

Zukunftspfade für die Transformation der Energieversorgung in Deutschland und Europa

Prof. Dr. Mario Ragwitz

Munich-Re Dialogforum „Strom- und Wärmewende in Deutschland – Erfolgreiche Umsetzung für eine nachhaltige Zukunft“, München, 12.03.2025

Die Fraunhofer-Gesellschaft auf einen Blick

Anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für Wirtschaft und Gesellschaft



Ziele

- Bezahlbare Gesundheit
- Digitalisierte Wertschöpfung
- Sicherheit und resiliente Gesellschaft
- Vollendete Energiewende
- Ganzheitliche Kreislaufwirtschaft

Strategische Forschungsfelder

- 🌱 Bioökonomie
- 💻 Next Generation Computing
- 🏥 Intelligente Medizin
- 🧠 Künstliche Intelligenz
- 🔬 Quantentechnologien
- 🌍 Ressourceneffizienz und Klimatechnologien
- 💧 Wasserstofftechnologien

Leitmärkte

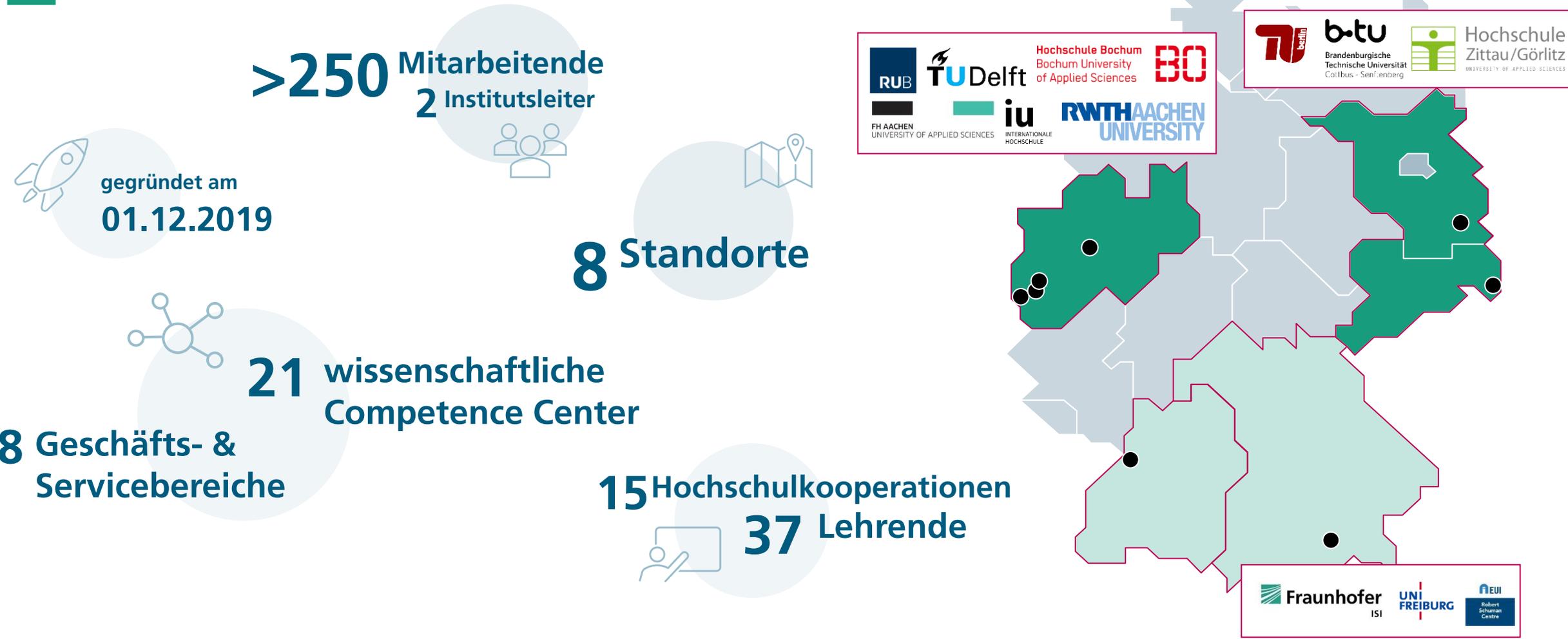
- 📱 Digitalwirtschaft
- 🚗 Mobilitätswirtschaft
- 🏭 Anlagen- und Maschinenbau
- 🏥 Gesundheitswirtschaft
- 🧪 Chemische Industrie
- 🍷 Ernährungswirtschaft
- ⚡ Energiewirtschaft
- 🏠 Bauwirtschaft
- 🚀 Luft- und Raumfahrtwirtschaft

30.000 Mitarbeitende in 76 Fraunhofer Instituten



Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG

Kurzvorstellung und Kennzahlen



Fraunhofer IEG – Forschungsfelder im Überblick

»Wir gestalten die klimaneutralen Energiesysteme der Zukunft«

- Integrierte **Energieinfrastrukturen**
- Transport-/Übertragungs- und **Verteilnetze**
- Sektorengekoppelte, integrierte **Quartiersplanung** (Open District Hub)
- **Wasserstoffinfrastrukturen** (Netze und Speicher)
- **Systemtransformation** und Technologietransfer

- Exploration und Erschließung von **Georessourcen**
- **Geothermale Energie**, flache bis tiefe geothermale Systeme
- **Geotechnologien**, Bohrtechnologien und -verfahren
- **Untergrundspeicher** für Stoffe und Energien, Bergbaufolgenutzung
- Carbon Capture & Storage/Utilization (**CCS/CCU**)

- Einbindung **thermodynamische Wandler zur Wärmeversorgung**
- Entwicklung von **Hochtemperatur-Wärmepumpen**
- **Wärme-/Kältenetze** der 4. und 5. Generation
- **Wärme-/Kältequellen** und -speicher

- **Steuerung, Regelung, Automatisierung** & Betriebsführung von Energiesystemen
- Dezentrale, **intelligente Netze** und Systeme
- Integrierte **Gebäudeenergietechnik**



Inhalt

Zukunftspfade für die Transformation der Energieversorgung in Deutschland und Europa

1. **Status Quo**
2. **Entwicklungen zur Klimaneutralität**
3. **Energieinfrastrukturen als kritische Säulen in der Transformation**
4. **Fazit**



© iStock.com/Petmal

[NEWS](#)[CAREERS](#)[COMMENTARY](#)[JOURNALS](#)

Science

[LOG IN](#)[BECOME A MEMBER](#)

ScienceAdvances

[Current Issue](#)[First release papers](#)[Archive](#)[About](#) [Submit manuscript](#)

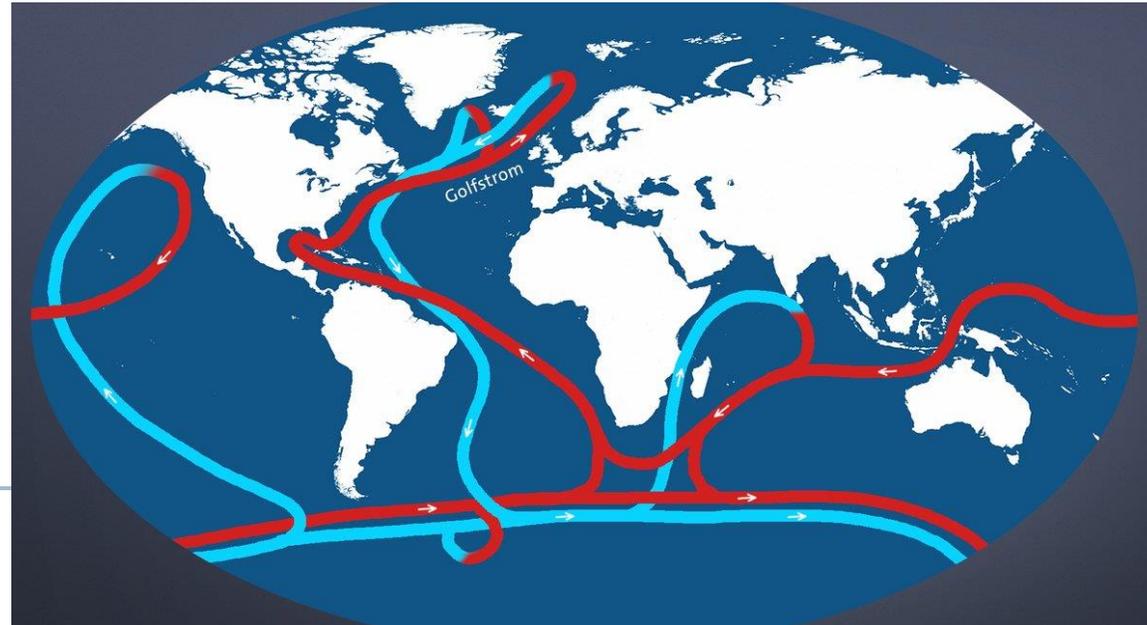
HOME > SCIENCE ADVANCES > VOL. 10, NO. 6 > PHYSICS-BASED EARLY WARNING SIGNAL SHOWS THAT AMOC IS ON TIPPING COURSE

[RESEARCH ARTICLE](#)[OCEANOGRAPHY](#)

Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course

RENÉ M. VAN WESTEN , MICHAEL KLIPHUIS, AND HENK A. DIJKSTRA [Authors Info & Affiliations](#)

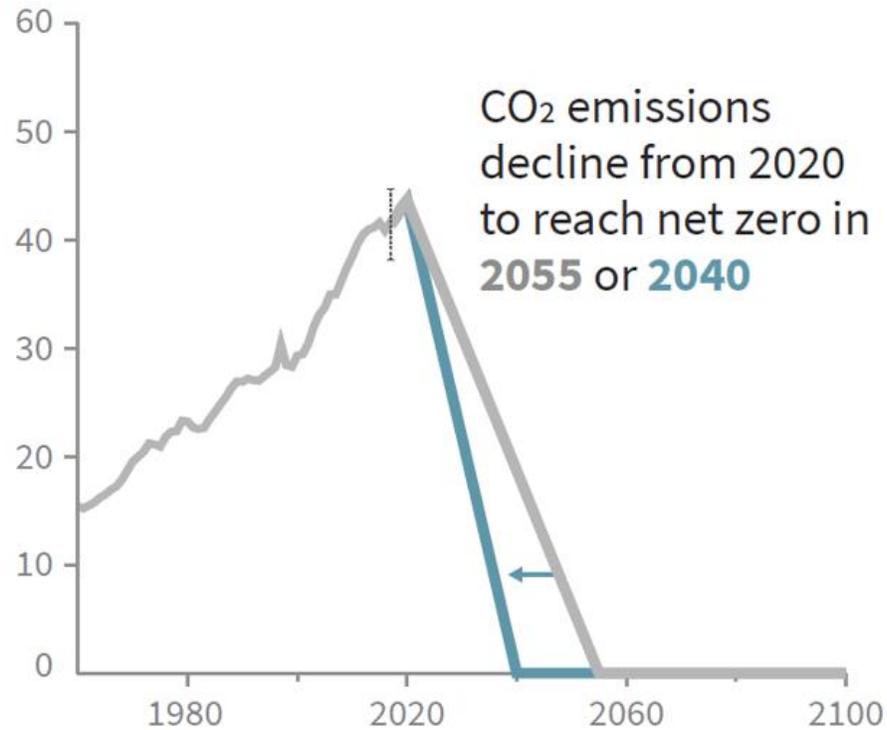
SCIENCE ADVANCES • 9 Feb 2024 • Vol 10, Issue 6 • DOI: 10.1126/sciadv.adk1189



intern

Entwicklung der globalen Emissionen zwischen 2040 und 2055 sollten diese „Net-Zero“ sein

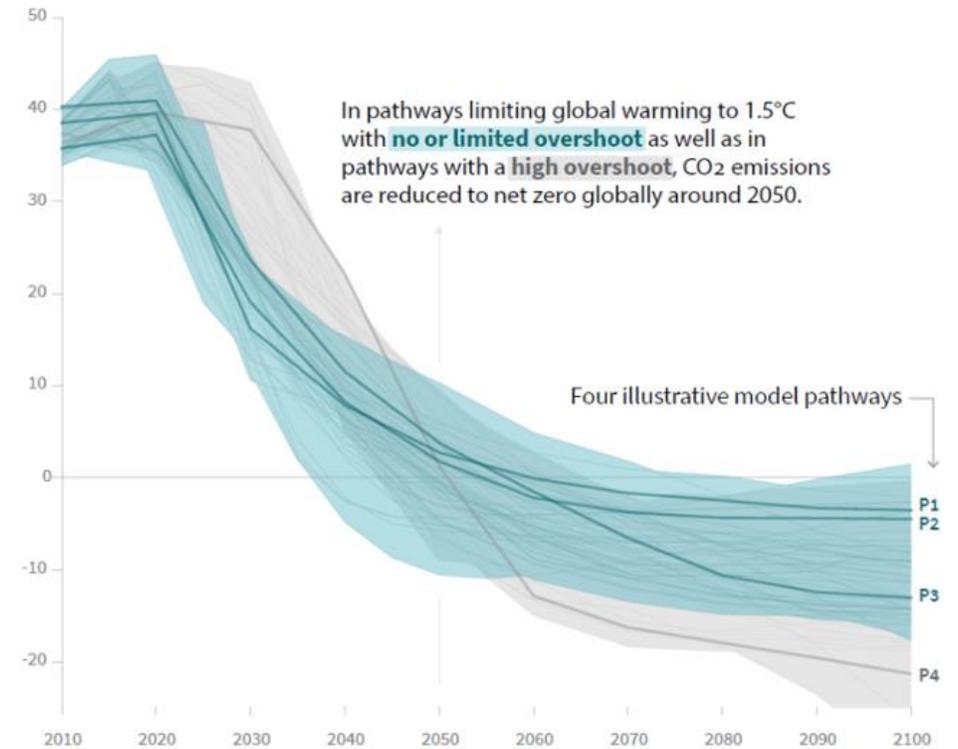
Notwendige Entwicklung der globalen Emissionen für die wahrscheinliche Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens.



Quelle: IPCC (2018)

Global total net CO₂ emissions

Billion tonnes of CO₂/yr



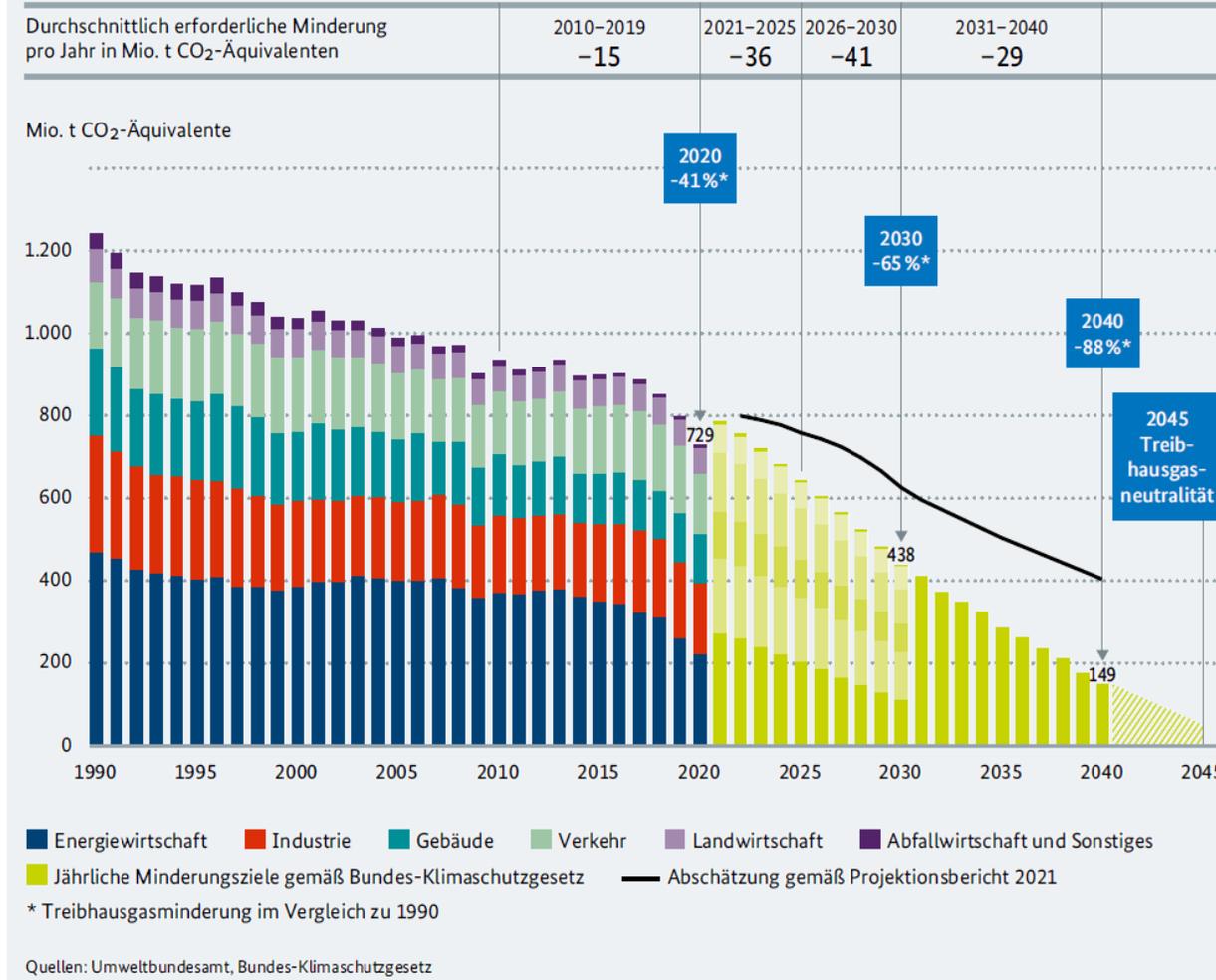
Nationaler Rahmen: Koalitionsvertrag 2021

ambitionierte Ziele für den Ausbau von EE und H₂

Ambitionierter EE-Ausbau bei avisierter frühzeitiger Abkehr von der Kohleverstromung. Einsatz von Erdgas als Übergangstechnologie.

- EE-Ziel 2030: 80% (544-600TWh)
 - PV auf allen geeigneten Dachflächen: 200 GW bis 2030
 - Windenergie auf 2% der Landesfläche
 - Wind auf See: 30 GW bis 2030, 70 GW bis 2045
 - Geothermiepoteziale besser nutzen
 - Nachhaltige Biomasse-Strategie
- Kohleausstieg idealerweise bis 2030
- Versorgungssicherheit durch H₂-ready Gaskraftwerke gewährleisten
- Flächendeckende kommunale Wärmeplanung: 50% klimaneutrale Wärme bis 2030
- 15 Mio. vollelektrische Fahrzeuge bis 2030
- Elektrolysekapazitäten von 10 GW bis 2030

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland



Inhalt

Zukunftspfade für die Transformation der Energieversorgung in Deutschland und Europa

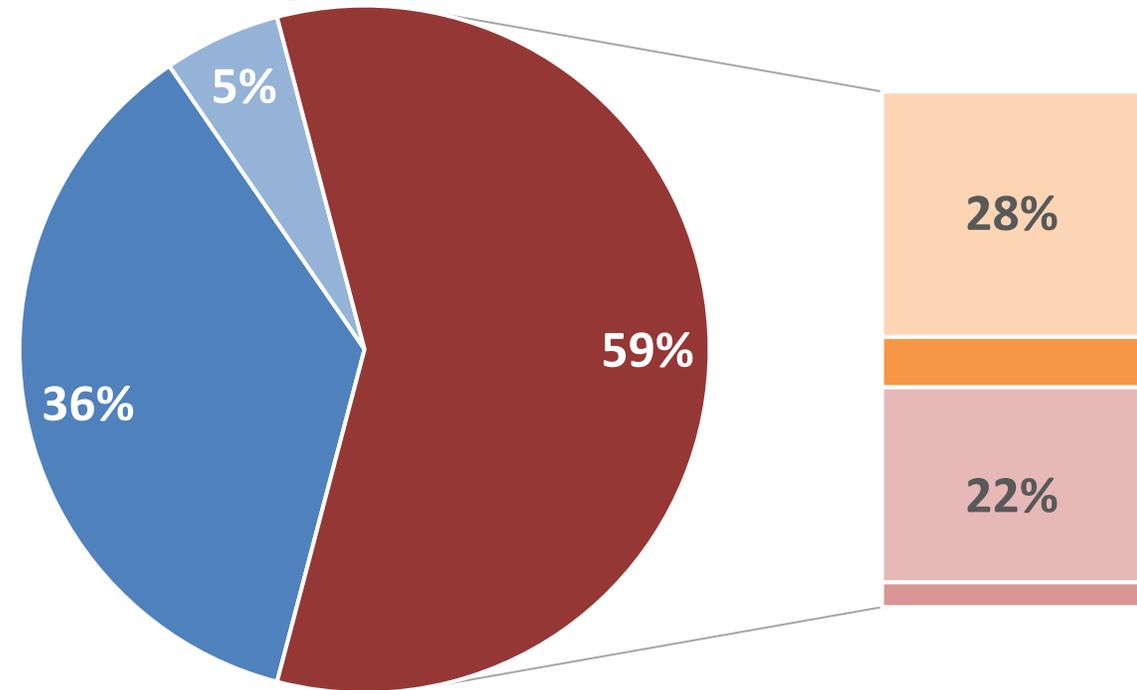
1. Status Quo
2. Entwicklungen zur Klimaneutralität
3. Energieinfrastrukturen als kritische Säulen in der Transformation
4. Fazit



© iStock.com/Petmal

Verteilung des Endenergiebedarfs in Deutschland

Wärmewende ist die halbe Energiewende



- Mechanische Energie
- IKT/Beleuchtung
- Raumwärme
- Warmwasser
- sonstige Prozesswärme
- Klima/Prozesskälte

Endenergiebedarf ges. (2020): ca. 2.300 TWh

Endenergiebedarf Strom (2020):

ca. 500 TWh

Wärme- / Kältebedarf (2020): 1.348 TWh

Kommunale Wärmewende:

- Raumwärme 641 TWh/a (> 2.100 h/a)
 - Warmwasser 132 TWh/a (8.600 h/a)
- Kommunaler Bedarf: **773 TWh/a**

Industrielle Wärmewende:

- Prozesswärme 510 TWh/a (8.600 h/a)
 - Kälte 65 TWh/a (8.600 h/a)
- Industrieller Bedarf: **575 TWh/a**

EE in der Wärmeversorgung (2022): 17,4 %

EE in der Stromerzeugung (2022):

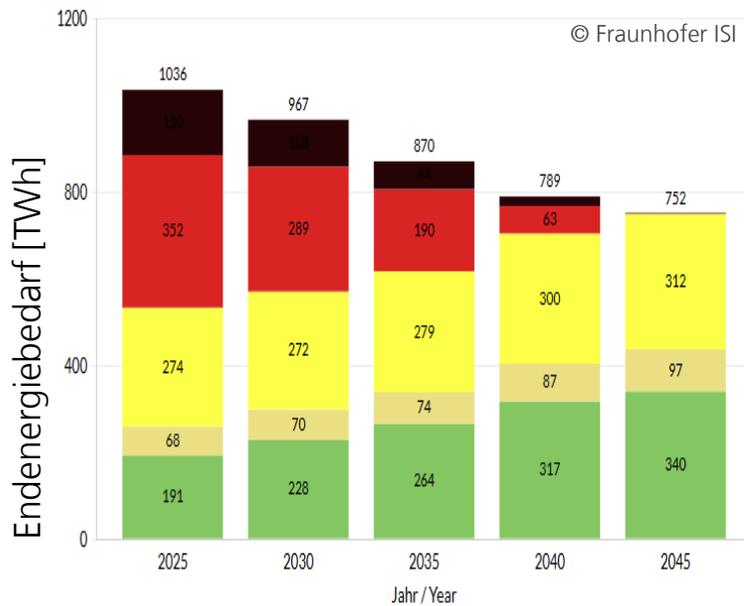
46,2 %

Quelle: BMWK, Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi, 2021

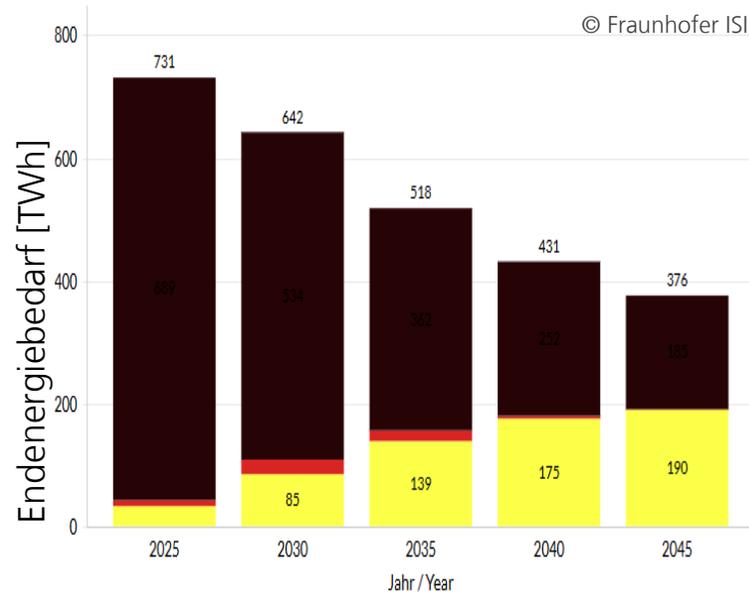
Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland

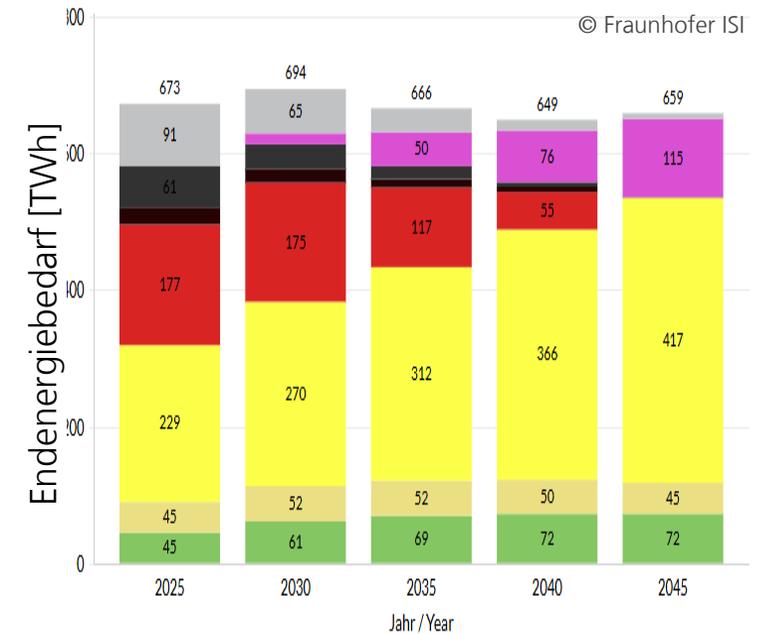
Gebäudesektor



Verkehrssektor



Industriesektor



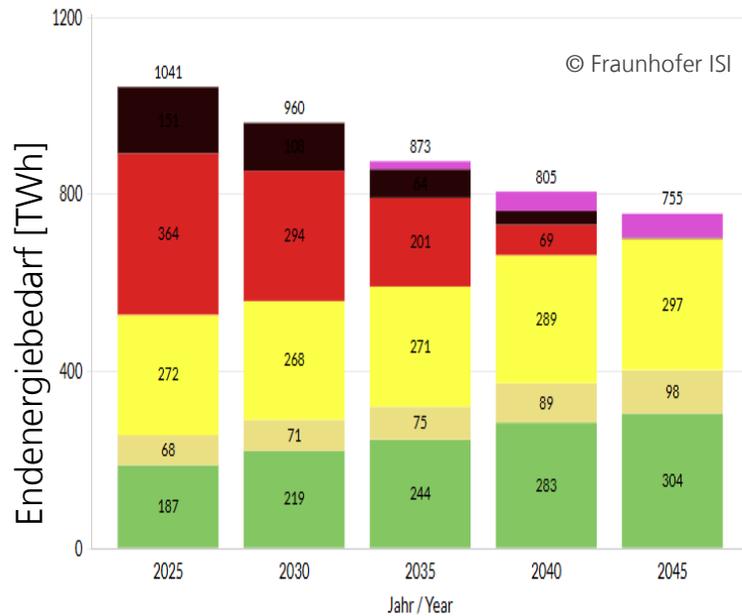
Strom-fokussiertes Szenario

- ✓ Erneuerbare
- ✓ Fernwärme
- ✓ Strom
- ✓ Gas
- ✓ Öl
- ✓ Kohle
- ✓ Wasserstoff
- ✓ Sonstige
- ✓ Unknown

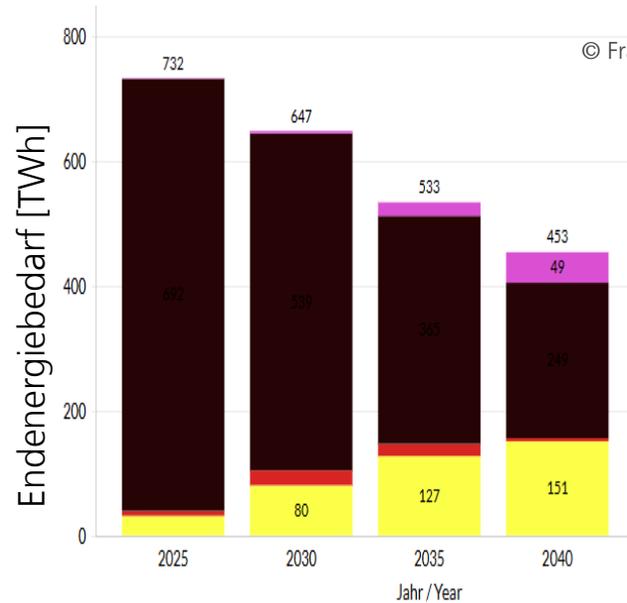
Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland

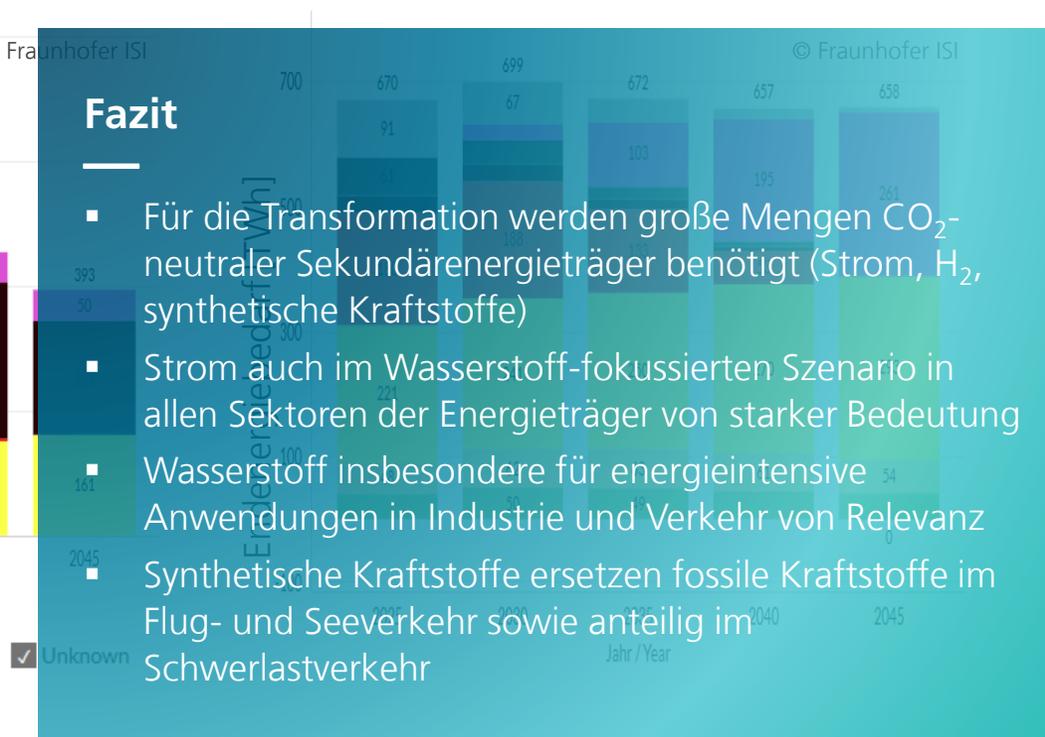
Gebäudesektor



Verkehrssektor



Industriesektor



Fazit

- Für die Transformation werden große Mengen CO₂-neutraler Sekundärenergieträger benötigt (Strom, H₂, synthetische Kraftstoffe)
- Strom auch im Wasserstoff-fokussierten Szenario in allen Sektoren der Energieträger von starker Bedeutung
- Wasserstoff insbesondere für energieintensive Anwendungen in Industrie und Verkehr von Relevanz
- Synthetische Kraftstoffe ersetzen fossile Kraftstoffe im Flug- und Seeverkehr sowie anteilig im Schwerlastverkehr

Wasserstoff-fokussiertes Szenario

- Erneuerbare
- Fernwärme
- Strom
- Gas
- Öl
- Kohle
- Wasserstoff
- Sonstige

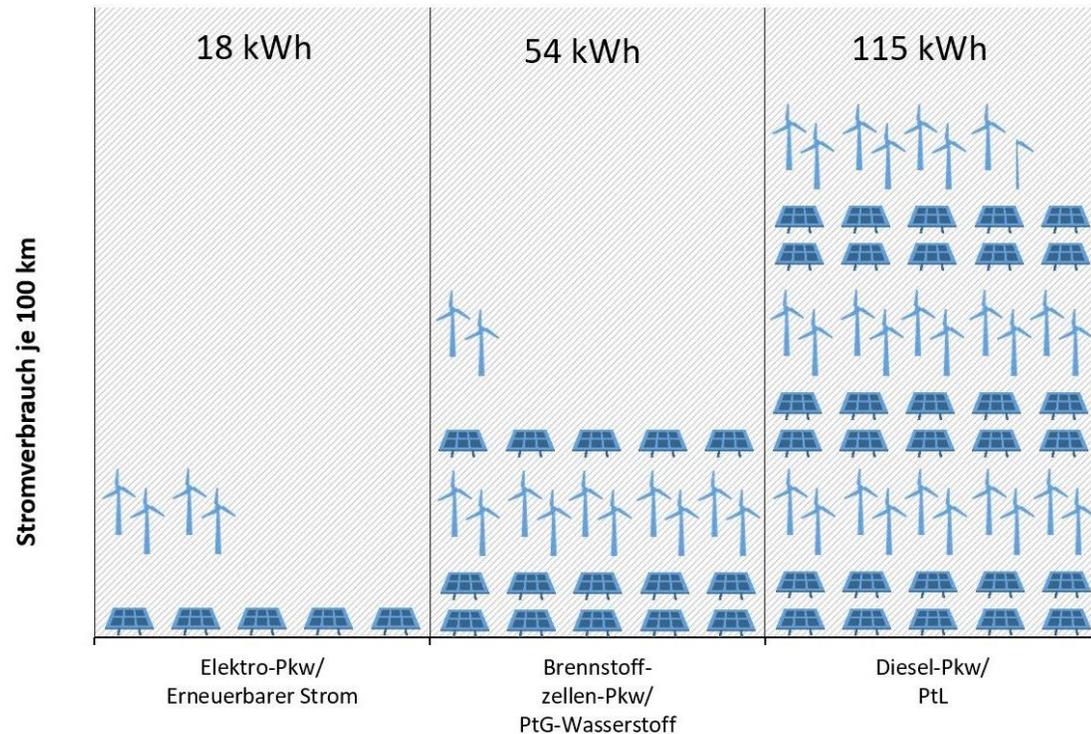
Indikativer Vergleich relevanter Technologieoptionen

Strombasierte Lösungen weisen bedeutsame Effizienzvorteile auf

Wärmequellen für Wärmepumpen: Geo-, Gewässerthermie, Luft

Stromverbrauch für Kompaktklasse Pkw

Ein Symbol entspricht jeweils 2 kWh



Quelle: BMU & UBA nach BMU (2020) auf Basis von Berechnungen des ifeu

mit einer ...	Wärmepumpe				E-Heizung (NSH)	H ₂ -Gaskessel	SNG-Gaskessel
	†	†††	†††††	††††††	††††††††	††††††††††	††††††††††††††
Anzahl WEA (3 MW):	1	2,6	6	14	42	64	80
PE (kWh Strom):	400	1.050	2.400	5.600	16.800	25.400	32.000
Effizienz (COP/η):	380 %	380 %	330 %	285 %	95 %	63 %	50 %
Nutzenergie (kWh Wärme):	1.500	4.000	8.000	16.000		16.000	
	PH	NZEB	EnEV 2007	Altbau		Altbau	
Spez. Nutzenergie:	15 kWh/m ²	40 kWh/m ²	80 kWh/m ²	160 kWh/m ²		160 kWh/m ²	

PH: Passivhaus / NZEB: Nearly Zero Energy Building / EnEV: Energieeinsparverordnung / WEA: Windenergieanlage / PE: Primärenergie
NSH: Nachtspeicherheizung / H2: Wasserstoff / SNG: Synthetic Natural Gas (= synthetisch erzeugtes Methan)

Quelle der Graphik: <https://www.tga-fachplaner.de/>

© Wuppertal Institut

Eigenschaften von direkter Stromnutzung, H₂ und PtX

Gesamtheitliche Betrachtung notwendig. Optimale Systemausgestaltung abhängig von Gewichtung.

	Strom-Direkt	H ₂	PTX
Effizienz	++	○	--
Kosten	--	○	++
Stoffliche Nutzung	--	+	++
Herausforderung Infrastruktur	+	+	○
Speicherbarkeit	-	+	++
Biomasse-Substitut	--	○	++
Anpassungsbedarf Nachfrageseite	++	+	--
Bedarf klimaneutrales „C“	--	--	++ / --

- niedrig
- eher niedrig
- mittel
- + eher hoch
- ++ hoch
- ++ / -- positive Auswirkung
- ++ / -- eher positive Auswirkung
- ++ / -- weder positiv noch negativ
- ++ / -- eher negative Auswirkung
- ++ / -- negative Auswirkung

Inhalt

Zukunftspfade für die Transformation der Energieversorgung in Deutschland und Europa

1. Status Quo
2. Entwicklungen zur Klimaneutralität
3. Energieinfrastrukturen als kritische Säulen in der Transformation
4. Fazit



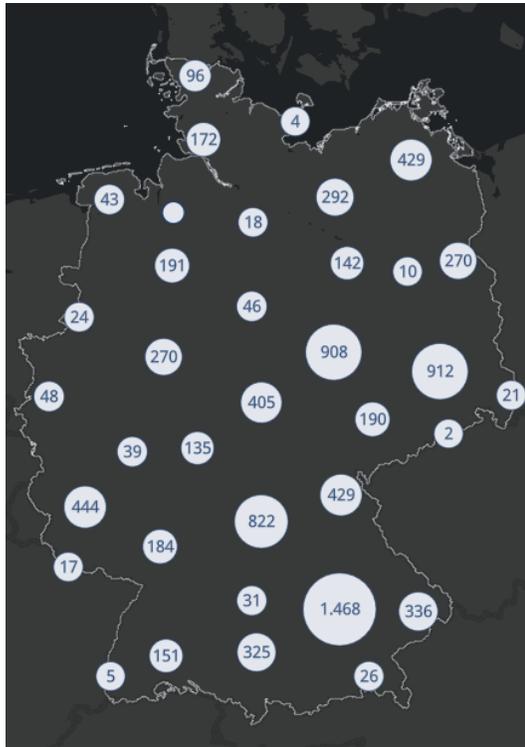
© iStock.com/Petmal

Räumliche Verteilung Erneuerbarer Energieanlagen

EE-Monitor (2024). Monitoring für eine naturverträgliche Energiewende in Deutschland.

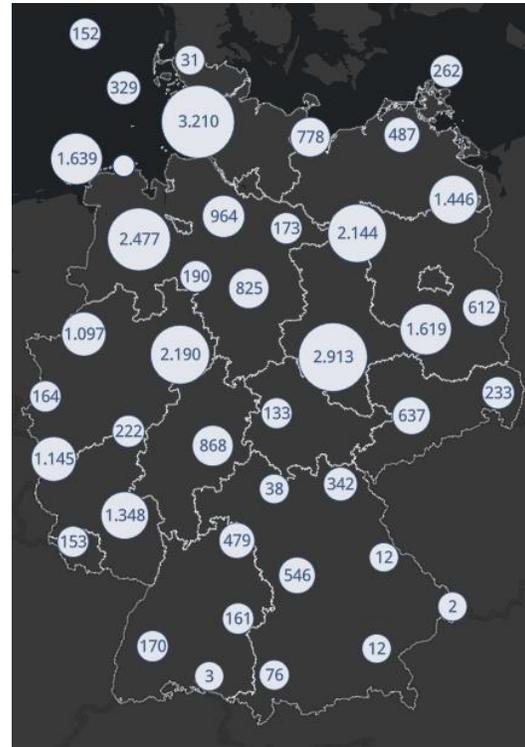
Photovoltaik-Anlagen

Anzahl



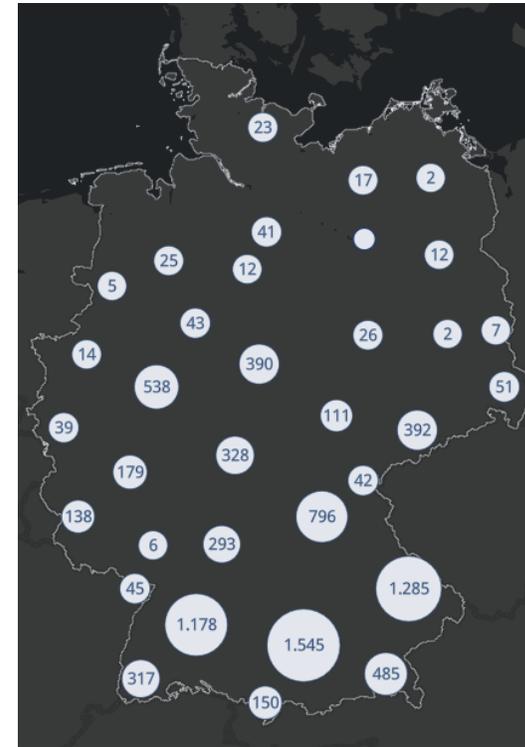
Windenergie-Anlagen

Anzahl



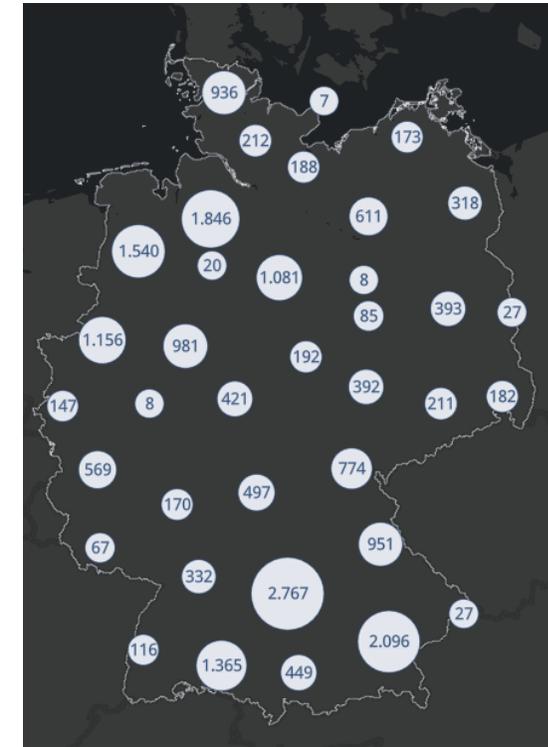
Wasserkraftanlagen

Anzahl



Bioenergieanlagen

Anzahl



Quelle der Graphik: [EE-Monitor](#) (2024). Monitoring für eine naturverträgliche Energiewende in Deutschland, UFZ.

