjahr/>



Abhängigkeit des Strompreises vom Gaspreis

Strompreisexplosion während der Gaskrise 2022



Quelle: https://www.pv-magazine.de/wp-content/uploads/sites/4/2023/01/Abb2-2_Vergleich_Strom_Gas_CO2.jpg

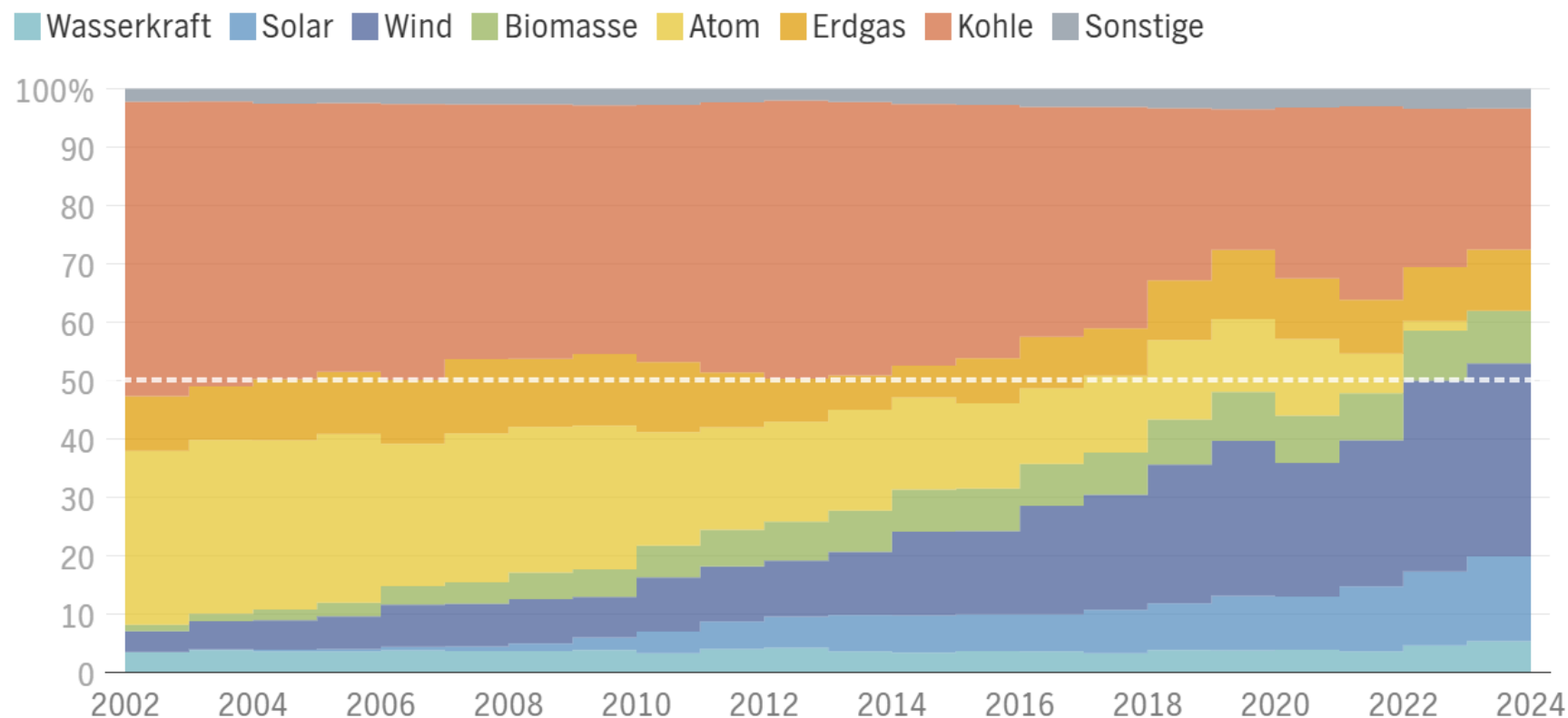


► Regelleistungsmarkt

- Energie als Netzdienstleistung
 - Ausschreibung durch Netzbetreiber
- Primärregelleistung
 - Ausschreibung jeweils für die folgende Woche
 - Vergütung nur für bereitgestellte Leistung (Leistungspreis)
 - Regelleistung muss sowohl positiv als auch negativ verfügbar sein
- Sekundärregelleistung und Minutenreserve
 - Ausschreibung täglich für 4h-Blöcke des Folgetags
 - Leistungspreis + zusätzliche Vergütung bei Abruf (Arbeitspreis)



Jährlicher Strommix seit 2002



Anteil erneuerbarer Energien im Strommix 2025 ca. 60%.

Es existieren auch andere Quellen mit leicht anderen Definitionen und Zahlen.

Unter "Sonstige" finden sich weitere erneuerbare und fossile Energieträger. Datenabruf am: 01.07.2025

Grafik: NDR Data · Quelle: [Fraunhofer ISE](#) · [Daten herunterladen](#)

<https://www.ndr.de/nachrichten/info/Strommix-Deutschland-Wie-ist-der-Anteil-erneuerbarer-Energien,strommix102.html>

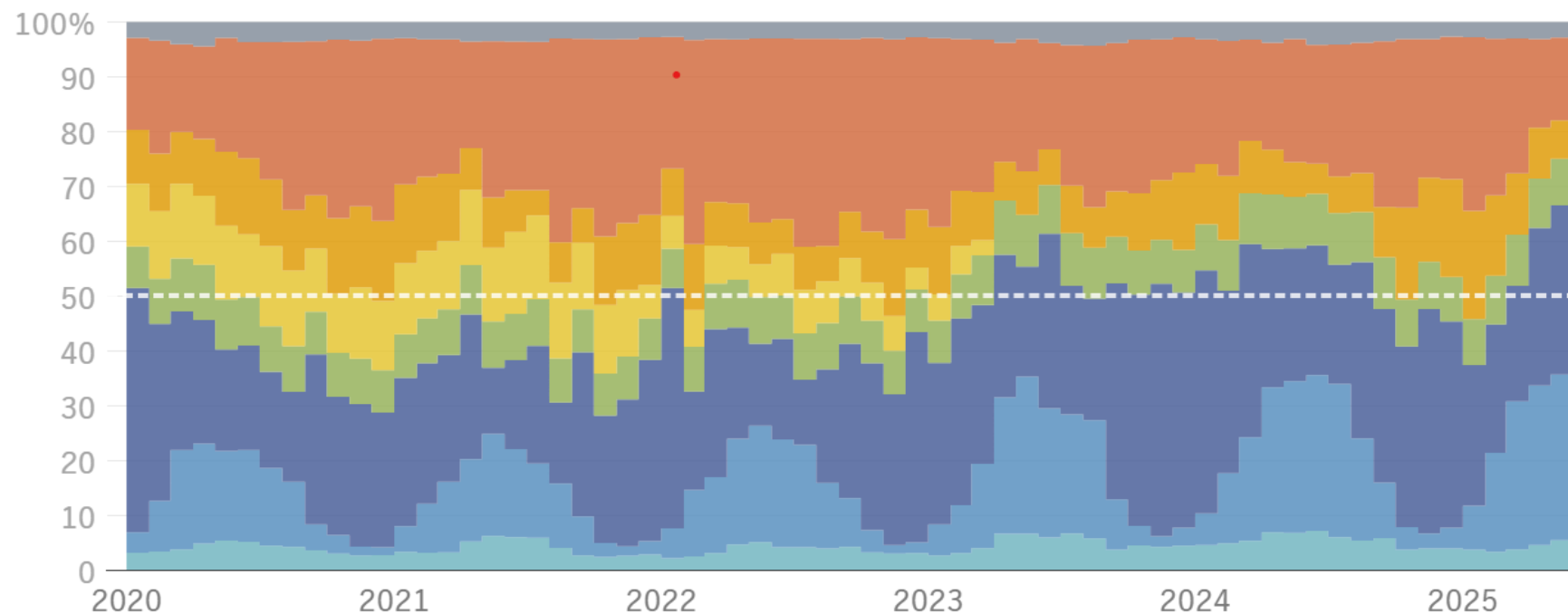


Monatlicher Strommix in Deutschland

Strommix

Erneuerbaren-Anteil

Wasserkraft Solar Wind Biomasse Atom Erdgas Kohle Sonstige



Unter "Sonstige" finden sich weitere erneuerbare und fossile Energieträger. Datenabruf am: 01.07.2025

Grafik: NDR Data · Quelle: [Fraunhofer ISE](#) · [Daten herunterladen](#)

<https://www.ndr.de/nachrichten/info/Strommix-Deutschland-Wie-ist-der-Anteil-erneuerbarer-Energien,strommix102.html>



► Konventionelle Kraftwerke

- Grundlast (z.B. Kohle, Kernkraft,...)
 - Möglichst Dauerbetrieb mit konstanter Leistung
- Mittel-/Spitzenlast (z.B. Gas-Kombikraftwerk)
 - Kurzfristig, flexibel einsetzbar

► Erneuerbare Energieträger

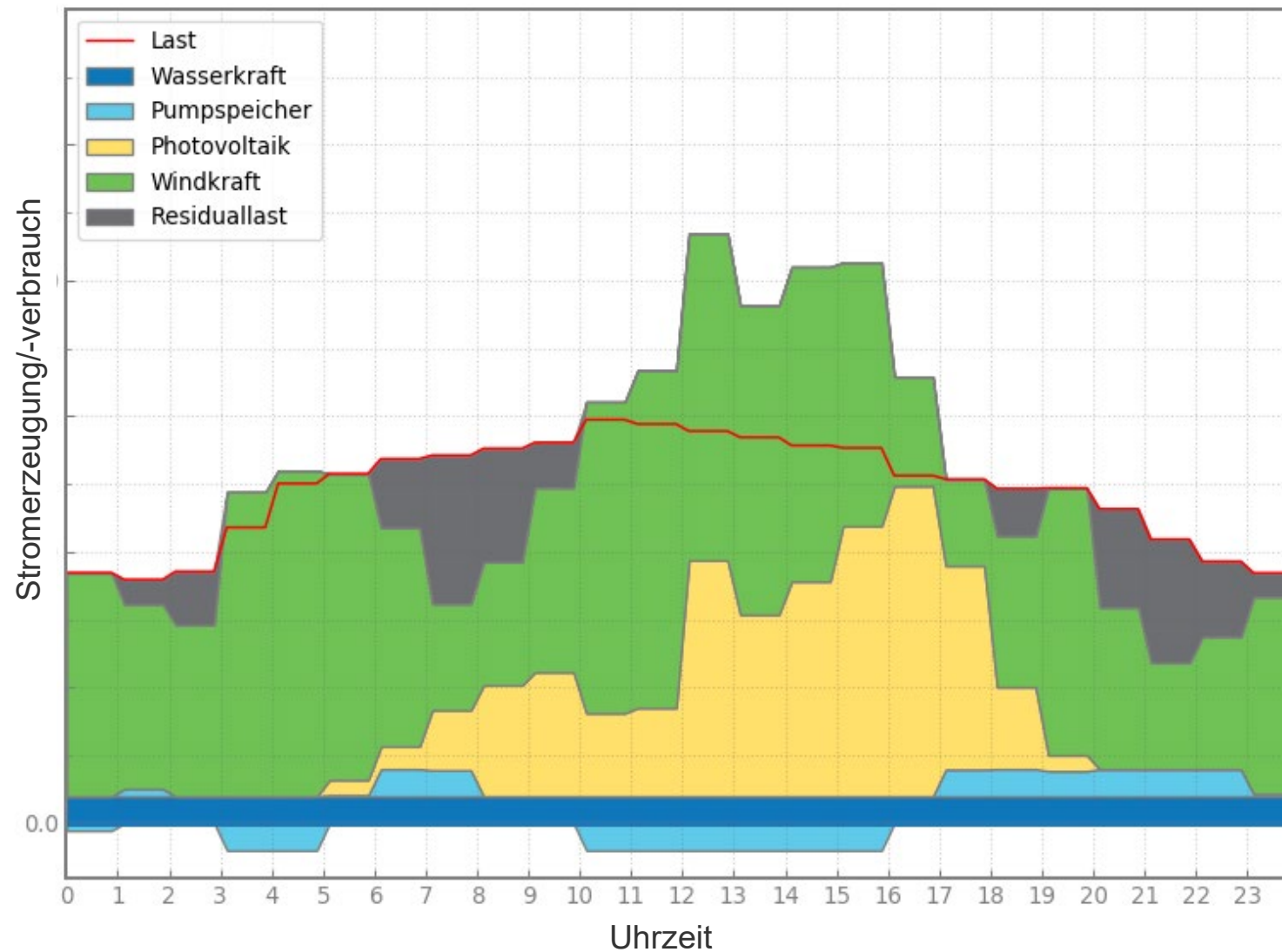
- Grundlast
 - Laufwasserkraftwerke
- Spitzenlast
 - Biogaskraftwerke
 - Pumpspeicher-Wasserkraftwerke
- Windkraft, Photovoltaik (wetterabhängig)
 - Kein Dauerbetrieb: kein Grundlasterzeuger
 - Nicht flexibel: kein Spitzenlasterzeuger



Foto: Pixabay



Foto: Pixabay





- ▶ Konventionelle Kraftwerke
 - Stromerzeugung folgt Verbrauch (bzw. Verbrauchsprognose)

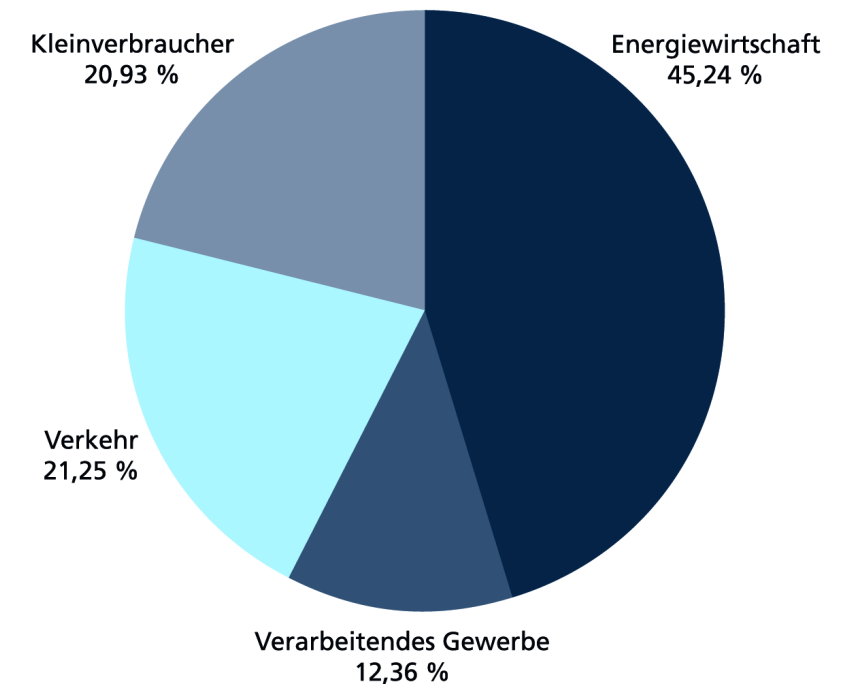
- ▶ Erneuerbare Erzeugung (wetterabhängig)
 - Strombedarf durch Erzeugung nicht gedeckt
 - Deckung in der Summe $\neq$ Deckung zu jedem Zeitpunkt
 - 100% Deckung auch bei verstärktem Ausbau nicht realistisch

- ▶ Lösungsansätze
 - Energiespeicher bauen (Pumpspeicher, Batterien, Power-to-X)
 - Unwirtschaftlich (Aufwand, Wirkungsgrad,...)
 - Demand Side Management (Lastmanagement)
 - Verbrauch folgt Stromerzeugung (bzw. Erzeugungsprognose)
 - Nutzung bereits bestehender Speicher bzw. Flexibilitäten



- ▶ CO₂-Einsparung bei Stromerzeugung nicht ausreichend
- ▶ Elektrifizierung von Wärme- und Verkehrssektor
 - Wärmepumpenheizung statt Gas- oder Ölheizungen
 - Elektroantrieb statt Verbrennungsmotoren
 - Insgesamt höherer Stromverbrauch
 - Aber: flexible Verbraucher
 - Bessere Ausnutzung der erneuerbaren Erzeugung

CO₂-Ausstoß 2004 nach Sektoren in Deutschland



Quelle: Umweltbundesamt, 2006; Grafik fairkehr



► Effizienz

- Höherer Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren
- Weniger Verlust beim Bremsen durch Rekuperation

► Flexibilität

- Standzeiten an Ladestationen meist länger als Ladevorgang
- Anpassung der Ladeleistung oder des Ladezeitraums möglich
- Ladestrategie
 - Kunde gibt Zielladestand und Endzeitpunkt vor
 - Intelligentes Ladesystem entscheidet wie geladen wird
 - Anreize durch entsprechende Tarifsysteme



Foto: Pixabay



► Funktionsprinzip

- Wärmequelle: Umgebungswärme (z.B. Luft, Boden, Wasser)
- Wärmepumpe entzieht der Umgebung Wärme mit Hilfe elektrischer Energie und nutzt diese Wärme zur Erwärmung von Wasser oder Beheizung von Gebäuden
- Wärmeleistung ca. 3-5 mal so hoch wie elektrische Leistung
- Effizienz am höchsten bei niedriger Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und -senke → Niedertemperaturheizung

► Flexibilität des Betriebszeitpunkts

- Gebäudemasse als Speicher
 - 1-2 K Temperaturtoleranz
- Warmwasserspeicher



Foto: Hochschule Reutlingen



► Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

- Gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme
- Nutzung der Abwärme von Gasmotor/Gasturbine
 - Lokale Nutzung
 - Einspeisung in Nah- oder Fernwärmenetze
- Effizientere Nutzung des Primärenergieträgers
 - Ca. 30% geringere CO₂-Emissionen ggü. getrennter Erzeugung

► Wärmegeführter Betrieb

- Anlage läuft bei Wärmebedarf, Strom wird eingespeist

► Stromgeführte Betriebsweise

- Läuft bei Strombedarf, Wärme wird ggf. über Kühler abgeführt

► Intelligente Betriebsweise

- Speichernutzung um Strom bedarfsgerecht zu erzeugen ohne überschüssige Wärme zu vernichten



- ▶ Wetterabhängige Erzeugung
 - Windkraft
 - Photovoltaik
- ▶ Flexible (steuerbare) Verbraucher
 - Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge
 - Wärmepumpenheizungen
- ▶ Flexible KWK-Anlagen
 - Blockheizkraftwerke (BHKW)
- ▶ Ziel
 - Residuallast minimieren
- ▶ Virtuelles Kraftwerk
 - Planung und Prognosen
 - Koordination der Teilnehmer
 - Optimierter Anlagenbetrieb
 - Gemeinsame Vermarktung
- ▶ Komponenten
 - Mess- und Steuerinfrastruktur
 - Kommunikationstechnik
 - Prognose- und Optimierungsalgorithmen
 - Leittechnik
 - Marktanbindung



► Neuerungen im Stromsystem

- Einspeisung auf unteren Netzebenen
 - PV-Dachanlagen am Niederspannungsnetz
 - Überwachung des Netzzustands
- Neue Abrechnungsmodelle
 - Spezialtarife für Wärmepumpen oder Elektroautos
 - Übermittlung von Preissignalen
 - Feingranulare Erfassung des Verbrauchs
- Virtuelle Kraftwerke
 - Übermittlung von Prognosen, Mess- und Steuerinformationen
- Direktvermarktung,...

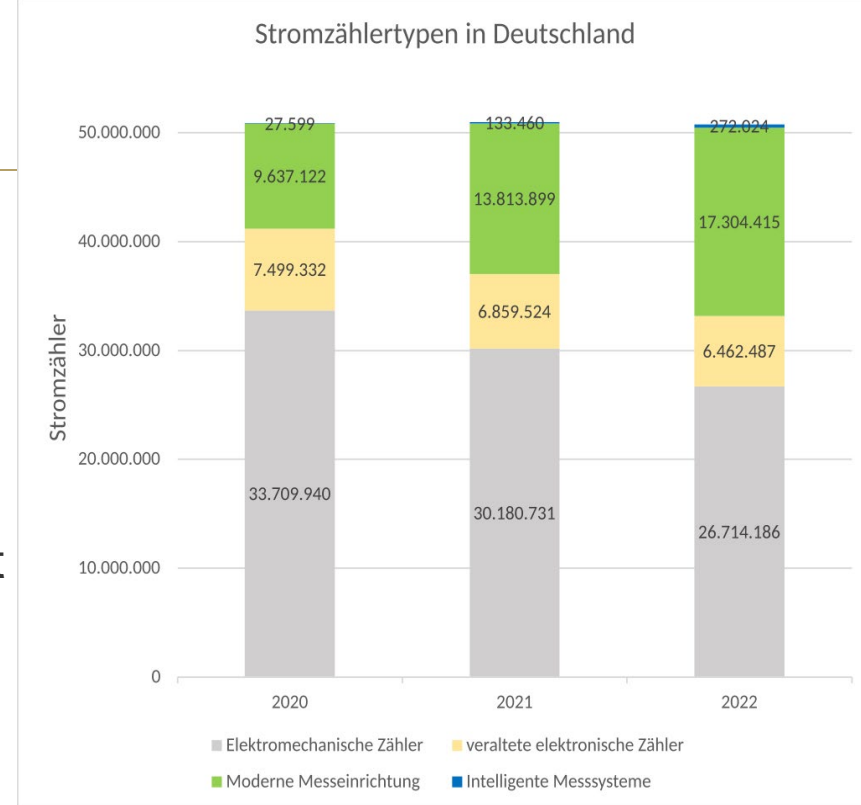
► Smart Grid

- Integration von Informations- und Kommunikationstechnologie in das Stromnetz



Smart Meters

- ▶ Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Intelligentes_Messsystem
- ▶ Moderne Messeinrichtung
 - Für Gas, Wasser oder Strom
 - Zählt und speichert Verbrauch pro 15 Minuten
- ▶ Smart Meter Gateway
 - Überträgt Daten zwischen Verbraucher, Netzbetreiber und Lieferant
- ▶ Intelligentes Messsystem (Smart Meter)
 - Moderne Messeinrichtung kombiniert mit Smart Meter Gateway
 - Kann Steueraufgaben übernehmen, damit wichtig für Smart Grids
 - Neues Solarspitzengesetz erfordert Fernsteuerbarkeit von PV-Anlagen für Netzbetreiber
 - Ermöglicht variable/dynamische/zeitabhängige Tarife
 - Teurer als einfache Zähler (20 EUR/Jahr für Haushalte, ansonsten teurer)
- ▶ Pflicht (<https://www.enercity.de/magazin/mein-leben/smart-meter-pflicht>) ab 2025 für
 - Verbraucher ab 6000 kWh/Jahr
 - Erzeuger ab 7 kW installierter Leistung





► Cyber-Secure Data and Control Cloud for Power Grids



► Sichere Kommunikations-plattform für Verteilnetze

- Messdatenerfassung für Zustandsabschätzung
- Fernwirktechnik (SCADA)
- Stromhandel und Smart-Metering

► Projektlaufzeit

- 2012-2016

► Partner



► Förderung





► Demonstrator Virtuelles Kraftwerk Neckar-Alb



► Demonstrations- und Versuchsanlage in Reutlingen

- Energieanlagen auf dem Campus der Hochschule
- Firmen aus der Region
- Leitsystem und Steuerboxen

► Projektlaufzeit

- 2015-2019

► Partner



Hochschule Reutlingen
Reutlingen University

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



PATAVO
Energie. Ressourcen. Effizienz.



► Förderung



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



► VK-Regelarchitektur

- „Entwicklung einer verteilten Regelarchitektur zur Einbindung indirekt steuerbarer Verbraucher und Erzeuger in Virtuelle Kraftwerke“

► Einbindung von Industrie in Virtuelle Kraftwerke

- Nutzung von Flexibilitäten in Produktionsprozessen
- Optimierung ohne Zentrale Steuerung

► Projektlaufzeit

- 2016-2019

► Partner



Hochschule Reutlingen
Reutlingen University

► Förderung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages





Factory Schedules for Reduced Energy Costs

► Motivation

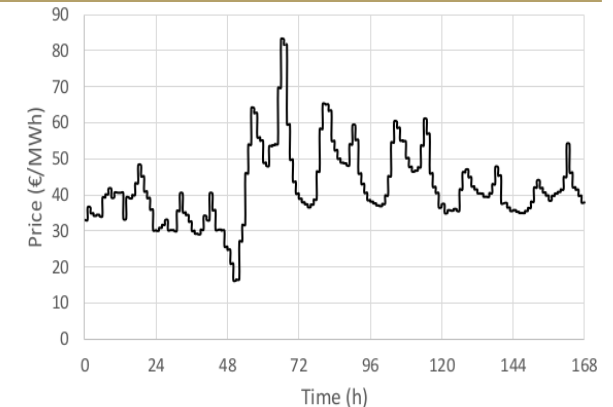
- Energy price fluctuation at the day-ahead market
 - Weather-dependent renewable energy
- Energy-intensive industry: cement production

► Schedule optimization for cement plants

- Modelling of production processes as mixed integer linear programs (MILP)
- Schedule optimization w/ energy price forecasts

► Result

- 11% reduced energy costs achievable with today's energy price variations



T. Stüber, F. Heimgärtner, M. Menth: Day-Ahead Optimization of Production Schedules for Saving Electrical Energy Costs, ACM e-Energy 2019



Heat Pump Schedules for Increased PV Usage

► Scenario

- Residential building w/ heat pump and PV panels

► Two goals

- Maximize use of PV energy for heat pump
- Minimize on/off cycles for heat pump

► Input

- Demand forecasts (heat, water, electric energy)
- PV production forecast

► Output

- Heat pump schedule

