

universität freiburg

Auf dem Weg zum klimaneutralen Energiesystem

AKE Frühjahrssitzung Energie

Bad Honnef
Prof. Dr. Anke Weidlich

14. April 2023



Stellungnahme

Wie wird Deutschland klimaneutral?

Ergebnisse der AG des Akademienprojektes
„Energiesysteme der Zukunft“ (Februar 2023)

Methodische Ansätze

- Eigene Modellrechnungen
 - Auswertung bestehender Szenarien
 - Expertendiskussionen
-
- Stellungnahme und Analyse:



Was können Szenarien?

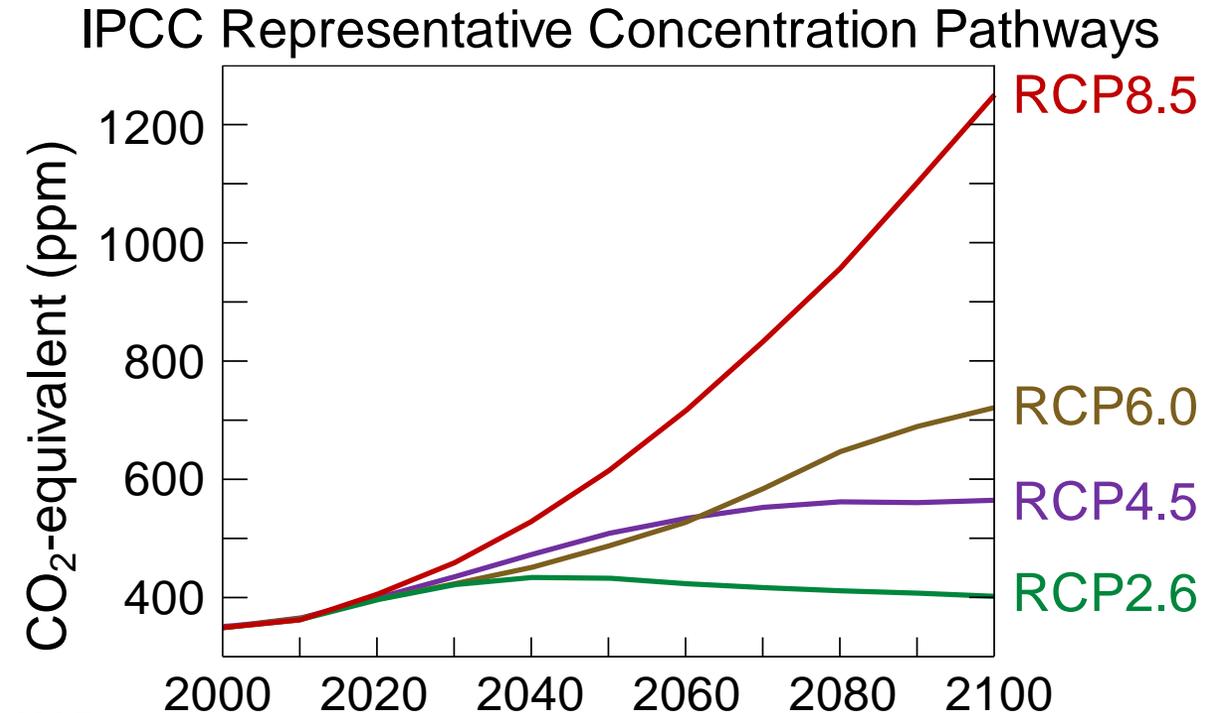
Aufgabe und Grenzen von Energiesystemszenarien

Mögliche Aufgaben von Szenarien

- Aufzeigen gangbarer Wege
- Plausible Möglichkeiten unter gegebenen Annahmen
- Optionen der Zielerreichung

Nicht Gegenstand von Szenarien

- Vorhersagen
- Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten der Zielerreichung



[IPCC 2014]

Häufige Methodik der Modellierung: Lineare Programmierung

Beispiel PyPSA-Eur

- Zielfunktion: üblicherweise Kostenminimierung

$$\min z = \underbrace{\sum_{n,s} c_{n,s} \bar{g}_{n,s} + \sum_{n,s} c_{n,s} \bar{h}_{n,s} + \sum_l c_l F_l}_{\text{Investitionskosten}} + \sum_t w_t \left[\sum_{n,s} o_{n,s,t} g_{n,s,t} + \sum_{n,s} o_{n,s,t} h_{n,s,t} \right] + \sum_t [suc_{n,s,t} + sdc_{n,s,t}]$$

(Stündliche) Betriebskosten

- Nebenbedingungen u.a.

$$\sum_s g_{n,s,t} + \sum_s h_{n,s,t} - \sum_s f_{n,s,t} + \sum_l K_{nl} f_{l,t} = \sum_s d_{n,s,t}$$

Leistungsbilanz (je Knoten & Zeitschritt)

$$\tilde{g}_{n,s,t} \cdot \bar{g}_{n,s} \leq g_{n,s,t} \leq \bar{g}_{n,s,t} \cdot \bar{g}_{n,s}$$

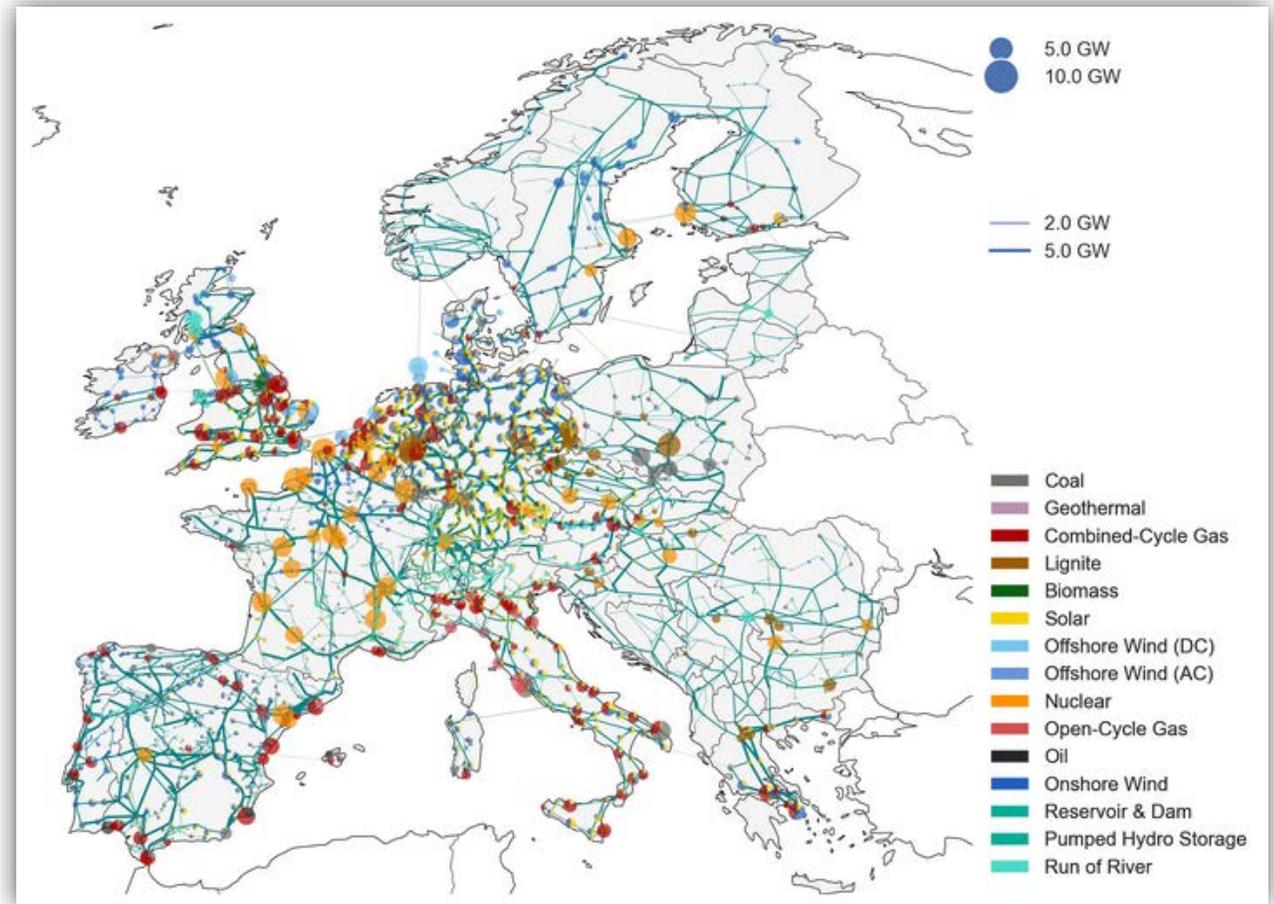
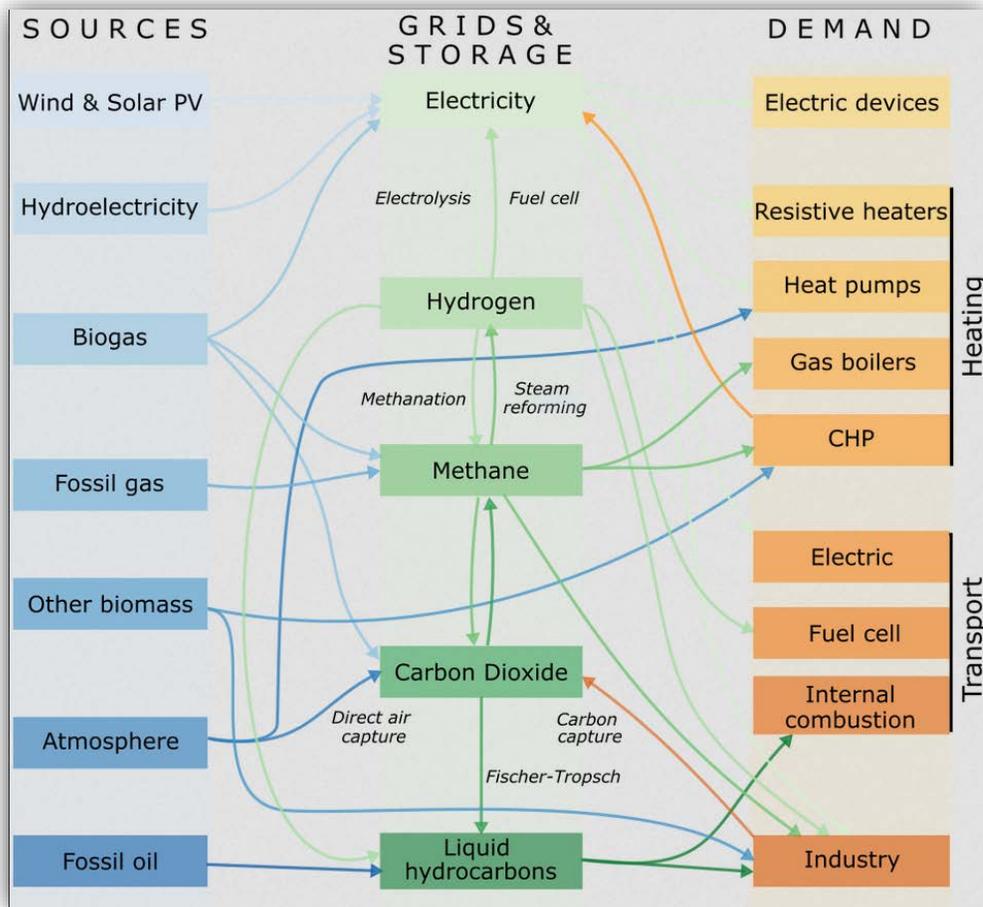
Verfügbare Leistung

$$\sum_{n,s,t} \frac{1}{\eta_{n,s}} w_t \cdot g_{n,s,t} \cdot e_{n,s} \leq CAP_{CO_2}$$

Emissionslimit

Häufige Methodik der Modellierung: Lineare Programmierung

Beispiel PyPSA-Eur



Qualitätssicherung Veröffentlichungen, offene Modelle und Daten, Veröffentlichungen

- Szenarien mit PyPSA



Energy
Volume 160, 1 October 2018, Pages 720-739

Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system

T. Brown^{a, b}, D. Schlachtberger^b, A. Kies^b, S. Schramm^b, M. Greiner^c



Energy
Volume 134, 1 September 2017, Pages 469-481

The benefits of cooperation in a highly renewable European electricity network

D.P. Schlachtberger^a, T. Brown^a, S. Schramm^a, M. Greiner^b

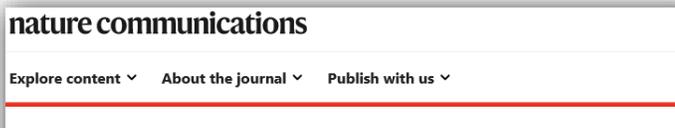


Joule
Volume 6, Issue 5, 18 May 2022, Pages 1066-1086

Article

Speed of technological transformations required in Europe to achieve different climate goals

Marta Victoria^{1, 2, 5}, Elisabeth Zeyen^{3, 4}, Tom Brown^{3, 4}



nature communications

Explore content | About the journal | Publish with us

nature > nature communications > articles > article

Article | Open Access | Published: 04 December 2020

Early decarbonisation of the European energy system pays off

Marta Victoria, Kun Zhu, Tom Brown, Gorm B. Andresen & Martin Greiner

Nature Communications 11, Article number: 6223 (2020) | Cite this article

13k Accesses | 69 Citations | 284 Altmetric | Metrics



CellPress Sneak Peek
A PREVIEW OF PAPERS UNDER REVIEW

Benefits of a Hydrogen Network in Europe

Joule

118 Pages • Posted: 26 Jul 2022 • Publication Status: Review Complete

Fabian Neumann
Technische Universität Berlin (TU Berlin) - Department of Digital Transformation in Energy Systems; Karlsruhe Institute of Technology - Institute for Automation and Applied Informatics

Elisabeth Zeyen
Technische Universität Berlin (TU Berlin) - Department of Digital Transformation in Energy Systems

Marta Victoria
Aarhus University - Department of Mechanical and Production Engineering

Tom Brown
Technische Universität Berlin (TU Berlin) - Department of Digital Transformation in Energy Systems



Energy Conversion and Management
Volume 201, 1 December 2019, 111977

The role of storage technologies throughout the decarbonisation of the sector-coupled European energy system

Marta Victoria^{a, b}, Kun Zhu^a, Tom Brown^c, Gorm B. Andresen^{a, b}, Martin Greiner^{a, b}

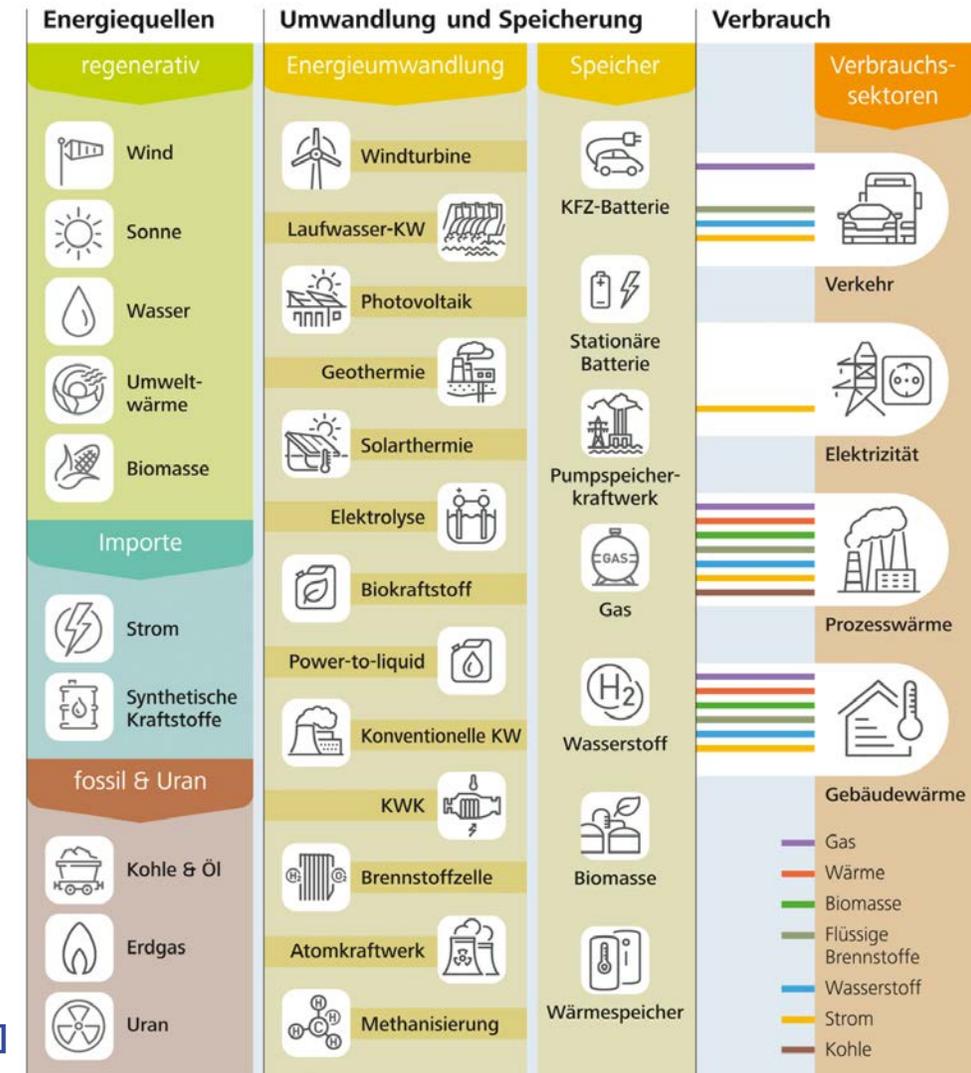
Methodik hier: Optimierungsmodell mit Monte-Carlo-Algorithmus

ReMOD

Modellcharakteristika

- Energiesektoren Strom, Wärme, Mobilität und Industrie
- Kostenoptimaler Transformationspfad
- Dynamische, nicht-lineare Optimierung des Ausbaus
- Bildet Nachfrage, Erzeugung, Speicherung, Energieumwandlung, Nachfragesteuerung und Infrastrukturen ab
- Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES)

[FhG ISE 2023]



Klimaneutrales Energiesystem

Betrachtete Szenarien

Haupt- und Fokusszenarien

Hauptszenario KN2045

- Ambitionierte Ausbauraten für Technologien
- Moderate Nachfragereduktion

Fokus Nachfragereduktion

- Stärkere Reduktion der Nachfrage

Fokus Technologieausbau

- (Noch) schnellere Technologie-Ausbauraten

KN2040

KN2035

Sensitivität Erdgaspreise

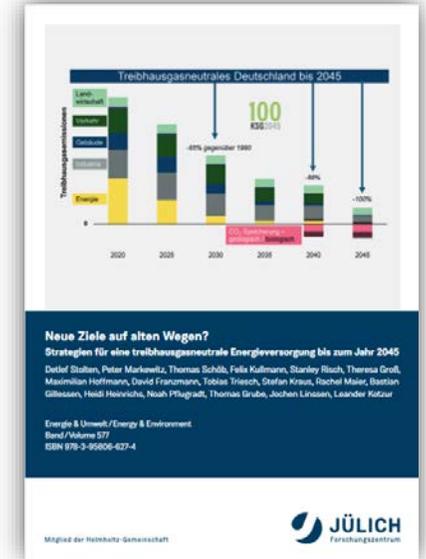
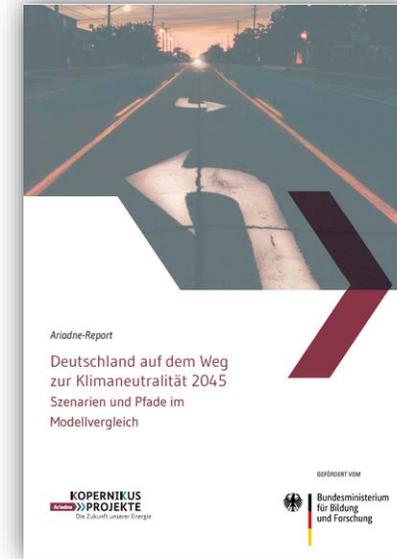
| Szenario | Energiebedingte CO ₂ -Emissionen |
|-----------------------|--|
| Klimaneutralität 2045 | Budget von 7,8 Gt _{CO2} mit -65 Prozent in 2030 und -100 Prozent in 2045 |
| Klimaneutralität 2040 | Budget von 6,2 Gt _{CO2} mit -65 Prozent in 2030 und -100 Prozent in 2040 |
| Klimaneutralität 2035 | Budget von 4 Gt _{CO2} , -100 Prozent in 2035 |



Szenarienstudien

Ziel Klimaneutralität 2045/50

Sieben Studien mit z.T. mehreren Szenarien wurden zusätzlich zu eigenen Rechnungen verglichen



Ergebnisse

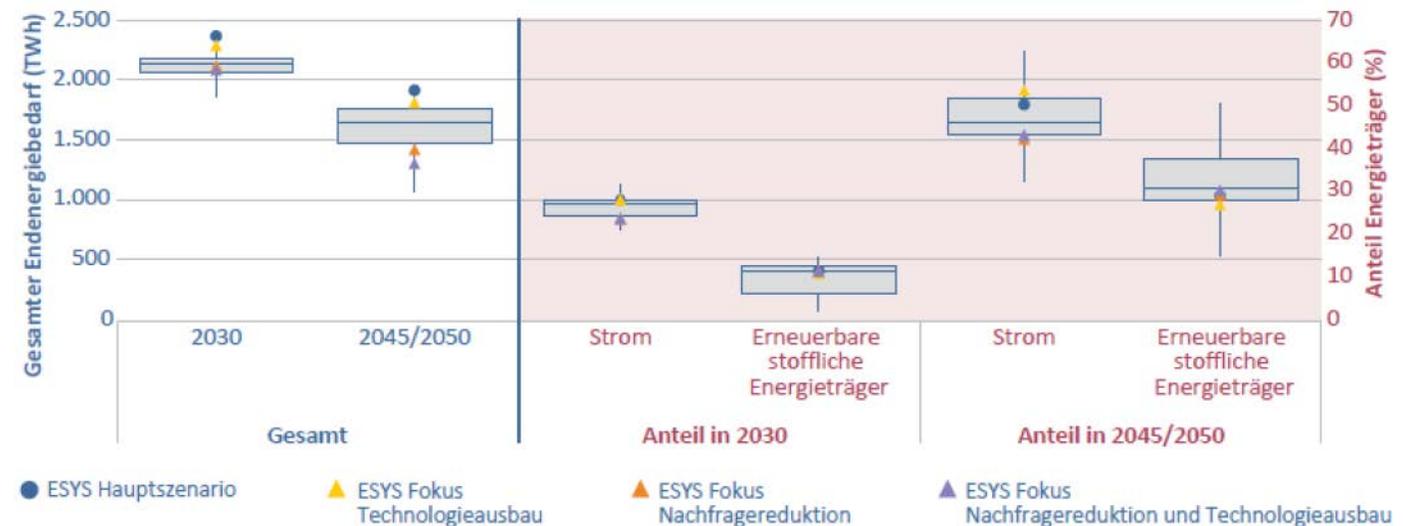
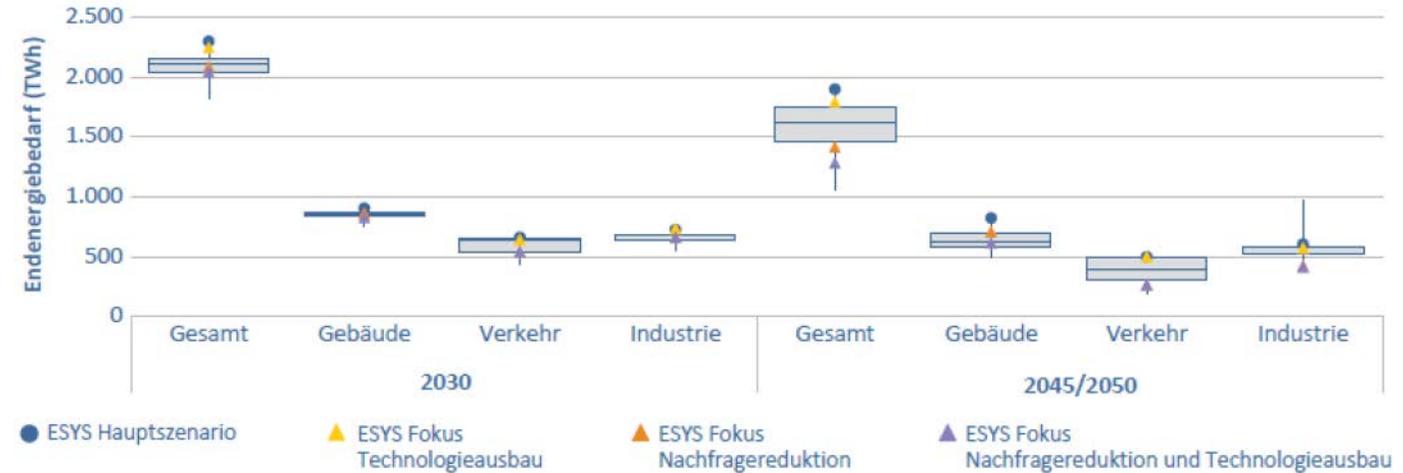
Stellungnahme formuliert 5 Kernbotschaften

1. Die Transformation zur Klimaneutralität erfordert eine umfassende gesellschaftliche und politische Neuausrichtung
2. Die Klimaziele sind ohne Nachfrageänderungen kaum erreichbar
3. Der technologische Umbau muss erheblich beschleunigt werden
4. In der Industrie ist der Dreiklang aus klimaneutralen Prozessen, Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz nötig
5. CO₂-Entnahmen sind erforderlich, ersetzen jedoch nicht die CO₂-Vermeidung



Nachfrageänderungen Sektoren und Anteil Energieträger

- Reduktion des Endenergiebedarfs in allen Studien
- Gleichzeitig starke Erhöhung des Strombedarfs



[ESYS 2023]

Nachfrageveränderungen

Optionen im Verkehr

- Optionen zur Energieverbrauchsreduktion
- Klassifizierung nach „Vermeidung, Verlagerung, Effizienzsteigerung“

[ESYS 2023]

| Sektor | Kurzfristige Wirkung (innerhalb 1–3 Jahre) | Mittelfristige Wirkung (Klimaziele 2030) | Langfristige Wirkung (Klimaziele 2045) |
|--------------------|--|---|--|
| Verkehr (Personen) | | Kurze Wege durch verteiltes Versorgungsangebot (Stadt, Land) | |
| | Ermöglichung von „digitaler Mobilität“ (Homeoffice, digitale Dienstreisen, digitale Ämter) | | |
| | Kurzfristige Kapazitätserweiterung des ÖPNV | Aufbau eines zeitlich und räumlich verfügbaren ÖPNV, inklusive Sharing- und On-Demand-Konzepten | |
| | Anreize zu vermehrter Nutzung des ÖPNV-Angebots, zum Beispiel preisgünstige Tickets und einfache Buchung | | |
| | Pop-up Rad- und Fußwege | Verkehrsraum umverteilen zugunsten Rad- und Fußverkehr | |
| | Temporäre Fernbusverbindungen | (Inter-)nationales Zugangebot im Fernverkehr ausbauen | |
| | Finanzielle Anreize für Umstieg weg vom Pkw, Abbau von Pkw-Subventionen | | |
| | | Incentivierung von erhöhter Fahrzeugauslastung, zum Beispiel Förderung von Ridesharing und reduzierter Fahrzeuggröße | |
| | | Effizienzsteigerung der Antriebe (konventionell und elektrisch) | |
| | | Incentivierung von Umstieg auf E-Pkw, unter anderem Ladeinfrastruktur ausbauen | |
| Verkehr (Güter) | Tempolimit | | |
| | | Vermeidung, zum Beispiel durch politisch bewirkte Nachfragereduktion und Regionalisierung | |
| | | Incentivierung von Verlagerung auf (Hybrid-) Oberleitungs-Lkw, Bahn und Schiff (unter anderem Infrastrukturaufbau, finanzielle Anreize) | |
| | | Effizienzsteigerung Flugzeuge, Schiffe, Lkw | |
| | Anteil E-Lkw erhöhen, zum Beispiel durch emissionsabhängige Lkw-Maut | | |

Nachfrageveränderungen

Optionen in den Gebäuden

- Optionen zur Energieverbrauchsreduktion
- Klassifizierung nach „Vermeidung, Verlagerung, Effizienzsteigerung“

[ESYS 2023]

| Sektor | Kurzfristige Wirkung (innerhalb 1-3 Jahre) | Mittelfristige Wirkung (Klimaziele 2030) | Langfristige Wirkung (Klimaziele 2045) |
|---------|--|--|--|
| Gebäude | | Politisch geförderte Umnutzung, Teilung, gemeinschaftliche Nutzung und Tausch von Bestandsgebäuden | |
| | Absenkung der Heiztemperatur in (Nicht-)Wohngebäuden ermöglichen oder vorschreiben, insbesondere öffentliche Gebäude | | |
| | Informationskampagnen zu effizientem Lüften, Heizen und Duschen | | |
| | | Klimaanpassung bei der Stadt- und Gebäudeplanung | |
| | Informationskampagnen zu schnell umsetzbaren Dämmungsmaßnahmen | Politisch getriebene Sanierung von Bestandsgebäuden | |
| | Betriebsoptimierung bestehender Heizungsanlagen | Effizienzsteigerung (neuer) technischer Geräte, Heizungsanlagen, Klimaanlage | |
| | | Rahmenbedingungen für den Umstieg auf ressourcenschonende Baustoffe (beispielsweise Recyclingbaustoffe, nachwachsende Rohstoffe) | |

Nachfrageveränderungen

Optionen bei Konsum und Industrie

- Optionen zur Energieverbrauchsreduktion
- Klassifizierung nach „Vermeidung, Verlagerung, Effizienzsteigerung“

[ESYS 2023]

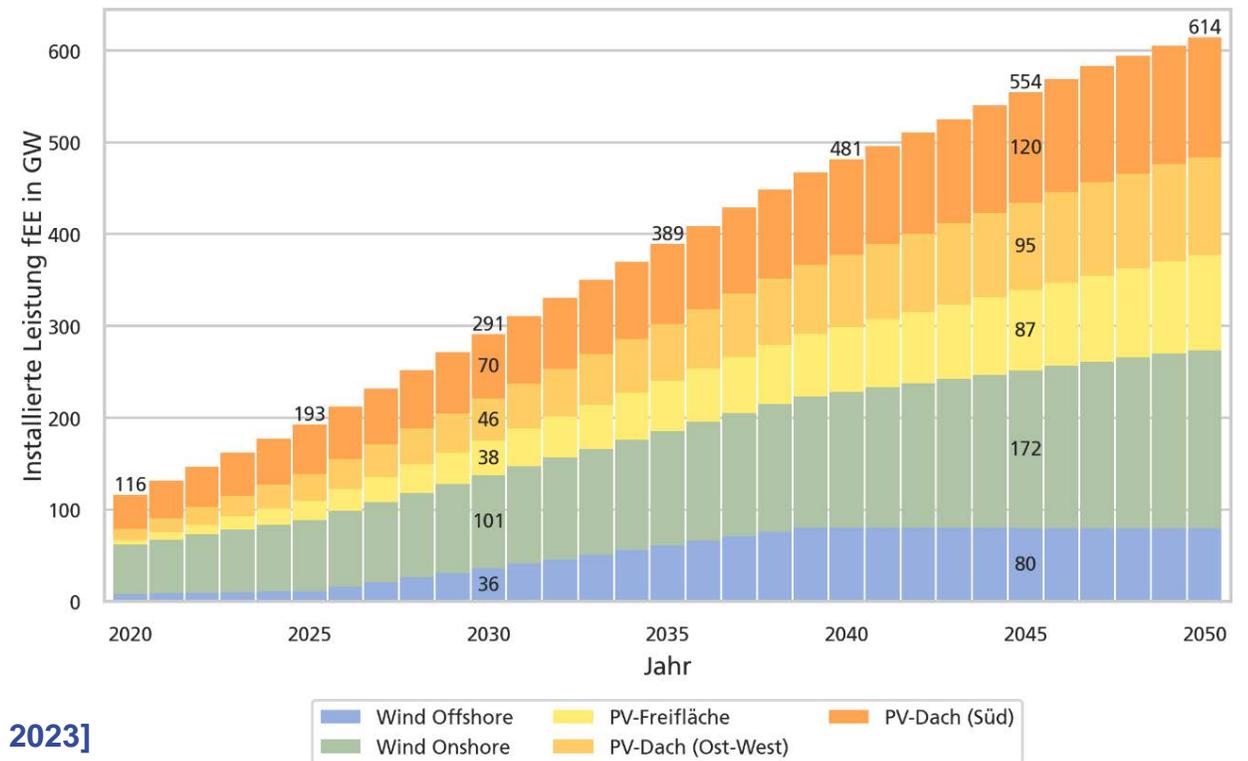
| Sektor | Kurzfristige Wirkung (innerhalb 1–3 Jahre) | Mittelfristige Wirkung (Klimaziele 2030) | Langfristige Wirkung (Klimaziele 2045) |
|----------------------------|--|--|---|
| Industrie und Konsum | Incentivierung längerer Nutzung und Reparatur von Produkten innerhalb des bestehenden Angebots | Rahmenbedingungen schaffen für Entwicklung und weit verbreitete Nutzung langlebiger, reparierbarer und kreislauffähiger Produkte | |
| | Incentivierung gemeinschaftlicher Nutzung und Wiederverwendung von Produkten innerhalb des bestehenden Angebots | Aufbau von Strukturen für flächendeckende Sharing-Konzepte und die Wiederverwendung von Produkten | |
| | | Politisch geförderter Wechsel zu material- und ressourcensparenden Produkten und weniger energieintensiven, nachwachsenden Materialien | |
| | Politische Förderung schnell umsetzbarer Prozesselektrifizierung, zum Beispiel Niedertemperaturprozesse, mechanische Energie | Rahmenbedingungen für weitreichende Prozesselektrifizierung | |
| | Schnell umsetzbare Effizienzmaßnahmen | Effizientere Technologien und Prozessoptimierung | |
| | | Rahmenbedingungen für vermehrtes Recycling | |

Technologischer Umbau

Ambitionierter EE-Ausbau zur Deckung der Stromlast

- Deutlicher Ausbau der installierten Leistung von Wind und Photovoltaik
- Bis 2030 ca. 144 GW PV, 100 GW Onshore-Wind, 36 GW Offshore-Wind
- Bis 2045 werden 554 GW EE benötigt

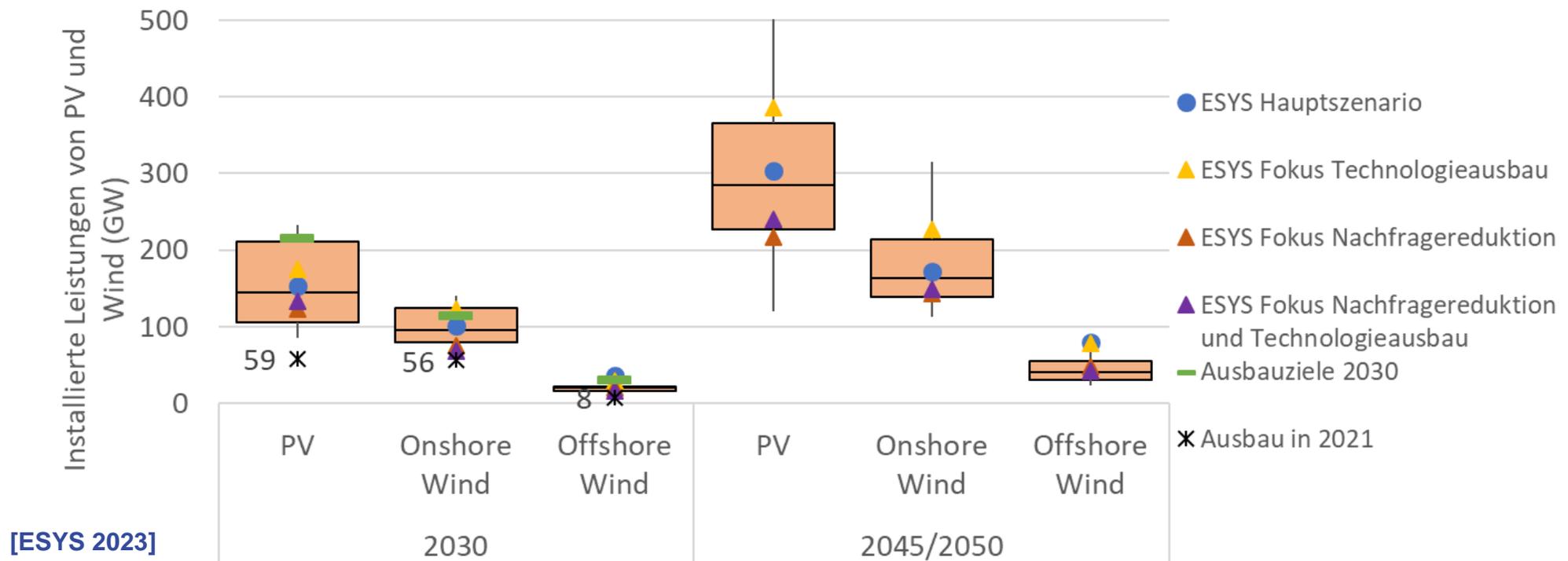
EE-Ausbau bis 2045 in Deutschland | ESYS Hauptszenario



Technologischer Umbau

PV- und Windausbau bis 2030 ähnlich wie Ziele der Bundesregierung

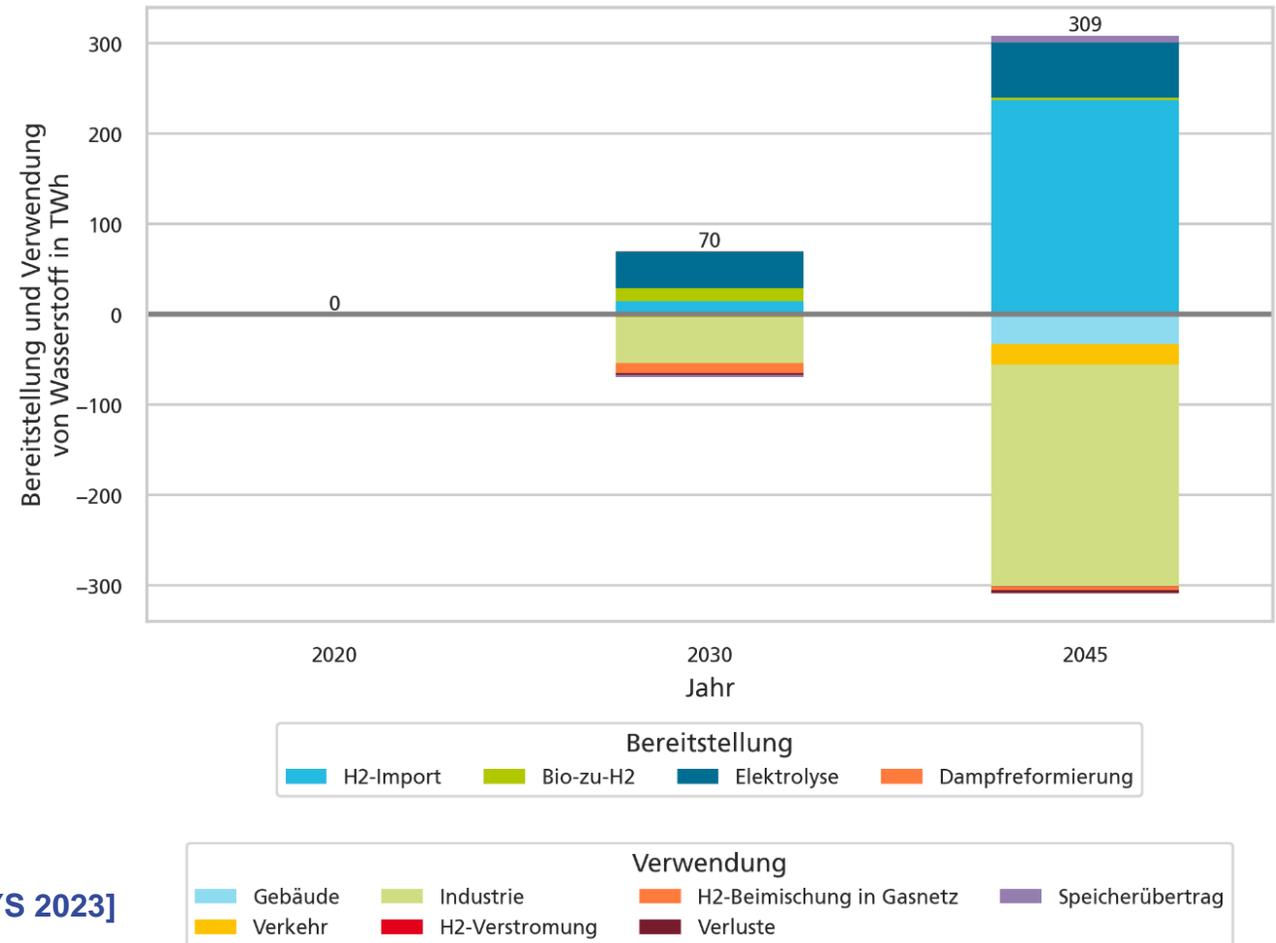
- Studienvergleich: Teilweise hohe Unterschiede in den Studien
- Deutlich unterschiedlicher Ausbau bei Fokus Technologieausbau vs. Fokus Nachfragereduktion



Technologischer Umbau Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft

- Im Hauptszenario wird in 2030 bereits viel Wasserstoff in der Industrie eingesetzt
- Starker Anstieg des Wasserstoffbedarfs bis 2045, insb. in der Industrie
- In 2045 kommt ca. 80 % des Wasserstoffs aus Importen

Wasserstoffhochlauf | ESYS Hauptszenario



[ESYS 2023]

Technologischer Umbau Elektronen vs. Moleküle

Nutzungsbereiche von Elektrizität und stofflichen Energieträgern

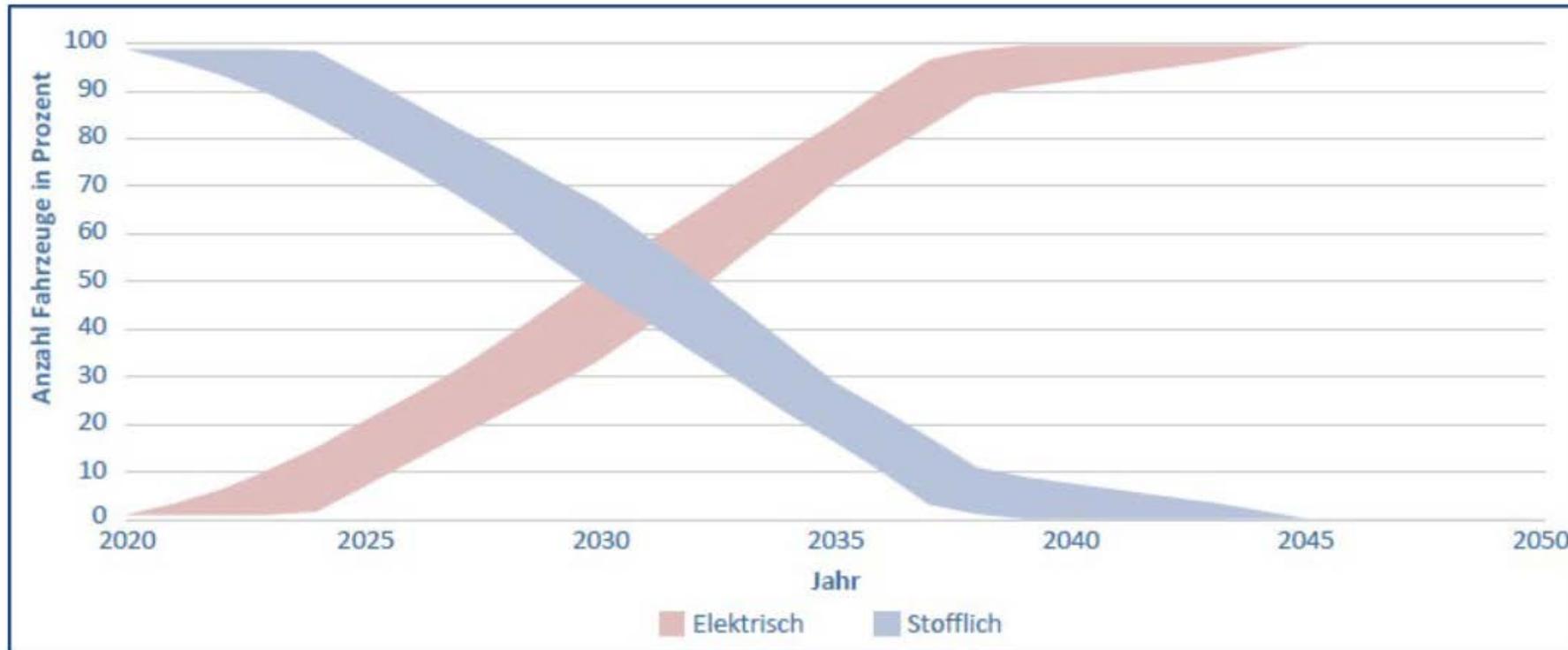
- Wasserstoff und -derivate mittelfristig eher begrenzt verfügbar
- Hoher Zubau an Elektrolyseleistung notwendig
- Import von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen nötig
- Nutzungspriorität in Bereichen ohne realistische Alternativen (Industrie, Langstreckenverkehr)

[ESYS 2023]

| | Industrie | Verkehr | Gebäude ²³ |
|--|--|--|---|
| Einsatz von stofflichen Energieträgern (inkl. Biomasse) | Feedstocks in der Stahl- und Chemieindustrie | Interkontinentaler Luft- und Schiffverkehr | Teilweise schwer sanierbare Gebäude |
| Technologiemix wahrscheinlich vorteilhaft | Hochtemperatur-Prozesswärme | Schwerlastverkehr Langstrecke Innereuropäischer Luft- und Schiffsverkehr | Fernwärmerzeugung (Großwärmepumpen: Elektrizität, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen: stoffliche Energieträger) |
| Einsatz von Elektrizität wahrscheinlich vorteilhaft | Mitteltemperatur-Prozesswärme | Öffentlicher straßengebundener Personenverkehr Leichte Nutzfahrzeuge Schwerlastverkehr Kurz- und Mittelstrecke | Sanierbare Gebäude |
| Einsatz von Elektrizität sicher | Niedertemperatur-Prozesswärme | Pkw-Verkehr, öffentlicher schienengebundener Personenverkehr | Neubauten |

Technologischer Umbau Elektronen vs. Moleküle

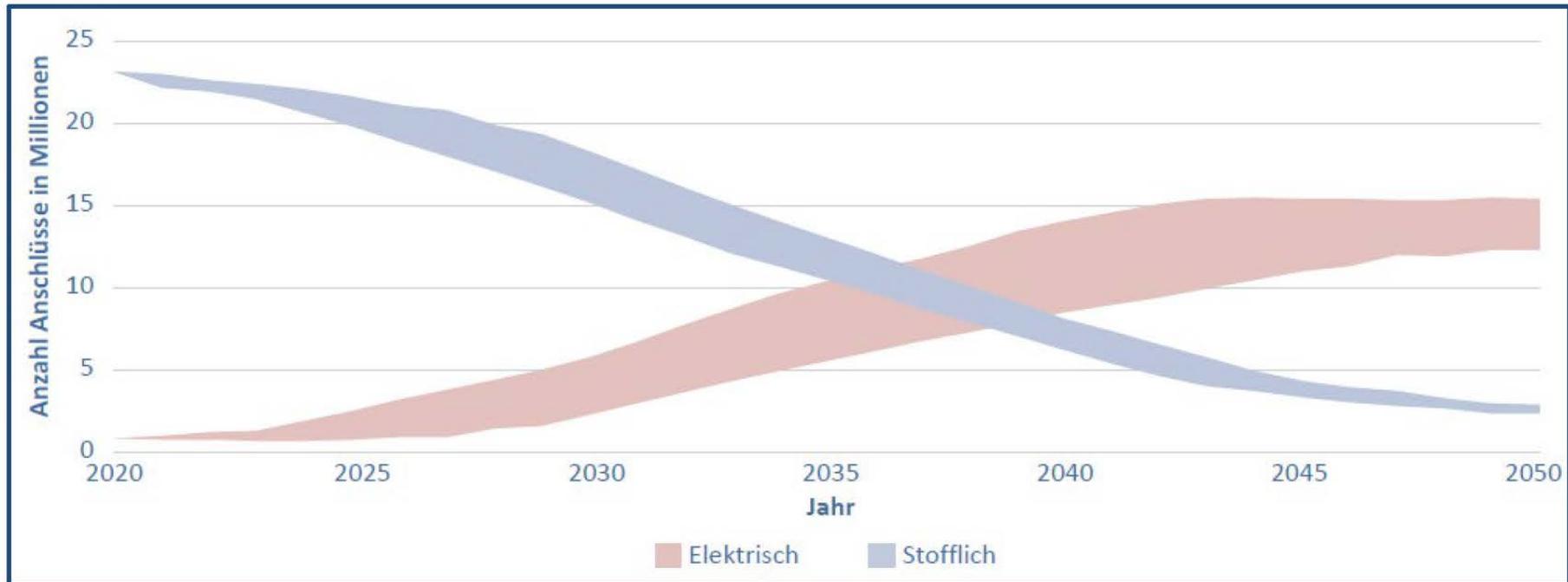
- Pkw: steigender Anteil (batterie-)elektrischer Fahrzeuge



[ESYS 2023]

Technologischer Umbau Elektronen vs. Moleküle

- Wärme: steigender Anteil elektrischer Heizungen (Wärmepumpen)



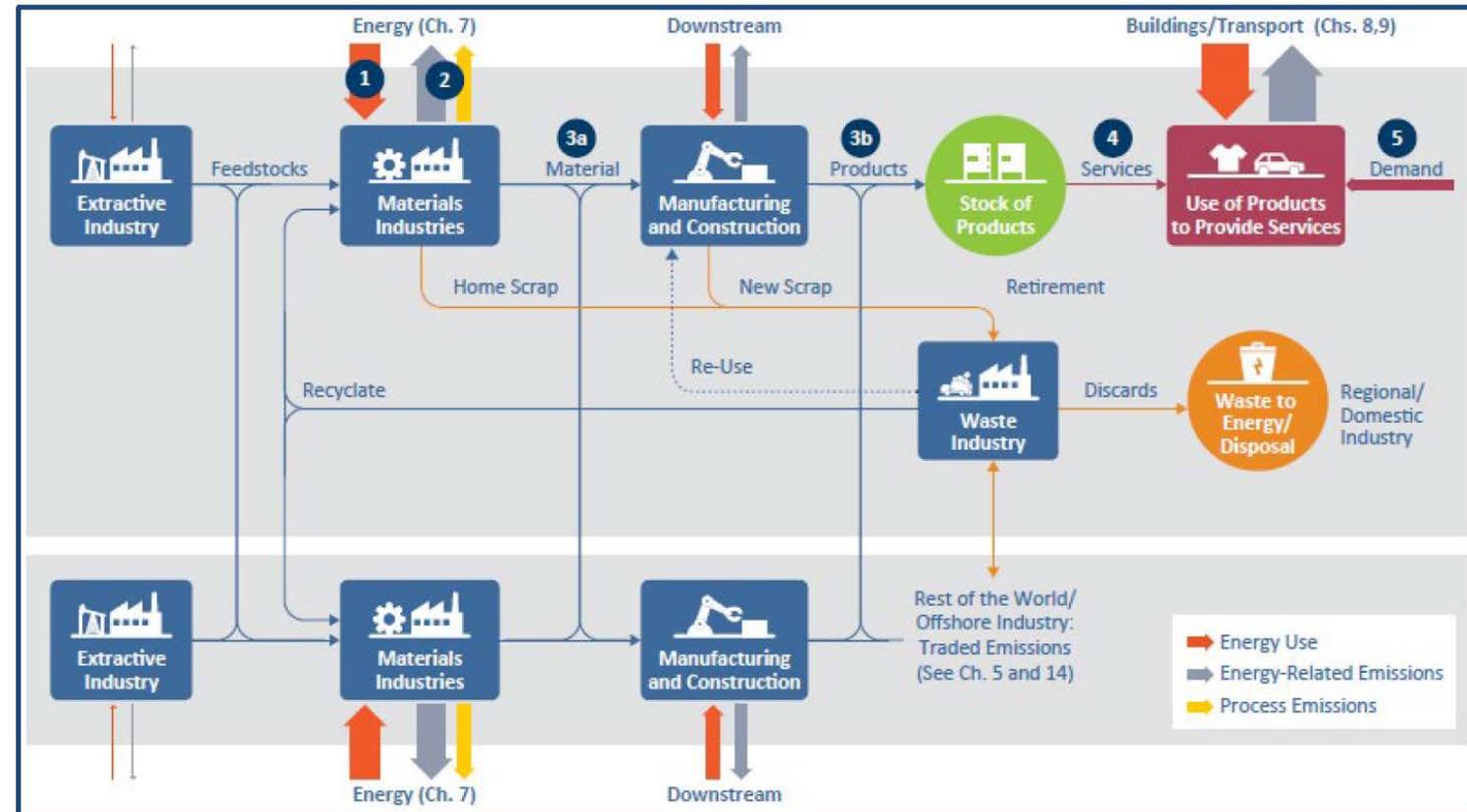
[ESYS 2023]

Klimaneutrale Industrie

Dreiklang an Maßnahmen

- Umstellung auf klimaneutrale Prozesse und Rohstoffe
 - Direktelektrifizierung
 - Grüner Wasserstoff
 - Tlw. Biomasse
 - Klimaneutrale Grundstoffe
- Kreislaufwirtschaft
- Materialeffizienz und –substitution

[ESYS 2023
nach IPCC 2021]



CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre

Vielfältige mögliche Kohlenstoffpfade

- Fokus auf nicht/schwer vermeidbare Emissionen (Landwirtschaft, Abfallwirtschaft, Industrieprozesse)

- Nicht für Emissionen aus fossilen Kraftwerken

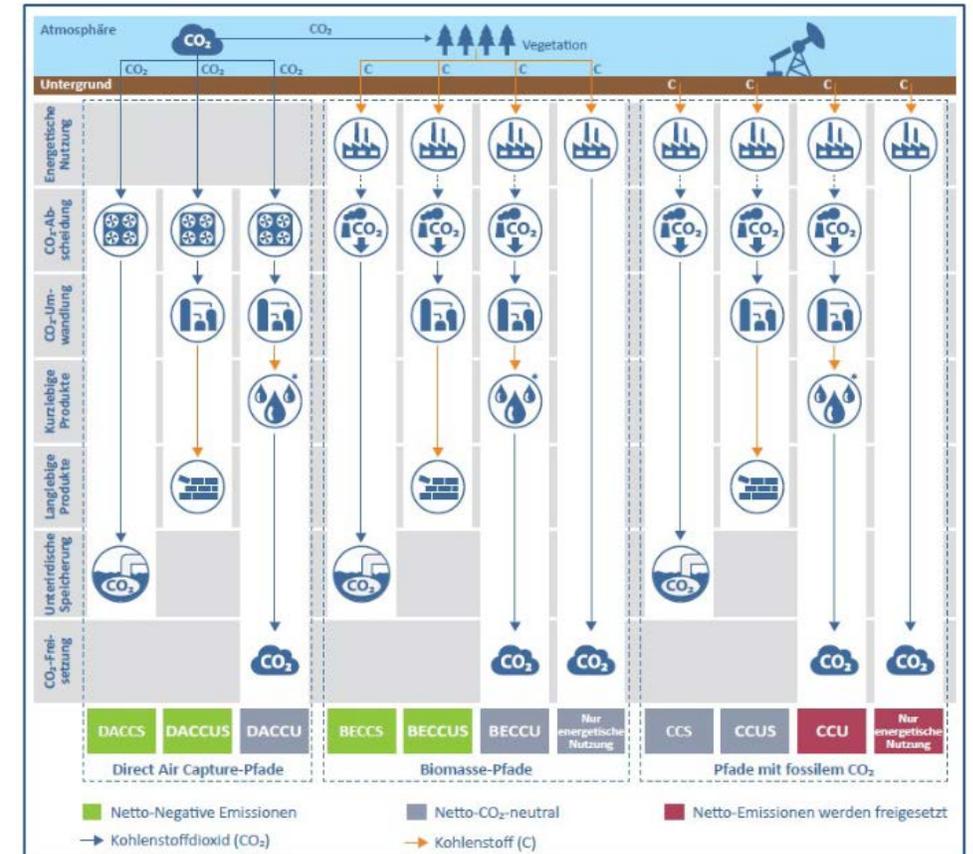
Mögliche Verfahren (Auswahl)

- Aufforstung, Kohlenstoffbindung im Boden, Pflanzenkohle,
- Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)
- Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)

Herausforderungen

- Viele Verfahren noch im frühen Entwicklungsstadium
- Unklare Permanenz
- Nutzungskonkurrenzen (Fläche, Biomasse, Energie)

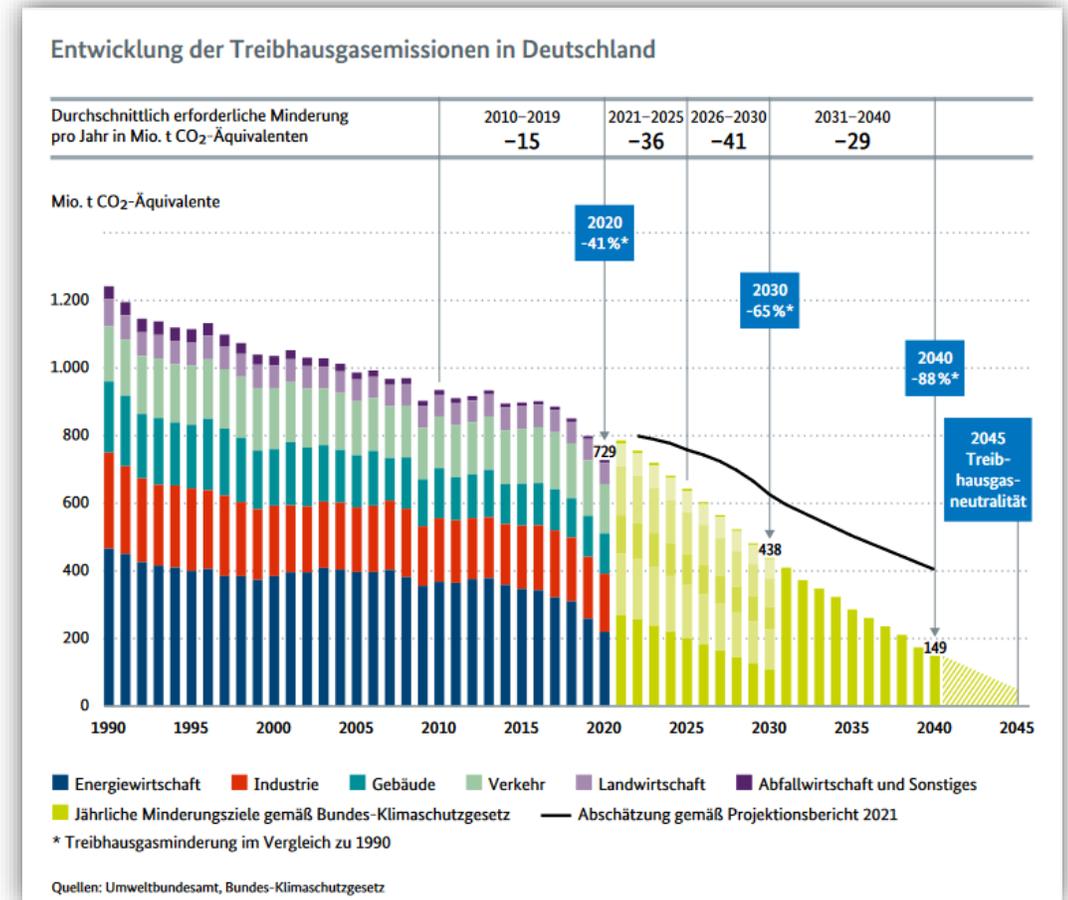
[ESYS 2023]



Einordnung Emissionen gemäß Klimaschutzgesetz

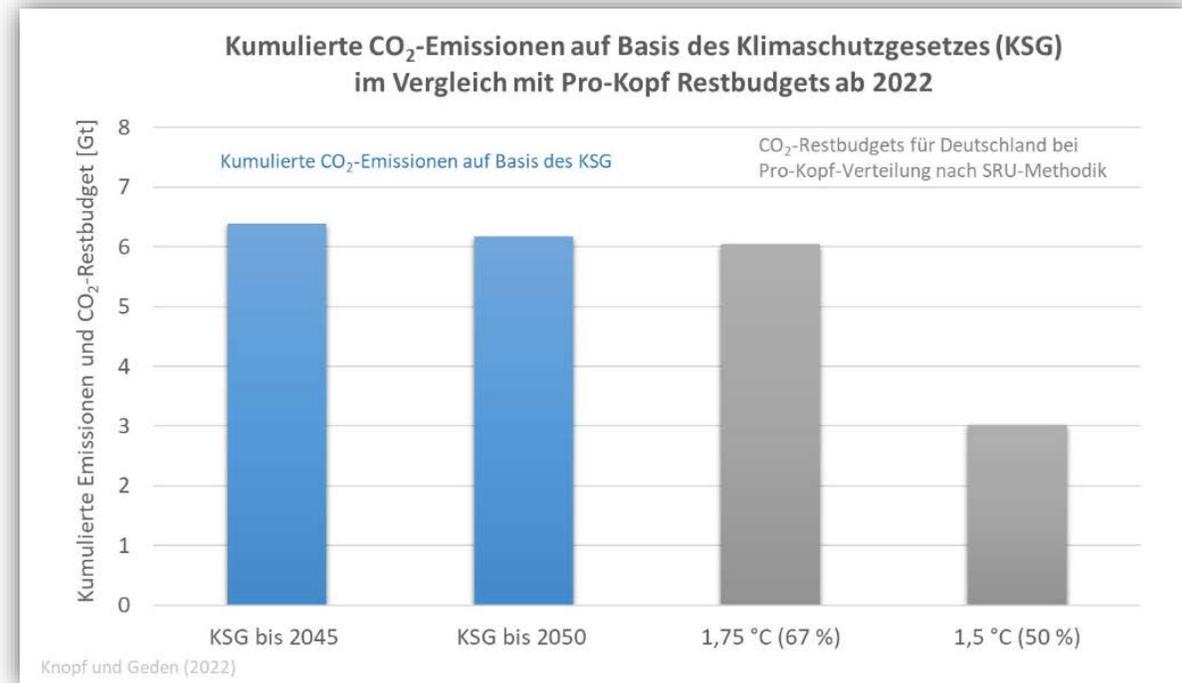
- Vorgesehener Reduktionspfad der Emissionen
- Klimaneutralität erst im Zieljahr
- Anschließend Übergang zu netto-negativen Emissionen

[BMWK 2022]



Einordnung Emissionen gemäß Klimaschutzgesetz

- Zielpfad der Emissionen im Klimaschutzgesetz führt zu 6,4 t kumulierten CO_{2äq} von 2022 bis 2045
- Kompatibel mit dem Paris-Ziel, den Temperaturanstieg „well below 2 °C“ zu halten (bei pro-Kopf-Verteilung des verbleibenden globalen CO₂-Budgets)
- Nicht kompatibel mit dem 1,5 °C-Ziel



Einordnung

Vernachlässigte Aspekte

Wichtige Aspekte werden in üblichen Energiesystemszenarien nicht betrachtet

- Lebenszyklusbetrachtung
- Betrachtung (kritischer) Rohstoffe für den Ausbau
- Berücksichtigung aller Energieverbräuche für das Schließen der Materialkreisläufe
- Berücksichtigung aller Energieverbräuche für Carbon Dioxide Removal

Ebenfalls wichtige Aspekte

- Nutzungskonkurrenzen Biomasse
- Nachhaltigkeitskriterien Wasserstoff

[<https://www.se-trends.de/kreislaufwirtschaft>]

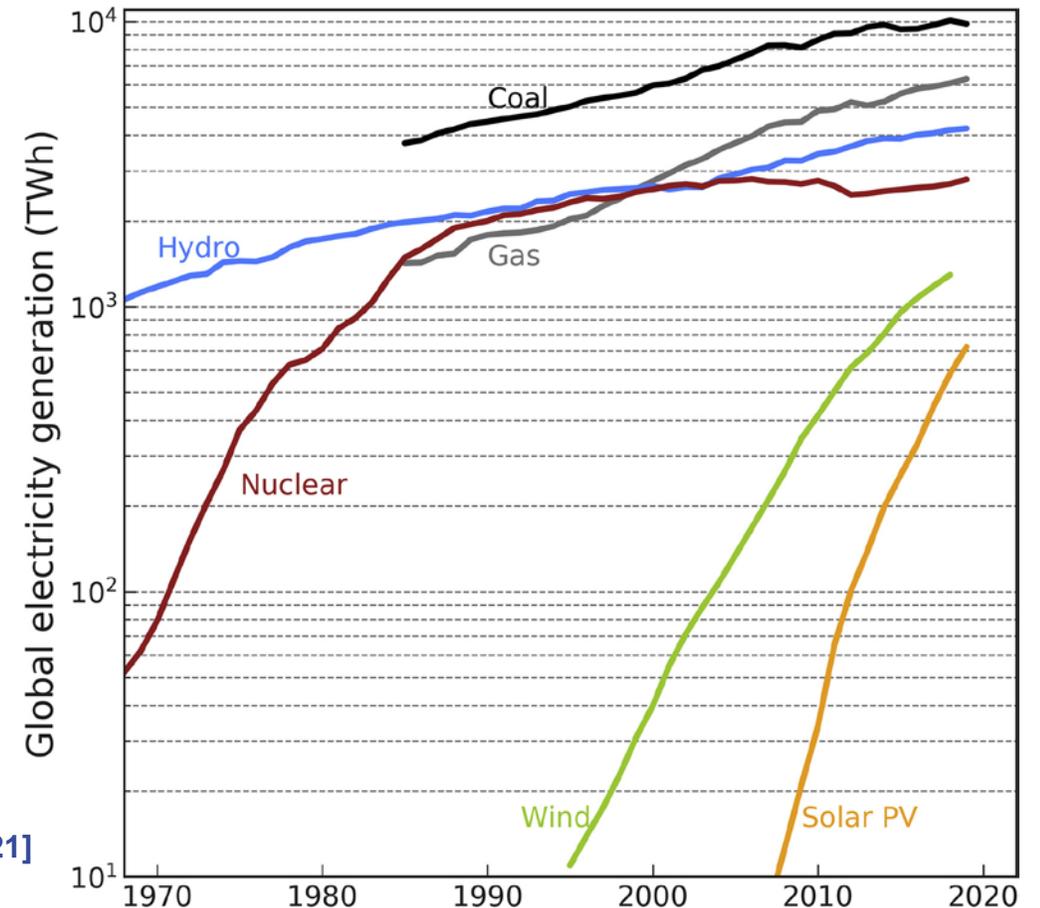


Was macht Hoffnung?

Rasante Entwicklung vor allem der Solarenergie

- Stärkste Wachstumsraten von allen Energiequellen
- 1 TW installierte Leistung in 2022
- Weitere Kostendegressionen und Ausweitung der Produktionskapazitäten möglich
- Rolle der Solarenergie wurde in Energieszenarien eher unterschätzt
- Vielerorts ist PV bereits heute die günstigste Stromerzeugungstechnologie

[Victoria et al. 2021]



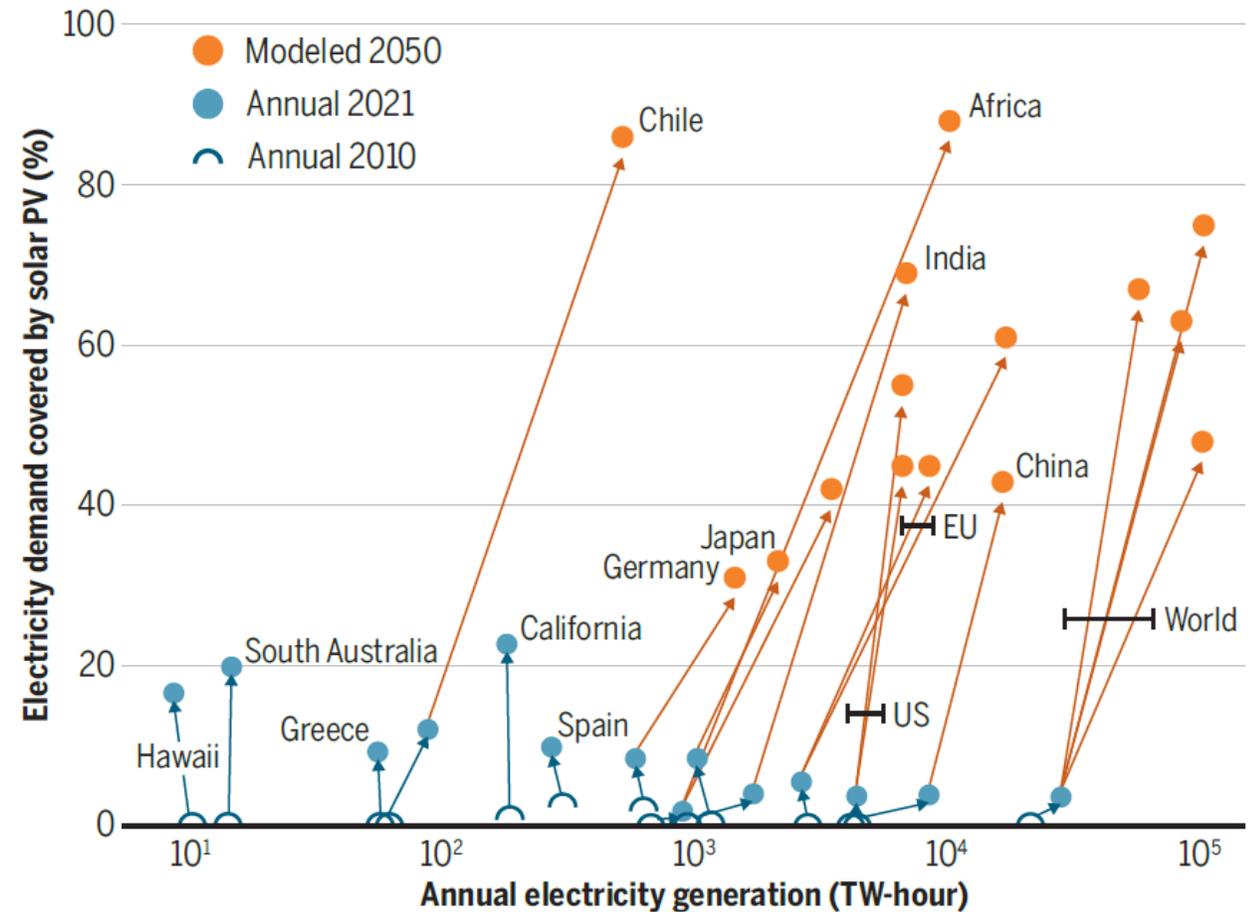
Weiterentwicklung

Entwicklung der Solarenergie (PV)

- Neuere Modellrechnungen sehen starke Relevanz der PV für die Stromerzeugung
- 75 TW installierte Leistung bis 2050 denkbar



[Haegel et al. 2023]



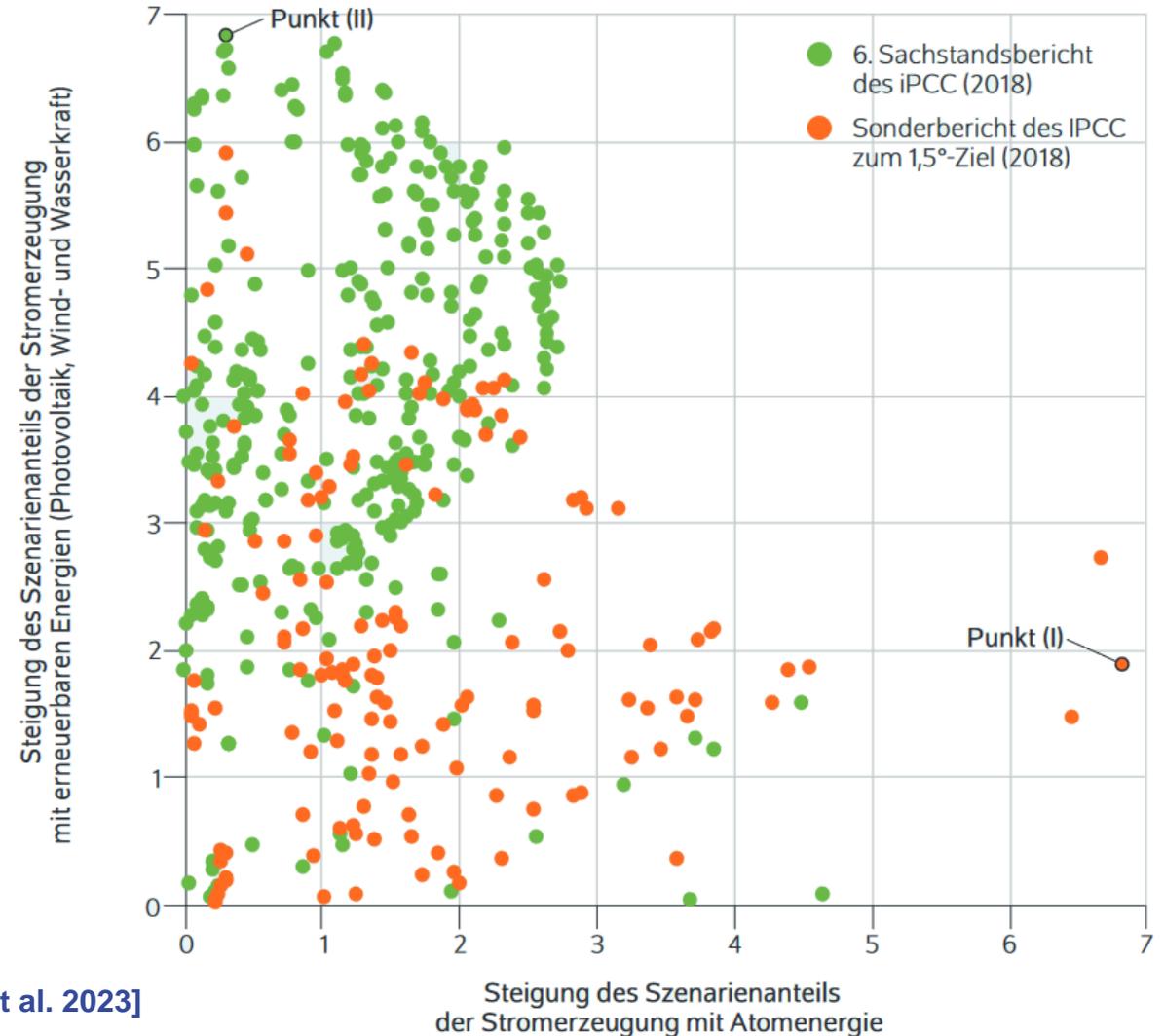
Andere Möglichkeiten?

Alternative Technologie Kernkraft

- Kernkraft war im Optionenraum ausgeschlossen (externe Setzung)
- Für den Fokus auf 2045 haben Laufzeitverlängerungen begrenzte Bedeutung
- Neubau von Kernkraftwerken prinzipiell denkbar
- Kostenprogression bei Kernkraft gegenüber Kostendegression bei Wind und PV
- Lange Umsetzungszeiten unterstützen Ziel 2045 voraussichtlich nicht
- In neueren Szenarien verlagert sich der Fokus zunehmend weg von der Kernenergie

[Wimmers et al. 2023]

Energie- und Klimaszenarien im IPCC 1,5-Grad-Bericht (2018) und IPCC sechsten Sachstandsbericht (2022)
Steigung Anteil an Stromproduktion 2020-2100 in Promille



Klimaneutrales Energiesystem



Fazit

Erkenntnisse aus der Szenarienarbeit

- Die Herausforderungen bei der Erreichung von Klimaneutralität sind enorm
- Maßnahmen in vielen Bereichen und Sektoren gleichzeitig und beschleunigt erforderlich
- Umsetzungsgeschwindigkeit muss stark gesteigert werden
- Die Basis des klimaneutralen Energiesystems – Wind- und Solarenergie – sind vorhanden und haben aktuell hohe Wachstumsraten
- Es werden weitere Technologien benötigt, von denen viele noch nicht technisch ausgereift sind
- Wichtige Aufgabe: Systemintegration

Anke Weidlich

INATECH

Telefon +49 761 203-54011

anke.weidlich@inatech.uni-freiburg.de

Quellen

- BMWK 2022: Eröffnungsbilanz Klimaschutz, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Haegel et al. 2023: Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option. *Science*, 380(6640), 39-42, DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>
- ESYS 2023: Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement, https://doi.org/10.48669/esys_2023-3.
- FhG ISE: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Nationales Energiesystemmodell mit Fokus auf sektorübergreifende Systementwicklung, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/leistungselektronik-netze-und-intelligente-systeme/energiesystemanalyse/energiesystemmodelle-am-fraunhofer-ise/remod.html>
- IPCC 2014: Fünfter Sachstandsbericht.
- IPCC 2021: Working Group III – Mitigation of Climate Change, Chapter 10: Industry.
- Victoria et al. 2021: Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule*, 5(5), 1041-1056, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005>.
- Wimmers et al. 2023: DIW Wochenbericht Nr. 10/2023, DOI: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2023-10-1.