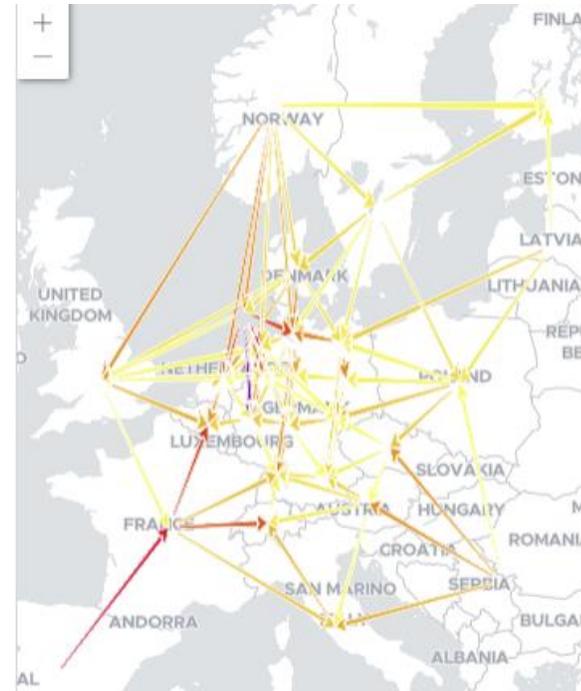
Stromnetzausbau

Stromnetz als wesentliches Rückgrat für die Erneuerbare Energieversorgung

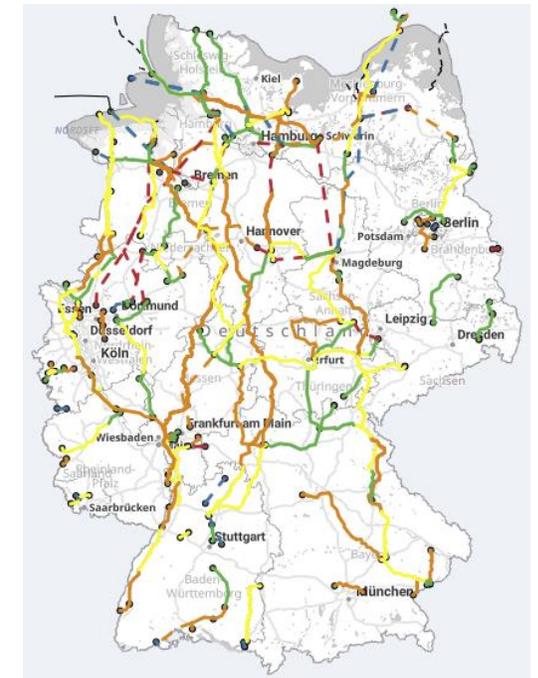
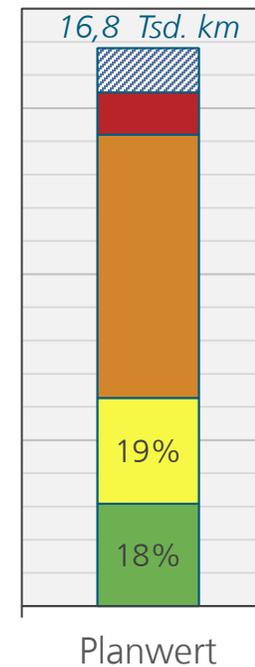
Großer Ausbaubedarf bis 2045 erforderlich und geplant, Umsetzung jedoch gehemmt

- Verbindung von Regionen mit hohen Erzeugungspotenzialen (Offshore-Wind im Norden, PV im Südwesten Europas) mit Regionen hoher Stromnachfrage (Ballungszentren, Industriecluster)
- Inneuropäische Vernetzung von zunehmendem Mehrwert für die Gewährleistung einer verlässlichen und systemisch effizienten Stromversorgung
- „Neue“ Art von Verbrauchern wie Elektromobilität und Wärmepumpen erhöhen einerseits den Strombedarf, bieten aber auch Möglichkeiten, fluktuierende Stromerzeugung flexible aufzufangen und so das System insgesamt stabiler zu machen.

Europäischer Stromhandel 2045 Zielbild



Stand des Netzausbaus nach dem dritten Quartal 2024



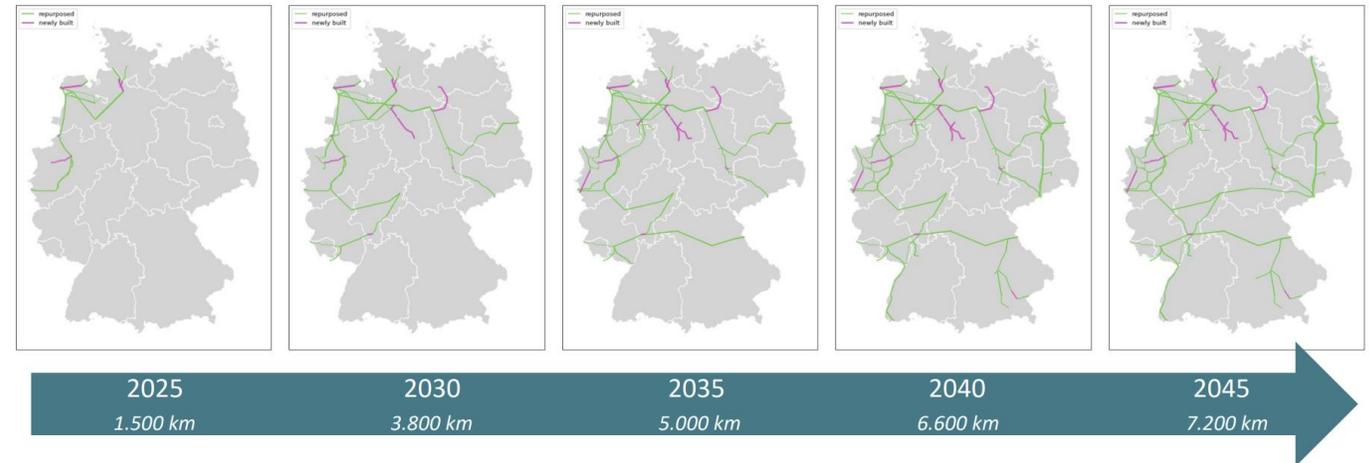
Wasserstoffnetzausbau

Infrastruktur für die industrielle Versorgung

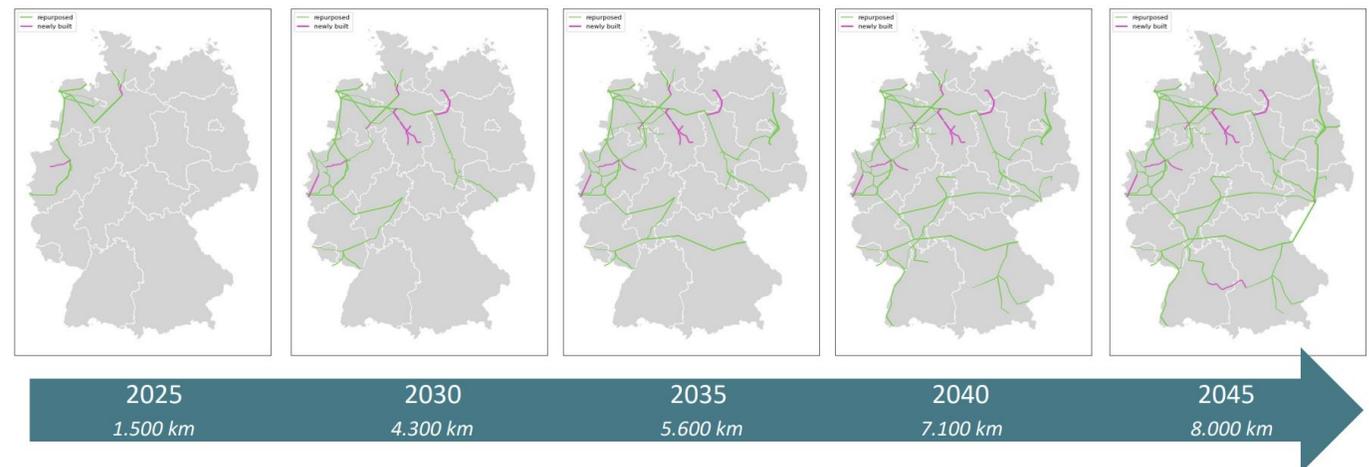
Wasserstoff ein Schlüsselement für die Defossilisierung von Industrie und Verkehr

- Wasserstoff als Rohstoff für die Industrie: Chemie, Stahl, Raffinerien.
- Wasserstoff als Brennstoff für Hochtemperaturanwendungen in Industrieöfen, wenn direkte Elektrifizierung nicht möglich.
- Wasserstoff / Wasserstoffbasierte Kraftstoffe für sehr energieintensive Transportanwendungen: Schwerlasttransport, Seeverkehr, Flugverkehr.
- Wasserstoff als Mittel- bis Langzeitspeichermedium für überschüssige Strommengen, wenn andere Optionen ausgeschöpft sind.
- Entwicklung der Wasserstoffnachfrage in starker Wechselwirkung zu Stromnetzausbau und Möglichkeiten der Elektrifizierung.

Hohes Maß an direkter Elektrifizierung



Hohes Maß an Wasserstoffnutzung



CO₂-Netzausbau

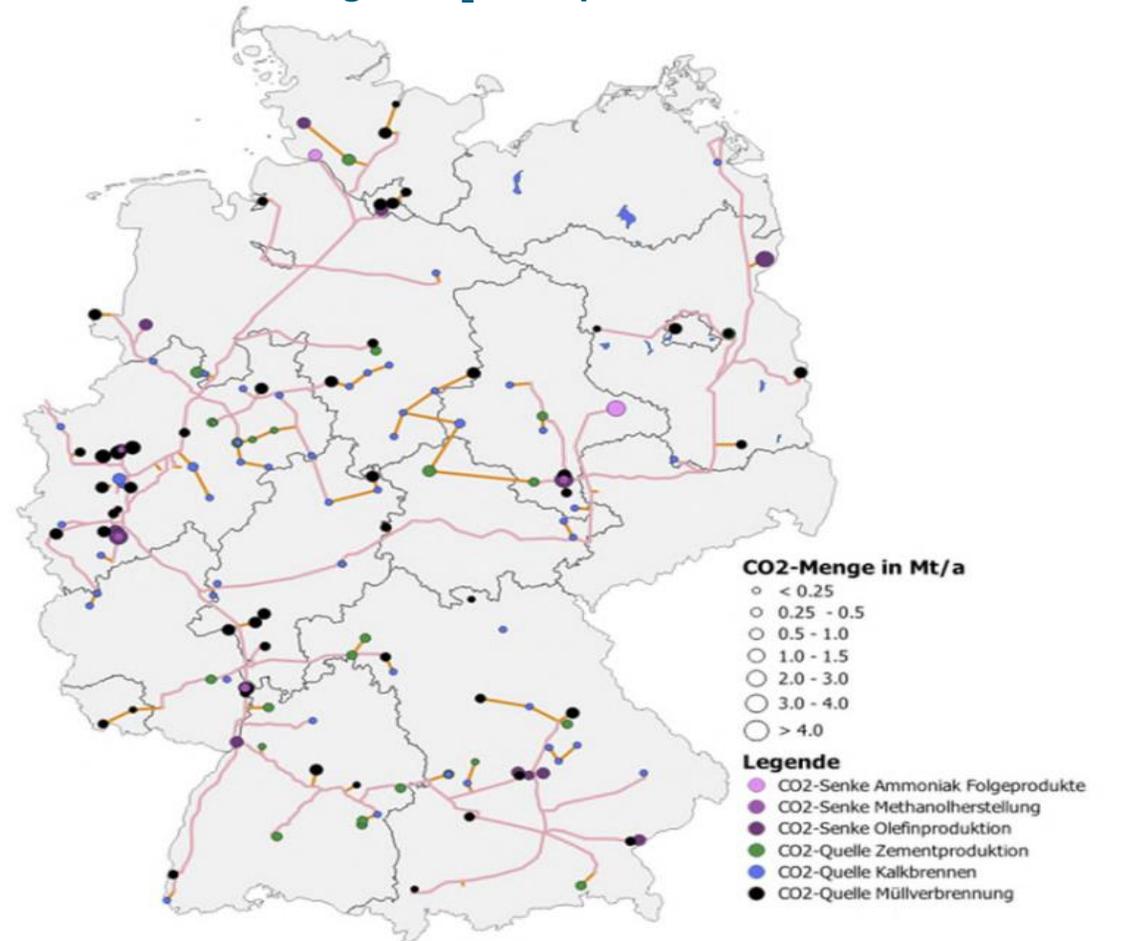
Kohlenstoffabscheidung als drittes Schlüsselement für die Klimaneutralität

Abscheidung von nicht-vermeidbaren CO₂-Emissionen aus der Abfallverwertung und bestimmten industriellen Prozessen ist notwendig, um die Netto-Null-Ziele zu erreichen.

Zielbild eines geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs: Emittiertes CO₂ als Rohstoff für die chemische Industrie

- CO₂-Bedarf vor allem für die Herstellung von Methanol auf Basis von Wasserstoff
- Methanol als Grundstoff für die Kunststoffherstellung
- CO₂-Abscheidung bei der Müllverbrennung
- Anteil Verbrennung durch Recycling verringern
- Speicherung Nicht-vermeidbare prozessbedingte Emissionen der Zement- und Kalkherstellung untertage oder Offshore

Benötigte CO₂-Transportinfrastruktur



Integrierte Planung gekoppelter Energiesysteme neues Paradigma

Technologieübersicht für die strombasierte Sektorkopplung

Stromumwandlung	Sektoren			
	Haushalte/GHD	Wärmenetze	Verkehr	Industrie
Power-to-Heat	Wärmepumpen, direktelektrische Heizung	Großwärmepumpe, Elektrodenkessel		Prozesswärme-erzeugung in Elektrodenkesseln
Power-to-Gas (PtG)	Verbrennung in Heizkesseln und KWK-Anlagen	Verbrennung in Heizkesseln und KWK-Anlagen	Brennstoffzelle, Verbrennungsmotor, Gasturbine	Prozesswärme-erzeugung, stoffliche Nutzung
Power-to-Liquid (PtL)	Verbrennung in Heizkesseln		Verbrennungsmotor, Gasturbine,..	Stoffliche Nutzung
Direktelektrische Antriebe			Elektro-Pkw, Oberleitungs-Lkw, Elektrifizierung von Bahnstrecken	
Strombasierte neue Verfahren				Elektrostahl

Inhalt

Zukunftspfade für die Transformation der Energieversorgung in Deutschland und Europa

1. Status Quo
2. Entwicklungen zur Klimaneutralität
3. Energieinfrastrukturen als kritische Säulen in der Transformation
4. Fazit



Fazit

Zukunftspfade für die Transformation der Energieversorgung in Deutschland und Europa

Die Emissionsziele sind erreichbar und die dafür benötigten Technologien sind verfügbar.

- Mit voranschreitender Energiewende geht die Importabhängigkeit der deutschen Energieversorgung deutlich zurück. Dennoch wird Deutschland ebenso wie heute auch in Zukunft auf den Import von Energie angewiesen sein.
- Eine zunehmende innereuropäische Vernetzung der nationalen Energiesysteme erhöht die Flexibilität und Robustheit des Gesamtsystems und mindert die Abhängigkeit von Energieimporten aus Drittländern.
- Strombasierte Lösungen in vielen Anwendungen die effizienteste Dekarbonisierungsoption. Wasserstoffbasierte Lösungen sind in der Regel gesamtsystemisch aufwendiger.
- Transformation in hohem Maße abhängig vom infrastrukturellen Ausbau.
- Starke gegenseitige Abhängigkeiten zwischen den Lösungsoptionen mit jeweils starken Wechselwirkungen mit der Infrastrukturentwicklung.
- Mit voranschreitender Energiewende vollzieht sich eine zunehmende Kopplung der Energiesektoren.

Eine integrierte Betrachtung von gekoppelter Energieinfrastrukturen Schlüssel für die effektive Planung und Weiterentwicklung des Energiesystems der Zukunft.

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit
