



**IMPULSE FÜR EINE FORSCHUNGSAGENDA
ZU NEGATIVEMISSIONSTECHNOLOGIEN
IN DER ENERGIESYSTEMANALYSE**





SYSTEMANALYSE

FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE

IMPULSE FÜR EINE FORSCHUNGSAGENDA ZU NEGATIVEMISSIONSTECHNOLOGIEN IN DER ENERGIESYSTEMANALYSE

Impressum

Herausgeber

Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt

Forschungsnetzwerk Systemanalyse

Gestaltung und Produktion

Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Stand

April 2026

Bildnachweise:

Titel: ©Sabina – stock.adobe.com
(KI-generiert)

Autor*innen und Unterstützer*innen:

Niklas Hartmann^{a)}, Christiane Hennig^{g)}, Meritxell Domènech Monfort^{a)}, Enric Prats-Salvado^{d)}, Hannes Bluhm^{g)}, Marc Deissenroth-Uhrig^{k)}, Thomas Schöb^{b)}, Mak Đukan^{b)}, Kurt Wagemann, Christoph Schmidt^{c)}, Simon Block^{e)}, Peter Viebahn^{e)}, Harry Schindler^{f)}, Anna Sandhaas^{a)}, Anne-Marie Thomas^{h)}, Carsten Wedler^{l)}, Bernd Hirsch^{g, j)}, Daniel Kray^{a)}, Ludger Eltrop^{l)}, Anna Flora Schade^{g)}, Ronja Wollnik^{g)}, Sebastian Lübbers^{m)}

Unterstützende Institutionen:

- ^{a)} Hochschule Offenburg, Institut für nachhaltige Energiesysteme INES
- ^{b)} Forschungszentrum Jülich GmbH, Institute of Climate and Energy Systems, Jülicher Systemanalyse
- ^{c)} Hochschule Nordhausen, Institut für Regenerative Energietechnik in.RET
- ^{d)} Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Future Fuels
- ^{e)} Wuppertal Institut, Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme
- ^{f)} Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ)
- ^{g)} Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)
- ^{h)} Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
- ⁱ⁾ RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
- ^{j)} Brandenburgische Technische Universität, Fachgebiet Management regionaler Energieversorgungssysteme
- ^{k)} Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme gGmbH (IZES)
- ^{l)} Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Abteilung Systemanalyse und Erneuerbare Energien (SEE)
- ^{m)} Prognos AG



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1. EINFÜHRUNG

Dieses Impulspapier fasst die Diskussionen und Ergebnisse der Themengruppe Negativemissionstechnologien (NET) des Forschungsnetzwerkes Systemanalyse zusammen. Es richtet sich an politische Entscheidungsträger und soll offenen Forschungsbedarf speziell mit Fokus auf die Einbindung von NET in Energiesystemen aufzeigen, basierend auf der aktuellen Forschung zum Thema NET. Um Klimaneutralität zu erreichen, ist nicht nur die Vermeidung von Treibhausgasemissionen, z. B. durch Effizienzmaßnahmen, Erneuerbare-Energie-Technologien oder Elektrifizierung erforderlich, sondern auch die Entfernung von Treibhausgasen aus der Atmosphäre mittels NET. Negative Emissionen, mit Fokus auf CO₂, auch „Carbon Dioxide Removal“ (CDR) genannt, spielen daher eine wichtige Rolle in langfristigen Klimastrategien.

EMPFEHLUNGEN

- Negativemissionstechnologien sind für das Erreichen der deutschen Klimaschutzziele unverzichtbar. Entwicklung, Bewertung und Anreizsysteme für die Implementierung entsprechender Lösungen sollten als Forschungsgegenstand im 9. Energieforschungsprogramm des BMWFJ klar platziert werden.
- Der politische Rahmen muss effiziente Investitionsanreize für NET setzen, nicht nur in Form von Subventionen, sowie den Schutz naturbasierter Senken gewährleisten.
- Eine Differenzierung und auch getrennte Förderung von naturbasierten Maßnahmen und NET ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Entwicklungsstände, Potenziale und Effekte sinnvoll.
- Andere EU-Länder haben bei der Rahmensetzung für NET bereits Erfahrungen gesammelt. Durch internationale Kooperationen kann Deutschland von den Vorreitern lernen und sich für EU-weite Rahmenbedingungen für die NET stark machen.
- Für eine robuste Analyse der Wechselwirkungen zwischen Energiesystem und NET besteht Forschungsbedarf
 - bei der Entwicklung integrierter Systemmodelle zur Abbildung von NET, CO₂-Strömen und Infrastrukturbedarf,
 - bei der Bewertung langfristiger Szenarien und NET-Portfolios einschließlich Potenzialanalysen und Landnutzungs-Risiken und
 - in der partizipativen, inter- und transdisziplinären Technikfolgenforschung zu NET in Verbindung mit systemanalytischen Ansätzen.

2. STATUS QUO IN DEUTSCHLAND UND VERGLEICH ZU ANDEREN EU-LÄNDERN

In Deutschland werden NET bislang vor allem im Kontext unvermeidbarer Residualemissionen diskutiert und finden zunehmend Eingang in strategische Langfristedokumente zur Klimaneutralität. Konkrete Festlegungen zur systematischen Förderung, Anrechnung und Integration verschiedener NET-Optionen, sowohl technischer als auch naturbasierter Ansätze, sind bislang nur begrenzt ausgearbeitet. Im europäischen Vergleich haben mehrere EU-Mitgliedsstaaten NET bereits explizit in ihre Klimastrategien integriert. Dänemark hat mit dem NECCS-Fund einen gezielten Fördermechanismus für biogene CO₂-Abscheidung und -Speicherung etabliert. Schweden verankert BECCS explizit in seinem nationalen Klimarahmen zur Erreichung von Netto-Negativemissionen ab 2045 und hat 2024 ein Förderprogramm in Form von Ausschreibungen eingeführt. Frankreich adressiert negative Emissionen auch im Kontext von Landwirtschafts- und Bodenstrategien, unter anderem durch die Förderung von Pflanzenkohle und natürlichen Senken. Insgesamt zeigt sich innerhalb der EU ein heterogenes Bild, das unterschiedliche technologische Schwerpunkte, Governance-Ansätze und Geschwindigkeit in der Umsetzung widerspiegelt.

HINTERGRUND - NEGATIVE EMISSIONEN/CDR UND CO₂ ALS RESSOURCE

CDR-Methoden umfassen permanente technische Senken sowie natürlichen Klimaschutz und nutzen die Biosphäre bzw. Geosphäre zur Speicherung. Unter den technischen permanenten Senken stellen Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) und Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) CDR-Optionen dar.

Abgeschiedenes CO₂ kann zwei strategische Funktionen erfüllen: als Instrument für die **Entnahme von CO₂** aus der Atmosphäre mit dauerhafter Speicherung in einer Senke (Carbon Dioxide Removal CDR/negative Emissionen über CCS) und als Brücke in eine CO₂-Kreislaufwirtschaft über die Nutzung des **CO₂ als Ressource** (Carbon Capture and Use, CCU).

BECCS/DACCS: Nur durch eine langfristige Speicherung von CO₂ können dauerhaft negative Emissionen erreicht werden. **Dies ist ein wichtiger Bestandteil von Klimastrategien und der Umsetzung von Klimaschutz.**

BECCU/DACCU: Das aus der Atmosphäre entnommene CO₂ kann **als Kohlenstoffbaustein** für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien dienen, was besonders relevant für Hard-to-abate-Sektoren wie die Luftfahrt ist. Da die Nutzung von CO₂ aus fossilen Punktquellen unter RED III zeitlich befristet ist (Stromerzeugung bis 2035, andere Sektoren bis 2040), wird atmosphärisches CO₂ langfristig an Bedeutung gewinnen. Wichtig ist jedoch: Bei stofflicher Nutzung wird das CO₂ nur temporär gebunden und später wieder freigesetzt, sodass keine negativen Emissionen entstehen.

CDR-Methoden wie DACCS, Direct Ocean Carbon Capture and Storage (DOCCS) oder BECCS speichern hochreines CO₂. Je nach Marktlage und regulatorischem Rahmen kann dieses CO₂ auch den Verwertungspfad CCU bedienen. Investitionen in eine CDR-Infrastruktur können damit gleichzeitig auf die Dekarbonisierung schwer abbaubarer Sektoren einzahlen oder negative Emissionen bereitstellen. Diese Synergie sollte in politischen Instrumenten explizit berücksichtigt werden

3. ZENTRALE VORAUSSETZUNGEN ZUM NACHHALTIGEN AUSBAU VON NET IN DEUTSCHLAND

Damit der Auf- und Ausbau von NET bestmöglich zum Klimaschutz beiträgt, braucht es einen geeigneten **politischen Rahmen**. Dieser muss insbesondere folgende Punkte gewährleisten:

- **Effektivität:** Es muss sichergestellt werden, dass der Einsatz von NET tatsächlich zu Negativemissionen und nicht nur zur Verlagerung von Kohlenstoff etwa aus Waldsenken in technische Speicher führt. Zusätzlich dazu können technische Senken aber helfen, Waldsenken zu entlasten und vor allem permanente Entnahmen zu realisieren. Wenn potenzielle Investoren in Sektoren tätig sind, denen Negativemissionen bilanziell nicht zugeschrieben werden dürfen, müssen Regeln geschaffen werden, die eine Übertragung dieser Negativemissionen ermöglichen, damit Investitionsanreize entstehen.
- **Effizienz:** Die Minimierung der oftmals hohen Kosten für Negativemissionen erfordert eine effiziente Balance u. a. zwischen natürlichen und technischen Senken. Eine solche Balance kann unterstützt werden, indem die Einbindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre etwa in Biomasse systematisch gefördert wird (result-based payments). Die Subventionierung technischer Senken, sowohl nicht-permanenter (z. B. Holzprodukte) als auch permanenter (z. B. geologische Speicherung), kann zur Schwächung natürlicher Senken und zu steigenden Klimaschutzkosten führen. Um technische Senken anzureizen, können ein CO₂-Preis auf die Freisetzung biogener Emissionen oder CCS-Quoten für Biomasseanlagen geeigneterer Lösungen sein.
- **Kohärenz:** Fördermaßnahmen für NET sollten im Einklang stehen mit der Klimaschutzarchitektur der EU und Deutschlands. Dazu zählt neben dem Vorrang der Emissionsvermeidung insbesondere das Klimaschutzziel für den Landnutzungssektor LULUCF, das einen kosteneffizienten Beitrag natürlicher Senken abbilden sollte.

- **Nachhaltigkeit:** Die Nutzung flächenintensiver NET muss im Einklang stehen mit aktuellen und zukünftig steigenden Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Landnutzungen, etwa den EU-Zielen zur Wiederherstellung der Natur. Für den Einsatz von BECCS als flächenintensive NET müssen klare Regeln zur Vereinbarkeit mit dem Ziel der Ernährungssicherheit gefunden werden. Dabei sollten potenzielle Synergien zwischen Ernährungssicherheit und NET Berücksichtigung finden, beispielsweise Beiträge zur Reduktion der Preisvolatilität auf Agrarmärkten und verbesserte Einkommenschancen für Land- und Forstwirte.

Zur Erreichung der nationalen und europäischen Klimaziele kommt dem **Aufbau einer CO₂-Infrastruktur** zudem eine wichtige Bedeutung zu, denn nur so kann abgetrenntes Kohlenstoffdioxid einer effizienten Speicherung zugeführt werden. Für festen Kohlenstoff kann auf die bestehenden Transportwege zurückgegriffen werden. Für die weitere Nutzung des abgetrennten Kohlenstoffdioxids hat jedoch der Aufbau einer CO₂-Infrastruktur eine zentrale Bedeutung. Der Einsatz von NET wird in der bisherigen Planung von CO₂-Infrastrukturen jedoch noch unzureichend berücksichtigt. Der Fokus liegt derzeit vor allem auf CO₂-Mengen aus prozessbedingten, unvermeidbaren Emissionen, insbesondere in der Zement-, Kalk- und Abfallwirtschaft. Mittel- bis langfristig werden jedoch deutlich größere CO₂-Mengen aus Negativemissionen erwartet, etwa aus atmosphärischen (DAC) und biogenen Quellen. Daher sollten diese potenziellen Mengen bereits zu Beginn systematisch ermittelt und in die Planung der Transportinfrastruktur integriert werden, um eine langfristig bedarfsgerechte Auslegung sicherzustellen. Für große Transportvolumina über weite Distanzen gilt der leitungsgebundene Transport als kosteneffizienteste Option. In der Hochlaufphase sowie für kleine, weniger zentral gelegene Standorte kommt dem multimodalen Transport eine zentrale Bedeutung zu, da infrastrukturelle Lücken überbrückt und flexible Übergangslösungen ermöglicht werden können. Vor dem Hintergrund grenzüberschreitender CO₂-Transporte sind zudem Grenzübergangspunkte, regulatorische Schnittstellen und geeignete Koordinationsmechanismen – etwa im Rahmen internationaler Carbon-Management-Partnerschaften – frühzeitig in die Infrastrukturplanung zu integrieren.

Forschungsbedarf besteht u.a. bei der Frage wie der Staat sich beim Hochlauf einer CO₂-Infrastruktur einbringen soll (Koordinierung, Regulierung, etc.), systematischen Identifikation geeigneter DAC- oder BECCS-Standorte in Deutschland und die Auswirkungen einer Inanspruchnahme der Opt-in-Klausel zur regionalen CO₂-Speicherung durch einzelnen Bundesländer auf Netzausbau und Standortentscheidungen.

4. ZENTRALE THEMEN IN DER FORSCHUNG ZU NET

Der Bedarf an Negativemissionstechnologien zur Erreichung der Klimaschutzziele zeigt, dass eine klare strategische Verankerung und Zielsetzung in der politischen Forschungsagenda notwendig sind. NET sind eng mit dem Energiesystem verknüpft. DAC-Anlagen erfordern große Mengen erneuerbarer Energie, während bioenergiebasierte NET direkt in bestehende Energie- und Wärmesysteme integrierbar sind. Gleichzeitig entstehen Schnittstellen bei Transport- und Speicherinfrastrukturen, etwa für CO₂-Pipelines und -Speicher, die aufgrund der engen Verflechtung, insbesondere mit dem Industriesektor und der Abfallwirtschaft, eine Koordination mit dem Energiesystem erfordern. Zudem können NET zur Flexibilisierung beitragen, indem sie als zusätzliche Stromnachfrage oder als Speicheroptionen wirken. Insgesamt ergeben sich sowohl Synergien (z. B. Nutzung von Abwärme) als auch Zielkonflikte, etwa bei der Konkurrenz um erneuerbare Energien und Biomasseressourcen. Vor dem Hintergrund bestehender energiepolitischer Ziele und (zukünftiger) CDR-Zielsetzungen entsteht ein wachsender Forschungsbedarf, insbesondere für integrierte Systemanalysen, Szenarientwicklungen und Politikfolgenabschätzungen. Eine ganzheitliche Systemanalyse und -integration sind entscheidend, um die Ziele ressourceneffizient und systemverträglich zu erreichen.

Forschungsbedarf im Thema der technischen Systemanalyse und -integration wird derzeit vor allem in den folgenden Bereichen gesehen:

- **Integrierte Systemmodelle** entwickeln: NET und Infrastrukturbedarfe sollten in unterschiedlichen Systemmodellen (Ausbauplanung, Einsatzplanung, Strommarktmodelle, Energiesystemmodelle, Industriesystemmodelle, Gleichgewichtsmodelle, ...) integriert und CO₂-Ströme adäquat abgebildet werden. Dabei ist zu beachten, dass

die Systemmodelle die Entscheidung für bestimmte NET nicht nur aufgrund deren Kosten treffen, sondern auch deren schwer monetarisierbare Eigenschaften adäquat berücksichtigen. Insbesondere sollte die Permanenz der Bereitstellung von Negativemissionen sowie Synergien und Risiken für Bereiche inner- und außerhalb des Energiesystems berücksichtigt werden. Da ein Overshoot über 1,5 °C sehr wahrscheinlich ist, ist das Ziel eine Modelllandschaft, die umfassende Analysen über das Jahr der Klimaneutralität hinaus erlaubt. Dabei sollten auch Interaktionen mit dem Ausland berücksichtigt werden, etwa länderübergreifende Infrastruktur.

- **Langfristige Strategien durch Szenarien mit unterschiedlichen NET-Portfolios und netto-negativen Emissionen** stützen: Für die Festlegung konkreter Zielwerte für Negativemissionen (Zielwerte der Abscheidung, der Nutzung in spezifischen Anwendungsbereichen, der Speicherung und der Vermeidung von CO₂) müssen adäquate Szenarien entwickelt werden. Diese sollten interdisziplinär technologische Entwicklungen, ökonomische Rahmenbedingungen, ökologische Auswirkungen und gesellschaftliche Präferenzen berücksichtigen. Für die NET-Portfolios sind zudem umfassende Potentialanalysen für die verschiedenen NET notwendig, die Landnutzungskonflikte und Risiken abbilden.
- **Politikfolgenforschung** intensivieren: Die Effekte von Gesetzen, Förderprogrammen und Anreizsystemen auf NET sind zu analysieren. Eine frühzeitige Einbindung der Öffentlichkeit durch transparente Kommunikation und partizipative Prozesse ist für die Akzeptanz entscheidend.

Die Energiesystemanalyse untersucht mithilfe normativer und explorativer Szenarien die Auswirkungen von NET. In Verbindung mit einem **inter- und transdisziplinären Forschungsansatz** werden eine ganzheitlichere **Technikfolgenabschätzung** und ein aktiverer Diskurs mit Stakeholdern ermöglicht. Somit lassen sich Entwicklungen antizipieren und tragfähige Strategien ableiten. Entsprechende Fragestellungen sind u. a. (Beispiele in Klammern):

- Ex-ante-Fragen zur Einbringung in die Systemanalyse: z. B. welche Folgen resultieren aus gesellschaftlichen Präferenzen (gegenüber Technologien, Standorten, Risiken), planerischen Bedingungen (Ausschlussflächen, CO₂-Transportoptionen), politischen Rahmenbedingungen (Ziele, Onshore-CO₂-Speicherung, internationale Verflechtungen), Innovationen (neue NET-Optionen, Effizienzgewinne, Kostendegressionen), Akteursverhalten (Geschäftsmodelle, Beteiligung an NET-Projekten) und Potenzialen (geologischer Speicheroptionen)?
- Ex-post-Fragen für die Folgeanalyse der Ergebnisse: z. B. welche Auswirkungen haben Zielszenarien auf die Akzeptanz gegenüber NET, was sind die Umweltwirkungen (Ressourcenverbrauch, Flächenverbrauch), sozialen Belastungen (Kostenverteilung, regionale Überlastung) und Wertschöpfungseffekte (Arbeitsplätze, Gewinne, Steuereinnahmen)?
- Anschluss- und Verwertungsfragen zur Befähigung von Stakeholdern im Sinne transformativer Forschung, wie z. B. Politik und Verwaltung (Roadmaps, effiziente Mittelverwendung), Wirtschaft (Geschäftsmodellentwicklung), Zivilgesellschaft (Legitimität von Zielen).

Für einen beschleunigten Markthochlauf von CDR-Projekten in Deutschland sind internationale Kooperation und Austausch wertvoll. Dies umfasst sowohl das politische Rahmenwerk und die entsprechende Gesetzgebung als auch die tatsächliche Umsetzung von CDR-Projekten. Hierbei sind insbesondere die Erfahrungen und etablierte Fördersysteme in Ländern, die Vorreiter in der Umsetzung sind, hilfreich. Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BECCS) sowie Biochar gelten allgemein als Optionen mit hohem Potenzial zur kurzfristigen Implementierung unter den verschiedenen CDR-Methoden. Daher lassen sich in diesem Bereich bereits zahlreiche Aktivitäten in den EU-Ländern Dänemark, Schweden und Norwegen beobachten. Erste Monitoringansätze zur Bewertung der Effizienz der einzelnen Förderinstrumente werden etabliert. Außerhalb Europas existieren bereits erste operierende BECCS-Anlagen. Das Carbon Removal Certification Framework (CRCF) als neue EU-Verordnung zur Schaffung des ersten Zertifizierungsrahmens für die dauerhafte Kohlenstoffentnahme und Kohlenstoffspeicherung in Produkten wurde verabschiedet. Einheitliche Standards sind zentral, um Negativemissionen robust zu messen, zu berichten und zu zertifizieren.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages