

Der Hochlauf von Negativen Emissionstechnologien in der Transformation des deutschen Energiesystems

Markus Kaiser, Charlotte Senkpiel, Saskia Kühnhold-Pospischil, Christoph Kost

Negative Emissionstechnologien in der Transformation des Energiesystems

Gliederung

1. Kernbotschaften

2. Hintergrund

3. Ergebnisse

- Hochlauf von Negativen Emissionstechnologien (NETs)
- Einbindung von Negativen Emissionstechnologien in das deutsche Energiesystem
- Transformation des Energiesystems

4. Anhang

- Abkürzungsverzeichnis
- Techno-ökonomische Parameter der Negativen Emissionstechnologien
- Modellbeschreibung REMod

Schleuniger Ausbau von breitem NET-Mix ist zentral für Klimazielerreichung

Kernbotschaften

1

Ein Technologiemark aus BCR, BECCS, DACCS und WACCS ist erforderlich, um THG-Neutralität 2045 zu erreichen. Ein frühzeitiger Hochlauf von BCR kann dabei das Risiko abfedern, Klimaziele wegen eines verzögerten Hochlaufs von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS zu verfehlen.

2

BECCS und BCR werden 2045 zu zentralen Verbrauchern der energetisch genutzten Biomasse und können einen relevanten Teil der benötigten Fernwärme bereitstellen. Dies erfordert eine zielgerichtete Strategie für eine Allokation der verfügbaren, nachhaltigen Biomasse.

3

Ein verzögerter Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS erhöht das Risiko einer Verfehlung der Klimaziele erheblich und führt zu höheren Anforderungen an Defossilisierung und Elektrifizierung in den Verbrauchssektoren.

4

Eine starke Elektrifizierung in den Verbrauchssektoren, sowie der zügige Ausbau erneuerbarer Energien sind zentral für die Energiesystemtransformation – unabhängig vom Technologiemark der NETs und dem Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS.

Auftraggeber & AutorInnen der Studie

Hintergrund

Auftraggeber



Carbonfuture GmbH



Deutscher Verband für negative Emissionen e.V.



E.ON Energy Projects GmbH



German Biochar e.V.



MVV Umwelt GmbH



SYNCRAFT GmbH

Hansjörg Lerchenmüller (Koordination)

Autorinnen und Autoren



Markus Kaiser
Charlotte Senkpiel
Saskia Kühnhold-Pospischil
Christoph Kost

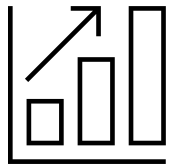
Die Studie wurde von den dargestellten Auftraggebern finanziert. Die darin vertretenen Aussagen und Schlussfolgerungen liegen in der Verantwortung der Autoren und entsprechen nicht zwingend den Ansichten der Auftraggeber.

Fragestellung der Studie

Hintergrund



Wie können die NETs BCR, BECCS, WACCS und DACCS kostenoptimal in die Transformation des deutschen Energiesystems integriert werden?



Wie verändert sich der gesamtsystemisch kosteneffiziente NET-Zubau bei einem zügigen oder verzögerten Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS¹?

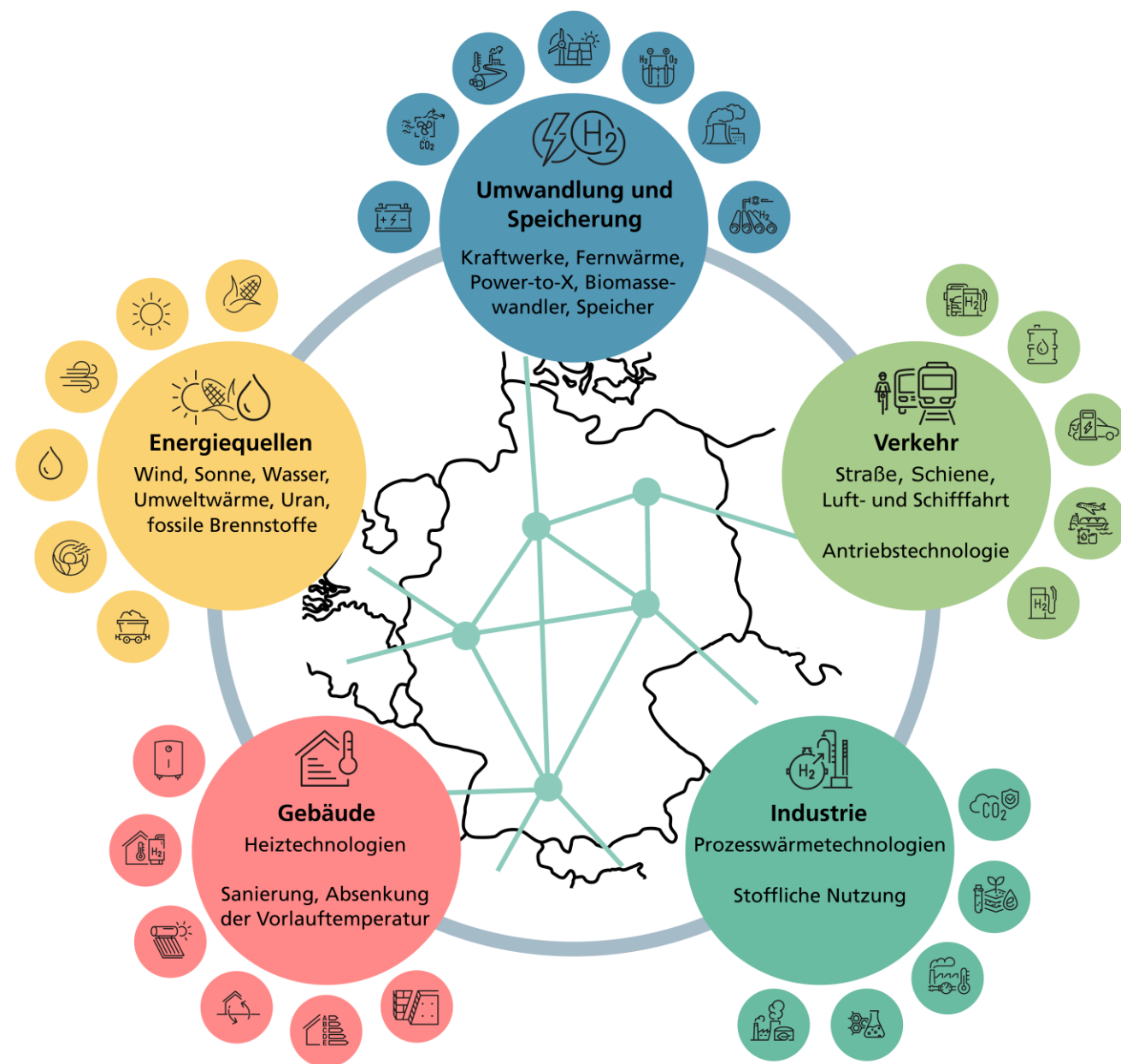
REMod Modellüberblick

Hintergrund

Die Studie nutzt das Energiesystemmodell REMod, um zwei Szenarien für eine kostenoptimale Transformation des Energiesystems zu berechnen. Die Studie legt einen Fokus auf den Hochlauf der NETs DACCS, BECCS, BCR und WACCS.

Modellhighlights

- Abbildung aller Verbrauchssektoren und des Energiesektors in einem Modell
- Integration aller THG-Emissionen in einem Modell
- Berechnung eines kostenoptimalen Transformationspfades zur Erreichung von Zielen zur Reduktion von THG-Emissionen
- Stündliche Simulation des Betriebs von heute bis 2050



Negative Emissionstechnologien im Energiesystemmodell

Hintergrund

Mit den Auftraggebern wurden die folgenden Energie-bezogenen NETs ausgewählt Annahmen abgestimmt.

BECCS (Bioenergy Carbon Capture and Storage)

- KWK-Kraftwerk, betrieben mit fester Biomasse und Anbaubiomasse
- Bereitstellung von Fernwärme und Strom
- Post-combustion CO₂-Abscheidung

WACCS (Waste-to-Energy Carbon Capture and Storage)

- Nachrüstung von Post-combustion CO₂-Abscheidung an bestehende Müllverbrennungsanlagen
- Sowohl reine Stromerzeugung als auch Strom- und Wärmeerzeugung

BCR (Biochar Carbon Removal)

- Pyrolyse von fester Biomasse und Anbaubiomasse
- Bereitstellung von Fernwärme und Strom, d.h. direkte Verbrennung von Pyrolysegas und –öl

DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage)

- Niedertemperatur Solid Sorbent DAC (*Temperature Vacuum Swing Adsorption*)
- Wärmepumpe zur Bereitstellung der Wärme zur Regeneration
- Flexibler Betrieb

Einschränkung: Dies stellt eine Auswahl an Energie-bezogenen NETs dar. Nicht abgebildete Energie-bezogene NETs sind z.B. eine Kombination von BCR und BECCS, oder CO₂-Abscheidung in der Biogasaufbereitung. Nicht Energie-bezogene NETs (z.B. Enhanced Rock Weathering) einschließlich der dazugehörigen Senkenpotentiale sind in dieser Studie nicht inkludiert.

Normatives Zielszenario zur Erreichung von Klimazielen als Modellergebnis

Hintergrund

Modell-Input: Parameter & Annahmen

- **Reduktionsziele für THG-Emissionen**
- **Prognose der Energienachfrage bis 2050:** Konstante Fortschreibung der heutigen Nachfrage
- Stündliche Profile der Energienachfrage: Sektorspezifisch
- **Potentiale** (z.B. für PV, Wind und Biomasse)
- **Bestand & Altersstruktur** des aktuellen Energiesystems
- Stündliche **Wetterdaten** zur Modellierung von EE-Erzeugung und Wärmenachfrage
- **Verfügbarkeit und Preise von Energieimporten**
- Techno-ökonomische Parameter inkl. Entwicklung bis 2050 für alle Energietechnologien

Modell-Ergebnis: Normatives Zielszenario

- **Kostenoptimaler Transformationspfad für das gesamte Energiesystem** zur Erreichung der THG-Reduktionsziele
 - Jährliche Ausbaupfade für Technologien im Energiesektor und in den Verbrauchssektoren
 - Betrieb des Energiesystems zur Deckung des Bedarfs in jeder Stunde
 - THG-Emissionen in allen Sektoren
- **Interpretation als Mengengerüst und Orientierung** für Entscheidungstragende, nicht als Prognose



Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS: Zwei Szenarien

Hintergrund: Szenarien

Szenario-übergreifende Annahmen

- Lediglich minimale, technologisch bedingte Einschränkungen des Transformationspfades¹
- LULUCF-Sektor wird 2045 THG-neutral²
- Wachstumsrate ggü. Vorjahr (CAGR) für NETs beschränkt auf 35%³
- BCR-Hochlauf ab 2026

Szenario *Zügig*

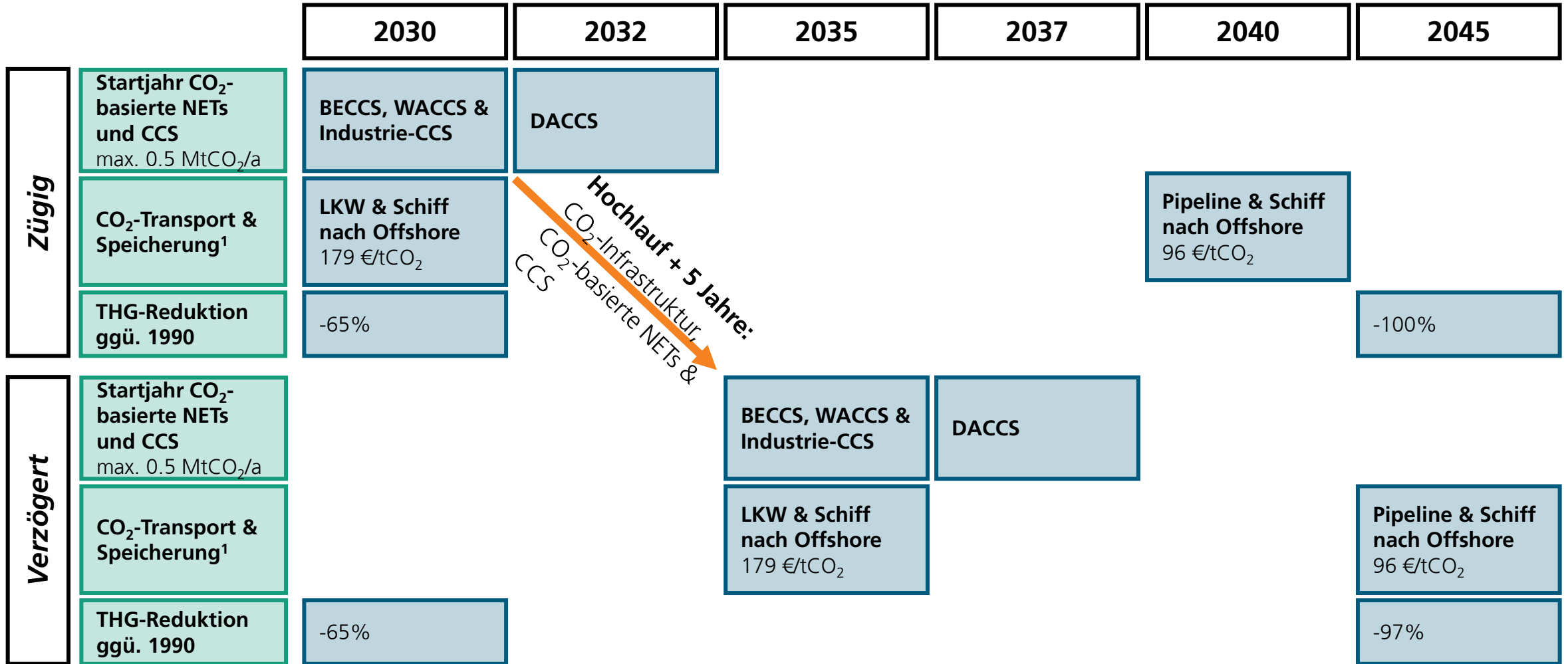
- Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS ab 2030
- Startjahr mit max. 0.5 Mt CO₂/a für WACCS & BECCS (2030) und DACCS (2032)
- Voll aufgebautes CO₂-Pipelinennetz ab 2040
- THG-Neutralität 2045 ohne internationales CDR oder alternative CDR-Methoden

Szenario *Verzögert*

- Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS ab 2035
- Startjahr mit max. 0.5 Mt CO₂/a für WACCS & BECCS (2035) und DACCS (2037)
- Voll aufgebautes CO₂-Pipelinennetz ab 2045
- -97% Reduktion von THG-Emissionen 2045 ggü. 1990. Rest auszugleichen durch internationales CDR oder alternative CDR-Methoden

Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS: Annahmen

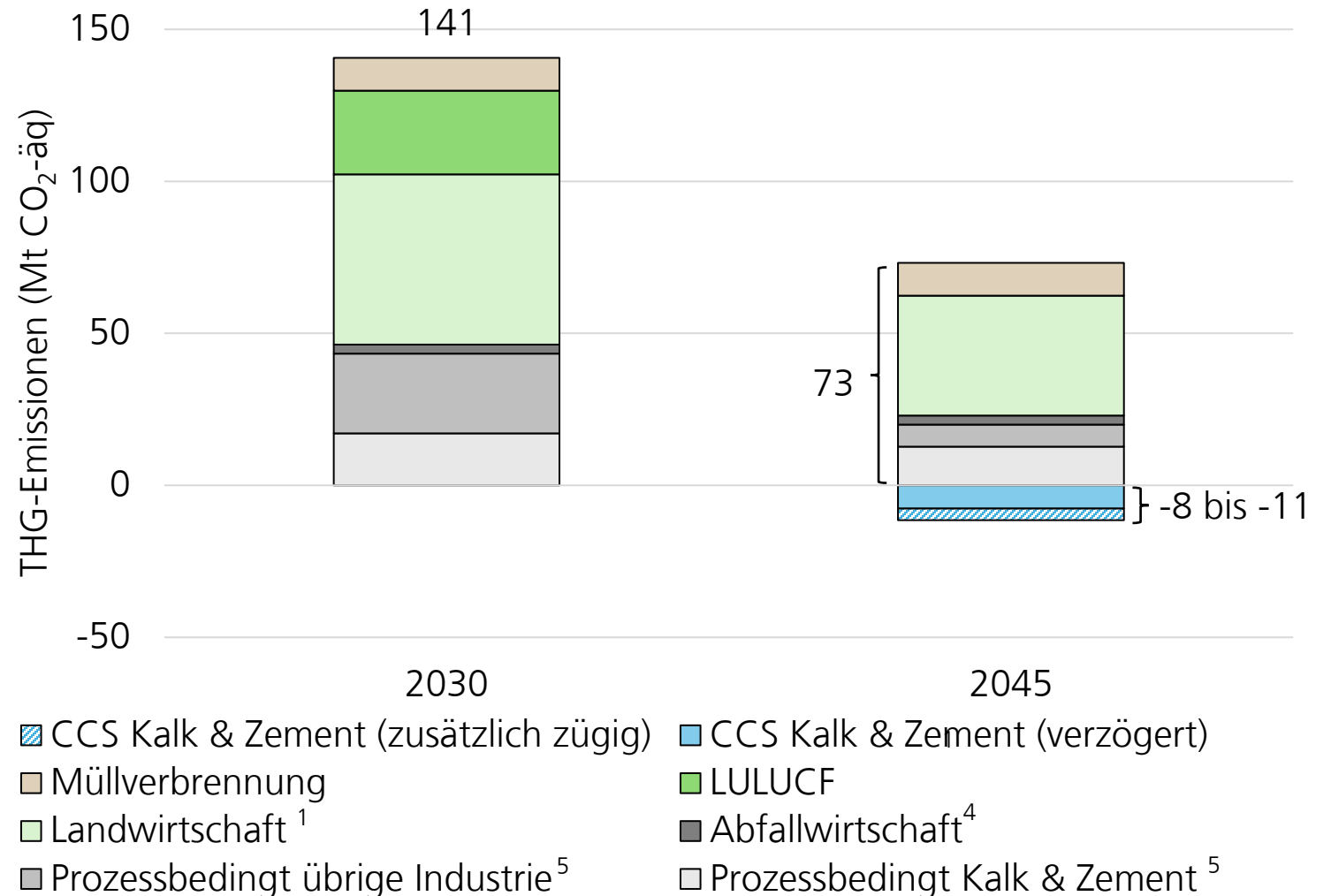
Hintergrund: Szenarien



Exogene Annahme: THG-Emissionen der Sektoren Landwirtschaft, LULUCF, Abfallwirtschaft und prozessbedingte Emissionen der Industrie

Im Jahr 2045:

- Landwirtschaft größter Beitrag mit + 39 Mt CO₂-äq.¹
- LULUCF 0 Mt CO₂-äq.
Annahme liegt zwischen Projektionsdaten (+ 37 Mt CO₂-äq)² und KSG-Ziel (- 40 Mt CO₂-äq)³.
- 90% der prozessbedingten Emissionen der Industrie (Kalk- und Zement) werden durch CCS abgeschieden.



1: https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS-3_T45_Bericht_Biomassepotenziale_20230724_o.Ae_.pdf

2: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-projektionen-2025-ergebnisse-kompakt>

3: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>

4: https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Szenarien_15_11_2022_final.pdf

5: https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_Industriebericht_v11.pdf

Annahmen: Techno-ökonomische Parameter der NETs

Hintergrund

	CAPEX (€/kW _{bio})		CO ₂ -Abscheidung (tCO ₂ /MWh _{bio})	
	Initial ¹	Final ¹	Initial ¹	Final ¹
BCR Thermisch	883	407	0.18	0.18
BCR KWK	1365	946	0.11	0.11
BECCS	3792	2755	0.32	0.34

	CAPEX (€/tCO ₂ /a)		Stromverbrauch (MWh _{el} /tCO ₂)		Wärmeverbrauch (MWh _{th} /tCO ₂)	
	Initial ¹	Final ¹	Initial ¹	Final ¹	Initial ¹	Final ¹
DACCS	7240	1763	0.28	0.17	2.72	2.00
WACCS: Nachrüstung CO ₂ -Abscheidung ²	931	558	0.3	0.25	0.96	0.96

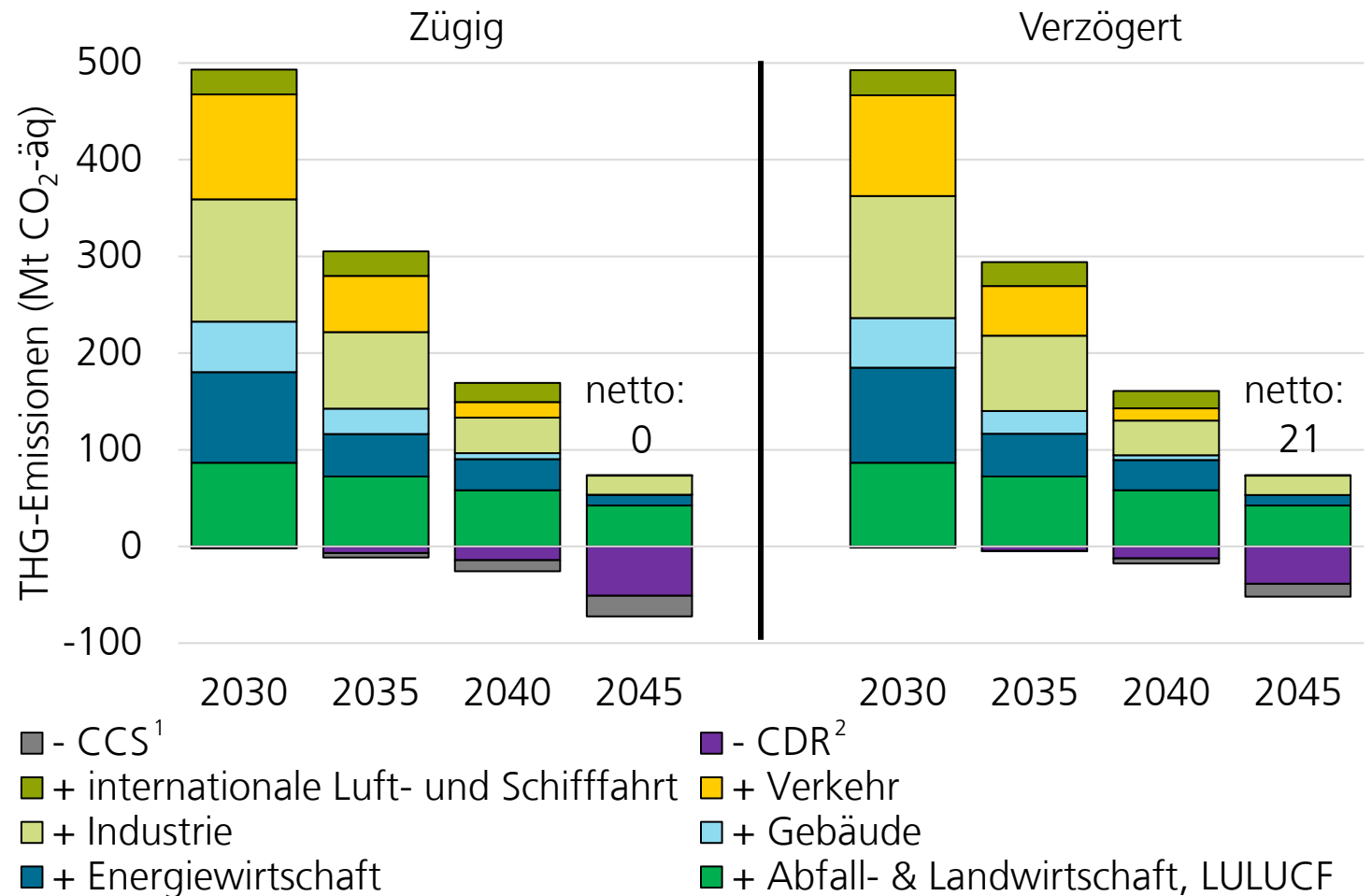
Diese techno-ökonomischen Parametern basieren auf ausgewählten aktuellen Veröffentlichungen und wurden mit den Auftraggebern abgestimmt. Eine vollständige Tabelle der techno-ökonomischen Parameter für NETs mit Quellen befindet sich im Anhang.

12 1: Initial bezieht sich auf das Startjahr der jeweiligen Technologie. In beiden Szenarien 2026 für BCR Thermisch und BCR KWK. 2030 (Zügig) oder 2035 (Verzögert) für BECCS und WACCS. 2032 (Zügig) oder 2037 (Verzögert) für DACCS.
©Fraunhofer ISE 2: Bezieht sich auf die Nachrüstung einer Post-Combustion CO₂-Abscheidung an einer Müllverbrennungsanlage.

Reduktion der THG-Emissionen in beiden Szenarien

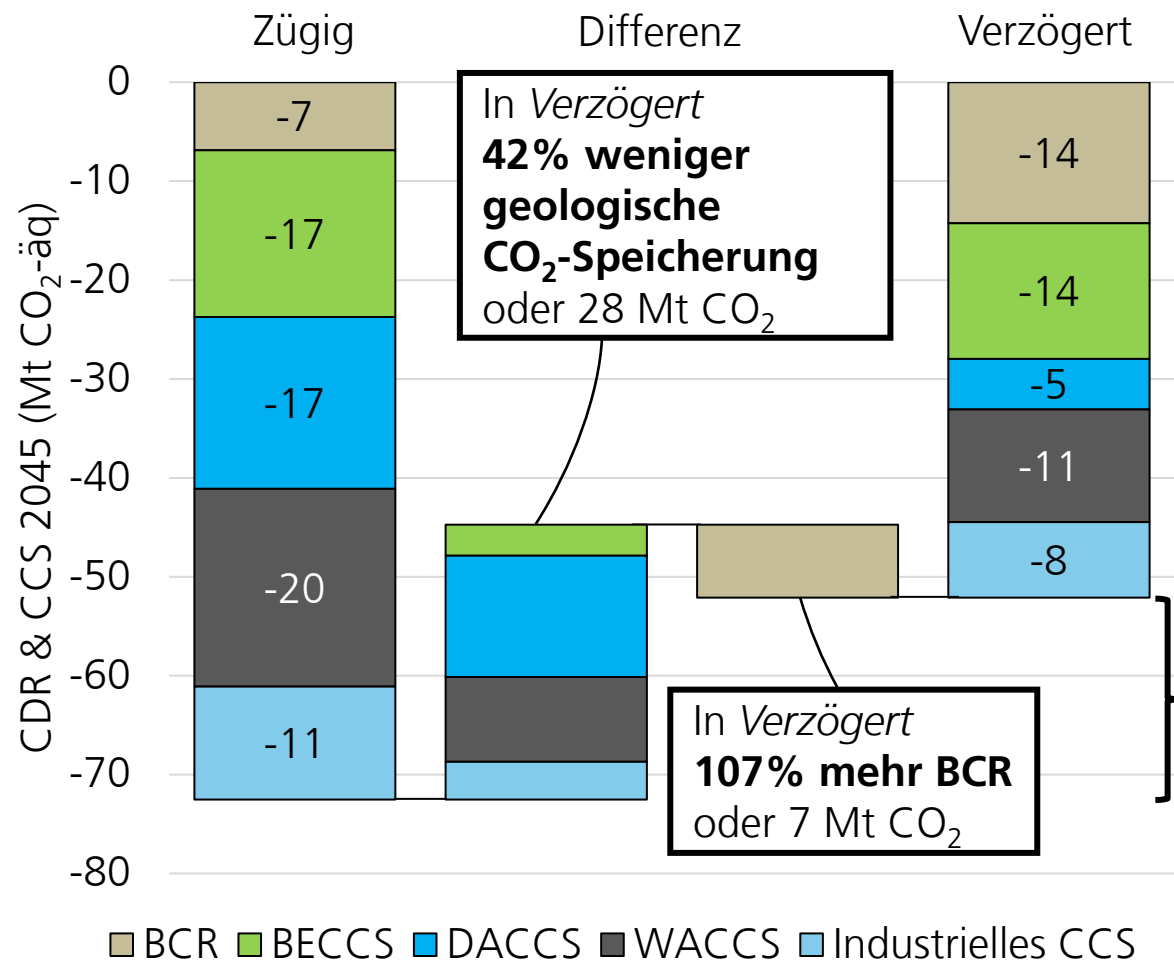
Ergebnisse: Treibhausgas-Emissionen bis 2045

	Zügig	Verzögert
Reduktions-Dynamik der THG-Emissionen	vergleichbar	
Szenarienannahme: Netto THG-Emissionen 2045 (Mt CO ₂ -äq)	0	21 (-97% Reduktion)
Hochlauf von CO ₂ -Infrastruktur, CO ₂ -basierten NETs und CCS	zügiger	
Transformation Verbrauchssektoren	etwas verzögert	



Verzögert: 42% weniger geologische CO₂-Speicherung & 107% mehr BCR

Ergebnisse: CDR & CCS 2045



Zielverfehlung

um 21 Mt CO₂:
auszugleichen
durch alternat./
internat. CDR

Analyse

- **Breiter NET-Mix** in beiden Szenarien erforderlich
- Szenario **Verzögert**: **42% weniger geologische CO₂-Speicherung** und **107% mehr BCR**

Anteil an Gesamt CDR & CCS 2045:

	Zügig	Verzögert
BCR	9%	19%
BECCS	23%	19%
DACCS	24%	7%
WACCS	28%	16%
Zielverfehlung	-	21 Mt CO ₂ -äq auszugleichen durch alternat./internat. CDR

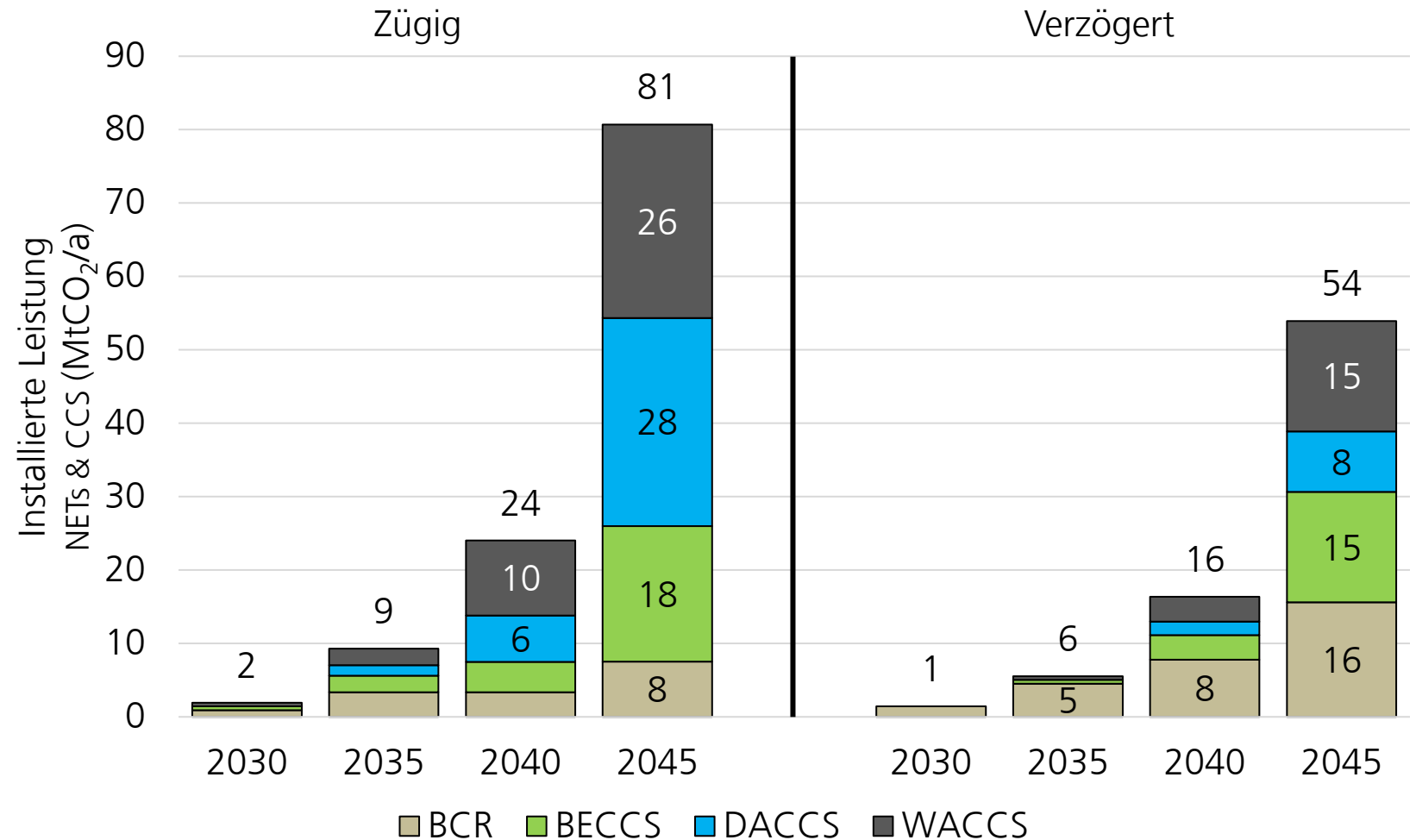
Rascher NET-Hochlauf und breiter NET-Mix erforderlich

Ergebnisse: Installierte Leistung NETs & CCS

Hintergrund

Diese Folie zeigt die installierte Leistung von NETs & CCS-Technologien, nicht tatsächlich abgeschiedene Emissionen.

- **Breiter NET-Mix in beiden Szenarien erforderlich**
- Ein verzögerter Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS ...
 - ...erfordert einen frühzeitigeren und stärkeren BCR-Hochlauf
 - ...führt zu deutlich reduzierter Leistung von DACCS 2045 (-70%)
 - ...führt zu einem späteren, aber schnelleren Hochlauf von BECCS



Rascher NET-Hochlauf und breiter NET-Mix erforderlich

Ergebnisse: Installierte Leistung NETs und CCS-Technologien 2045

Hintergrund

In der Modellierung ist die installierbare Leistung von NETs und CCS-Technologien begrenzt durch

- 1) eine max. Leistung im Startjahr von 0.5 MtCO₂/a und eine max. jährliche Wachstumsrate von 35%
- 2) jährlich verbrannte Menge Müll (WACCS)

Für BCR ist kein Anteil berechnet, da die maximal installierbare Leistung unrealistisch hoch ist.

NET-Leistung 2045	Zügig			Verzögert		
	installiert (MtCO ₂ /a)	installiert (% von max.)	maximal (Verweis auf Aufzählung)	installiert (MtCO ₂ /a)	installiert (% von max.)	maximal (Verweis auf Aufzählung)
BECCS	18	27%	67 ¹⁾	15	100%	15 ¹⁾
DACCS	28	77%	37 ¹⁾	8	100%	8 ¹⁾
WACCS	26	100%	26 ²⁾	15	100%	15 ¹⁾

Analyse

- Für BECCS, DACCS und WACCS wird in *Verzögert* die maximal verfügbare Leistung installiert.
- Für WACCS wird in beiden Szenarien die maximal verfügbare Leistung installiert.
- *Zügig*: DACCS (77%) und BECCS (27%) werden mit weniger als der maximalen Leistung eingesetzt.

18 bis 34 Mrd. € für CO₂-Transport und Speicherung bis 2045

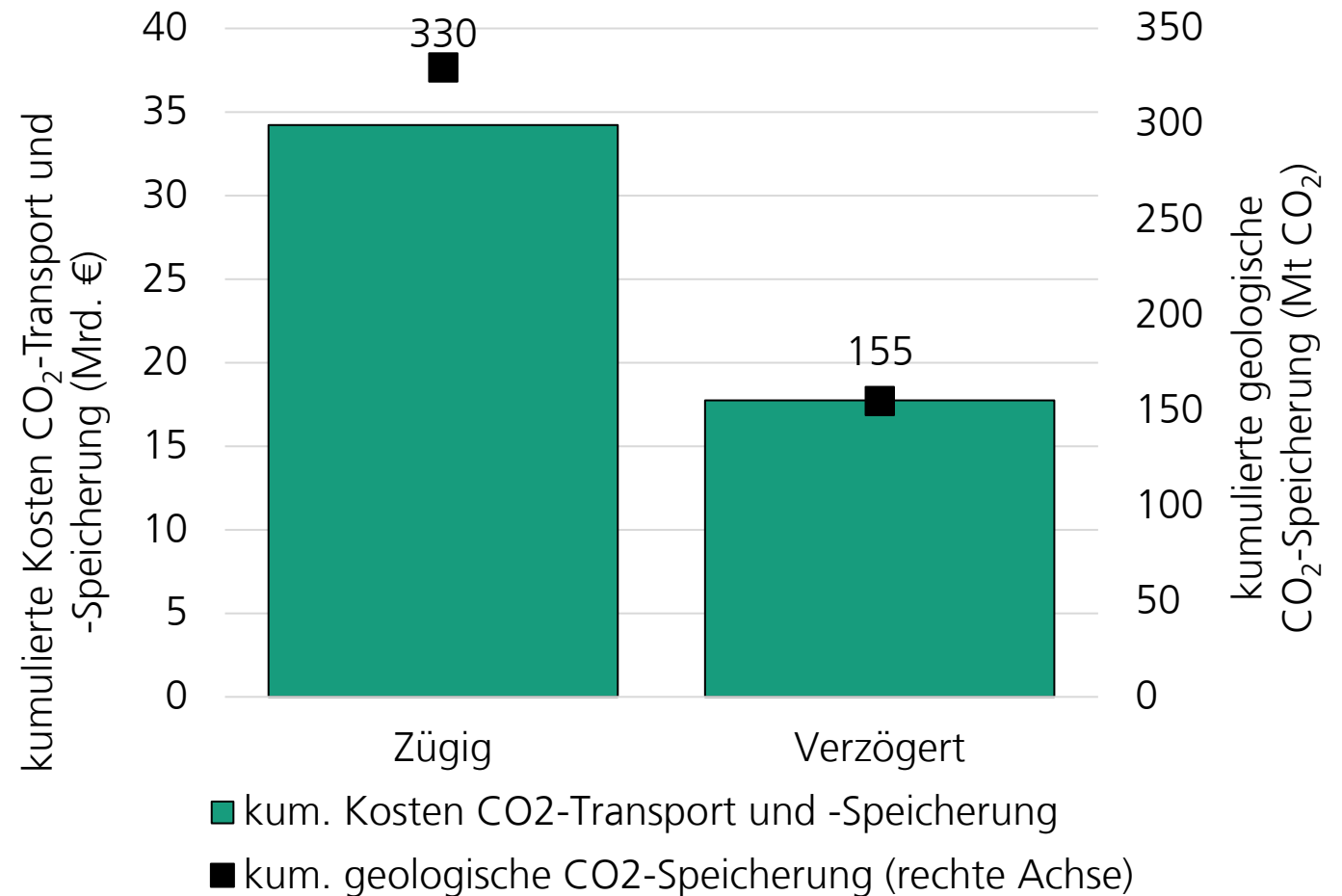
Ergebnisse: Kosten für CO₂-Transport und Speicherung

Hinweis

Hier werden nur die Kosten für CO₂-Transport und -Speicherung betrachtet. Zwar fließen alle erforderlichen Kosten - einschließlich CAPEX, fixen OPEX, Energiekosten und Energieerlöse - in das Modell ein, lassen sich aber nicht NETs & CCS-Technologien und anderen Verbrauchern zuordnen.

Analyse

- Dargestellt ist die kumulierte geologische CO₂-Speicherung bis 2045.
- Kumulierte Kosten für CO₂-Transport und Speicherung: 18 bis 34 Mrd. € für 155 bis 330 Mt CO₂ bis 2045
- Durchschnittlich: 104 (*Zügig*) bis 115€/tCO₂ (*Verzögert*) für Transport und Speicherung bis 2045



Kernbotschaften: Hochlauf von NETs und CCS-Technologien

Ergebnisse

1

Ein Mix aller abgebildeten NET-Optionen BCR, BECCS, DACCS und WACCS ist notwendig, um THG-Neutralität zu erreichen.

2

Ein zügiger Hochlauf der abgebildeten NET-Optionen ist notwendig, um 2045 THG-Neutralität zu erreichen.

3

Ein frühzeitiger Hochlauf von BCR vermindert das Risiko einer Zielverfehlung durch einen verzögerten Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS.

4

Der erforderliche Hochlauf von NETs zur Erreichung von THG-Neutralität ist stark abhängig von der erreichten Quellen- oder Senkenleistung des LULUCF-Sektors.

Energiebilanzen von NETs und CCS-Technologien

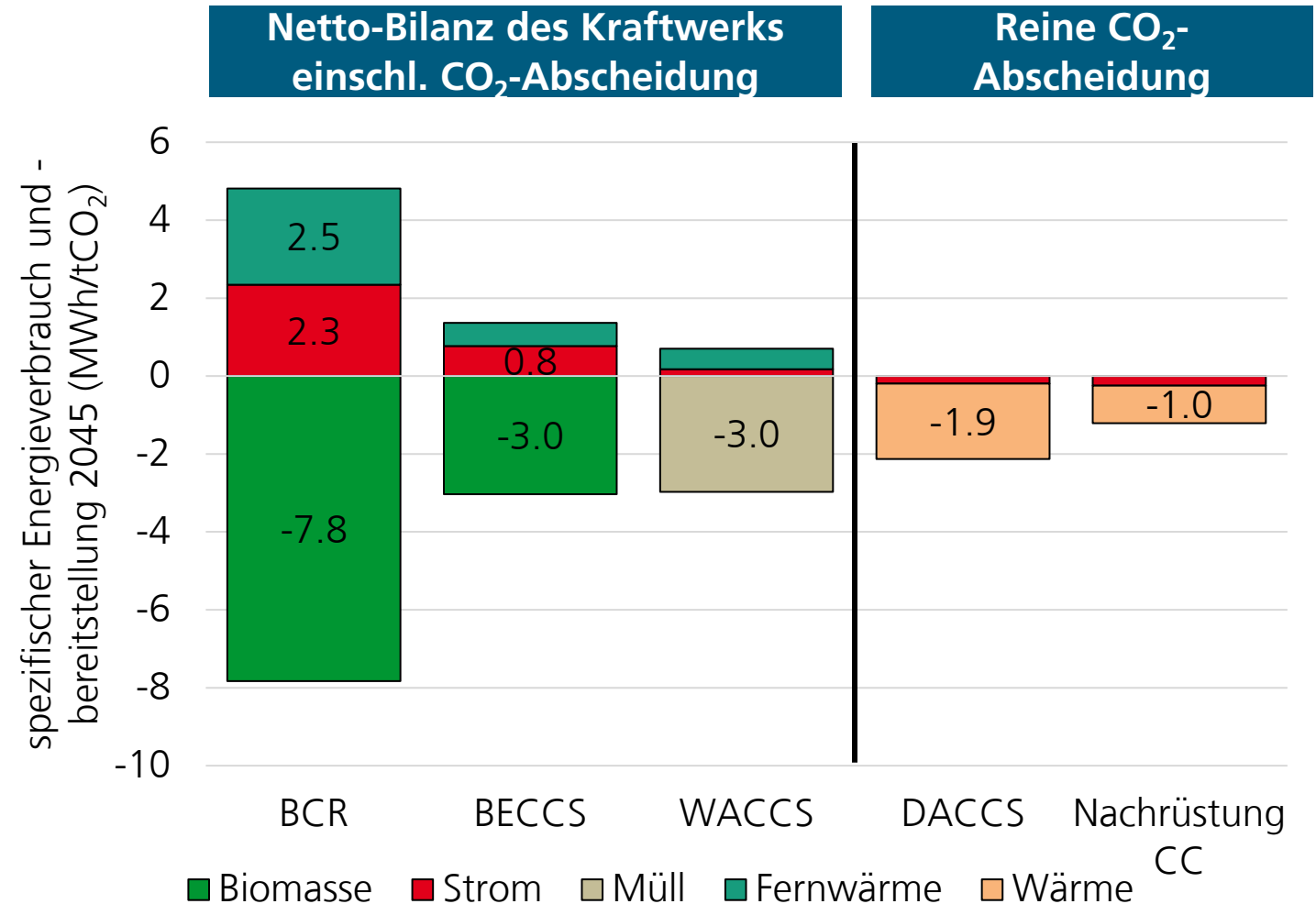
Ergebnisse: Spezifischer Energieverbrauch und -bereitstellung von NETs und CCS-Technologien 2045

Hinweis zur Grafik

Für BCR, BECCS und WACCS ist die Gesamtbilanz des Kraftwerks mit Energieverbrauch und -bereitstellung gezeigt. Für DACCS und eine Carbon Capture Nachrüstung (für ein Biomasse-/Müll-KWK Kraftwerk) bezieht sich der gezeigt Energieverbrauch ausschließlich auf die CO₂-Abscheidung.

Analyse

- BCR (ohne Kombination mit post-combustion Abscheidung von CO₂) verbraucht ca. 2.6-mal so viel Biomasse je Tonne CO₂ wie BECCS.
- Reduzierter Gesamtwirkungsgrad der BECCS- und WACCS-Kraftwerke durch Energieverbrauch für CO₂-Abscheidung
- DACCS deutlich energieintensiver im Vergleich zu Carbon Capture Nachrüstung an einem KWK-Kraftwerk



NETs & CCS-Technologien: bedeutender Einfluss auf Biomasse & Fernwärme.

Ergebnisse

Hinweis zur Grafik

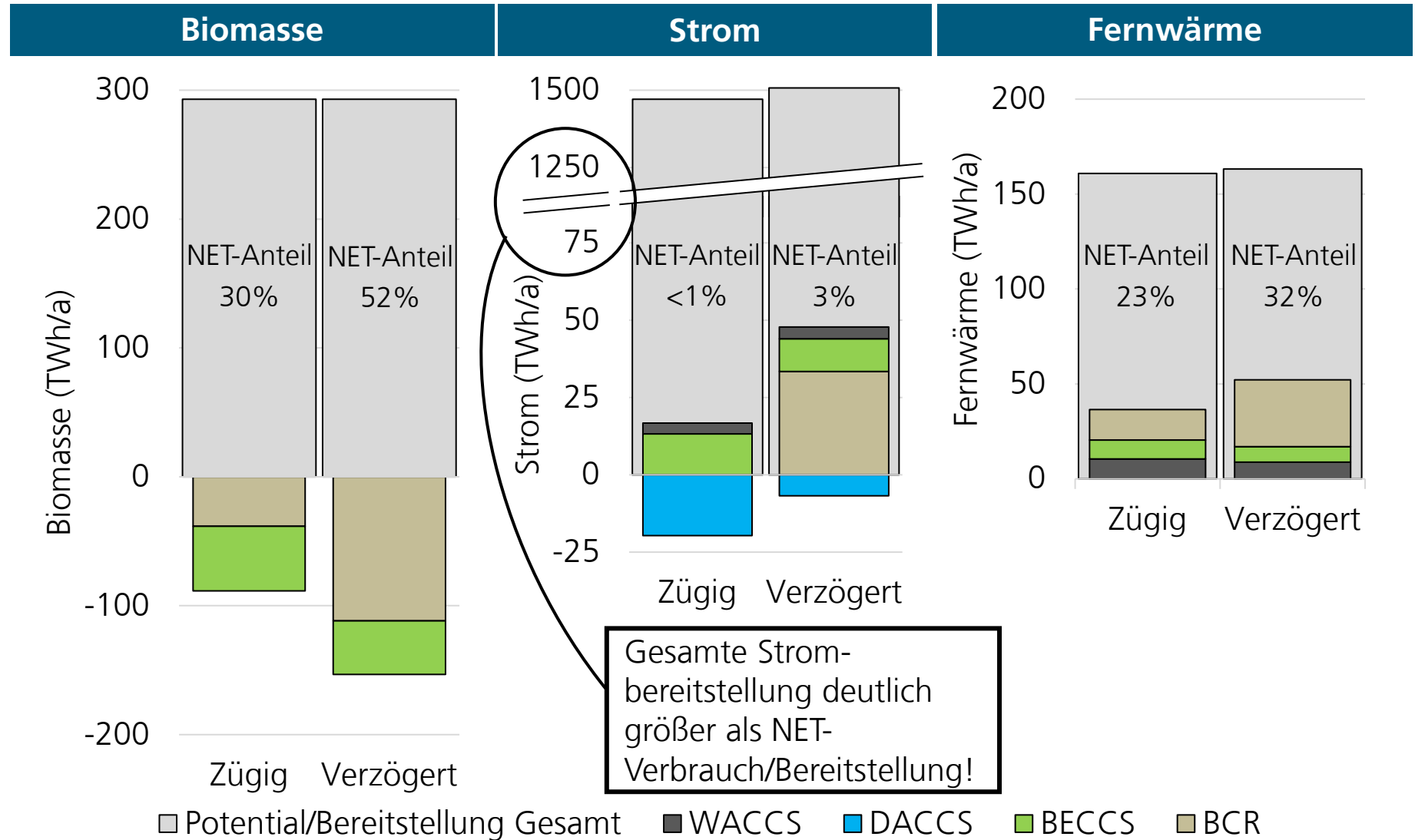
Vergleich von Energieverbrauch und -bereitstellung von **NETs**

(Farben) 2045 mit Gesamtsystem (grau) als

- verfügbares Potential (Biomasse)
- gesamte Bereitstellung (Fernwärme und Strom)

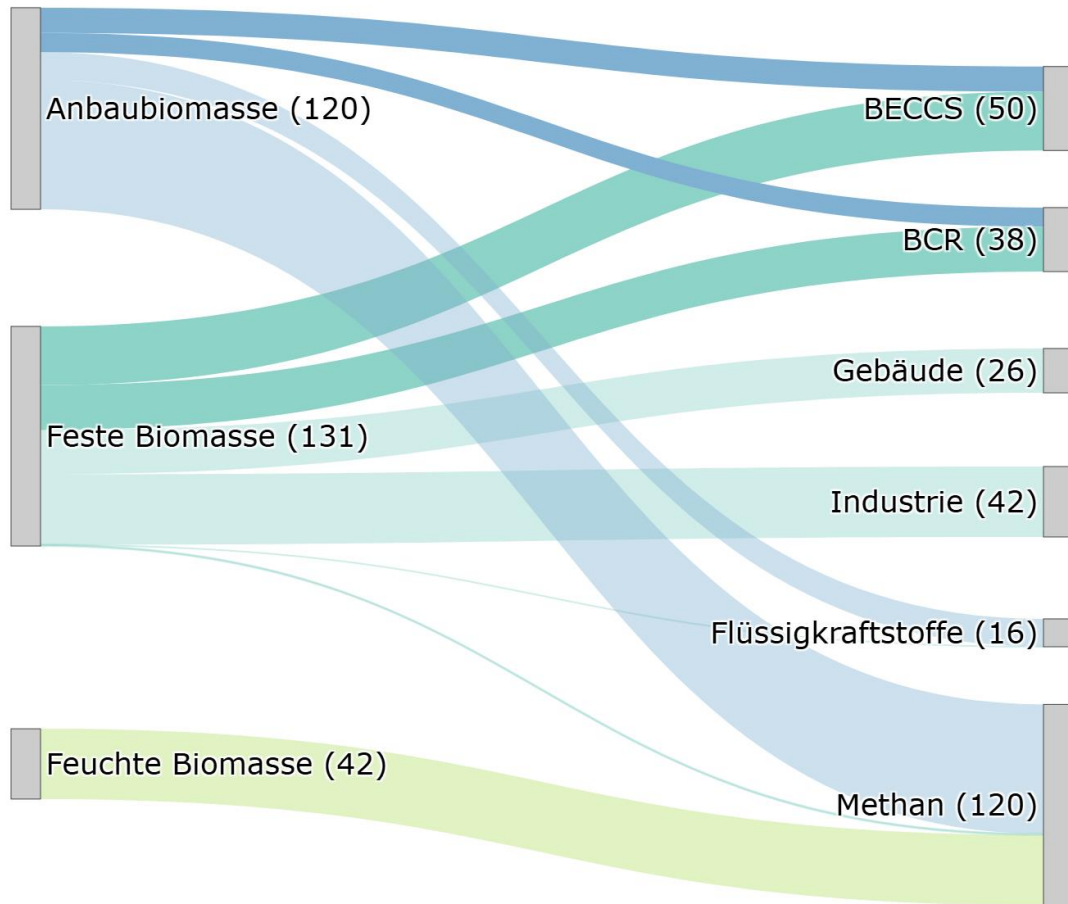
Analyse

NETs und CCS-Technologien haben einen bedeutenden Einfluss auf den Biomasse- und Fernwärmesektor. Der Einfluss auf den Stromsektor ist minimal.



Zügig: Biomasse 2045 für Biomethan, BECCS & BCR und dezentrale Wärme

Ergebnisse: Biomassenutzung im Szenario Zügig 2045



Energiemengen in Klammern in TWh

Biomasse wird in drei Bereichen verwendet:

- 1) NETs BECCS und BCR
- 2) Dezentrale Wärmeerzeugung im Industrie- und Gebäudesektor
- 3) Biomethan und biogene Flüssigkraftstoffe

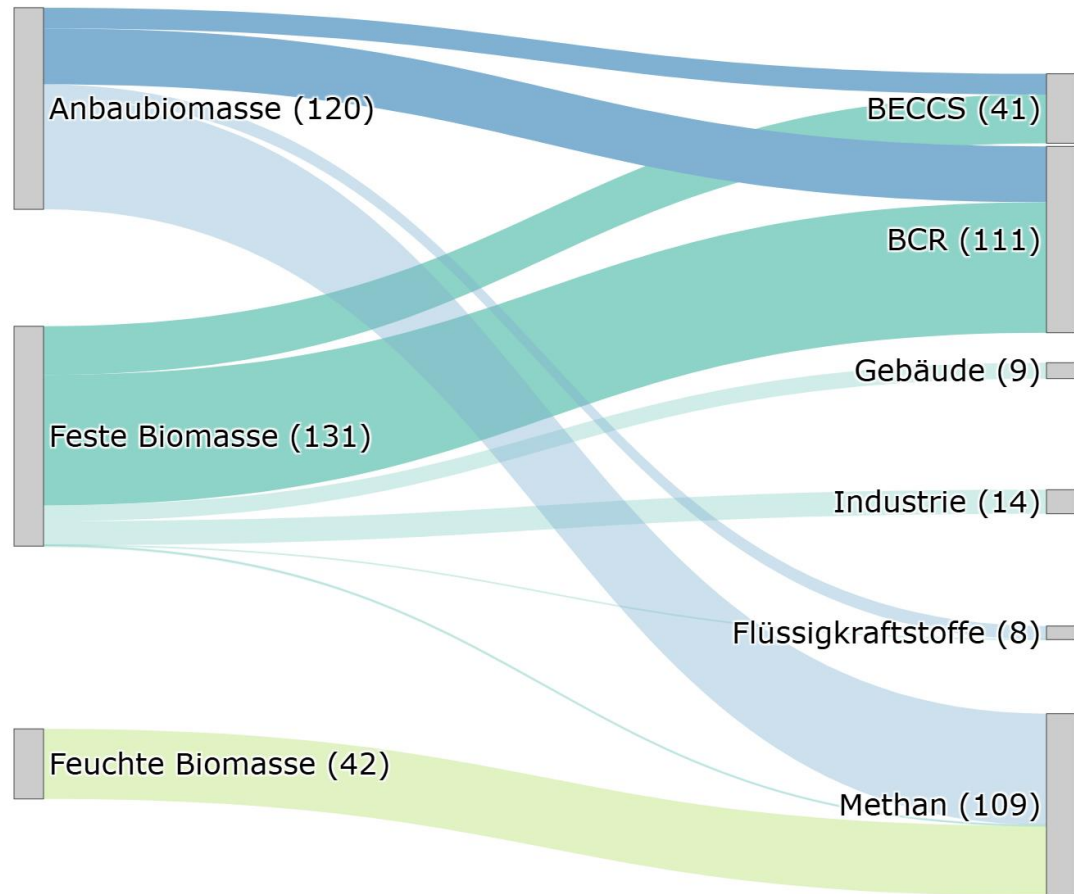
Bei einem zügigen Hochlauf des CCS-Systems spielen alle 3 Bereiche eine zentrale Rolle.

Im Detail:

- 46% der Biomasse wird für Biomethan und biogene Flüssigkraftstoffe genutzt.
- 30% der Biomasse wird für NETs genutzt:
 - BECCS: 17%
 - BCR: 13%
- 23% der Biomasse wird direkt in Industrie und Gebäuden zur dezentralen Wärmeerzeugung genutzt.

Verzögert: 2045 mehr Biomasse für BCR, weniger für dezentrale Wärme

Ergebnisse: Biomassenutzung im Szenario *Verzögert* 2045



Bei einem verzögerten CCS-Hochlauf wird mehr Biomasse für BCR benötigt. Die dezentrale Wärmeerzeugung im Industrie- und Gebäudesektor spielt deswegen nur noch eine untergeordnete Rolle.

Im Detail:

- 40% der Biomasse wird für Biomethan und biogene Flüssigkraftstoffe genutzt.
- 52% der Biomasse wird für NETs genutzt:
 - BECCS: 14%
 - BCR: 39%
- 8% der Biomasse wird direkt in Industrie und Gebäuden zur dezentralen Wärmeerzeugung genutzt.

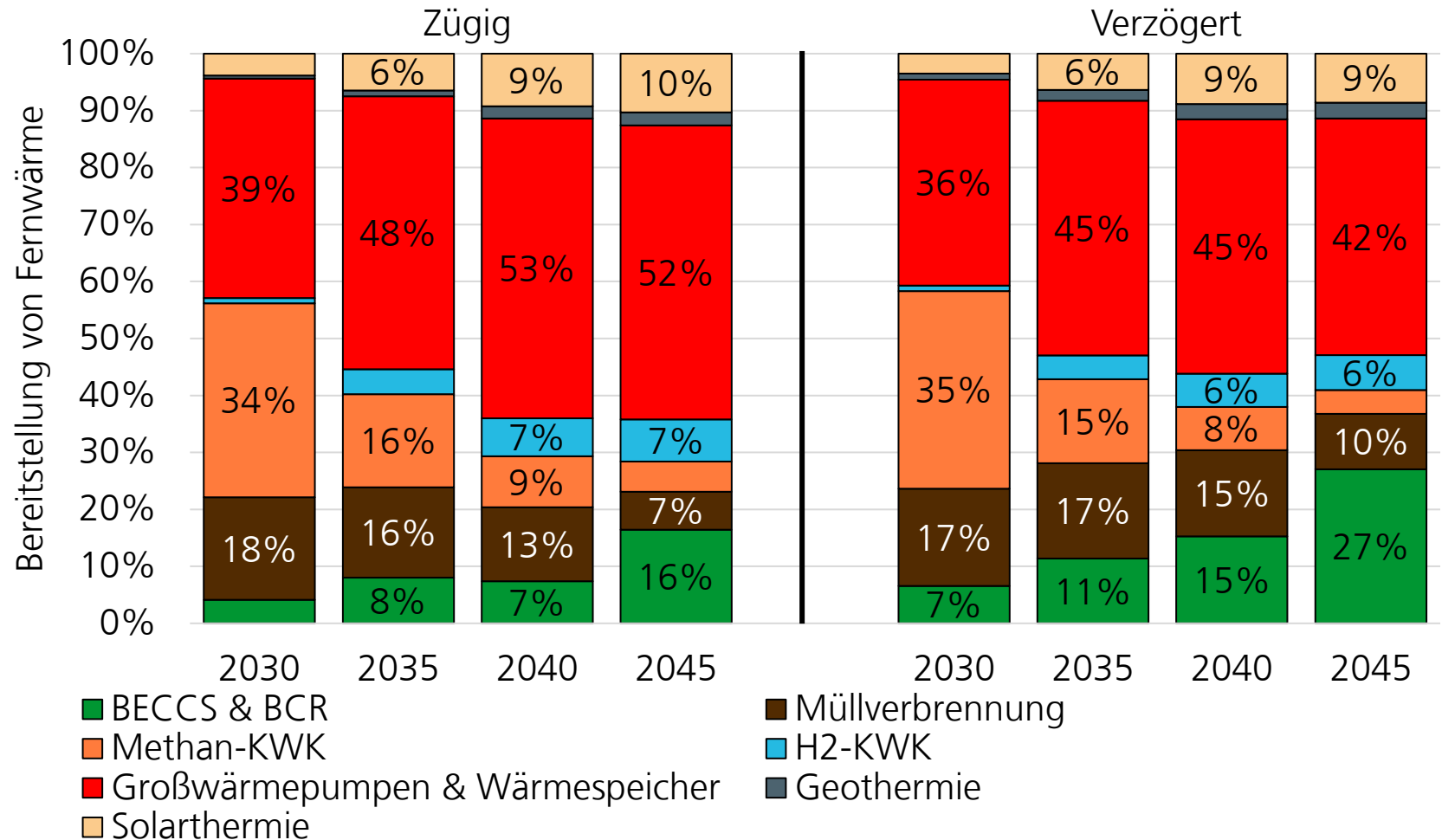
Energiemengen in Klammern in TWh

BECCS & BCR: Zentrale Rolle zur Erzeugung von Fernwärme 2045 möglich

Ergebnisse: Bereitstellung von Fernwärme

BECCS und BCR stellen in den berechneten Szenarien 2045 16% bis 27% der Fernwärme bereit.

- Großwärmepumpen stellen in etwa die Hälfte der Fernwärme bereit.
- Die Rolle von Methan-KWK sind stark rückläufig.
- Müllverbrennung stellt zukünftig weniger Fernwärme bereit, weil die erzeugte Wärme teilweise zur CO₂-Abscheidung eingesetzt wird.
- Solarthermie, H₂-KWK und Geothermie spielen eine zunehmende, ergänzende Rolle.



Betrieb von DACCS in Zeiträumen mit hoher Wind- und PV-Einspeisung

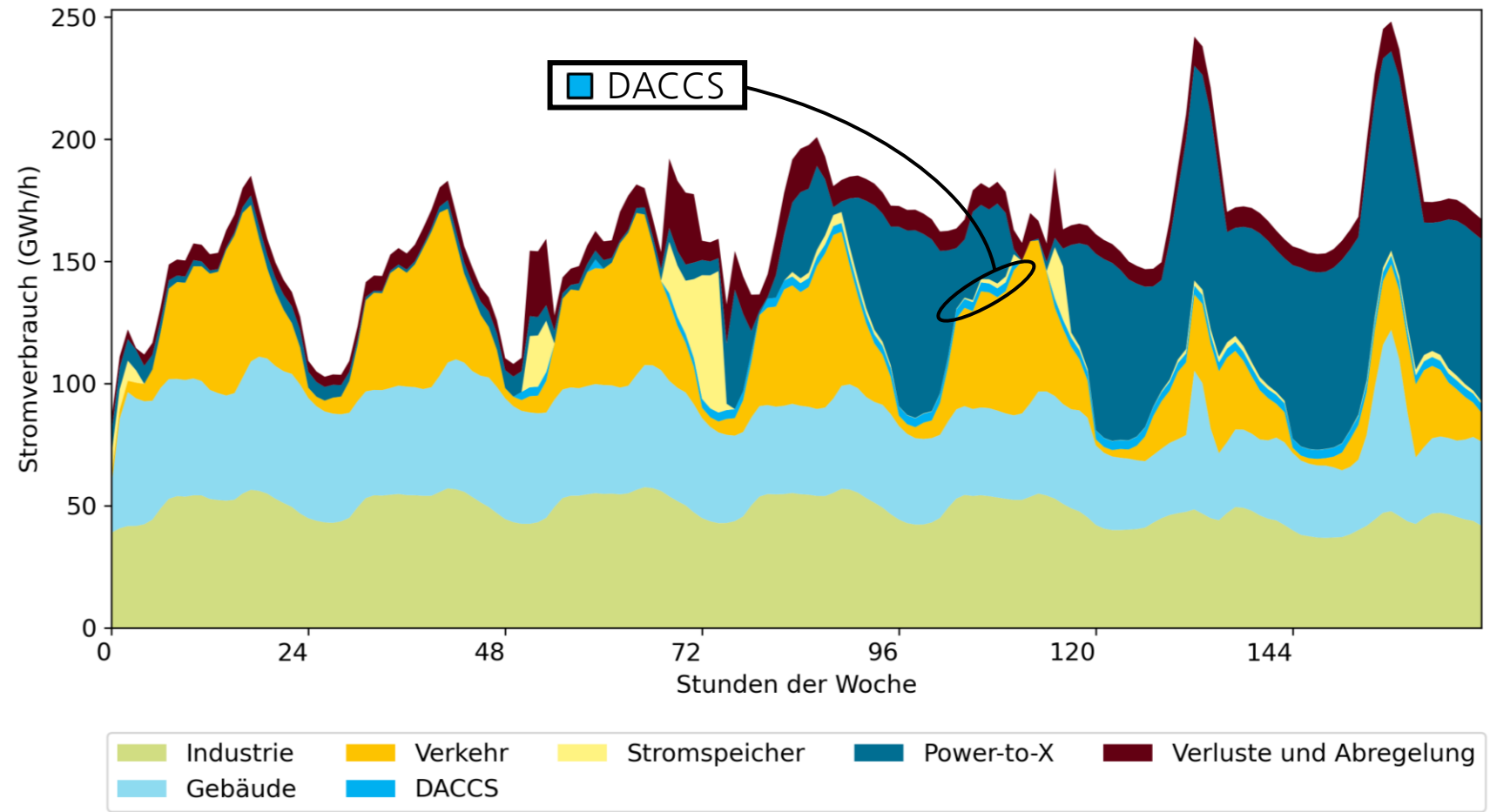
Ergebnisse: Stündliches Profil des Stromverbrauchs im Dezember 2045

Hinweis zur Grafik

Gezeigt ist das stündliche Profil des deutschen Stromverbrauchs einer Woche im Dezember 2045.

Analyse

- Niedertemperatur DACCS wird im Modell flexibel zu Zeiten mit hoher Wind- und PV-Einspeisung betrieben.
- 2045 läuft DACCS mit ca. 5400 Volllaststunden.



Kernbotschaften: Einfluss von NETs und CCS auf das Energiesystem

Ergebnisse

1

Im Vergleich mit dem Gesamtsystem haben Energieverbrauch und -bereitstellung von und für NETs einen bedeutenden Einfluss auf den Biomasse- und Fernwärmesektor, jedoch nur minimalen Einfluss auf den Stromsektor.

2

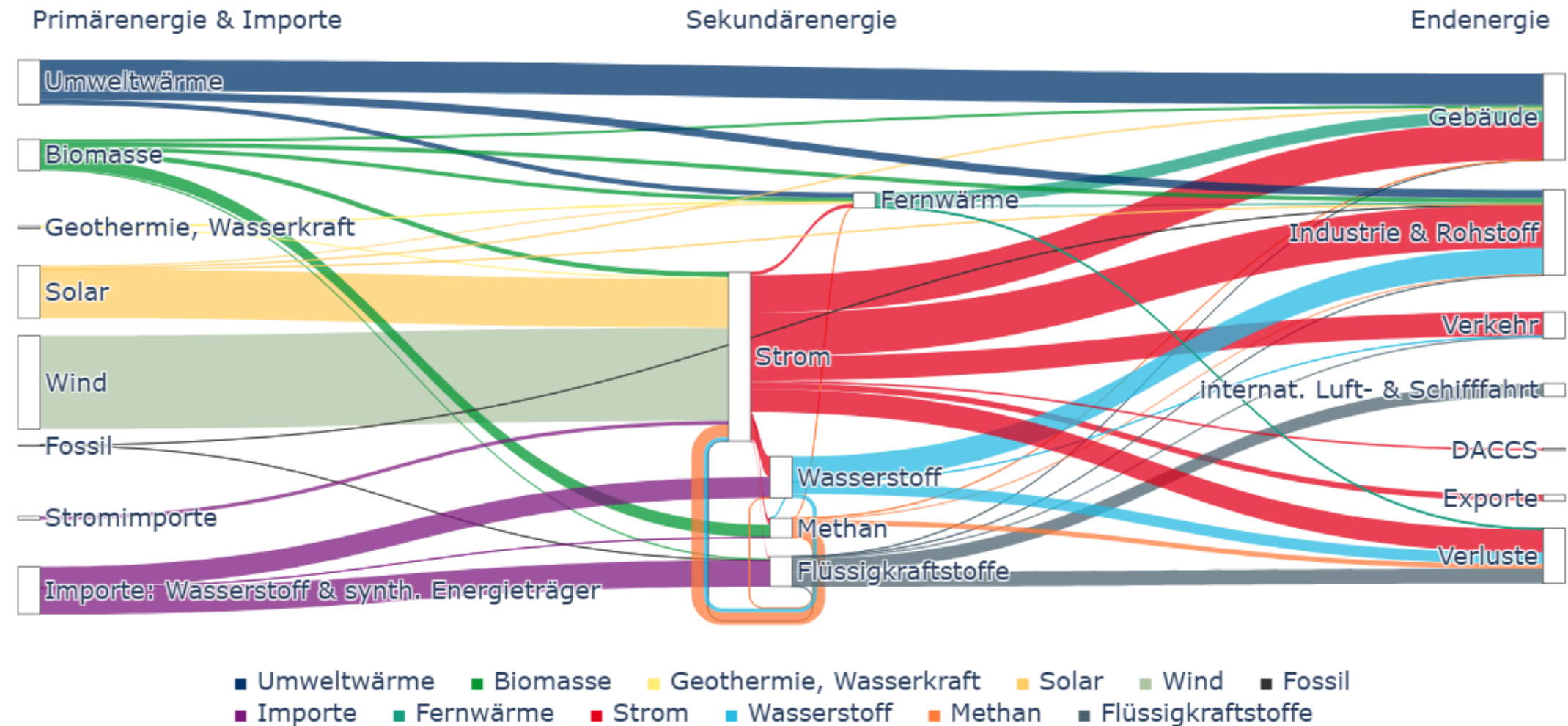
BECCS & BCR werden zu zentralen Verbrauchern der verfügbaren energetisch genutzten Biomasse und nutzen 2045 30% bis 52% der verfügbaren Biomasse.

3

BECCS & BCR können 2045 mit 16% bis 27% einen relevanten Teil der erforderlichen Fernwärme bereitstellen.

Starke EE-Erzeugung und Elektrifizierung, ergänzend: grüner H₂ und Biomasse

Ergebnisse: Energiesystem 2045



Starke Elektrifizierung der Industrie; *Verzögert*: weniger Biomassenutzung

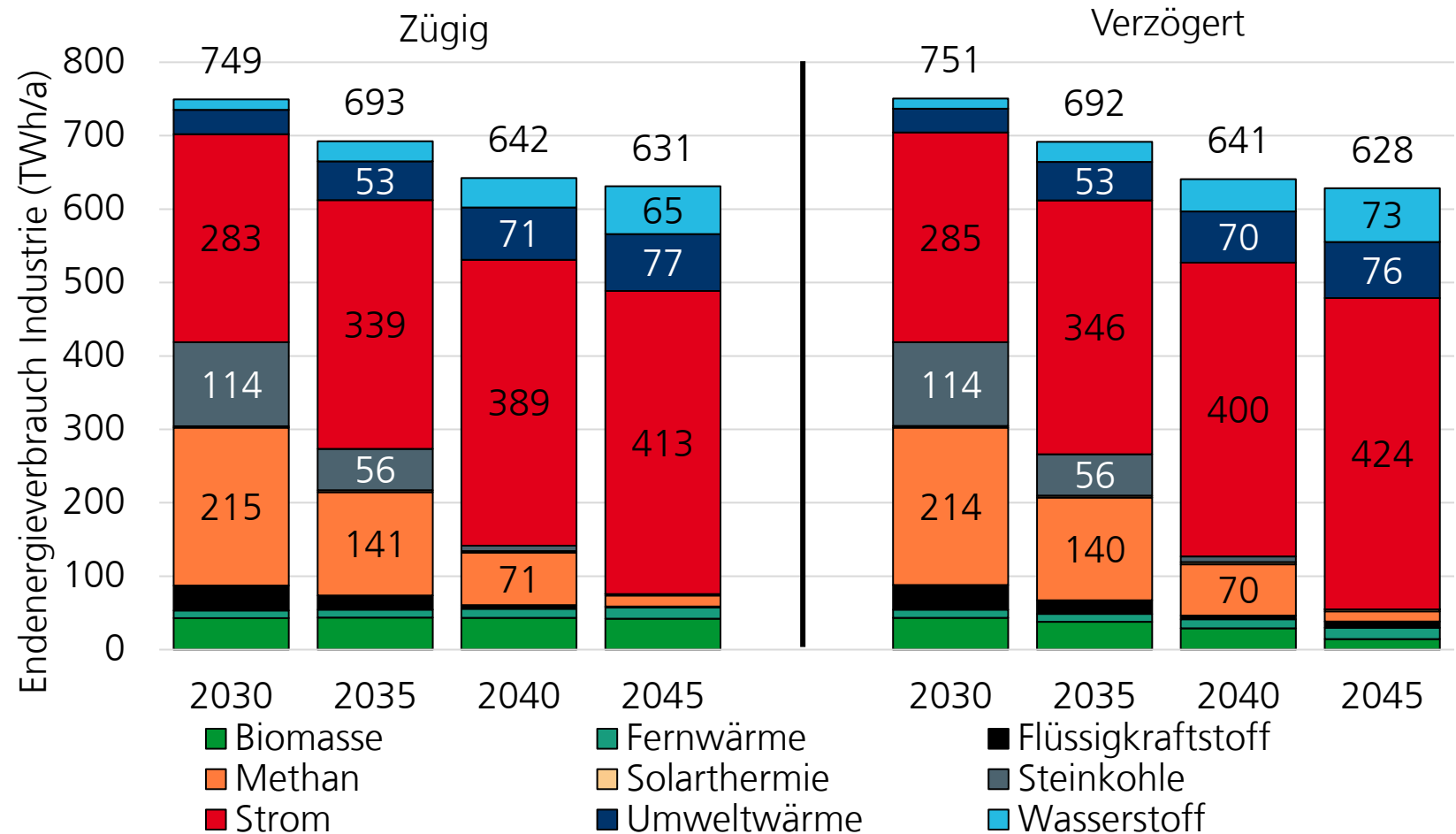
Ergebnisse: Transformation des Industriegesektors

Allgemein

- Sinkender Endenergieverbrauch im Industriesektor
- Starke Elektrifizierung des Industriesektors
- Ergänzende Rolle von Wasserstoff und Biomasse

Ein verzögerter Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS führt zu ...

- weniger Biomassenutzung in der Industrie
- mehr Wasserstoffnutzung in der Industrie



Starke Elektrifizierung der Gebäude; *Verzögert*: weniger Biomassenutzung

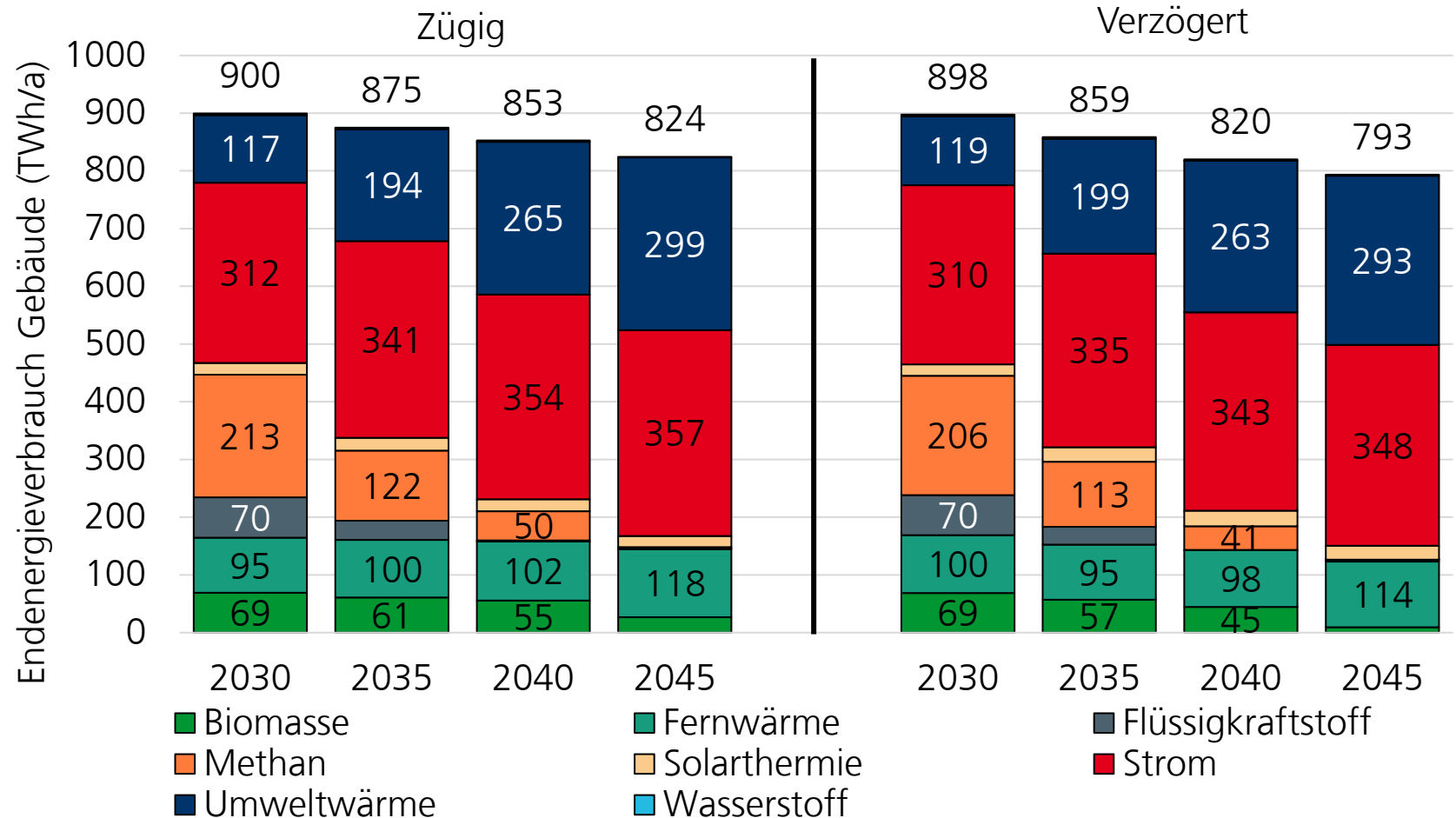
Ergebnisse: Transformation des Industriebsektors

Allgemein

- Sinkender Endenergieverbrauch im Gebäudesektor
- Starke Elektrifizierung des Gebäudesektors, ergänzende Rolle von Fernwärme

Ein verzögerter Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS führt zu ...

- stärkerem Rückgang des Endenergieverbrauchs durch stärkere Sanierung
- weniger Biomassenutzung im Gebäudesektor



Starke Elektrifizierung des Verkehrs; *Verzögert*: schnellere Dekarbonisierung

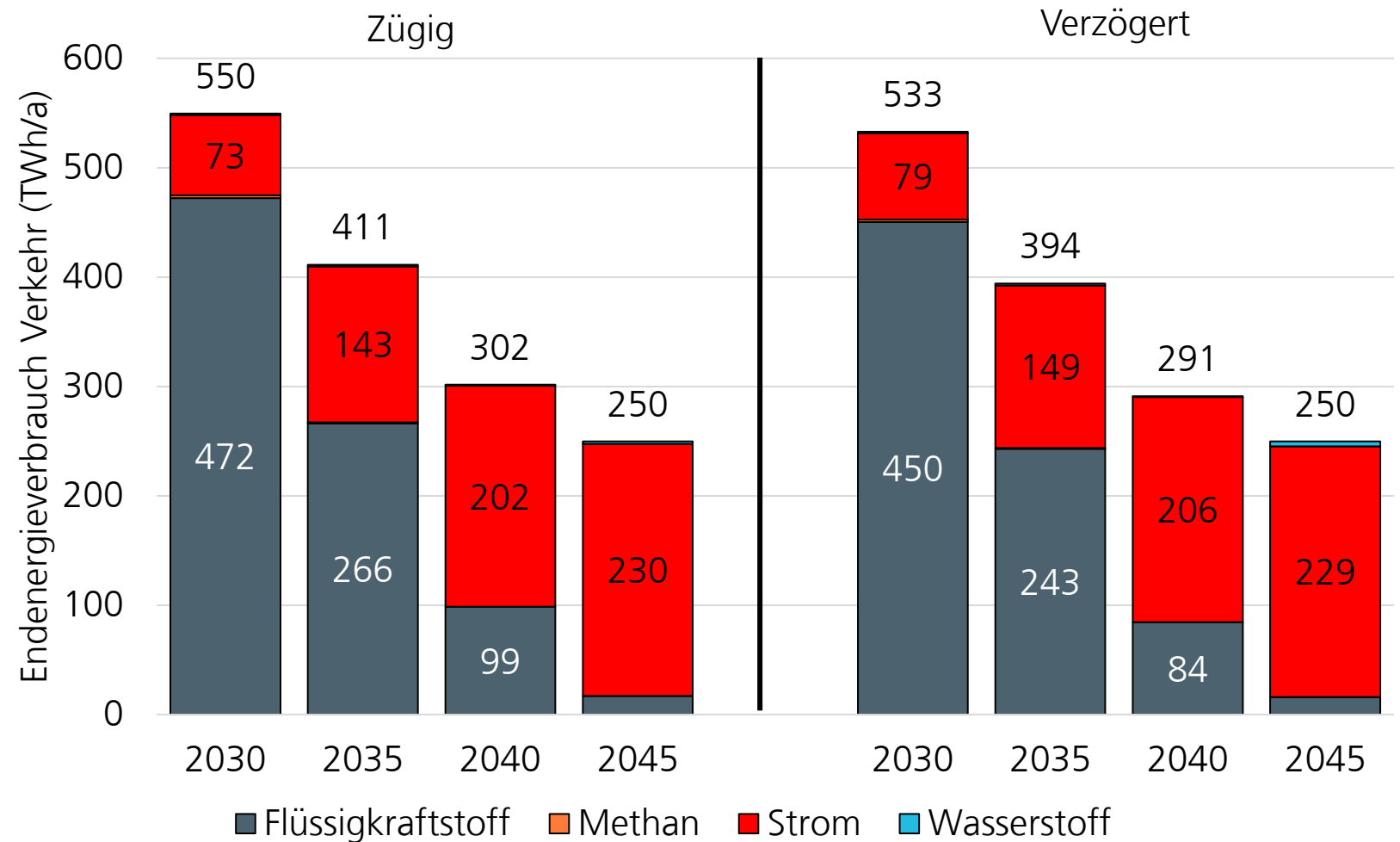
Ergebnisse: Transformation des Verkehrssektors

Allgemein

- Stark sinkender Endenergieverbrauch im Verkehrssektor durch weitgehende Elektrifizierung
- Umstellung PKW & LKW nahezu komplett auf batterieelektrisch 2045
- Wasserstoff-betriebene Fahrzeuge spielen eine untergeordnete Rolle

Ein verzögerter Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS führt zu ...

- leicht schnellerer Dekarbonisierung des Verkehrssektors

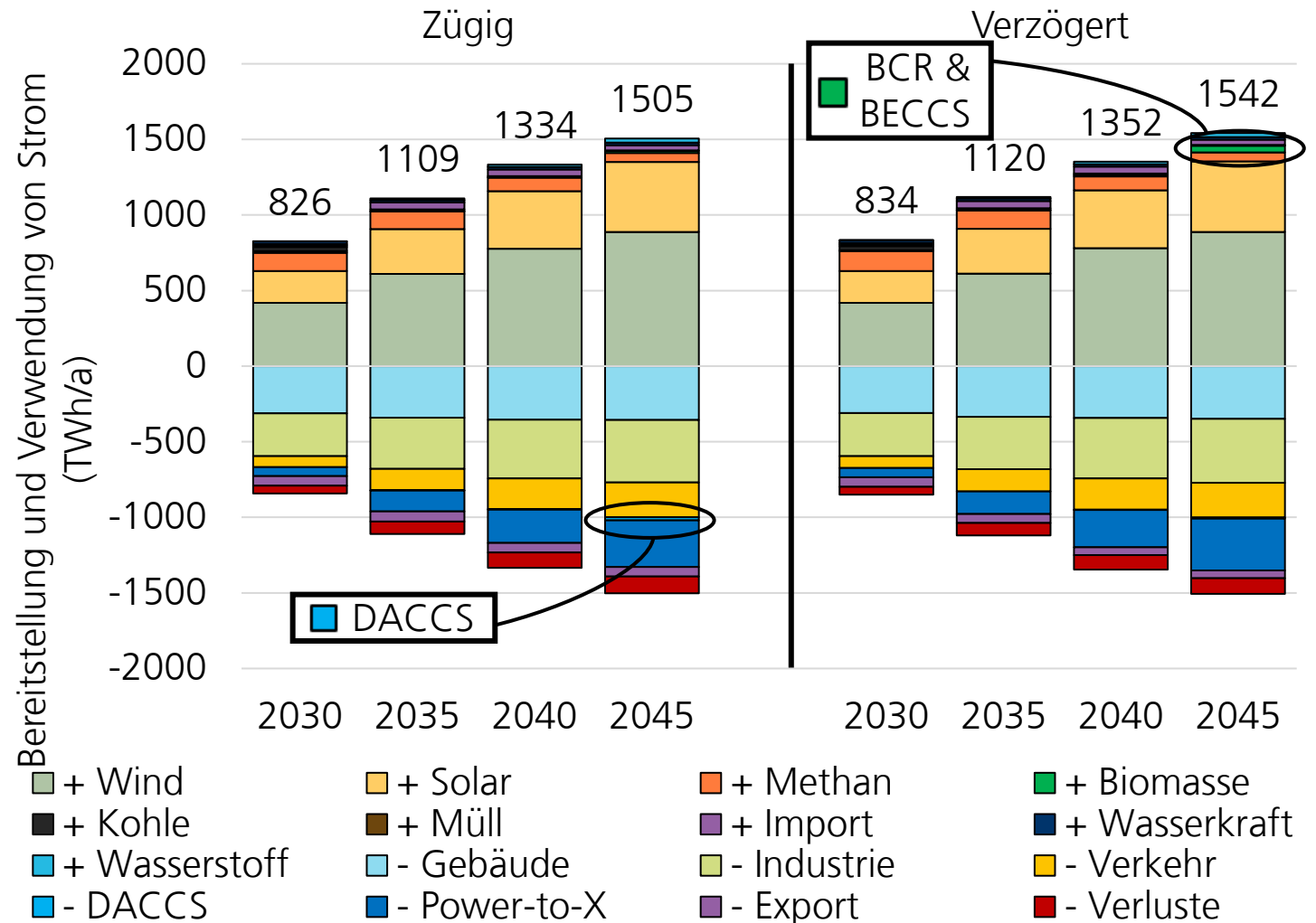


Starker Ausbau von Wind und PV für Elektrifizierung der Verbrauchssektoren

Ergebnisse: Transformation des Stromsektors

Allgemein

- Zügiger Ausbau von Wind & PV bis 2045
300 GW Wind und 450 GW PV stellen ca. 1350 TWh Strom bereit
- Gas-Kraftwerke als Flexibilitätsoption
- Verbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Verkehr sind mit Power-to-X (Elektrolyse, Power-to-Gas, Power-to-Fuel und Power-to-Heat) Hauptverbraucher von Strom
- Strombereitstellung von BCR & BECCS sowie Stromverbrauch von DACCS fallen gesamtsystemisch nicht ins Gewicht
- Keine Unterschiede zwischen den Szenarien



Kernbotschaften: Transformation des gesamten Energiesystems

Ergebnisse

1

Eine starke Elektrifizierung in den Verbrauchssektoren und ein zügiger Ausbau von Erneuerbaren Energien ist zentral für die Transformation des Energiesystems. Der Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS hat geringe Auswirkungen auf den Stromsektor.

2

Ein verzögerter Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS führt zu einem geringeren Biomasseverbrauch in den Verbrauchssektoren Gebäude und Industrie.

3

Ein verzögerter Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS erhöht das Risiko einer Verfehlung der Klimaziele, bzw. erfordert ein noch höheres Ambitionsniveau für Defossilisierung und Elektrifizierung in den Verbrauchssektoren.

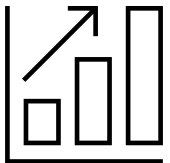
Schleuniger Ausbau von breitem NET-Mix ist zentral für Klimazielerreichung

Ergebnisse: Zusammenfassende Erkenntnisse zu den Fragestellungen der Studie



Wie können die NETs BCR, BECCS, WACCS und DACCS kostenoptimal in die Transformation des deutschen Energiesystems integriert werden?

- Um THG-Neutralität 2045 zu erreichen, ist ein zügiger Ausbau eines breiten Technologiemicx der NETs BCR, BECCS, WACCS und DACCS notwendig.
- Die Biomasse-basierten NETs BECCS und BCR werden 2045 zu zentralen Verbrauchern der energetisch genutzten Biomasse und können einen relevanten Teil der benötigten THG-neutralen Fernwärme bereitstellen. Der Einfluss der NETs auf den Stromsektor ist minimal.



Wie verändert sich der gesamtsystemisch kosteneffiziente NET-Zubau bei einem zügigen oder verzögerten Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS?

- Ein verzögerter Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS erhöht das Risiko einer Zielverfehlung erheblich. Ein frühzeitiger Hochlauf von BCR kann dieses Risiko abfedern.
- Eine Verzögerung des Hochlaufs von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS um 5 Jahre führt zu einer deutlich höheren Relevanz von BCR und einer deutlich reduzierten Relevanz von geologischer Speicherung von CO₂. Im Vergleich zu einem zügigen Hochlauf von CO₂-Infrastruktur, CO₂-basierten NETs und CCS steigen die durch BCR abgeschiedenen Emissionen um 107% und geologische Speicherung von CO₂ fällt 42% geringer aus.

Kontakt

Markus Kaiser und Christoph Kost

Geschäftsbereich Systemintegration

markus.kaiser@ise.fraunhofer.de

christoph.kost@ise.fraunhofer.de

Links

Geschäftsbereich Systemintegration: [Energiesystemanalyse](#) und [NETs](#)

Fraunhofer ISE

Heidenhofstraße 2

79110 Freiburg

www.ise.fraunhofer.de

Anhang

Abkürzungsverzeichnis

Anhang

BCR – Biochar Carbon Removal

BECCS – Bioenergy Carbon Capture and Storage

CAGR – Compound Annual Growth Rate/jährliche Wachstumsrate

CAPEX – Capital Expenditures

CCS – Carbon Capture and Storage

CDR – Carbon Dioxide Removal

CO₂-basierte NETs – BECCS, DACCS & WACCS

DACCS – Direct Air Carbon Capture and Storage

KSG – Klimaschutzgesetz

KWK – Kraft-Wärme-Kopplung

LULUCF – Land Use, Land Use Change and Forestry

NETs – Negative Emissionstechnologien

OPEX – Operational Expenditures

THG – Treibhausgas

WACCS – Waste-to-Energy Carbon Capture and Storage

Biochar Carbon Removal - KWK

Anhang: Techno-ökonomische Parameter NETs

Biomassepyrolyseanlage mit Strom- und Wärmeerzeugung.

Parameter	Einheit	Initial	Final	Quelle
CAPEX	€/kW _{bio}	1365	946	1
OPEX Fix	% von CAPEX	6	6	1 und 2
Lebensdauer	Jahre	20	20	2
Abscheidewirkungsgrad	tCO ₂ /MWh _{bio}	0.11	0.11	3
Elektrischer Wirkungsgrad	%	28	28	3
Thermischer Wirkungsgrad	%	40	40	3

Quellen

- 1: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100970>
- 2: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/publikationen/schriftenreihe-2024-14-pyrolysetechnologien-europa.php>
- 3: <https://www.syncraft.at/system-types/typ1000/>

Biochar Carbon Removal - Thermisch

Anhang: Techno-ökonomische Parameter NETs

Biomassepyrolyseanlage mit Wärmeerzeugung.

Parameter	Einheit	Initial	Final	Quelle
CAPEX	€/kW _{bio}	883	407	1
OPEX Fix	% von CAPEX	6	6	1 und 2
Lebensdauer	Jahre	20	20	2
Abscheidewirkungsgrad	tCO ₂ /MWh _{bio}	0.18	0.18	3
Thermischer Wirkungsgrad	%	42	42	3

Quellen

1: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100970>

2: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/publikationen/schriftenreihe-2024-14-pyrolysetechnologien-europa.php>

3: <https://pyreg.com/de/unsere-technologie/>

Bioenergy Carbon Capture - KWK

Anhang: Techno-ökonomische Parameter NETs

Biomasse-KWK Kraftwerk mit post-combustion CO₂-Abscheidung.

Parameter	Einheit	Initial	Final	Quelle
CAPEX	€/kW _{bio}	3792	2754	1, 2 und 3
OPEX Fix	% von CAPEX	6	6	1 und 4
Lebensdauer	Jahre	20	20	5
Abscheidewirkungsgrad	tCO ₂ /MWh _{bio}	0.32	0.34	6
Elektrischer Wirkungsgrad	%	19	20	1 und 6
Thermischer Wirkungsgrad	%	24	27	1 und 7

Quellen

- 1: <https://ens.dk/media/6570/download> (für Biomasse KWK)
- 2: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.709891> (für Nachrüstung CO₂-Abscheidung)
- 3: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.987166> (für Kostenreduktion)
- 4: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624023667> (für Nachrüstung CO₂-Abscheidung)
- 5: <https://doi.org/10.3390/su16198468>
- 6: <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9841-4> (für Nachrüstung CO₂-Abscheidung)
- 7: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122193> (für Nachrüstung CO₂-Abscheidung)

Direct Air Capture

Anhang: Techno-ökonomische Parameter NETs

Niedertemperatur Direct Air Capture.

Parameter	Einheit	Initial	Final	Quelle
CAPEX	€/(tCO ₂ /yr)	7240	1763	1
OPEX Fix	% von CAPEX	9	9	1 und 2
Lebensdauer	Jahre	25	25	1 und 2
Stromverbrauch	MWh _{el} /tCO ₂	0.28	0.17	1
Wärmeverbrauch	MWh _{th} /tCO ₂	2.72	1.72	1

Quellen

1: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.02.005>

2: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.06.004>

Waste Carbon Capture

Anhang: Techno-ökonomische Parameter NETs

Nachrüstung einer Post-Combustion CO₂-Abscheidung an einer Müllverbrennungsanlage.

Parameter	Einheit	Initial	Final	Quelle
CAPEX	€/(tCO ₂ /yr)	931	558	1 und 2
OPEX Fix	% von CAPEX	7	7	1 und 2
Lebensdauer	Jahre	20	20	3
Abscheiderate	%	90	95	4
Stromverbrauch	MWh _{el} /tCO ₂	0.30	0.25	4
Wärmeverbrauch	MWh _{th} /tCO ₂	0.96	0.96	5

Quellen

- 1: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.709891> (für initialen CAPEX)
- 2: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.987166> (für relative Kostenreduktion)
- 3: <https://doi.org/10.3390/su16198468>
- 4: <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9841-4>
- 5: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122193>

Modellbeschreibung REMod

Anhang

Das Energiesystemmodell REMod wurde am Fraunhofer ISE entwickelt, um eine sektorgekoppelte und zeitlich hochaufgelöste Optimierung der zukünftigen Energiesysteminfrastruktur in Deutschland zu ermöglichen. Das Ziel der Optimierung sind minimierte Systemkosten, bestehend aus diskontierten Investitions-, Betriebs- und Verbrauchskosten von allen wichtigen Energieinfrastrukturen, angefangen von der Energiebereitstellung wie der Strom- oder Wärmeerzeugung, über Speicher und Netze bis zu Anwendungstechnologien wie Fahrzeugen. Die technologische Transformation der Energiewirtschaft und der Verbrauchssektoren wird jahresscharf optimiert, indem technische Komponenten unter Berücksichtigung ihrer Lebensdauer neu ausgebaut oder ersetzt werden. Der Betrieb des Gesamtsystems wird stündlich unter Berücksichtigung von fünf historischen Wetterjahren simuliert. Der Fokus des Modells liegt auf der Abbildung der Wechselwirkungen zwischen dem Sektor Energiewirtschaft und den Verbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Verkehr unter Berücksichtigung des gesamten Transformationspfades. Das Modell umfasst alle relevanten Energieträger, verschiedene Umwandlungs- und Speicheroptionen sowie zahlreiche Technologien in den Verbrauchssektoren.

Das Modell verwendet den Ansatz der simulationsbasierten Optimierung. Der Kern besteht dabei aus einer stündlichen Simulation des Energiesystems von heute bis in ein Zieljahr (z.B. 2045), in der durch verschiedene Energiebereitstellungs- und Flexibilitätsoptionen der Bedarf in jeder Stunde gedeckt wird. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Energiebilanz stündlich über alle Sektoren und Energieträger ausgeglichen ist. Als zentrale Rahmenbedingung müssen sowohl festgelegte CO₂-Reduktionsziele als auch ein CO₂-Budget im betrachteten Zeitraum eingehalten werden, um die Wege berechnen zu können, die bestimmte (Klima-)Ziele erreichen. Das Modell REMod bildet das gesamte Energiesystem inklusive der Verbrauchssektoren Gebäude, Verkehr und Industrie ab. In der Energiewirtschaft werden konventionelle Kraftwerke, erneuerbare Stromerzeuger, Fernwärmeerzeugung, Speicher für Strom, Wärme und chemische Energieträger, verschiedene Biomasseumwandlungsoptionen sowie Power-to-X-Technologien (Elektrolyse, Methanisierung und Produktion synthetischer Kraftstoffe) berücksichtigt.