



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Transformationspfade für ein klimaneutrales Deutschland

Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement

Dr. Berit Erlach (acatech)
24.05.2023 Kolloquium für Erneuerbare Energie, München

www.energiesysteme-zukunft.de

Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS)



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN
DER WISSENSCHAFTEN



- Gemeinsame Initiative der deutschen Wissenschaftsakademien
- Unabhängige, wissenschaftsbasierte Politikberatung mit mehr als 100 Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Forschung
- Interdisziplinäre Dialogformate mit Stakeholdern der Energiewende
- Publikationen mit Handlungsoptionen zum Umbau des Energiesystems für eine nachhaltige, sichere und bezahlbare Energieversorgung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Klimaziele

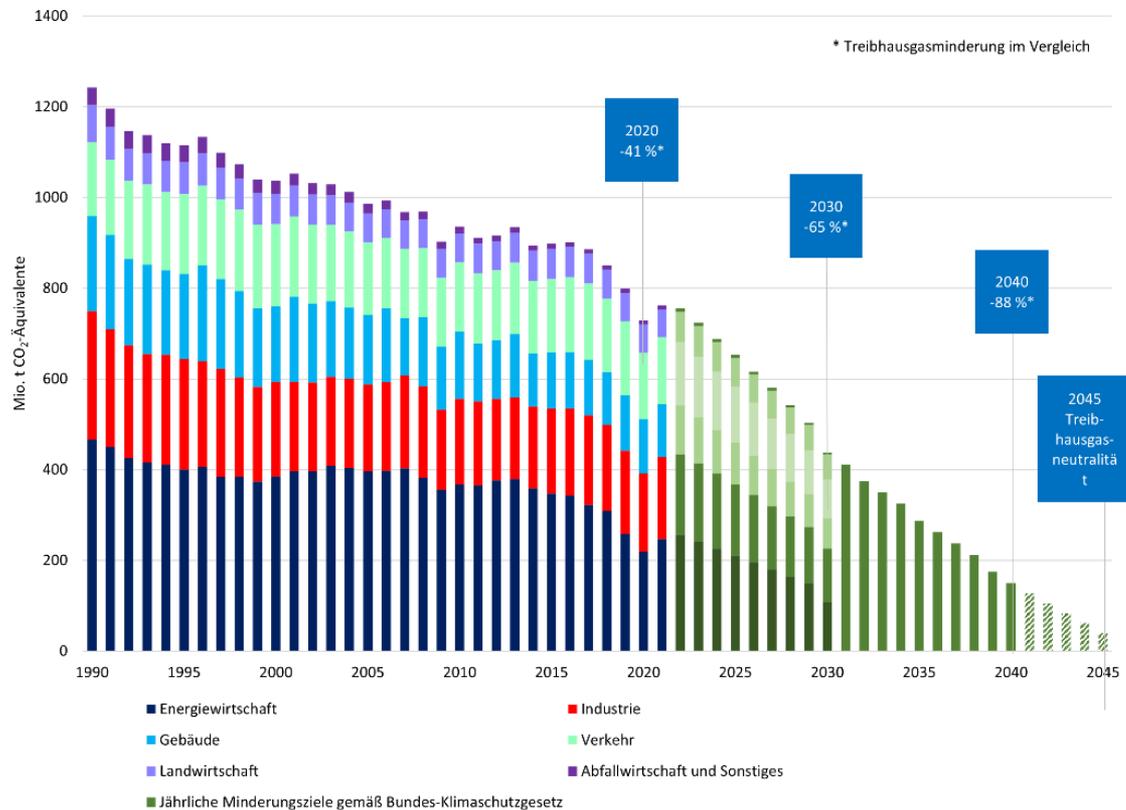
Nur noch 22 Jahre bis zur Klimaneutralität



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

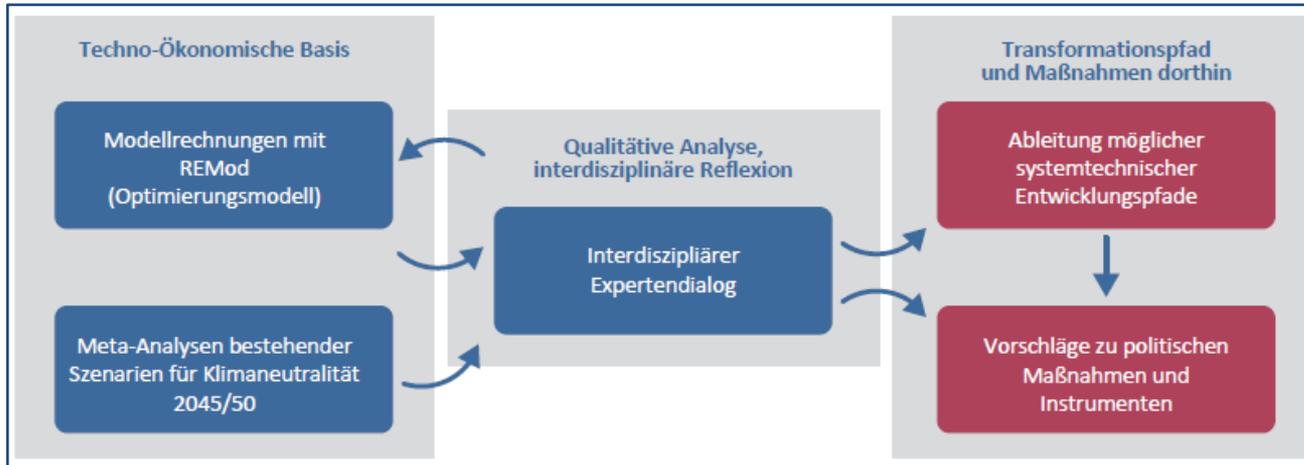


Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland



- -65% ggü. 1990 bis 2030
- -88% bis 2040
- Netto-Klimaneutralität 2045
- Fokus auf Energiesystem nicht mehr ausreichend
- schwer vermeidbare Restemissionen müssen durch CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre ausgeglichen werden
- Für das Klima zählt die Gesamtmenge an Emissionen, die noch ausgestoßen wird (Budget)

Untersuchung von **Transformationspfaden** zu einer klimaneutralen Energieversorgung und industriellen Produktion bis 2045



Modellrechnungen:

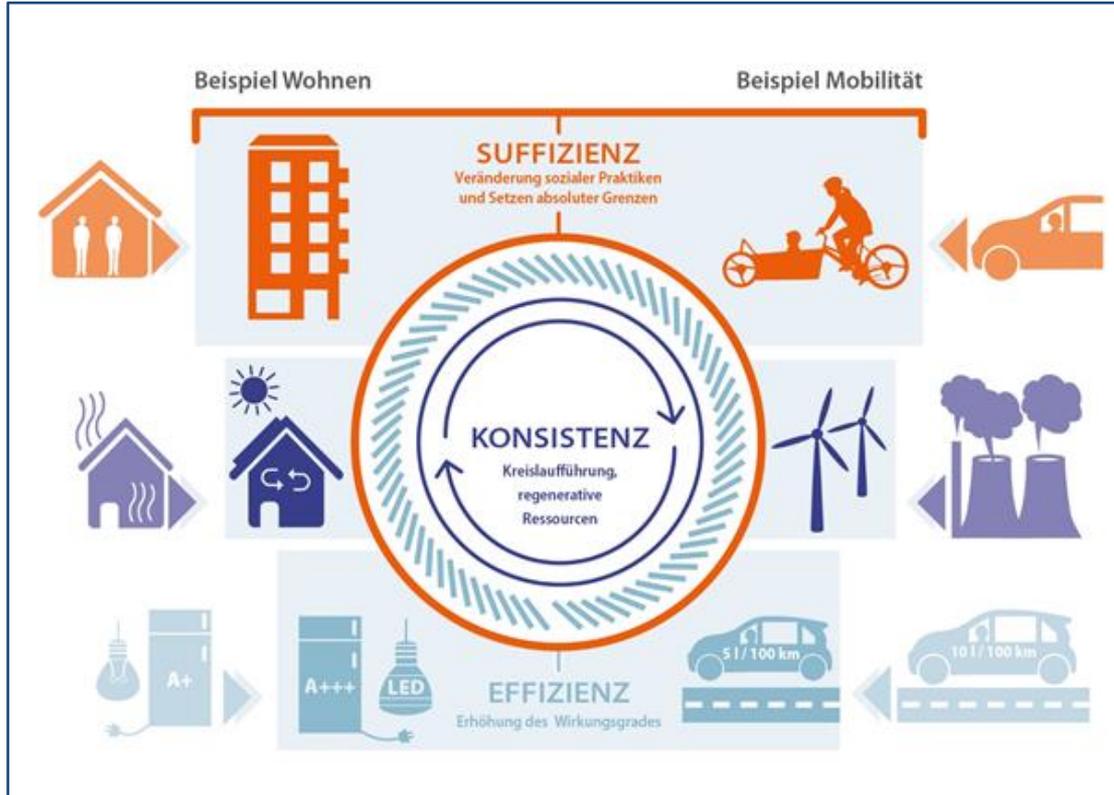
Modell REMod, entwickelt am Fraunhofer ISE

Meta-Analyse:

- BMWK Langfristszenarien
- Dena Leitstudie
- Agora Energiewende
- BDI Klimapfade
- Kopernikus-Projekt Ariadne
- Forschungszentrum Jülich
- UBA RESCUE-Studie

Strategien der Transformation

Suffizienz – Effizienz – Konsistenz



- **Konsistenz** (Umstellung auf erneuerbare Energieträger und klimaneutrale Produktionsverfahren) spielt in allen Szenarien eine wichtige Rolle
- Erhöhung der **Energieeffizienz** spielt in allen Szenarien eine große Rolle (teils als Folge der Elektrifizierung, teils gezielte Anstrengungen z.B. Gebäudesanierung)
- Ambitionierte **Suffizienzmaßnahmen** werden in wenigen Studien untersucht

Endenergiebedarf

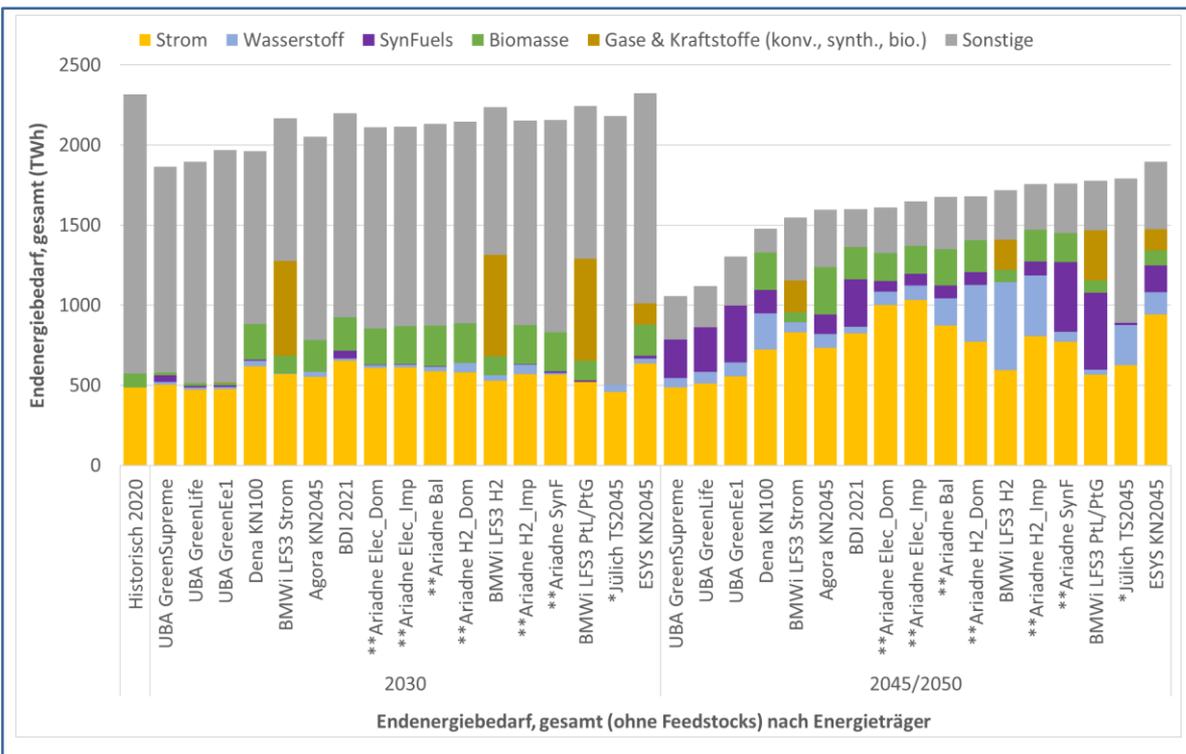
sinkt in allen Szenarien



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

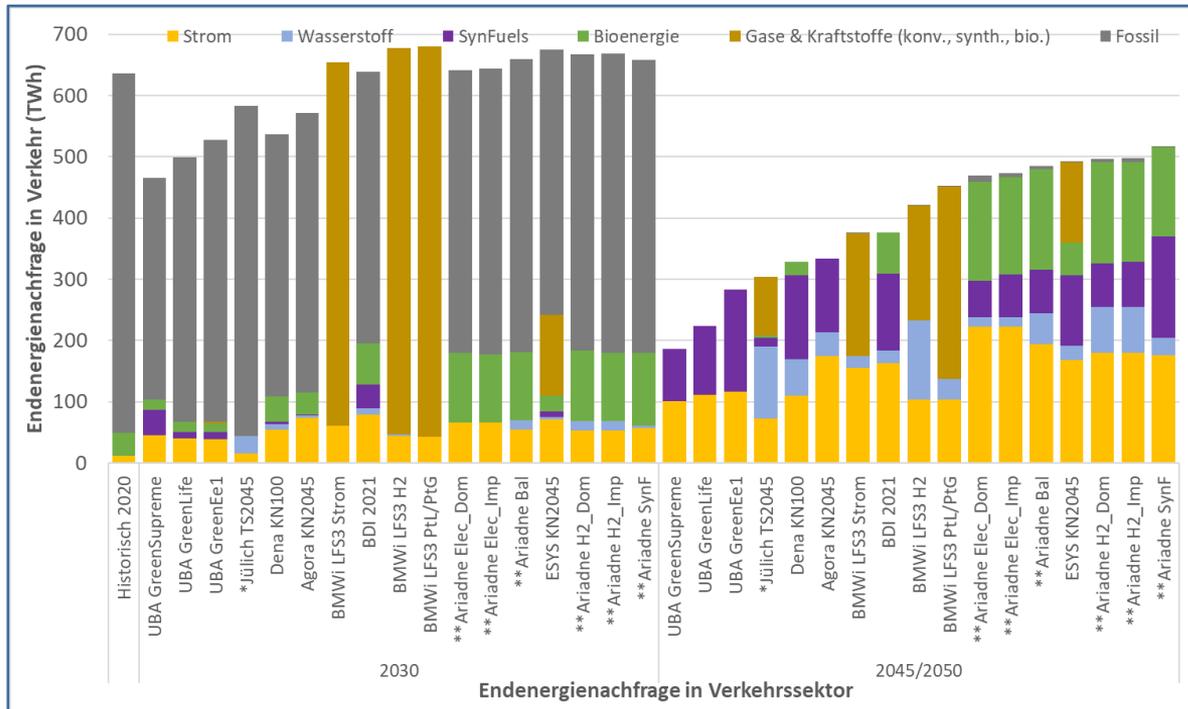
UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEEN
DER WISSENSCHAFTEN



- sinkt um 3-20% bis 2030 und um 23-54% bis 2045/50
- Strombedarf steigt durch Elektrifizierung

Verkehrssektor

Sinkende Endenergienachfrage durch Elektrifizierung



- Alle Szenarien gehen von einer umfassenden Elektrifizierung im Individualverkehr aus
- Sehr unterschiedliche Annahmen zu Mobilitätsverhalten und unterschiedliche Bilanzgrenzen
- Etwa die Hälfte der Szenarien sehen Biokraftstoffe als wichtigen Energieträger

Gebäudesektor

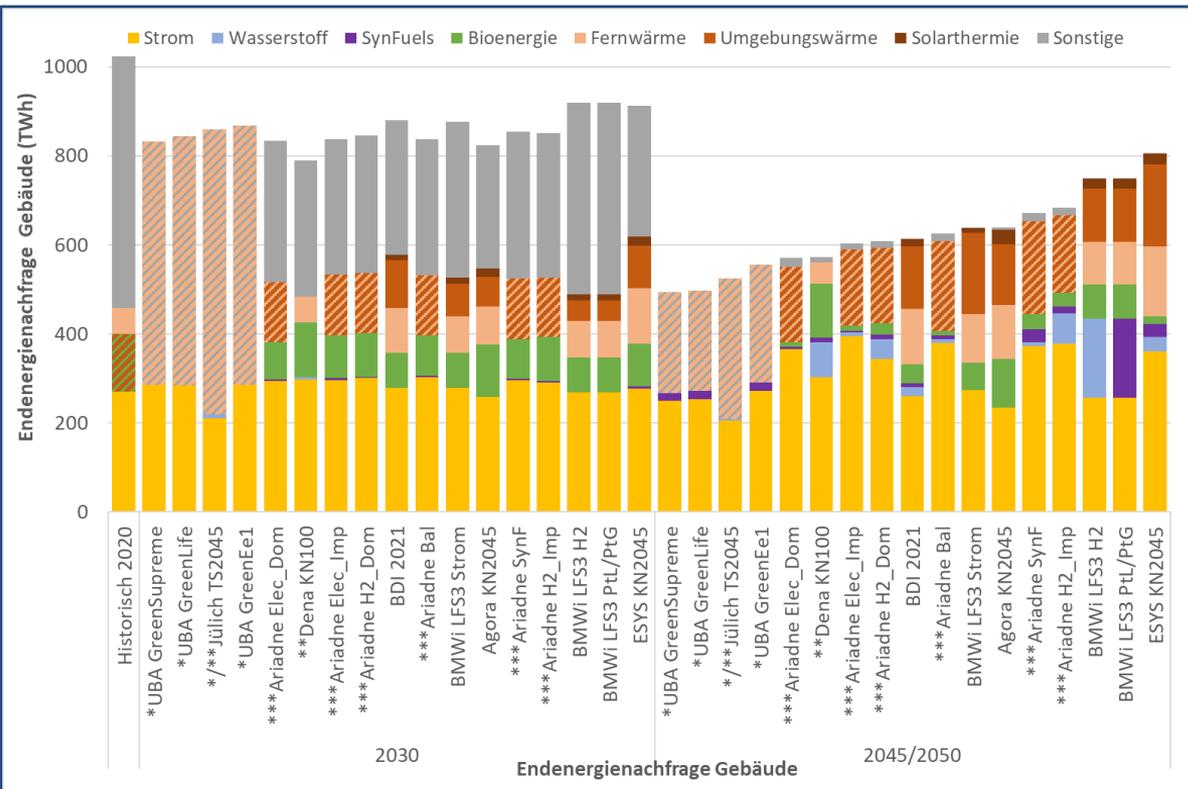
Elektrifizierung, Fernwärme, Sanierung



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEEN
DER WISSENSCHAFTEN



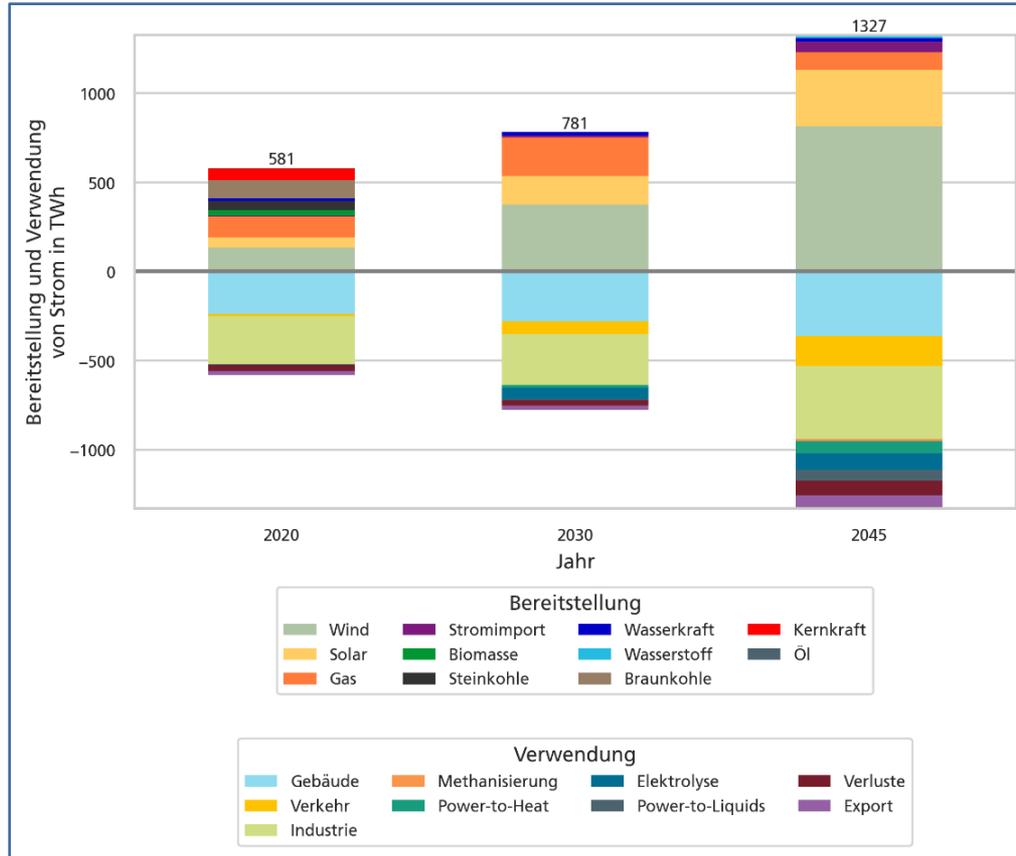
- Elektrische Wärmepumpen
- Aus- und Umbau der Fernwärmenetze
- Deutliche Erhöhung der Sanierungsraten
- Anteil von Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen ist in Szenarien mit Gesamtkostenoptimierung sehr gering, sofern nicht exogen höhere Anteile vorgegeben sind.

Stromerzeugung und -verbrauch

steigen stark in allen Szenarien



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



- Etwa Verdoppelung der Stromnachfrage bis 2045
- Elektrifizierung in Gebäudesektor, Verkehr, Industrie
- >200 TWh zur Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern

Ambitionierte Ausbau Windenergie & PV

zur Deckung des steigenden Strombedarfs

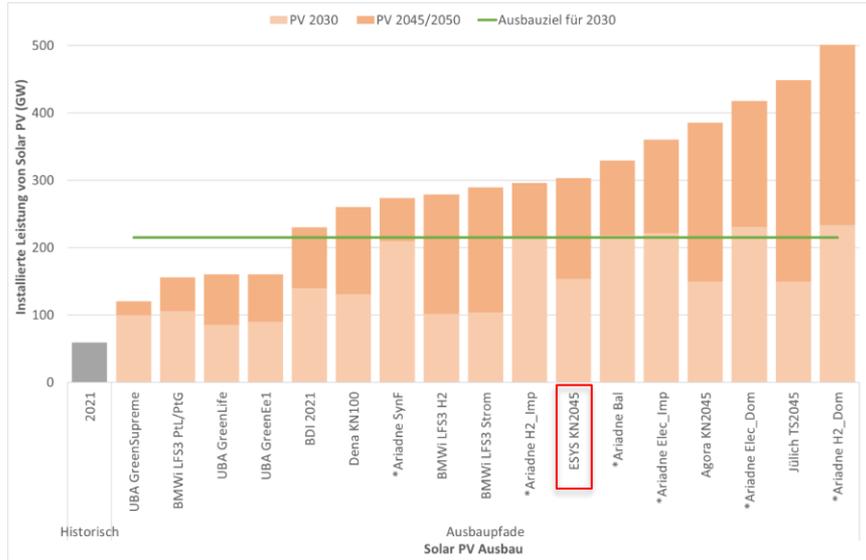


Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

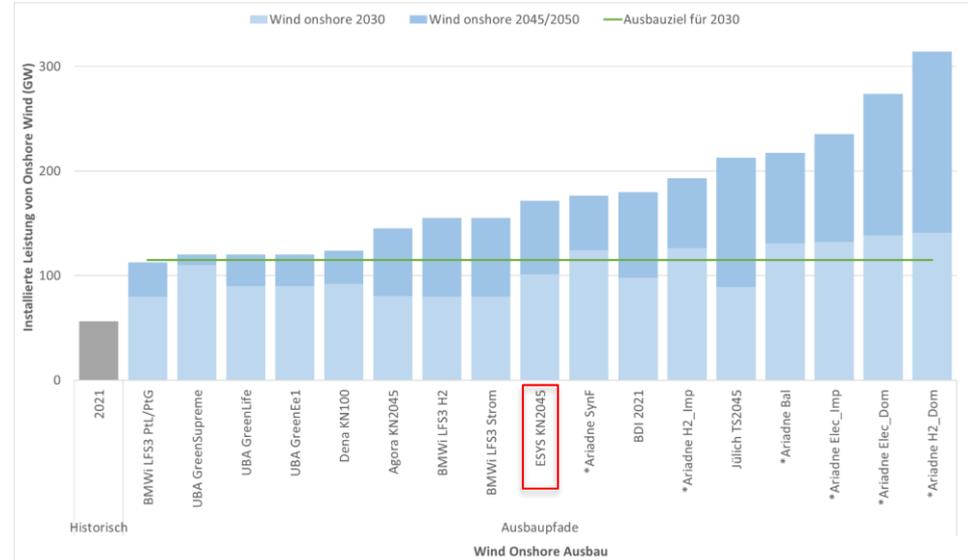
acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEEN
DER WISSENSCHAFTEN

Photovoltaik



Windenergie an Land



Ambitionierte Ausbau Windenergie & PV

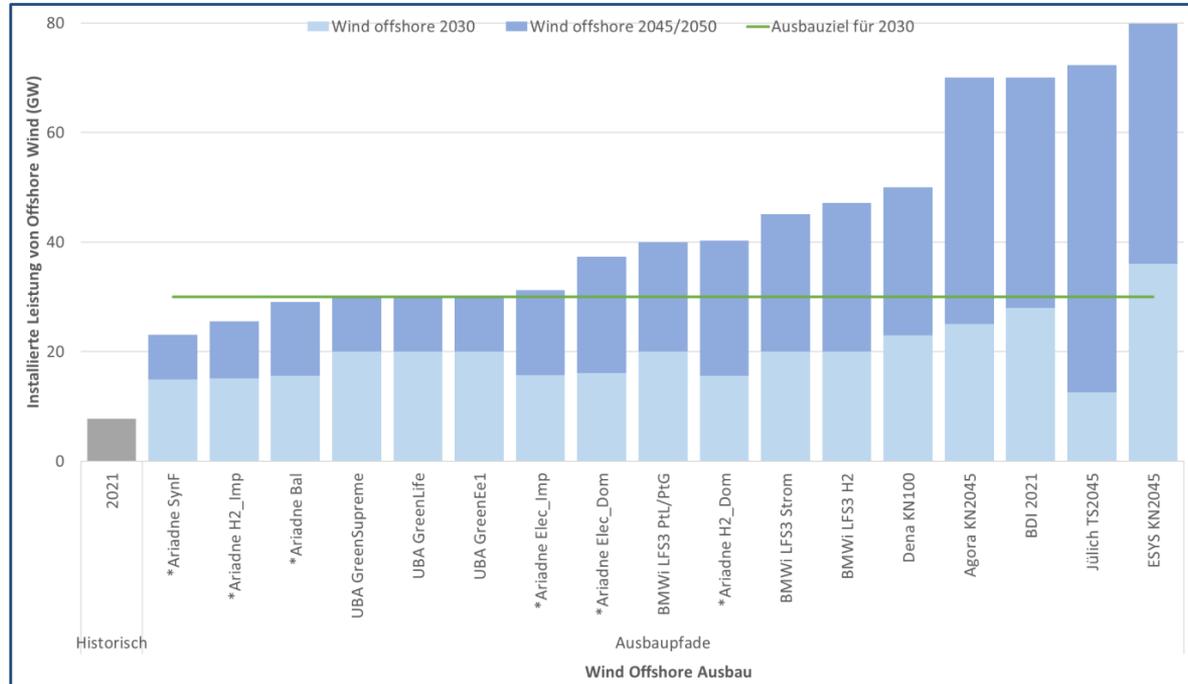
zur Deckung des steigenden Strombedarfs



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Windenergie auf See



Elektronen und Moleküle

beides wird benötigt



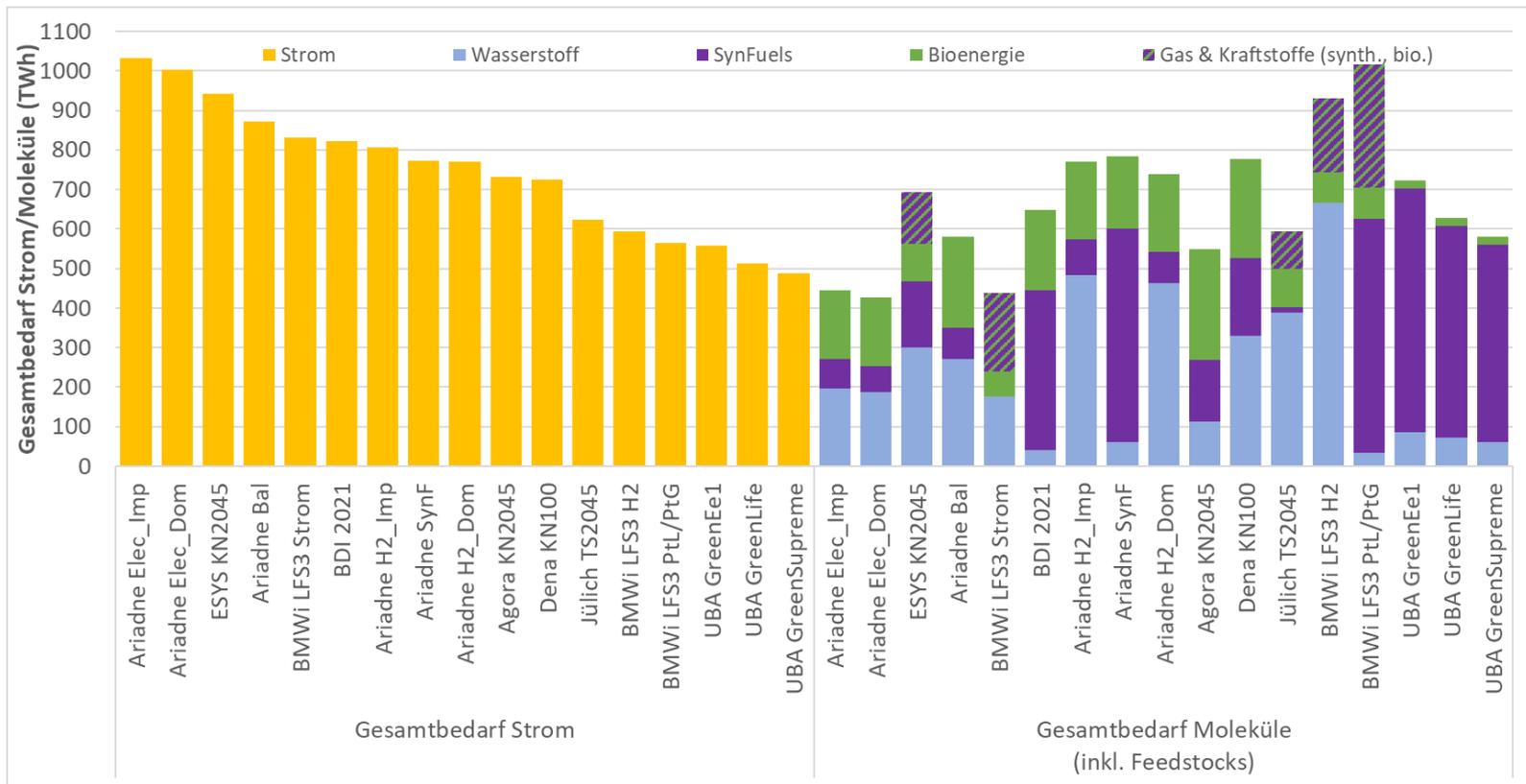
Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



	Industrie	Verkehr	Gebäude
Einsatz von stofflichen Energieträgern (inklusive 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	Fernwärmeerzeugung (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

Elektronen und Moleküle

Der richtige Mix



Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft

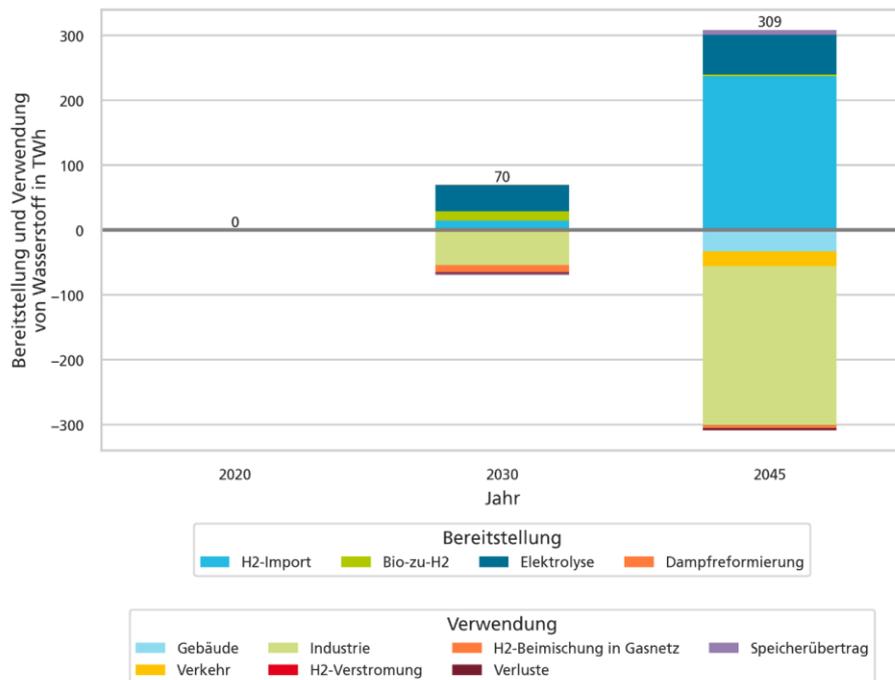
Vor allem für klimaneutrale Industrie nötig



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Wasserstoff-Hochlauf (ESYS-Hauptzenario)

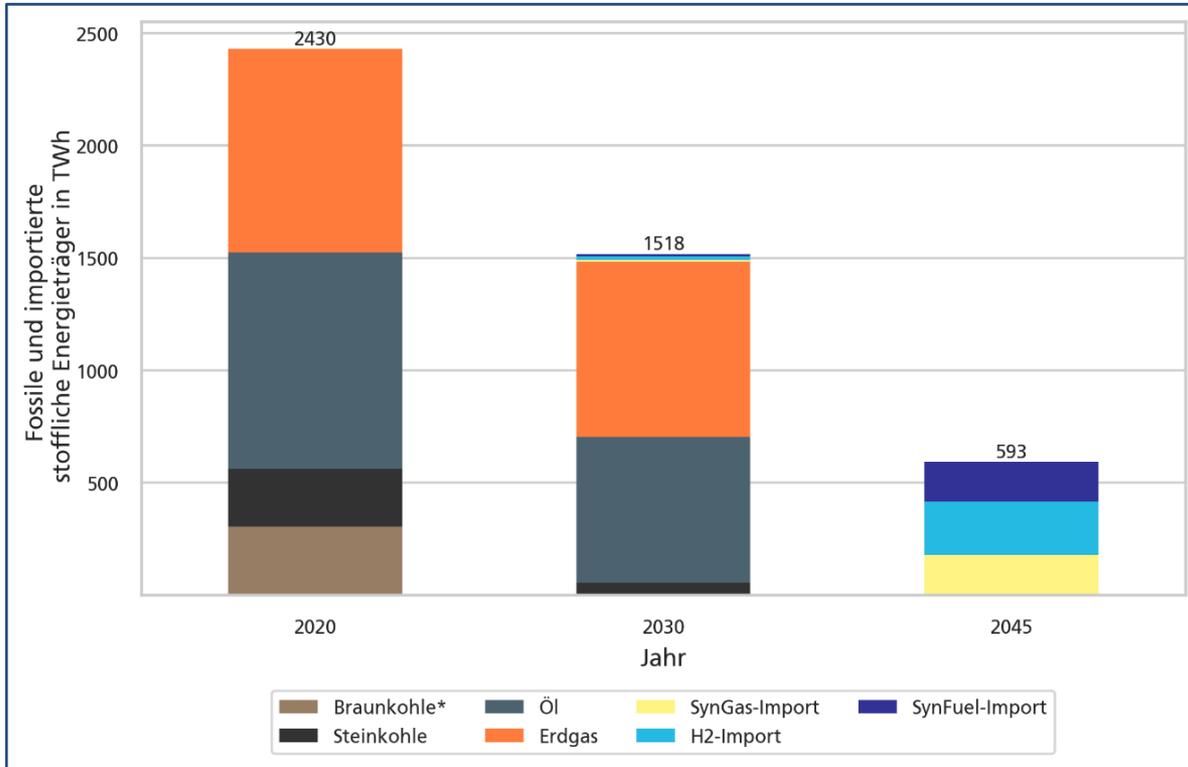


- Im Hauptzenario wird in 2030 bereits viel Wasserstoff in der Industrie eingesetzt
- In 2030 kommt ca. 80% des Wasserstoffs aus heimischer Erzeugung
- Starker Anstieg des Wasserstoffbedarfs bis 2045, insb. in der Industrie
- In 2045 kommt ca. 80 % des Wasserstoffs aus Importen

Importe von Energieträgern sind in allen Szenarien erforderlich



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



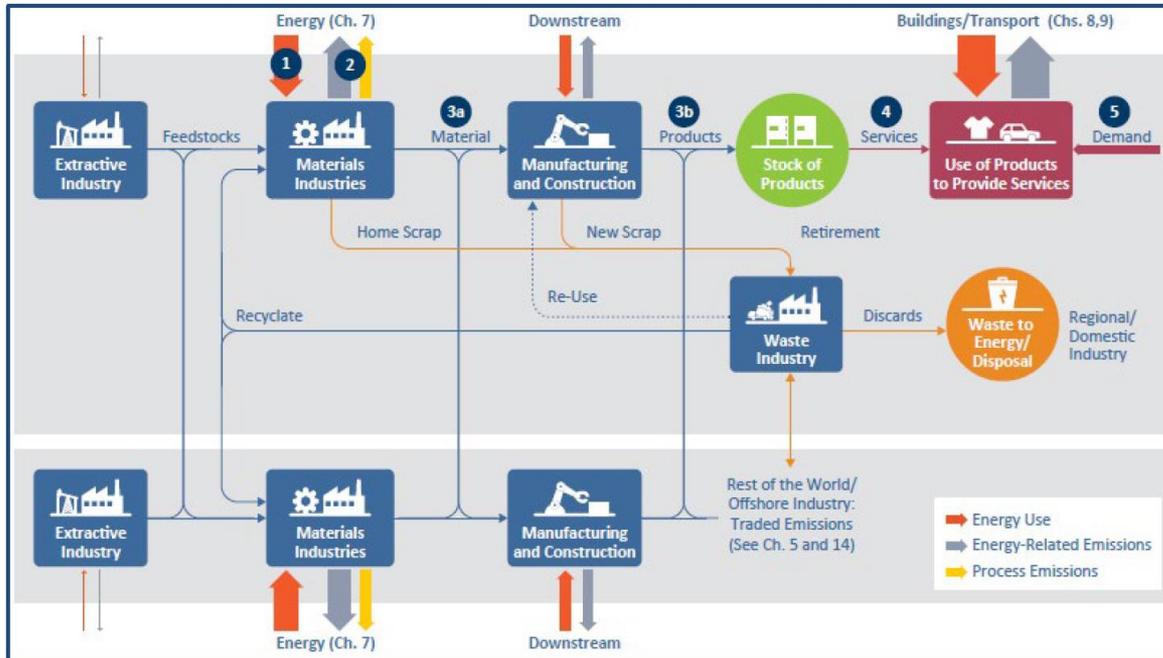
- Verglichen mit heute gehen die Importe deutlich zurück
- 2045 werden in verschiedenen Szenarien 50-90% des Bedarfs an Wasserstoffs und >90% des Bedarfs an synthetischen Energieträgern über Importe gedeckt

Industrielle Produktion

Klimaneutrale Prozesse, Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Zahlreiche Ansatzpunkte entlang der gesamten Prozesskette:

- Energieversorgung auf Strom und grünen Wasserstoff umstellen
- neue Produktionsrouten (z.B. Stahl)
- Klimaneutrale Feedstocks (aus Biomasse oder aus H_2+CO_2)
- bei Zement und Kalk: CCS
- Langlebige, reparierbare Produkte
- Materialsparende Bauweisen
- Design-for-Recycling
- Einsatz von Sekundärrohstoffen
- Investitionszyklen berücksichtigen

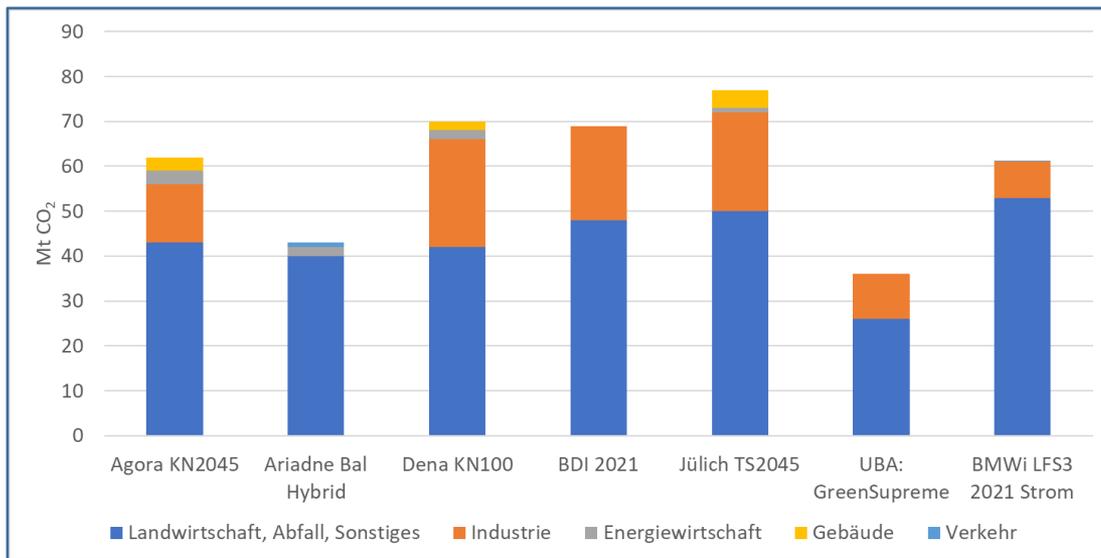
Verfahren	Einsatzgebiete
Kohlendioxidabscheidung und -speicherung in geologischen Formationen (CCS)	Verfahren für die langfristige Lagerung des CO ₂ , kann unabhängig von der CO ₂ -Quelle eingesetzt werden: <ul style="list-style-type: none">• Abscheidung von CO₂ an industriellen Punktquellen (insbesondere Prozessemissionen in der Zement- und Kalkindustrie)• Aus der Atmosphäre entzogenes CO₂ (bioenergy with carbon capture and storage – BECCS, direct air capture and storage – DACCS)
CO ₂ -Entnahme aus der Atmosphäre („Negative Emissionen“) (CDR)	Ausgleich schwer vermeidbarer Restemissionen, die in der Fläche verteilt entstehen (insbesondere Nicht-CO ₂ -Treibhausgase aus der Landwirtschaft) <ul style="list-style-type: none">• Verfahren mit CCS• Verfahren mit Speicherung des Kohlenstoffs in Vegetation und Boden• Speicherung des Kohlenstoffs in langlebigen Produkten (z.B. Baumaterialien)
Kohlendioxidabscheidung und -verwendung (CCU)	CO ₂ als Kohlenstoffquelle (alternativ zu Erdöl/Erdgas) <ul style="list-style-type: none">• Klimabilanz abhängig von CO₂-Quelle und Produktlebensdauer• In den meisten Fällen keine negativen Emissionen• Bei Verwendung fossilen CO₂ in der Gesamtkette nicht CO₂-neutral

Kohlenstoffmanagement

Residualemissionen



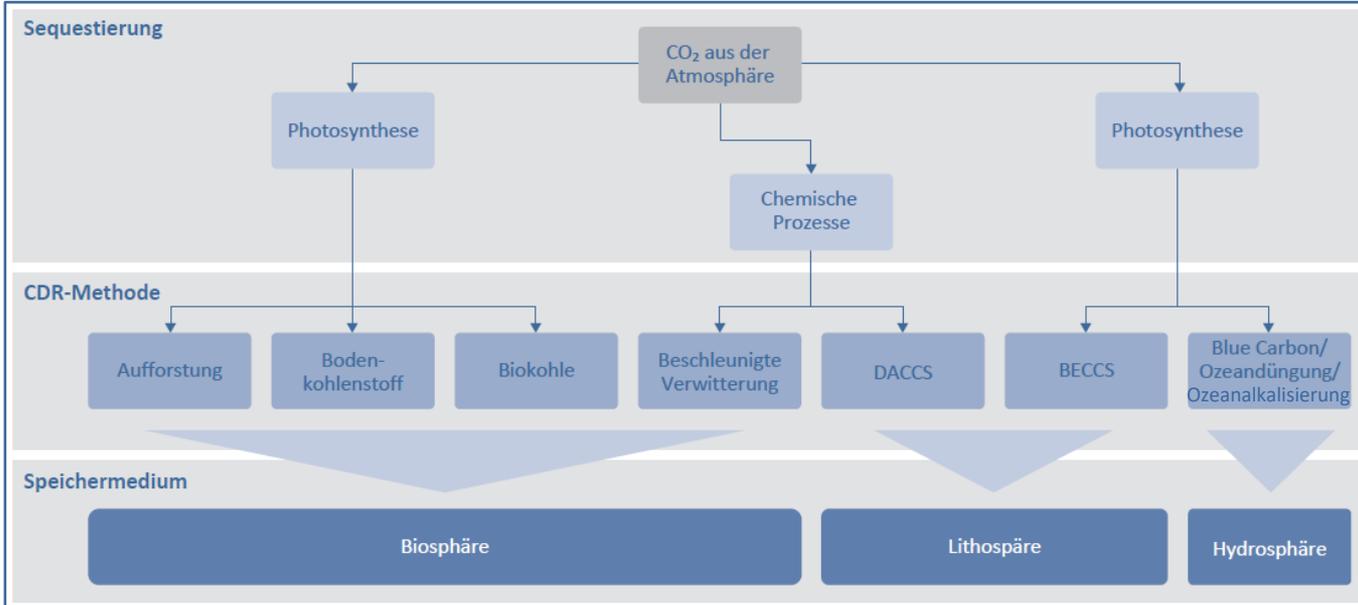
Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



- Restemissionen 2045 betragen 2,9-6,2 % der CO₂-Äquivalent-Emissionen 1990
- Die in den Szenarien ausgewiesenen Restemissionen beinhalten nicht das mit CCS abgefangene CO₂ aus Industrieprozessen

Kohlenstoffmanagement

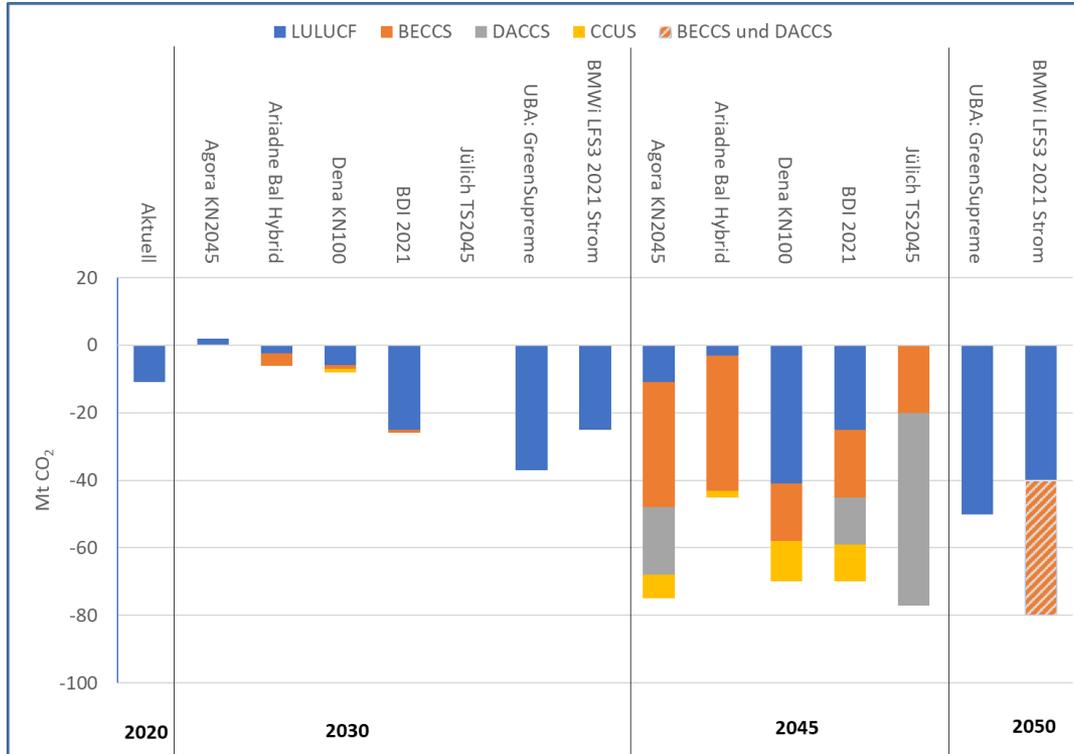
CO₂-Entnahmeverfahren



- Potenziale
- Umweltrisiken
- Permanenz der Speicherung
- Kosten
- Großskalige Implementierung

Kohlenstoffmanagement

CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (CDR)



- Senkenleistung im Bereich Landnutzung und Forstwirtschaft (LULUCF) sehr unsicher
- Nach 2050 voraussichtlich netto-negative Emissionen erforderlich → steigender Bedarf an CDR

Kohlenstoffmanagement

CCS kommt in den meisten Szenarien zum Einsatz



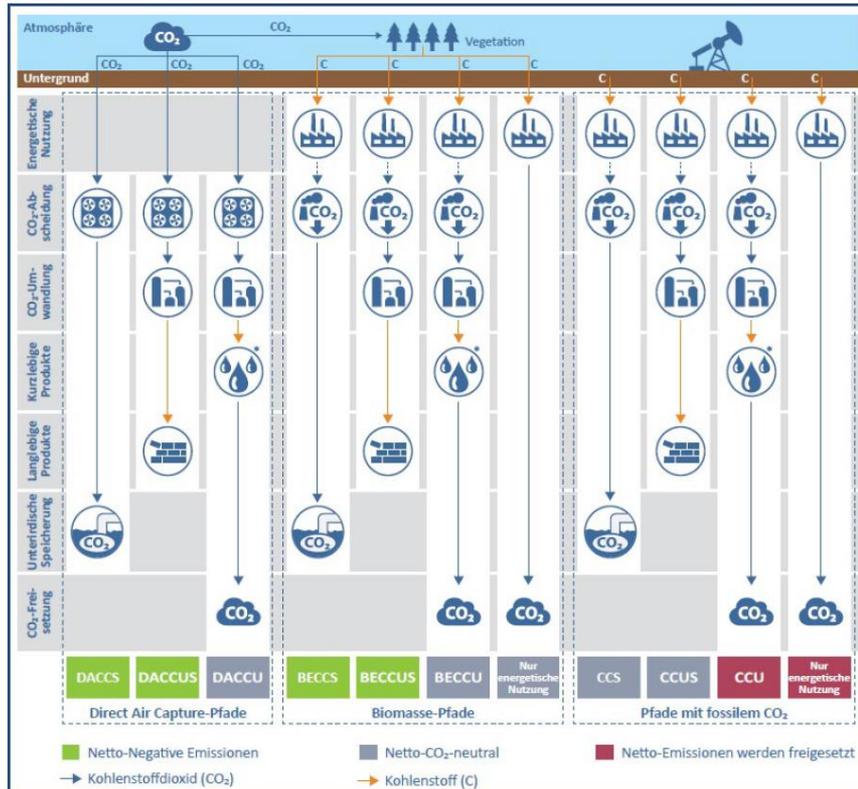
Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



- Bei Verzicht auf CCS werden zusätzliche Restemissionen freigesetzt (z.B. Zementwerke), die ausgeglichen werden müssen. Gleichzeitig sinkt das CDR-Potenzial durch Verzicht auf BECCS und DACCS.

Kohlenstoffmanagement

Rechtsrahmen erforderlich



- Aussicht auf CO₂-Entnahme soll Ambitionen in Vermeidung nicht schmälern
- Definition zulässiger Restemissionen
- Accountingregeln müssen klar definiert werden
 - Prozesskette CCU
 - Permanenz der CO₂-Speicherung
- Forschungsbedarf zu Risiken und Umweltauswirkungen der Entnahmeverfahren
- Anreize für CDR-Einsatz, CCS und CCU sind erforderlich
- Infrastrukturen für CO₂-Transport erforderlich

Schlussfolgerungen

Tiefgreifende Transformation in vielen Bereichen

- Das Ambitionsniveau der Transformation ist sehr hoch!
- 100 % erneuerbare Energien rasch benötigt
- Großer Handlungsbedarf auch in „schwierigen“ Sektoren Industrie, Gebäude & Verkehr
- Suffizienz ist wichtiger Teil der Transformation
→ politische Gestaltung nötig
- Sektorenübergreifende Infrastrukturen erforderlich
→ Systementwicklungsstrategie
- Schwer vermeidbare Emissionen müssen ausgeglichen werden → Kohlenstoffmanagement
- Alle Bereiche müssen zeitgleich adressiert werden



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN
DER WISSENSCHAFTEN





Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Kontakt

Koordinierungsstelle Energiesysteme der Zukunft

Dr. Berit Erlach
Wissenschaftliche Referentin

Pariser Platz 4a
10117 Berlin

erlach@acatech.de

www.energiesysteme-zukunft.de



Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften