

Torsten Brinkmann Hereon, Roland Dittmeyer KIT, Juliane El Zohbi GERICS/Hereon, Stefan Fogel HZDR, Uwe Hampel HZDR, Daniela Jacob GERICS/Hereon, Thomas Klassen Hereon, Fiona Köhnke GERICS/Hereon, Robin König DLR, Stefan Kronshage

DLR, Matthew Mayer HZB, Nathalie Monnerie DLR,

Enric Prats Salvado DLR, Thomas Pregger DLR, Björn Rau HZB, Imke

Rhoden FZJ, Torsten Sachs GFZ, Katharina Schätzler KIT, Eva Schill KIT, Bettina Steuri GERICS/Hereon.

NETTO-NULL-2050 REALITY-CHECK

von praxisorientierten Handlungsempfehlungen und Strategien für ein CO₂-neutrales Deutschland bis 2050

PROJEKT: NETTO-NULL-2050 (MITIGATION)

Phase 2; Projektlaufzeit: 2023-2024

Netto-Null-2050 Reality-Check – von praxisorientierten Handlungsempfehlungen und Strategien für ein CO₂-neutrales Deutschland bis 2050

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Methodik	4
2.a Was versteht man unter einem Reality-Check?	4
2.b Die Netto-Null-2050 Reality-Check Methodik	4
3. Reality-Check	9
3.a Ausgangspunkt: Netto-Null-2050 Wegweiser	9
3.b Handlungsempfehlungen mit Praxiseinschätzung	9
3.b.1 Quantifizierung der Treibhausgas-Dynamik wiedervernässter Moore (Steckbrief E)	10
3.b.2 Konzentrierte Sonnenstrahlung zur Herstellung von solaren Brennstoffen (Steckbrief I)	14
3.b.3 Sichere und dauerhafte Speicherung von CO ₂ im Untergrund (Steckbrief K)	17
3.b.4 Wärme- und Kältebereitstellung und -speicherung (Steckbrief M)	20
3.b.5 Gasspeicherung (H ₂ , CH ₄ , CO ₂) im Untergrund oder in technischen Speichern (Steckbrief O)	24
3.c Energiesystem Handlungsempfehlungen	30
3.c.1 Die konsequente Minderung des Energiebedarfs und die aktuelle Energieeffizienzgesetzgebung	30
3.c.2 Ausbau der Wärmeversorgung von Gebäuden über Wärmepumpen und Wärmenetze bis 2030	32
3.c.3 Flottenentwicklung der Batterie-, Hybrid- und Wasserstoff-Pkws auf 15 bis 17 Millionen bis 2030	35
3.c.4 Elektrifizierung und Wasserstoffeinsatz in der Industrie bis 2030	37
3.c.5 Erforderlicher Ausbau des Strom-Übertragungsnetzes	42
3.c.6 Erhöhung des jährlichen Ausbaus von PV und Windkraft als zentrale Säulen eines klimaneutralen Energiesystems	45
4. Fazit und Ausblick	47
5. Abkürzungsverzeichnis	51
Literatur	53

IMPRESSUM

Netto-Null-2050 Reality-Check – von praxisorientierten Handlungsempfehlungen und Strategien für ein CO₂-neutrales Deutschland bis 2050, Veröffentlichung März 2025.

Autor:innen: Fiona Köhnke, Imke Rhoden, Enric Prats Salvado, Thomas Pregger, Stefan Kronshage, Robin König.

Beitragende: Stefan Fogel, Thomas Klassen, Torsten Sachs, Katharina Schätzler.

Der Bericht ist als Teil des Projekts *Netto-Null-2050* entstanden. Beteiligt waren hier: Daniela Jacob, Torsten Brinkmann, Roland Dittmeyer, Juliane El Zohbi, Stefan Fogel, Uwe Hampel, Thomas Klassen, Fiona Köhnke, Matthew Mayer, Nathalie Monnerie, Enric Prats Salvado, Thomas Pregger, Stefan Kronshage, Robin König, Björn Rau, Imke Rhoden, Torsten Sachs, Katharina Schätzler, Eva Schill, Bettina Steuri.

Beteiligte Helmholtz-Zentren:

Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum hereon GmbH

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Forschungszentrum Jülich (FZJ)

Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)

Helmholtz-Zentrum hereon GmbH

Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Danksagung: Wir möchten uns bei allen befragten Expert:innen aus der Praxis bedanken, dass sie ihre Expertise und Fachwissen mit uns geteilt haben.

Bitte den Bericht zitieren als: Köhnke, F., Rhoden, I., Prats Salvado, E., Pregger, T., Kronshage, S., König, R., Fogel, S., Klassen, T., Sachs, T., Schätzler, K., Jacob, D., El Zohbi, J., Brinkmann, T., Dittmeyer, R., Hampel, U., Mayer, M., Monnerie, N., Rau, B., Schill, E., Steuri, B. **Netto-Null-2050** Reality-Check Report, 2025.

1. Einleitung

Die globale Forderung nach CO₂-Neutralität, wie sie im Pariser Klimaabkommen (UNFCCC, 2015) und in Folgearbeiten wie dem Sechsten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) formuliert wurde, unterstreicht die Notwendigkeit von Strategien zur Adressierung von fossilen Restemissionen, die nicht oder nur mit sehr hohen Kosten vermeidbar sind. Vor diesem Hintergrund wurde das interdisziplinäre Projekt Netto-Null-2050 ins Leben gerufen, das Wissenschaftler:innen aus acht Helmholtz-Forschungszentren zusammenbringt. Ziel des Projekts war es, die umfangreiche wissenschaftliche Expertise der Helmholtz-Zentren zu bündeln, um Optionen zur CO₂-Vermeidung und -Entnahme umfassend zu bewerten und Lösungsansätze zur Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland zu entwickeln.

In der ersten Projektphase entstand mit dem Netto-Null-2050 Wegweiser (Jacob et al., 2023) ein Katalog wissenschaftlich fundierter Handlungsempfehlungen, der Strategien für den Übergang Deutschlands zur CO₂-Neutralität bis zur Mitte des Jahrhunderts aufzeigt. Dabei wurde betont, dass der Zeitraum bis 2030 entscheidend ist: Ansätze zur Kohlenstoffentnahme müssen intensiv erforscht und erprobt sowie die notwendigen politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Dieser in der zweiten Projektphase erstellte Bericht zum Reality-Check baut auf diesen Empfehlungen auf und dient der Validierung und Weiterentwicklung der vorgeschlagenen Maßnahmen. Die Überprüfung erfolgte in einem dreistufigen Prozess: (1) Identifikation relevanter Akteur:innen wie z. B. Praxisexpert:innen aus der Industrie für ausgewählte Maßnahmen, (2) Sammlung ihrer Positionen durch Interviews beziehungsweise die Analyse öffentlicher Stellungnahmen und (3) Synthese und Interpretation des Feedbacks. Für die Diskussion von Empfehlungen zum Energiesystem wurden auch aktuelle Bewertungen und Positionierungen von relevanten Wissenschaftler:innen herangezogen und Transformationspfade in

Szenarien mit der realen Entwicklung verglichen. Die Fragen, wie Machbarkeit und Zielerreichung bewertet werden und welche Implikationen aus den Aussagen und Positionierungen für die Umsetzung der Netto-Null-2050-Empfehlungen gezogen werden können, stehen im Mittelpunkt des Reality-Checks.

Obwohl der Reality-Check aufgrund der begrenzten Anzahl an Maßnahmen und Einbeziehung von Akteur:innen nicht alle Aspekte abdecken konnte, stellt er einen wichtigen ersten Schritt dar, um die Handlungsempfehlungen iterativ zu bewerten und an die praktischen Herausforderungen anzupassen.

Darüber hinaus hat der Reality-Check versucht, Verbindungen zwischen Akteur:innen zu fördern, die traditionell nicht gut miteinander verbunden waren, deren Zusammenarbeit aber immer wichtiger geworden ist. So wurde beispielsweise das kritische Dreieck zwischen Forschungseinrichtungen, der etablierten Industrie und aufstrebenden Start-ups hervorgehoben, deren Vernetzung den Technologietransfer erleichtert.

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse dieses Prozesses vor, indem er das Feedback von Interessengruppen außerhalb der unmittelbaren wissenschaftlichen Gemeinschaft zusammenfasst und dessen Auswirkungen auf die ursprünglichen Empfehlungen analysiert. Durch die Integration dieser verschiedenen Perspektiven wird versucht, die Praktikabilität und Effektivität der vorgeschlagenen Maßnahmen zu verbessern und so zu dem gemeinsamen Ziel beizutragen, eine CO₂-neutrale Zukunft zu erreichen.

2. Methodik

Um die Relevanz und Machbarkeit der Handlungsempfehlungen zu überprüfen, wurde die ‚Reality-Check‘-Methodik für ausgewählte Handlungsempfehlungen des Netto-Null-2050 Wegweisers mit Wissenschaftler:innen und Praxisexpert:innen durchgeführt. In diesem Kapitel wird zunächst kurz erläutert, was unter dem Begriff Reality-Check verstanden wird. Anschließend wird beschrieben, wie diese Methodik in dem Projekt Netto-Null-2050 angewandt wurde.

2.a Was versteht man unter einem Reality-Check?

Für die Begriffe ‚Reality-Check‘ oder Realitätsprüfung gibt es keine einheitlich genutzten Definitionen. In der wissenschaftlichen Literatur existieren Artikel aus verschiedenen Disziplinen, die Reality-Check-Ansätze beinhalten. Oft wird der Begriff nur im Titel verwendet und die Vorgehensweisen werden nicht genauer beschrieben. In diesen Artikeln werden als Reality-Check mehrheitlich Analysen durchgeführt, die praxisbezogene Prozesse und Gegenstände untersuchen, beispielsweise Entwicklungs- und Umsetzungsprozesse (Lima et al., 2017). Laut Eversberg et al. (2023) heben Realitätsprüfungen Realitäten hervor, die entweder der Wünschbarkeit oder der Möglichkeit der Umsetzung einer Vision - oder beidem - widersprechen. Mit ‚Realitäten‘ sind nicht nur die in der Welt beobachteten Ereignisse („das Tatsächliche“), sondern auch die Erfahrungen, Wahrnehmungen oder Darstellungen dieser Ereignisse durch soziale Akteur:innen („das Empirische“) und die ‚kausalen Mechanismen‘, die sie bewirken, gemeint.

Dieser Beschreibung entsprechend besteht ein Realitätscheck darin, die tatsächliche Möglichkeit einer vorgestellten Zukunft zu hinterfragen (Eversberg et al., 2023). Goettsch (2016) argumentiert, dass Realitätsprüfungen durchgeführt werden könnten, um zu erfahren, wie die Anwendung von Forschungsergebnissen

im wirklichen Leben aussehen könnte. Insbesondere die Empfehlungen und Einschätzungen von Wissenschaftler:innen und Praxisexpert:innen seien hilfreich.

Für die Reality-Check-Analysen werden unterschiedliche Forschungsgegenstände und Instrumente genutzt. Beispiele hierfür sind Feldstudien, Interviews mit Schlüsselpersonen und die Analyse von Primär- und Sekundärdokumenten (Lima et al., 2017; Katsagounos et al., 2021; Callo-Concha, 2018).

2.b Die Netto-Null-2050 Reality-Check Methodik

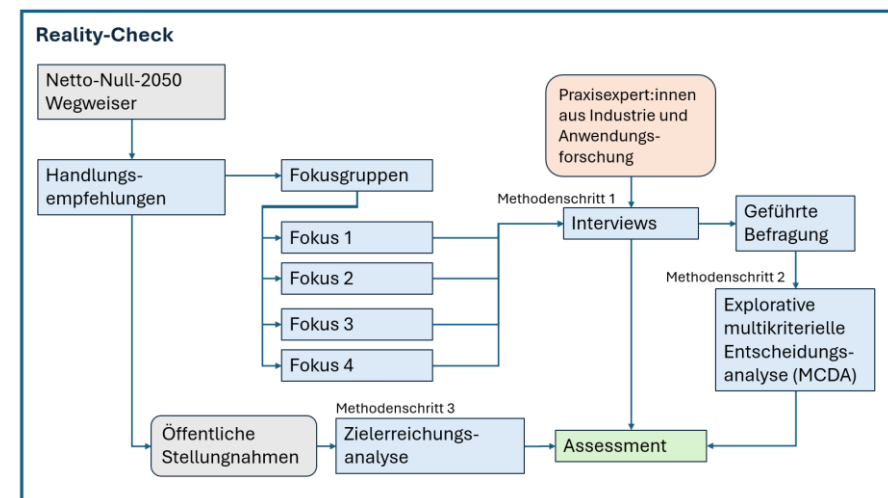


Abb. 1: Reality-Check Konzeption. Grau: Publikationen und Statements in der Literatur, orange: Praxisexpert:innen, blau: Prozess- und Analyseschritte, grün: finale Synthese und Ergebnis des Reality Checks. Quelle: Eigene Darstellung.

Im Hinblick auf die zuvor genannten Eigenschaften und Vorteile wurde der Reality-Check Ansatz ausgewählt und angepasst, um ausgewählte Handlungsempfehlungen aus der ersten Projektphase von Netto-Null-2050 einem Praxistest zu unterziehen. Zur Durchführung des Reality-Checks wurde ein mehrstufiger Ansatz verwendet, der neben Interviews mit Praxisexpert:innen eine explorative multikriterielle Analyse der Implementierbarkeit selektierter Handlungsempfehlungen und ein literatur-basiertes Assessment für den Bereich Energiesystem beinhaltet (vgl. Abb. 1).

Insgesamt folgte der Ablauf dem Schema:

- Prüfung von selektierten Handlungsempfehlungen durch Wissenschaftler:innen
- Bildung von Fokusgruppen
- Auswahl von Handlungsempfehlungen und Zuordnung zum Fokus
- Identifikation von Praxisexpert:innen je Handlungsempfehlung
- Durchführung von Interviews mit den Praxisexpert:innen (Methodenschritt 1)
- Präferenzassessment mit Hilfe multikriterieller Entscheidungsanalyse durch zusätzliche Leitfragen (Methodenschritt 2)
- Zusätzliche Zielerreichungsanalyse von selektierten Maßnahmen im Energiesystem (Methodenschritt 3)

Methodenschritt 1:

Nach der Prüfung und Identifikation von selektierten Handlungsempfehlungen und der Bildung von thematischen Fokusgruppen wurden Praxisexpert:innen für die gewählten Handlungsempfehlungen identifiziert und eingeladen. Die Wissenschaftler:innen haben diese hinsichtlich ihrer Expertise und Praxiserfahrung als Schlüsselexpert:innen ausgewählt. Mit diesen Expert:innen wurden dann im Methodenschritt 1 einzelne Interviews geführt, in denen je eine oder zwei Handlungsempfehlung(en) diskutiert und eingeordnet wurden (vgl. Tab. 1).

Zusätzlich zu der Interviewerin war ein:e Wissenschaftler:in aus der Forschungsdisziplin bei dem Interview dabei. Die Einschätzungen sind den jeweiligen Handlungsempfehlungen direkt zugeordnet (siehe Kapitel 3b).

Nach einer kurzen Vorstellung des Projekts Netto-Null-2050, des Wegweisers und der Handlungsempfehlung(en) wurden in diesem ersten Teil des Interviews fünf offene Fragen gestellt. Das Hauptziel war es hier, die Handlungsempfehlungen hinsichtlich ihrer Relevanz und Machbarkeit mit den Expert:innen aus der Praxis bzw. mit Praxishintergrund zu prüfen. Die fünf Fragen wurden eingeleitet mit „Aus Ihrer Sicht, ...“:

Allgemein:

1. Was halten Sie von der Handlungsempfehlung?

Detailfragen:

2. Finden Sie, dass die vorgeschlagenen Instrumente geeignet und zielführend sind?
3. Denken Sie, dass die Angabe der genannten Personen/Gruppen (Kategorie ‚Beteiligte‘), die einbezogen werden müssen, vollständig ist?
4. Denken Sie, dass die Angabe der Zeit realistisch ist?
5. Finden Sie die Monitoring-Methode geeignet?

Falls die Handlungsempfehlung bei Frage 1 als ‚nicht relevant‘ eingeordnet wurde, wurden folgende Alternativfragen gestellt (statt Fragen 2-5):

- Warum erachten Sie die Handlungsempfehlung als ‚nicht relevant‘?
- Welche Handlungsempfehlung fänden Sie stattdessen zweckvoll?
- Welche Instrumente wären hierfür zielführend?
- Welche Personen/Gruppen (Beteiligte) sollten einbezogen werden?
- Welche Zeitangabe halten Sie für realistisch?
- Welche Monitoring-Methode wäre hierfür geeignet?

Methodenschritt 2:

Die multikriterielle Entscheidungsanalyse (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) ist eine Methode zur Entscheidungsfindung auf Grundlage mehrerer Kriterien. Es wird davon ausgegangen, dass Akteur:innen – wie eine soziale Gruppe, ein:e Entscheidungsträger:in oder eine andere relevante Einheit – aus einer festen und begrenzten Anzahl von Alternativen auswählen muss, wobei jede Alternative auf der Grundlage einer festgelegten Anzahl vordefinierter Kriterien bewertet wird. Für jede Alternative und jedes Kriterium können die objektiven Kosten oder der objektive Nutzen quantifiziert werden und gelten als bekannt. Diese Werte, die die Leistung jeder Alternative in Bezug auf jedes Kriterium darstellen, bilden die sogenannte Leistungsmatrix, die den objektiven Aspekt der Entscheidung erfassen soll, da sie nicht von einzelnen Akteur:innen abhängt. Sie bleibt daher für alle Entscheidungsträger:innen gleich (Baležentis & Streimikiene, 2017; Ibáñez-Forés et al., 2014).

Allerdings können die Akteur:innen unterschiedliche Ansichten über die relative Bedeutung der verschiedenen Kriterien haben. Um diese subjektiven Ansichten zu berücksichtigen, wird jede:r:m Akteur:in ein Gewichtungsvektor zugewiesen, der ihre Präferenzen hinsichtlich der relativen Bedeutung jedes Kriteriums widerspiegelt. Die Werte innerhalb dieses Vektors werden verwendet, um Kriterien auf der Grundlage ihrer Sichtweise zu priorisieren. Es wird davon ausgegangen, dass die Akteur:innen die Alternative mit der höchsten Bewertung wählen. Wenn diese Alternative nicht realisierbar ist, entscheiden sie sich für die Alternative mit der zweithöchsten Bewertung, und so weiter. Unter den verschiedenen verfügbaren MCDA-Methoden wird Promethee 2, das weit verbreitet ist und zu den bekanntesten MCDA-Modellen gehört, verwendet (Brans & Vincke, 1985; Mareschal & Brans, 1988).

In vielen Entscheidungsbewertungszenarien sind die den verschiedenen Kriterien zugewiesenen Gewichtungen oft nur annähernd bekannt. In solchen Fällen ist es entscheidend, die Robustheit der Entscheidungsprioritäten in Bezug auf diese ungewissen Gewichtungen zu bewerten. Dies ist besonders wichtig, wenn die genauen Werte der Gewichtungen nicht vollständig bestimmt sind. Um die

Untersuchung der Empfindlichkeit der Ergebnisse auf mögliche Schwankungen in den Gewichtungen zu analysieren, wird ein geometrischer, computergestützter Ansatz angewendet. Konkret wird berechnet, wie nah das aktuelle Set der Präferenzen bei einer Änderung derer zu einer anderen Entscheidung führt. Da jede farblich gekennzeichnete Fläche eine Alternative kennzeichnet, stellt jeder Teil der Grenze einer farbigen Fläche zu einer anderen einen potenziellen Umschwung in der Präferenzrangfolge dar. Diese geometrische Methode ermöglicht, die Robustheit einer Entscheidung bei unsicheren Gewichtungen zu bewerten. Sie liefert wertvolle Informationen darüber, wie empfindlich die Präferenz auf Änderungen in den Gewichtungen reagiert, und hilft zu verstehen, welche Alternative bei geringfügigen Änderungen bevorzugt werden könnte und welche Alternativen ausgeschlossen werden können. Für die Visualisierung in 2D können nur drei Kriterien auf einmal dargestellt werden. Die farbigen Flächen kennzeichnen die Alternativen, hier die Handlungsempfehlungen, der schwarze Punkt stellt die Präferenz dar. Beispielsweise liegt er bei einer Gleichgewichtung der drei selektierten Kriterien genau in der Mitte. Die Alternative, in der der Punkt liegt, ist die bevorzugte. Je näher der Punkt an einer Kante zu einer anderen Fläche liegt, desto eher wird bei Änderung der Präferenzen die andere Alternative gewählt (Vögele et al., 2023).

Für den Reality-Check wurden die Praxisexpert:innen am Ende der Interviews (Methodenschritt 1) für ihre selektierte Handlungsempfehlung zu fünf auf dem Wegweiser basierenden Charakteristika der Handlungsempfehlungen befragt, wie sie deren Wert für die Implementierbarkeit der Handlungsempfehlung einschätzen. Diese Expert:innen-Einschätzung ist die Basis der Charakterisierung der Handlungsalternativen. Es wurden folgende Kriterien eingeschätzt:

- Relevanz von **Kollaboration** für die Implementierung
- Höhe des noch nötigen **Aufwands** zur Implementierung
- **Beitrag** der Maßnahme bei Implementierung zur Zielerreichung
- **Gelingen** der Implementierung
- Funktionierendes **Monitoring** erfolgreicher Implementierung

Nach der Charakterisierung der Handlungsempfehlungen wurden sechs Szenarien für die Gewichtung der Präferenzen festgelegt, wobei zunächst eine komplette Gleichgewichtung der fünf Kriterien unterstellt wird und darauffolgend eine Bevorzugung jeweils eines Kriteriums gegenüber den anderen im Verhältnis 5:1 angenommen wird. Jedes der unterschiedlichen Gewichtungssets stellt ein Szenario dar, mit dem die Handlungsempfehlungen im Hinblick auf ihre Implementierbarkeit eingeordnet werden können. Weitergehend wird analysiert, wie robust die Implementierbarkeit einer Handlungsempfehlung ist, wenn sich das Szenario, also die Präferenz der Kriterien, ändert. Dies wird mithilfe einer zweidimensionalen Darstellung visualisiert, wobei jeweils drei Kriterien abgebildet werden können. Der schwarze Punkt stellt die aggregierte Präferenz dar, die verschiedenen gefärbten Flächen stehen für die Handlungsalternativen, die am ehesten implementierbar angenommen werden. Die Fläche, in der der Punkt liegt, ist die im Szenario bevorzugte Handlungsempfehlung. Sofern sie nah an einer anderen Fläche liegt, kann sich diese Entscheidung bei einer Änderung des Szenarios, sprich der Präferenzen, ändern. Die Implementierbarkeit der Handlungsempfehlung ist demnach nicht deutlich der Implementierbarkeit der angrenzenden Handlungsempfehlung überlegen.

Eingeschätzt wurden für die Analyse folgende Handlungsempfehlungen (vgl. Tab. 1). Für die Analyse wurde außerdem eine Alternative konstruiert, bei der keine Maßnahme zur Erreichung von Netto-Null 2050 angestrebt wird („Keine Maßnahmen“).

Wegweiser ID	Kurzbezeichnung	Beschreibung
K1	CCS Richtlinien	Schaffung klarer politischer und rechtlicher Rahmenbedingungen (Deutschland oder EU)

O1	Transportnetz-analyse	Bestandsaufnahme und Transportnetzanalyse für alle Gase, insbesondere H ₂ und CO ₂
O3	Wasserstoff	Wasserstoff H ₂ Analyse für H ₂ in Bezug auf Menge und Speicherung (ober- und unterirdisch)
M1	Geo-Thermische Speicherung	Entwicklung und Umsetzung von geothermischen Wärmespeicherprojekten unter Einbindung dieser in Versorgungsnetze der Industrie
E	THG Dynamik Moore	Quantifizierung der Treibhausgas-Dynamik wiedervernässter Moore
I1C	Demo-Anlage	Demo-Anlage mit 10 Megawatt Herstellung von solarem Wasserstoff und solaren Kraftstoffen mit CO ₂

Tab. 1: Von Praxisexpert:innen in Methodenschritt 1 (Interviews) und 2 (MCDA) eingeschätzte Handlungsempfehlungen aus dem Wegweiser. Quelle: Eigene Darstellung, Netto-Null-2050 Wegweiser.

Im Szenario einer Gleichgewichtung der Kriterien (uniforme Gewichtung) wird die Handlungsempfehlung der Bestandsaufnahme und Transportnetzanalyse für alle Gase (graue Fläche, „Transportnetzanalyse“) am ehesten als implementierbar eingeschätzt. Sollte sich das Szenario und die Präferenz der Kriterien ändern, sodass beispielsweise der nötige Aufwand zur Umsetzung der Empfehlungen (z. B. aufgrund von hohen nötigen Investitionen) als vergleichsweise wichtiger als die anderen Kriterien gesehen wird, kann es zu einer Verschiebung der Implementierbarkeit kommen, sodass die Handlungsempfehlungen zur Quantifizierung der Treibhausgas-Dynamik wiedervernässter Moore (grüne Fläche, „THG Dynamik Moore“) oder die Wasserstoff-Analyse in Bezug auf Menge und Speicherung (blaue Fläche, „Wasserstoff“) zur bevorzugten Alternative werden.

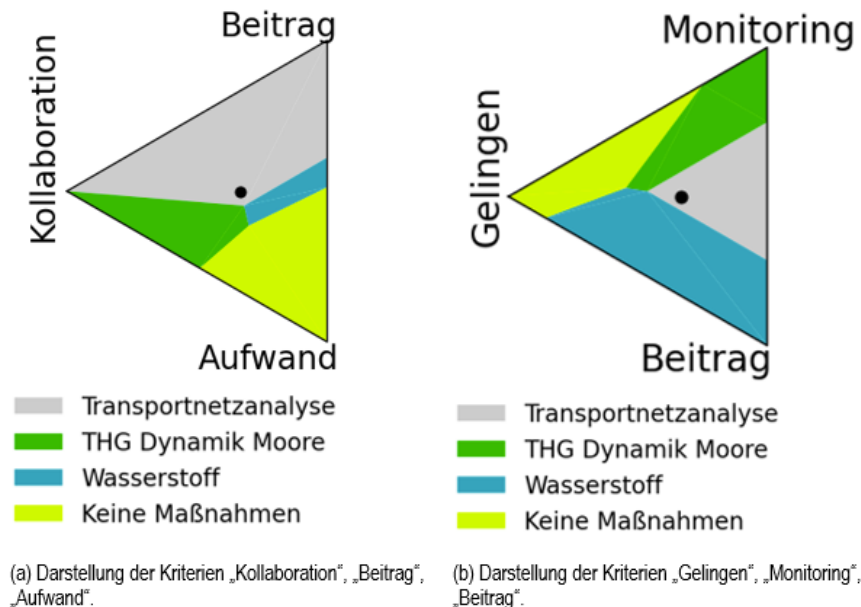


Abb. 2: Robustheit der Implementierbarkeit der Handlungsempfehlungen bei uniformer Gewichtung aller Kriterien. Quelle: Eigene Darstellung, Vögele et al. (2023); Grajewski (2024).

Bei einer Variation der Präferenzen in den Szenarien ändert sich das Ergebnis der am ehesten implementierbaren Handlungsempfehlung nur geringfügig und schwankt zwischen den in Abb. 2 gezeigten Alternativen. Für alle weiteren Handlungsempfehlungen aus dem Wegweiser (vgl. Tab. 1), die für die Analyse eingeschätzt wurden, ist die Implementierung noch vergleichsweise weiter entfernt, und zusätzliche Anstrengungen in der Erforschung sowie insbesondere in der Einbeziehung von Stakeholder:innen sind erforderlich. Dies trifft besonders auf die Handlungsempfehlung „CCS-Richtlinien“ zu, bei der ein Fokus auf die Kollaboration der Beteiligten und der Gesellschaft als essentiell gilt. Ist dies gegeben, rückt auch die Implementierbarkeit dieser Alternative näher.

Allgemein betrachtet stellt diese Untersuchung eine explorative Analyse dar, die die unterschiedlichen Kriterien für die Implementierung der Handlungsalternativen abschätzt und basierend auf den Präferenzen dieser Kriterien Hinweise darauf gibt, welche Maßnahme eine relativ höhere Implementierbarkeit aufweist. Es wird keine Aussage über die Nicht-Implementierbarkeit von Handlungsempfehlungen getroffen, sondern vielmehr ein praxisbasiertes Assessment der „naheliegendsten“ Umsetzbarkeit gegeben (siehe Kapitel 3b).

Methodenschritt 3:

Zusätzlich zu den erfolgten Interviews im Methodenschritt 1 und der MCDA in Methodenschritt 2 wurde basierend auf veröffentlichten Stellungnahmen ein Reality-Check für ausgewählte relevante Ziele, Maßnahmen und Entwicklungspfade zur Energiewende durchgeführt. Diese wurden aus den Handlungsempfehlungen aus dem Netto-Null-2050 Wegweiser und dem zugrunde liegenden Netto-Null-2050 Szenario (Simon et al., 2022) abgeleitet und betreffen die Themen Energieeffizienzziele, Ausbau von erneuerbaren Stromerzeugern und Wärmepumpen, Hochlauf der Elektromobilität, Dekarbonisierung der Industrie und Ausbau des Strom-Übertragungsnetzes. Hierbei wurden Expertisen aus aktuellen Studien, Kommentare von Interessenverbänden sowie Stellungnahmen in den Medien ausgewertet und ausgearbeitet. Das Assessment in diesem dritten Methodenschritt ist den entsprechenden Handlungsempfehlungen direkt zugeordnet (siehe Kapitel 3c).

Im Ergebnis lässt sich einschätzen, ob die Zielerreichungen und Pfadentwicklungen aus dem Netto-Null-2050 Szenario und anderen zielorientierten Szenariostudien in den unterschiedlichen Bereichen erreichbar erscheinen und welche weiteren Maßnahmen für eine Beschleunigung der Transformationsprozesse gegenüber den heute wirksamen Randbedingungen aus unterschiedlichen Perspektiven vorgeschlagen werden.

3. Reality-Check

3.a Ausgangspunkt: Netto-Null-2050 Wegweiser

Im Folgenden geben wir einen Kurzüberblick über den Ausgangspunkt dieses Berichts: in der ersten Projektphase von Netto-Null-2050 wurde der Netto-Null-2050 Wegweiser - Strategische Handlungsempfehlungen und mögliche Wege für ein CO₂-neutrales Deutschland bis 2050 (Jacob et al., 2023) erstellt. Zu den Haupteckdaten dieser Studie gehört, dass wir uns bereits jetzt mit der Erforschung und Entwicklung von Technologien für negative Emissionen beschäftigen und entsprechende Aktivitäten vorantreiben müssen. Wir wissen, dass die rein biologischen Optionen nicht ausreichen werden. Eine Kombination aus verschiedenen CO₂-Entnahme-Verfahren erscheint sinnvoll, um die CO₂-Netto-Null-Linie zu erreichen. Um den Diskurs zu beschleunigen, haben die Netto-Null-Partner:innen für ihre jeweiligen Forschungsthemen Handlungsempfehlungen herausgearbeitet. Sie umfassen neben den im Kapitel 3.c betrachteten Empfehlungen zum Energiesystem die Themen zur chemischen und biologischen CO₂-Entnahme, Verwertung und Speicherung, aber beziehen sich auch auf Tools und Methoden zur Unterstützung von Entscheidungen auf dem Weg dorthin.

Die Systematisierung der Handlungsempfehlungen zeigt, dass zwei Themenkomplexe für den Umgang mit den Restemissionen entscheidend sind. Zum einen benötigen wir Wissen über die Technologien und Verfahren, um CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen und zu speichern (unter Technologie verstehen wir sowohl biologische als auch chemische und biologisch/chemische Optionen). Diese Themen werden dem technologischen Hebel zugeordnet. Zum anderen ist es entscheidend, Navigationshilfen in Bezug auf den Einsatz und die Bewertung der Technologien sowie den Transfer zu entwickeln und bereitzustellen. Diese Navigationshilfen bauen auf den Technologien auf und bilden den

entscheidungsunterstützenden Hebel. Im Reality-Check überprüfen wir ausschließlich Handlungsempfehlungen und Steckbriefe, die dem technologischen Hebel zugeordnet sind. Steckbriefe sind eine standardisierte Form, in der die Handlungsempfehlungen für jedes Forschungsthema festgehalten sind und im Detail anhand von verschiedenen Kriterien präsentiert werden. Die Reality-Checks sind unter den jeweiligen Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

3.b Handlungsempfehlungen mit Praxiseinschätzung

Im diesem Teil finden sich die Handlungsempfehlungen aus dem technologischen Hebel, die mit Praxisexpert:innen besprochen wurden (vgl. auch Tab. 1). Die folgenden Steckbriefe, die jeweils ein bis zwei Handlungsempfehlungen beinhalten, lassen sich in fünf thematische Bereiche einteilen:

1. Quantifizierung der Treibhausgas-Dynamik wiedervernässter Moore
2. Konzentrierte Sonnenstrahlung zur Herstellung von solaren Brennstoffen
3. Sichere und dauerhafte Speicherung von CO₂-im Untergrund
4. Wärme- und Kältebereitstellung und -speicherung
5. Gasspeicherung (H₂, CH₄, CO₂) im Untergrund oder in technischen Speichern

Zu jedem der fünf Themen wurden die Handlungsempfehlungen mit ein oder zwei Praxisexpert:innen besprochen. Die Synthese daraus findet sich in den gelben ‚Reality-Check Boxen‘ unterhalb der jeweiligen Handlungsempfehlung. Hierzu gehört eine allgemeine Einschätzung der Expertin oder des Experten sowie Einschätzungen zu den jeweiligen Kriterien, die die Handlungsempfehlungen spezifizieren.

3.b.1 Quantifizierung der Treibhausgas-Dynamik wiedervernässter Moore (Steckbrief E)

Trocken gelegte Moorflächen in der EU emittieren ca. 220 Mt CO₂äq pro Jahr (Schätzung des Greifswald Mire Centre, 2020), was etwa 5% der gesamten EU-Emissionen entspricht. Der Großteil entfällt hierbei auf die Landwirtschaft, die auf nur 2,5% der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche 25% der Emissionen des Landwirtschaftssektors verursacht (in moorreichen Ländern entsprechend mehr: 62% in Finnland, 42% in Polen, 37% in Deutschland). Wird die aktuelle Nutzung drainierter Moorflächen unverändert beibehalten, verbraucht diese allein 12-41% des zur Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5-2,0 °C noch verbleibenden Treibhausgasemissionsbudgets. Wiedervernässung verhindert nach aktuellen Schätzungen je nach Nutzung ca. 20-30 t CO₂äq pro Hektar und Jahr (Tanneberger et al., 2022), aber die all diesen Schätzungen zugrundeliegenden Emissionsfaktoren basieren zu einem erheblichen Teil auf räumlich nicht repräsentativen und die zeitliche Dynamik der Emissionen nicht abbildenden Daten und bedürfen daher einer dringenden Aktualisierung und Verfeinerung.

ID	Handlungsempfehlung	Ergebnis	Instrumente	Beteiligte	Zeit	Monitoring	Aufwand	Nebeneffekte	Kollaboration
E1	Aktualisierung und Verbesserung der Emissionsfaktoren wiedervernässter Moore	Räumlich repräsentative und die zeitliche Dynamik besser abbildende Bestimmung der Emissionen bzw. Einsparpotenziale	Forschungsprojekt	Wissenschaft (Helmholtz), Wissenschaft (außerhalb Helmholtz)	Bis Ende 2025, danach kontinuierliche schrittweise Aktualisierungen	Treibhausgas-Monitoring mit existierenden Netzwerken; fernerkundliches Monitoring des Moorzustandes	Abhängig von Anzahl der Monitoring-Stationen	<i>Information nicht vorhanden</i>	<i>Information nicht vorhanden</i>

Reality-Check	Allgemeine Einschätzung: Deutschland hat ein hohes Niveau in der Treibhausgas-Berichterstattung. Emissionsfaktoren sollten nicht national betrachtet bzw. bestimmt werden, sondern nach biogeografischen Regionen. Demnach sollten alle Länder mit z. B. temperaten Mooren an der Entwicklung und Verbesserung von Emissionsfaktoren für temperate Moore beteiligt sein. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Erfassung der gesamten Flächen wiedervernässter Moore in Deutschland. Bereits stattfindende Wiedervernässungen müssen im Treibhausgasinventar erfasst werden.									
	Instrumente: Forschungsprojekte hierzu sollten eng mit laufenden Forschungsaktivitäten - auch auf internationaler Ebene - verknüpft sein.									
	Beteiligte: Im Speziellen sollte in der Wissenschaft zusammengearbeitet werden - wichtige Beteiligte sind hier z. B. das Thünen-Institut und das Peatland Science Centre. Das Ziel sollte sein, dass alle beteiligten Forschungseinrichtungen gemeinsame Ergebnisse und Aussagen veröffentlichen.									
	Monitoring: Zusätzlich sollte das Thünen-Institut bei der Datenerhebung für das Nationale Treibhausgasinventar unterstützt werden.									
	Nebeneffekte: Diese Maßnahme würde einen Beitrag zum internationalen Klimaschutz leisten.									
E2	Wiedervernässung von Mooren: Klärung von Flächen und Wasser sowie Einwilligungen der Eigentümer:innen/Nutzer:innen/ Behörden einholen	a) Vermeidung von CO ₂ -Emissionen; b) CO ₂ -Aufnahme aus der Atmosphäre, wenn natürliches Torfwachstum wiederhergestellt werden kann oder Paludikultur in Verbindung mit BECCS oder paludikultur-basierte, regionale Stoffkreisläufe etabliert werden	Kommunikations- und Öffentlichkeitsarbeit, Koordinierungs- und Unterstützungsmaßnahmen	Private Investoren, Industrie, Politik, Andere Entscheidungsträger:innen, Zivilgesellschaft, Wissenschaft (Helmholtz)	Kontinuierlich* *Letztendlich müssen alle Moore wiedervernässt werden bis spätestens Ende 2050 – besser bereits früher, um die Paris-Ziele zu erreichen.	Treibhausgas-Monitoring mit existierenden Netzwerken; fernerkundliches Monitoring des Moorzustandes	Anfangs gering, zunehmend mit zunehmender Fläche; Einwilligungen einholen könnte aufwändig sein; evtl. zunehmende Flächenkonkurrenz	Verbesserte Wasserqualität und -rückhaltung, Erholungswert, Biodiversität, verbessertes Mikro-/Regionalklima (Kühlung durch Verdunstung)	Interessengruppen und Entscheidungsträger:innen; Evaluierung sozio-ökonomischer Abwägungen und positive Nebeneffekte	

Reality-
Check

Allgemeine Einschätzung: Die Handlungsempfehlung enthält die wichtigsten Aspekte zur Moorwiedervernässung: die Klärung von Flächen und Wasser und die Einwilligungen der Eigentümer:innen/Nutzer:innen/Behörden. Durch den hohen Flächenbedarf birgt die Durchführung der Maßnahme verschiedene Herausforderungen.

Es muss rechtlich geklärt werden, wie der Eingriff in die Fläche für die Eigentümer:innen kompensiert/entschädigt wird. Hierzu sind gesetzliche Änderungen hinsichtlich der Freiwilligkeit nötig: in den Bundesgesetzen müssen Moorschutz und Wasserrückhalt gestärkt werden. Es müssen ausreichende Mittel bereitgestellt werden, damit die Freiwilligkeit umgesetzt werden kann. Außerdem braucht es eine Gesetzesänderung auf EU-Ebene, so dass Direktförderungen auch für Nasswiesen und Paludikulturen gesichert sind. Darüber hinaus wäre eine Vereinfachung der Landeswassergesetze sinnvoll, sodass für kleine Staubauwerke kein Wasserrecht beantragt werden muss. Hierdurch könnten dort Wasserstände sofort auf ein bestimmtes Niveau angehoben werden. Als Maßnahme gegen die Tiefenentwässerung wäre dies ein Beitrag zum Ziel der Gesamtwiedervernässung.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass deutschlandweit schon viel Forschung und Aktivitäten zur Moorwiedervernässung durchgeführt werden - es wäre sinnvoll, wenn die beteiligten Akteur:innen zusammenarbeiten und auf die vorliegenden Daten und das vorhandene Wissen aufbauen.

Instrumente: Kommunikations- und Öffentlichkeitsarbeit ist hier essentiell. Zu Koordinierungs- und Unterstützungsmaßnahmen für Moorschutz in größerem Maßstab gehört im Speziellen, dass (bestehende) Projektträger unterstützt werden, die die entsprechenden Projekte durchführen (z. B. der Wasser- und Bodenverband).

Die Schaffung von Vorranggebieten für Wasserrückhalt und Moorschutz könnte ein zusätzliches, hilfreiches Instrument sein.

Außerdem muss es eine bundeseinheitliche Förderung für Landwirt:innen geben, die Moorflächen bewirtschaften und durch Wiedervernässungsmaßnahmen von finanziellen Einbußen betroffen sind. Über Wirtschaftsförderungsmaßnahmen könnten Anreize für die Industrie geschaffen werden, beispielsweise einen Schwerpunkt auf die Herstellung von Produkten aus nasser Biomasse zu legen.

Ein weiteres wichtiges Instrument sind Ausbildung und Kapazitätsaufbau, z. B. die Ausbildung von Wasserbauingenieuren.

Im Bereich der Forschung und Wissenschaft sollten in engen Dialogprozessen mit gesellschaftlichen Akteur:innen Wissensbedarfe identifiziert werden. Die Erkenntnisse der darauf aufbauenden Forschung sollten entsprechend an die Akteur:innen vermittelt werden.

Beteiligte: Alle genannten Beteiligten sind erforderlich für die Umsetzung der Maßnahme. Außerdem sind Flächeneigentümer:innen und Landwirt:innen - als Teil der Zivilgesellschaft - maßgeblich für die Umsetzung. Als Entscheidungsträger sind Behörden und die Wasser- und Bodenverbände hervorzuheben.

Ein weiterer wesentlicher Baustein für die Durchführung dieser Maßnahme sind „Kümmerer-Strukturen“, wie z. B. Moor-Agenturen oder kommunale Klimaschutzmanager, die die Moorwiedervernässung voranbringen.

Zeit: Die genannten gesetzlichen Anpassungen und weitere Instrumente sollten so schnell wie möglich umgesetzt werden.

Räumliche Einordnung und rechtlich-politische Einordnung

- Deutschland insgesamt // ländlicher Raum
- Paris Abkommen (1,5 °C Ziel nicht erreichbar mit weiterer konventioneller Nutzung drainierter Moorböden)

Netto-Null-2050 Referenzen

Netto-Null-2050 Web-Atlas

Emissionsminderungs- und CO₂-Aufnahmepotenzial durch Moorwiedervernässung von Aram Kalhori et. al., 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/71>



Wissenschaftliche Publikationen:

Kalhori et al. (in Vorbereitung). Emission reduction potential of CO₂ and CH₄ in German rewetted peatlands, towards 'higher tier' national Emission Factors.

Li et al. (in Vorbereitung). Temporal Dynamics of CO₂ and CH₄ fluxes at a Spatially Heterogeneous Rewetted Fen over 8 years using Nonparametric Decomposition of Fluxes.

Mengis, N., Kalhori, A., Simon, S., Harpprecht, C., Baetcke, L., Prats-Salvado, E., Schmidt-Hattenberger, C., Stevenson, A., Dold, C., El Zohbi, J., Borchers, M., Thrän, D., Korte, K., Gawel, E., Dolch, T., Heß, D., Yeates, C., Thoni, T., Markus, T., ... Dittmeyer, R. (2022). Net-zero CO₂ Germany – A retrospect from the year 2050. *EarthsFuture*, 10, e2021EF002324.

<https://doi.org/10.1029/2021EF002324>

Koebisch, F., Gottschalk, P., Beyer, F., Wille, C., Jurasinski, G., & Sachs, T. (2020). The impact of occasional drought periods on vegetation spread and greenhouse gas exchange in rewetted fens. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1810), 20190685.

3.b.2 Konzentrierte Sonnenstrahlung zur Herstellung von solaren Brennstoffen (Steckbrief I)

Für die Herstellung klimaneutraler Brennstoffe spielt die Solarthermie eine große Rolle. Um Kraftstoffe aus CO₂ und H₂O herzustellen, besteht der aktuelle Prozess darin, ein Sauerstoffatom aus diesen Molekülen zu entfernen, um Kohlenmonoxid (CO) oder/und Wasserstoff (H₂) zu erhalten. Eine Methode hierfür ist die Anwendung eines solarthermochemischen Kreisprozesses mit der Verwendung eines Metalloxids und konzentrierter solarer Energie. Metalloxide sind feste Substanzen, die aus Metall und Sauerstoff bestehen. Einige von ihnen sind in der Lage, Sauerstoff bei Temperaturen zwischen 1.200 °C und 1.500 °C freizusetzen. Um diese Temperaturen zu erreichen, wird die Sonnenenergie durch fokussierendes Spiegeln (Heliostaten) konzentriert. Wenn die Metalloxide dann auf 700-900 °C abgekühlt werden, versuchen sie, den verlorenen Sauerstoff zurückzugewinnen. In Gegenwart von Wasser nimmt das Metalloxid einige Sauerstoffatome auf und Wasserstoff wird erzeugt. Bei Gegenwart von Kohlendioxid entsteht auf ähnliche Weise Kohlenmonoxid. Wenn das Metalloxid alle Sauerstoffatome zurückgewonnen hat, kann der Zyklus erneut beginnen. Diese Art solare Brennstoffe zu erzeugen, wird „thermochemischer Zyklus“ genannt. Kohlenmonoxid und Wasserstoff sind Gase und können bereits als Brennstoffe verwendet werden. Darüber hinaus wird ein Gemisch aus beiden als Synthesegas bezeichnet und kann zur Herstellung von flüssigen Brennstoffen wie Methanol oder Kohlenwasserstoffen verwendet werden.

ID	Handlungsempfehlung	Ergebnis	Instrumente	Beteiligte	Zeit	Monitoring	Aufwand	Nebeneffekte	Kollaboration
I1c	Demo-Anlage mit 10 Megawatt	Kommerzielle und ausgereifte Technologie	Demonstrationsprojekt	Wissenschaft (Helmholtz), Wissenschaft (außerhalb Helmholtz), Industrie	Bis Ende 2030	Erfüllung von Meilensteinen und Klärung von Forschungsfragen	Geringer bis mittlerer Aufwand (vorhandene Technologie, Finanzierung über nationale Förderung, sozial akzeptiert, etc.)	Umnutzung der vorhandenen Infrastruktur (z. B. Tanker, Pipelines)	Energiesektor (Kleinkraftwerke), Industrieanlagen (nachhaltige Chemie, Power-to-X, Zement, Stahl)

Reality-
Check

Allgemeine Einschätzung:

Die Produktion von Solar-Kraftstoffen ist sehr wichtig, da sie nicht auf Biomasse angewiesen ist und Probleme wie bei Biokraftstoffen wegfallen. Allerdings ist dies momentan auch ein Nachteil, da Prozesse auf Biomassebasis derzeit wirtschaftlicher und ausgereifter sind. Aus diesem Grund werden derzeit Prozesse auf Basis von Biogas untersucht, aber es wird auch in Erwägung gezogen, in Zukunft atmosphärisches CO₂ als Ausgangsstoff zu verwenden.

Die größte Herausforderung für die Technologie besteht darin, trotz der hohen Temperaturen über längere Zeiträume eine hohe Effizienz zu erreichen. Dies könnte durch Verbesserungen der Wärmerückgewinnung, der thermischen Energiespeicherung und durch das Sammeln von Daten über den Langzeitbetrieb erreicht werden.

Die Technologie ist von großer Bedeutung, da die Produktion von Kohlenmonoxid über alternative Wege zum reversen Wasser-Gas-Shift eine Schlüsselpriorität darstellt. Im Vergleich zu anderen Technologien mag die 10-MW-Skala hoch erscheinen, jedoch kann der benötigte Maßstab zur Nachweisführung der Lebensfähigkeit eines Prozesses je nach Technologie erheblich variieren.

Aufwand: Die Entwicklung des Demonstrationsprojekts ist günstiger, wenn es in Deutschland oder an Standorten mit ausreichender ingenieurtechnischer, wissenschaftlicher und finanzieller Unterstützung stattfindet. Im Demonstrationsmaßstab ist es nicht erforderlich, günstige Moleküle zu produzieren.

Angesichts des sehr wettbewerbsintensiven Feldes mit anderen Technologien in Bezug auf die Kosten wird das Erfolgspotenzial als eher gering bewertet, obwohl der potenzielle Einfluss auf eine Netto-Null-Zukunft als sehr hoch eingeordnet wird.

Der Zeitrahmen bis 2030 ist jedoch knapp, aufgrund des dringenden Bedarfs an synthetischen Kraftstoffen. Bis die Solar-Kraftstofftechnologie vollständig entwickelt ist, könnte eine andere suboptimale Technologie bereits den Markt dominieren.

Generell wird der Entwicklungsaufwand der Technologie als hoch eingeschätzt. Während ein Demonstrationsprojekt helfen kann, ist die Technologie für eine 10-MW-Anlage im Jahr 2030 noch nicht ausgereift. Auch beachtet werden muss, dass Fehler in größeren Maßstäben teurer sein können als in kleineren Testanlagen.

Kollaboration: Die Kooperation mehrerer Akteure (z. B. Forschung, Industrie oder Gesellschaft) ist sehr wichtig, um das Potenzial der Technologie zu realisieren, das als sehr anspruchsvolles Unterfangen angesehen wird. Derzeit liegt das Potenzial der Technologie, Treibhausgasemissionen zu verringern, noch im mittleren Bereich, aber dies könnte in naher Zukunft steigen. Die Technologie steht jedoch in Konkurrenz zu anderen alternativen Wegen zur Kraftstoffproduktion, die ebenfalls erfolgreich sein könnten, sodass ein gewisses Maß an Unsicherheit besteht.

Die Zusammenarbeit verschiedener gesellschaftlicher Akteure wird für diese Technologie als sehr wichtig angesehen, insbesondere aus regulatorischer Perspektive.

Monitoring: Das Potenzial, die Leistung der Technologie zu messen, ist einfach, da es leicht ist, verschiedene Wege zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen zu vergleichen.

Räumliche Einordnung

MENA-Region¹, Südeuropa

Netto-Null-2050 Referenzen

Netto-Null-2050 Web-Atlas

Solare Kraftstoffe von Enric Prats-Salvado et. al., 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/75>



Netto-Null-2050 Projektberichte

Solar Thermochemical Cycles Project Briefing. Abrufbar unter https://www.netto-null.org/Projektergebnisse/Project_Briefings/index.php.de

Wissenschaftliche Publikationen

Prats-Salvado, E., Monnerie, N. & Sattler, C. (2021). Synergies between Direct Air Capture Technologies and Solar Thermochemical Cycles in the Production of Methanol. *Energies*, 14(16), 4818. <https://doi.org/10.3390/en14164818>

Prats-Salvado, E., Monnerie, N. & Sattler, C. (2022). Techno-Economic Assessment of the Integration of Direct Air Capture and the Production of Solar Fuels. *Energies*, 15(14), 5017. <https://doi.org/10.3390/en15145017>

¹ MENA steht für „Middle East & North Africa“ (Nahost und Nordafrika). Der Begriff bezeichnet die Region von Marokko bis zum Iran und ist weitgehend deckungsgleich mit der arabischsprachigen Welt.

3.b.3 Sichere und dauerhafte Speicherung von CO₂ im Untergrund (Steckbrief K)

Aus den untersuchten Szenarien des Weltklimarates IPCC ist ersichtlich, dass auch die CO₂-Abscheidung und dauerhafte Speicherung im Untergrund ihren Anteil dazu beitragen kann, den CO₂-Ausstoß in die Atmosphäre zu verringern. Besonders für Industrieprozesse, die nur schwer zu ‚dekarbonisieren‘ sind, sollte diese Technologie vorbehalten bleiben. Das Einlagern von CO₂ in tiefen Speichern (>800 m) ist sicher, wenn der Speicher entsprechend der bestehenden Sicherheitsauflagen ausgewählt wird. Dazu gehört z. B. eine geeignete poröse Speicherschicht, die das eingebrachte CO₂ in ihren Gesteinsporen gut aufnehmen kann, sowie eine Multibarrierenschicht aus abdeckenden, undurchlässigen Gesteinen oberhalb der Speicherschicht. Der Pilotversuch zur CO₂-Speicherung am Standort Ketzin (Brandenburg) unter Koordination des GFZ Potsdam hat erfolgreich gezeigt, dass die CO₂-Speicherung im Untergrund auch an Land (onshore) sicher und zuverlässig durchgeführt werden konnte und auch während des Pilotversuchs nachweislich kein CO₂ entwichen ist. Das wurde durch Langzeitanalysen von Messdaten unterschiedlicher Messsysteme bestätigt.

Durch die vorwiegend ablehnende Haltung zu CO₂-Abscheidung und dauerhafter Speicherung in den öffentlichen Debatten und die dabei wiederholte Feststellung, dass die Technologie nicht sicher anwendbar sei, konnte die skeptische Grundhaltung bisher nicht abgebaut werden, trotz erfolgreicher internationaler Projekte zu diesem Thema. Die gesellschaftspolitische Debatte zu diesem Thema muss wieder eröffnet werden und es bedarf auch dringend einer Überarbeitung des Kohlenstoffdioxidspeichergesetzes KSpG, welches in der derzeitigen Fassung keine dauerhafte Speicherung auf deutschem Territorium für CO₂-Mengen größer 100.000 t (Grenze für Forschungsprojekte) erlaubt.

ID	Handlungsempfehlung	Ergebnis	Instrumente	Beteiligte	Zeit	Monitoring	Aufwand	Nebeneffekte	Kollaboration
K1	Schaffung klarer politischer und rechtlicher Rahmenbedingungen (Deutschland oder EU)	Politische Entscheidungen über Speicherorte und Mengen, nationale und internationale Rechtsregelungen (im Falle von Transport von CO ₂ ins Ausland)	Expert:innen-gruppen	Politik, Industrie, Wissenschaft (Helmholtz)	Bis Ende 2030 – spätesten Zeitpunkt für Anwendbarkeit	Evaluierungsbericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag alle 4 Jahre gemäß §44 KSpG.	Erfüllungsaufwand für ein Regelungs-vorhaben; Umsetzungsaufwand für Speicherbetreiber	Öffentliche Diskussion	Industrie; Zusammenarbeit von Politik mit Behörden, Unternehmen und Wissenschaft

Reality-
Check

Allgemeine Einschätzung: Für die Speicherung von CO₂ im Untergrund in Deutschland ist die Schaffung klarer politischer und rechtlicher Rahmenbedingungen (Carbon Management Strategie und Kohlenstoffdioxidspeichergesetz) der erste nötige Schritt. Da für alle Planungsschritte inkl. Genehmigungsverfahren bis zur Einspeicherung mehrere Jahre benötigt werden (ca. 5-6 Jahre), könnte zunächst CO₂ in Skandinavien eingespeichert werden - bevor in Deutschland begonnen werden kann. Hierfür müsste die internationale Verschiffung von CO₂ rechtlich erlaubt werden.

Als zweiter Schritt sollte eine CO₂-Infrastruktur für den Transport des CO₂s geschaffen werden (CO₂-Züge oder -Pipeline).

In Deutschland müssen Speicherstätten geschaffen bzw. geöffnet werden. Dies müsste auch EU-weit geklärt werden, damit das CO₂ heimisch gespeichert und nicht in andere Länder verschifft wird.

Hinsichtlich der Industrie und der wirtschaftlichen Komponente muss die Finanzierung der CO₂-Speicheranlagen geklärt sein (Investitionsbedarf und Betriebskosten).

Instrumente: Expert:innengruppen sind an dieser Stelle nicht mehr nötig, da die Expert:innenmeinungen an dieser Stelle bereits klar und einheitlich ist. Wichtig wäre die Kommunikation mit der Politik/Bundestag, damit die rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen geschaffen werden können.

Beteiligte: Für den ersten Schritt muss die Politik entsprechende Entscheidungen treffen, damit mit der CO₂-Speicherung in Deutschland begonnen werden kann.

Zeit: Ab 2030 sollte CO₂-Einlagerung in Deutschland möglich sein. Bis dahin müssten alle entsprechenden Rahmenbedingungen gegeben sein. Es sollte direkt damit begonnen werden, die entsprechenden Rahmenbedingungen zu schaffen.

Räumliche Einordnung und rechtlich-politische Einordnung

- Deutschland insgesamt
- Kohlenstoffdioxidspeichergesetz KSpG

Netto-Null-2050 Referenzen

Netto-Null-2050 Web-Atlas

CO₂-Speicherpotenzial in porösen Aquiferen von Chris Yeates, 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/1>



Salzkavernenspeicherungspotentiale von Chris Yeates, 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/86>



Wissenschaftliche Publikationen

Fogel, S. et al. (eingereicht). SNG based energy storage systems with subsurface CO₂ storage

Populärwissenschaftliche Veröffentlichungen

Interview: Klimakrise: So könnten wir CO₂ aus der Atmosphäre entfernen, <https://www.quarks.de/umwelt/klimawandel/co2-speicher-als-ein-baustein-fuer-die-klimaziele/>

3.b.4 Wärme- und Kältebereitstellung und -speicherung (Steckbrief M)

Der Einsatz von geothermischer Wärme zur nachhaltigen und CO₂-neutralen Fernwärmeversorgung im urbanen Raum ermöglicht, große Teile des volkswirtschaftlichen Wärmebedarfs auf heimische erneuerbare Energien umzustellen. Fernwärmenetze stellen dabei im aktuellen und zukünftigen Energiesystem eine wichtige Rolle bei der Integration von Erneuerbaren Energien dar. Große Aquiferspeicher (ATES = Aquifer Thermal Energy Storage), die als saisonale Wärmespeicher fungieren (von sommerlicher und industrieller Überschusswärme zur Nutzung im Winter), können zusätzlich in ein bestehendes Fernwärmenetz integriert werden, was zu enormen CO₂-Einsparungseffekten führen kann.

Die vorliegende Studie:

- schätzt das geothermische Potenzial in verbrauchsintensiven, urbanen Räumen Norddeutschlands ab. Mittels Sensitivitätsanalysen und numerischer Modellierung werden fünf geothermische Sandsteinhorizonte im Norddeutschen Becken betrachtet, welche substantielle, geothermische Potenziale im PJ-Bereich bereithalten.
- schätzt das volumetrische Speicherpotenzial in verbrauchsintensiven, urbanen Räumen Norddeutschlands ab. Mittels Sensitivitätsanalysen und numerischer Modellierung werden fünf geothermische Sandsteinhorizonte im Norddeutschen Becken betrachtet, welche allein für die Nachfrage-starken, dicht besiedelten urbanen Räume substantielle Speicherpotenziale im PJ-Bereich bereithalten.
- erstellt Simulationsmodelle eines Aquiferspeichers und des Fernwärmenetzes und ergänzt dies um datengetriebene Modelle der Wärmeerzeuger und -verbraucher. Die initiale Kopplung der Modelle in einer Gesamtsimulation wurde erfolgreich aufgebaut. Die Simulation erlaubt nun die Erforschung des optimierten Betriebs eines Fernwärmenetzes, an das ein saisonaler Wärmespeicher gekoppelt ist. Mit Hinblick auf die Erstellung eines digitalen Zwillings der Gesamtwärmeversorgung soll nun in weiteren Schritten der Detailgrad der Modelle „Aquiferspeicher“, „Fernwärmenetz“, „Wärmeverbraucher“ und „Wärmeerzeuger“ erhöht werden, um exaktere Ergebnisse zu erhalten. Mithilfe von Simulationsszenarien soll untersucht werden, wie groß das CO₂-Einsparpotenzial mit und ohne Aquiferspeicher ist. Hinsichtlich der thermischen Gebäudemodellierung sollen unterschiedliche Modellierungsansätze (historische Lastprofile, mathematische Modelle des thermischen Verhaltens von Gebäuden, usw.) verglichen werden.

Netto-Null-2050 Reality-Check strategischer Handlungsempfehlungen

ID	Handlungsempfehlung	Ergebnis	Instrumente	Beteiligte	Zeit	Monitoring	Aufwand	Nebeneffekte	Kollaboration
M1a	Entwicklung und Umsetzung von geothermischen Wärmespeicherprojekten unter Einbindung dieser in Versorgungsnetze der Industrie	Bestimmung geothermisches Förderpotenzial Norddeutsches Becken (abgeschlossen)	Forschungsprojekt	Wissenschaft (Helmholtz), Industrie	Ende 2026	Jährliche Berichterstattung der Kommunen	Finanzierung, Planung	Integration mit Gebäude-sanierung, Entwicklung des Wärmepumpenmarktes	Kommunale Wärmeversorger, Bauindustrie
M1b	Entwicklung und Umsetzung von geothermischen Wärmespeicherprojekten unter Einbindung dieser in Versorgungsnetze der Industrie	Bestimmung Hochtemperatur Speicherpotenzial Oberrheingraben (abgeschlossen), Bestimmung Speicherpotenzial im Molassebecken (laufend)	Forschungsprojekt	Wissenschaft (Helmholtz), Industrie	Ende 2030	Jährliche Berichterstattung der Kommunen	Ausbildung, Genehmigungsprozess, Finanzierung, Planung	Power-to-X, Power-to-heat, Sektorenkopplung in großem Umfang	(1) Weiterführung der Arbeit mit dem Projekt: Urban systems des Cluster II der Helmholtz-Klima-Initiative, (2) In Süddeutschland: EnBW, Stadtwerke München (in BMBF Verbundprojekt VESTA)

Reality-
Check

Allgemeine Einschätzung: Geothermische Speicher in flachen Horizonten sind sehr relevant für die Wärmetransformation. Die Forschung an Wärmespeichern ist essentiell. Wärmespeicher können voraussichtlich in geologisch geringeren Tiefen entwickelt werden als Tiefe Geothermie für die Wärmegewinnung. Daher sprechen wir von der Nutzung flacher Horizonte. Die Vorteile von geothermischen Speichern in flacheren Horizonten gegenüber klassischer Tiefengeothermie sind: 1) Wärmespeicher in flachen Horizonten können eine breitflächige Anwendung finden, 2) sie sind mit weniger Risiko behaftet, 3) das Investitionsvolumen ist geringer.

Für den Marktanlauf von Wärmespeichern in flachen Horizonten sind nötig: 1) die Entwicklung von entsprechenden Technologien (Pumpen-Technik), 2) die Bereitstellung und Förderung der Materialien und Techniken und 3) die Schaffung des genehmigungsrechtlichen Rahmens (Abbau genehmigungsrechtlicher Hürden).

Deutschland wird wahrscheinlich sein tiefes geothermisches Potenzial nutzen müssen, um die Heizziele in städtischen Gebieten zu erreichen. Ein landesweites 3D-Modell des tiefen geothermischen Potenzials Deutschlands, das auf vorhandenen seismischen Daten basiert, wäre von Vorteil. Dieses umfassende Modell würde den Beteiligten eine effiziente Erkundung und Nutzung ermöglichen.

Beteiligte: Zu den Akteur:innen, die an dem Prozess beteiligt sein sollten, gehören zusätzlich zur Wissenschaft und Industrie auch die Politik und Beteiligte der kommunalen Wärmeplanung: Kommunen, Ingenieurbüros, Genehmigungsbehörden. Zusätzlich ist die Kommunikation mit der Bevölkerung wichtig.

Die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Interessengruppen ist von entscheidender Bedeutung, auch mit denjenigen, die letztlich von der erzeugten Wärme profitieren würden. Dies umfasst nicht nur Wärmeversorger, sondern auch potenzielle Stromerzeuger, wenn die Temperaturen hoch genug sind. Die Industrie spielt eine entscheidende Rolle bei der Bereitstellung der erforderlichen Technologie und des Fachwissens sowohl für die Forschung als auch für die praktische Umsetzung. Der Austausch und die Verbreitung von Wissen sind von entscheidender Bedeutung. Bestehende Branchenverbände wie die AGWB (Arbeitsgemeinschaft der Fernwärmebetreiber) können als effektive Multiplikatoren dienen, um relevante Interessengruppen zu erreichen. Die direkte Zusammenarbeit mit lokalen Wärmeversorgern ist unerlässlich, insbesondere in Gebieten mit begrenzter Erfahrung im Bereich der Geothermie. Auch wenn Kommunen eine Rolle spielen, ist es nicht sinnvoll, sich bei der Überwachung der Fortschritte ausschließlich auf sie zu verlassen. Eigenmotivierte Personen in Kommunen und Versorgungsunternehmen sind für eine erfolgreiche Projektumsetzung von entscheidender Bedeutung.

Instrumente: Als Hauptinstrument sollten Demonstrationsprojekte realisiert werden. Daneben ist nötig, dass Dialoge mit der Politik stattfinden, der Aufbau einer digitalen Dateninfrastruktur ermöglicht und Leitfäden für Ingenieurbüros, die die kommunale Wärmeplanung vorbereiten, erarbeitet werden.

Zeithorizont: Die Handlungsempfehlungen sollten so schnell wie möglich umgesetzt werden.

Tiefengeothermie- und Aquifer-Speicherprojekte sind machbar und können einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Netto-Null-Emissionsziele leisten, insbesondere im Wärmesektor. Es bestehen jedoch Unsicherheiten hinsichtlich der Gesamterfolgsquote solcher Projekte. Obwohl erfolgreiche Projekte erwartet werden, ist die genaue Zahl der Projekte, die abgeschlossen werden, noch unklar.

Räumliche Einordnung und rechtlich-politische Einordnung

- Norddeutschland, Stadt, Süddeutschland
- BBergG

Netto-Null-2050 Referenzen

Netto-Null-2050 Web-Atlas

Wärmespeicherpotential in mesozoischen Sandsteinhorizonten Norddeutschlands von Sven Fuchs et. al., 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/37>



Klimaneutrales KIT – Umsetzung der Helmholtz-Forschung am eigenen Zentrum von Eva Schill et. al., 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/110>



Wärmespeicher in ehemaligen Erdöl-Reservoiren der Süddeutschen Molasse von Ulrich Steiner et. al., 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/102>



Wissenschaftliche Publikationen

Frick, M., Kranz, S., Norden, B., Bruhn, D., Fuchs, S. (2022). Geothermal Resources and ATES Potential of Mesozoic Reservoirs in the North German Basin. *Energies*, 15, 1980. <https://doi.org/10.3390/en15061980>

Stricker, K., Grimmer, J. C., Egert, R., Bremer, J., Korzani, M. G., Schill, E. & Kohl, T. (2020). The potential of depleted oil reservoirs for high-temperature storage systems. *Energies*, 13(24), 6510.

3.b.5 Gasspeicherung (H₂, CH₄, CO₂) im Untergrund oder in technischen Speichern (Steckbrief O)

Untergrundspeicher eignen sich sowohl für die Speicherung von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Wasserstoff (H₂) als auch für synthetisches Erdgas sowie die gemeinsame Speicherung verschiedener Gase, um die Nutzung von Speichervolumina zu optimieren.

Kohlendioxid CO₂

Für das Konzept eines emissionsfreien Speicherkraftwerks mit geschlossenem CO₂-Kreislauf sind große Mengen CO₂ im Untergrund temporär zu speichern. Zunächst müssen zu speichernden Gasmengen, deren volumetrischer Speicherbedarf sowie die erforderlichen technischen Infrastrukturen für vorgegebene Energiesystem- und Ausbauszenarien ermittelt werden. Durch Gastrapping und Mineralisierung kann ein Teil des zwischengespeicherten CO₂ permanent im Boden eingelagert werden. Dazu sind weiterführende wissenschaftliche Studien notwendig.

Wasserstoff H₂

Der Einsatz von grünem Wasserstoff als CO₂-freier Energieträger ermöglicht das Ersetzen von fossilen Energieträgern in vielen Bereichen und bietet somit die Chance, große Mengen CO₂ zu vermeiden. Hierbei wird grüner Wasserstoff sowohl als Rohstoff für Industrieprozesse (Stahlproduktion, chemische Prozesse, usw.) als auch als Energieträger für energieintensive Anwendungen (Schwerlastverkehr, Flugzeuge, Schiffe, usw.) benötigt. Wasserstoffspeicherung ist ein Schlüsselement der Wasserstoffwirtschaft, da insbesondere die kompakte Speicherung von Wasserstoff aufgrund seiner geringen Dichte sehr herausfordernd ist. Daher ist es mit Blick auf die zu erreichende Minimierung von Treibhausgasen notwendig großskalige Untergrundspeicher mit Energiemengen für mehrere Monate und kompakte technische Speicher (z. B. Druck-, Flüssig- oder Metallhydrid-Wasserstoffspeicher) zu entwickeln. Diese können den Einsatz von grünem Wasserstoff sowohl für die Sicherstellung der Energiesicherheit (Überbrücken von Dunkelflauten, strategische Reserven, usw.) als auch für die verschiedenen mobilen und stationären Anwendungen ermöglichen. Hierbei bewirkt insbesondere der Einsatz von Metallhydridspeichern eine kompakte und effiziente Speicherung für viele Anwendungen. Neben der Erforschung und Weiterentwicklung der Speichertechnologien ist auch das Etablieren klarer, rechtlicher Rahmenbedingung für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft essenziell.

Ko-Speicherung

Das gemeinsame Speichern von Gasen im Untergrund, etwa CO₂ und Methan (CH₄) oder CO₂ und H₂, optimiert die Nutzung vorhandener Speichervolumina. Allerdings sind hier weiterführende Analysen auf der systemischen Ebene, insbesondere zur Größe und Art verfügbarer, geologischer Speicherkapazitäten, aber auch wissenschaftliche Untersuchungen zum Verhalten der Gase bei Ko-Speicherung und zu erforderlichen Trennverfahren notwendig.

Netto-Null-2050 Reality-Check strategischer Handlungsempfehlungen

ID	Handlungsempfehlung	Ergebnis	Instrumente	Beteiligte	Zeit	Monitoring	Aufwand	Nebeneffekte	Kollaboration
O1a	Alle Gasarten Bestandsaufnahme und Transportnetzanalyse für alle Gase, insbesondere H ₂ und CO ₂ (CH ₄ ist bereits sehr gut entwickelt und erforscht)	Bestandsaufnahme mittelfristig verfügbarer Untergrundspeicherkapazitäten für H ₂ und CO ₂ in Deutschland	Expert:innen-gruppen	Industrie	Bis Ende 2023	Information nicht vorhanden	Information nicht vorhanden	Information nicht vorhanden	Information nicht vorhanden
Reality-Check	Allgemeine Einschätzung: Die Bestandsaufnahme mittelfristig verfügbarer Untergrundspeicherkapazitäten ist ein essentieller Schritt für die Umsetzung der Gasspeicherung im Untergrund oder in technischen Speichern. Die existierenden Infrastrukturen (im großen Maßstab; große Trassen, die große Mengen verteilen) sollten für unterschiedliche Gase genutzt werden (durch Gasumwandlung). Synthetische Fuels könnten als Speichermedium für erneuerbare Energie genutzt werden. Die zukünftigen CO₂-Importmöglichkeiten sollten mit der Entwicklung von inländischen CO₂-Quellen und damit auch der -Speicherung einhergehen und verknüpft werden. Temporäre CO₂-Speicherung ist notwendig und realisierbar, wohingegen langfristige CO₂-Speicherung in Deutschland (onshore) mit Herausforderungen, z. B. öffentlichem Widerstand, verbunden ist. Langfristspeicher in verschiedenen Molekülen für unterschiedliche Anwendungen ist eine weitere Speichermöglichkeit - ein chemischer Langfristspeicher. Hierbei können auch die existierenden Infrastrukturen für die Gasverteilung und -Nutzung verwendet werden. Beteiligte: In der Industrie sind im Speziellen die Chemie- und Energieindustrie wichtig. Hier sollte die Zusammenarbeit gefördert werden. Die Wissenschaft ist ein weiterer wichtiger Akteur, um verschiedene Gas-Nutzungen und -Speichermöglichkeiten weiter zu erforschen und damit die Entwicklung von Technologien für die Energiewende voranzutreiben. Außerdem ist gesellschaftliche Akzeptanz von entscheidender Bedeutung. Um dies zu erreichen, muss die Zivilgesellschaft/Bevölkerung informiert bzw. eingebunden werden.								

O3	Wasserstoff H₂ Analyse für H ₂ in Bezug auf Menge und Speicherung (ober- und unterirdisch)	Klärung Potenzial H ₂ -Speicherung unterirdisch in Salzkavernen und Porenspeichern sowie sichere, wirtschaftliche und kompakte überirdische Speicher, Klärung der rechtlichen Rahmenbedingungen	Forschungsprojekt, Demonstrationsprojekt, Industrialisierung	Wissenschaft (Helmholtz), Wissenschaft (außerhalb Helmholtz), Industrie	<i>Von der betrachteten und eingesetzten Technologie zur Speicherung abhängig</i>	<i>Information nicht vorhanden</i>	Es ist noch ein großer Aufwand sowohl bei der Grundlagenforschung als auch beim Markthochlauf der bereits entwickelten Technologie notwendig. Bei der Grundlagenforschung zur H ₂ -Speicherung muss insbesondere noch großer Aufwand in die Verbesserung der materialbasierten Speicherung zur Steigerung der Energiedichte und der Effizienz gesteckt werden. Bei der Unterspeicherung wird noch ein großer Aufwand benötigt, um die Löslichkeit von H ₂ im Wirtsgestein und dem vorhandenen Untergrundwasser zu	<i>Information nicht vorhanden</i>	Industrie
----	--	--	--	---	---	------------------------------------	---	------------------------------------	-----------

							erforschen und um Effekte wie die Methanisierung in Porenspeichern zu analysieren.		
Reality-Check	Allgemeine Einschätzung: Die Dringlichkeit der Klimakrise erfordert sofortiges Handeln. Eine gründliche Planung ist wichtig. Vorhandene Analysen sollten zusammengestellt und umgehend umgesetzt werden, um Verzögerungen zu vermeiden. Ein Mangel an langfristiger Planung und politischer Konsistenz hindert Investitionen in Wasserstofftechnologien. Die Regierungspolitik sollte einen stabilen und vorhersehbaren Rahmen für mindestens 20 bis 30 Jahre bieten, die typische Lebensdauer von Wasserstoffinfrastrukturprojekten, um Investitionen und die Marktentwicklung zu fördern. Die aktuellen Vorschriften für die Hochdruck-Wasserstoffspeicherung sind für die Metallhydridspeicherung nicht geeignet, da diese bei niedrigeren Drücken erfolgt und andere Sicherheitsaspekte aufweist. Eine Überprüfung und Anpassung der Vorschriften ist erforderlich, um das Sicherheitsprofil der Metallhydridspeicherung genau widerzuspiegeln, wodurch möglicherweise geringere Sicherheitsabstände möglich werden und die Einführung in besiedelten Gebieten erleichtert wird. Kollaboration: Die öffentliche Wahrnehmung und Akzeptanz sind für die erfolgreiche Umsetzung von Wasserstofftechnologien von entscheidender Bedeutung. Eine klare Kommunikation über die Vorteile von Wasserstoff, die auf die Bedenken der Öffentlichkeit in Bezug auf Sicherheit und Kosten eingeht, ist unerlässlich, um breite Unterstützung zu erhalten. Greifbare Vorteile für die Bevölkerung sind notwendig, um Anreize für die Einführung erneuerbarer Energien und klimafreundlicher Praktiken zu schaffen. Dies könnte Maßnahmen wie die direkte Rückverteilung von Einnahmen aus CO₂-Steuern oder CO₂-Preissystemen an die Bürger umfassen, um sicherzustellen, dass jeder die Vorteile von Klimaschutzmaßnahmen erfährt. Die Komplexität der Energiewende erfordert einen vielschichtigen Ansatz, der soziale, wirtschaftliche und politische Faktoren berücksichtigt. Die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, Branchenexperten, politischen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit ist unerlässlich, um umfassende und nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Deutschland sollte sich auf die praktische Umsetzung konzentrieren. Ein Gleichgewicht zwischen öffentlichem Engagement und entschlossenem Handeln ist notwendig, um die Einführung von Technologien für erneuerbare Energien und Infrastrukturprojekten zu beschleunigen. Um die Öffentlichkeit effektiv einzubinden, ist es von entscheidender Bedeutung, die Auswirkungen des Klimawandels auf eine verständlichere und greifbarere Weise zu kommunizieren.								

Räumliche Einordnung und rechtlich-politische Einordnung

- Deutschland insgesamt
- Europäische und deutsche Wasserstoffstrategie (ID O3)

Netto-Null-2050 Referenzen

Netto-Null-2050 Web-Atlas

Wasserstoffspeicherung von Lars Baetcke et. al., 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/85>



Wasserstoffwirtschaft von Lars Baetcke et. al., 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/90>



CO₂-Speicherpotenzial in porösen Aquiferen von Chris Yeates, 2021, <https://atlas.netto-null.org/contribution/1>



Salzkavernenspeicherpotenziale von Chris Yeates, 2021 <https://atlas.netto-null.org/contribution/86>



Storage solutions Konzepte zur CO₂-Entnahme von Borchers et al., 2021 <https://atlas.netto-null.org/contribution/118>



Geschlossener CO₂-Kreislauf zur Energiespeicherung von Unger et al., 2021 <https://atlas.netto-null.org/contribution/83>



3.c Handlungsempfehlungen zum Energiesystem

Nachfolgend werden für eine Auswahl zentraler Ziele, Maßnahmen und Szenarien der Transformation des Energiesystems Spiegelungen anhand von realen Entwicklungen und unterschiedlichen Perspektiven auf ihre Erreichbarkeit durchgeführt sowie mögliche zusätzliche Maßnahmen diskutiert. Die Auswahl der im Folgenden betrachteten Fragestellungen orientiert sich an den Formulierungen von Handlungsempfehlungen im Netto-Null-2050 Wegweiser auf Basis des Netto-Null-2050 Szenarios (Simon et al. 2022). Das Energieszenario zielte darauf ab, Schlüsselemente einer Energiewende hin zu Netto-Null-Emissionen in Deutschland zu identifizieren und umfasste dabei die Endverbrauchssektoren Haushalte, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, Industrie und Verkehr, sowie den Umwandlungssektor mit Kraft- und Heizwerken, Infrastrukturen etc. Die Geschwindigkeit der Entwicklung in Richtung dieses Ziels wurde durch das vorgegebene CO₂-Budget im Projekt Netto-Null-2050 definiert, sowie durch den Teil des Budgets, der dem Energiesektor zugewiesen wird. Die dort skizzierte Energietransformation erfordert eine „Kehrtwende“ hinsichtlich bisheriger Investitionsprioritäten im Energiesektor, wie sie derzeit in der deutschen Energiepolitik auch angegangen wird. Wesentliche Quellen der Kurzanalysen sind veröffentlichte Positionen von Expert:innen und Stakeholder:innen, d.h. von Interessengruppen wie Akteure, politische Parteien und Verbände.

3.c.1 Die konsequente Minderung des Energiebedarfs und die aktuelle Energieeffizienzgesetzgebung

I_2	Konsequente Minderung des Energiebedarfs Effizienzmaßnahmen spielen in der Transformation des Energiesystems eine entscheidende Rolle, Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs müssen konsequent und schnell vorangebracht werden, sie wirken vor allem, so lange noch weitgehend fossile Energien eingesetzt werden. Die Reduktion der Endenergienachfrage aller Sektoren in Deutschland erscheint, entsprechend der in Netto-Null-2050 erfolgten Auswertung verschiedener Szenarioanalysen, langfristig um 30% bis 45% bezogen auf 2018 möglich zu sein.
I_2a	Für die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen sind konkrete Ziele z. B. in Form von Energieintensitäten oder spezifischem Energieeinsatz für Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen in einzelnen Sektoren oder Branchen nötig. Die ambitionierten Szenariostudien projizieren z. B. für die Industrie eine mögliche Verbesserung der mittleren Energieintensität um 20 bis 35%.

I_2b	Erkenntnisse und konkrete Vorschläge generieren, wie Rebound-Effekte zu vermeiden sind und wie Suffizienz im Energieverbrauch erreicht werden kann.
Reality-Check	Als wesentliche Energieeinsparziele legt das Energieeffizienzgesetz von 2023 fest (EnEfG), dass bis zum Jahr 2030 in Deutschland gegenüber 2008 der Endenergieverbrauch um mindestens 26,5% auf 1.867 TWh und der Primärenergieverbrauch um mindestens 39,3% auf 2.252 TWh sinken sollen. Ende 2023, also vor dem Aus der sog. Ampelkoalition aus SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP, legte das Umweltbundesamt seinen aktualisierten Projektionsbericht 2023 vor (UBA, 2023a). Demnach ist mit einem Rückgang des Endenergieverbrauchs von ca. knapp 15% und des Primärenergieverbrauchs von ca. 30% gegenüber 2008 zu rechnen, wenn alle von der Ampelkoalition geplanten Maßnahmen umgesetzt würden. Die Einsparziele würden also unter diesen Randbedingungen des Jahres 2023 nicht erreicht werden. Im Jahr 2024 kamen dann wichtige Weichenstellungen und Impulse zu Energieeffizienz und Energieverbrauch zunächst aus der Europäischen Union: Die Neuwahl der EU-Kommission im Juni 2024 zog eine Richtungsänderung in der Programmatik nach sich, die auch die Bereiche Klimaschutz und Energie betrifft. Bei der Schwerpunktsetzung für die vergangenen fünf Jahre stand der Europäische Grüne Deal (Green Deal) mit dem "Fit for 55"-Plan und wichtigen klimaschutz- und energiepolitischen Gesetzeswerken mit an erster Stelle der Programmatik der Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen (Von der Leyen, 2024). Für 2024-2029 formuliert die im Amt bestätigte Präsidentin der Kommission die Schwerpunkte "Verteidigung und Sicherheit, nachhaltiger Wohlstand und nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit, Demokratie und soziale Gerechtigkeit, Führung in der Welt und greifbare Ergebnisse in Europa" als Kernelemente der folgenden fünf Jahre, wobei der Green Deal mit seinem Ziel einer klimaneutralen EU bis 2050 grundsätzlich fortgeführt wird. Insbesondere Wettbewerbsfähigkeit und Sicherheit sind eng mit der Ausrichtung der Energie- und Klimapolitik verbunden. Insbesondere die Wettbewerbsfähigkeit stellt dabei aber üblicherweise den Energiepreis stark in den Fokus gegenüber einer schnellstmöglichen Dekarbonisierung der Wirtschaftssektoren. In der neuen Programmatik kündigt Frau von der Leyen an, klar umrissene gemeinsame Ziele „für 2030 und darüber hinaus“ festzulegen, die jedoch in Bezug auf die Energieeffizienz und -einsparung hier nicht weiter konkretisiert sind. Noch in 2024 trat die Neuversion der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in Kraft (2024/1275 Energy Performance of Buildings Directive, EPBD). Sie führt grundlegende Neuerungen ein, darunter insbesondere erstmals Vorgaben zur Verringerung von Energiearmut und Vermeidung von unverhältnismäßigen Belastungen, die durch kostenintensive energetische Sanierungsmaßnahmen verstärkt werden können. Für die Minderung des Energieverbrauchs im Gebäudesektor konnte in den vorausgehenden Verhandlungen der EPBD das ambitionierteste Konzept jedoch nicht durchgesetzt werden: Statt expliziter Sanierungspflichten für Gebäude werden Mindesteffizienzstandards in Verbindung mit nationalen Effizienzsteigerungspfaden und -strategien für den Gebäudebestand auf Ebene der Mitgliedstaaten eingefordert. Wichtige Ziele der EPBD sind eine Reduzierung des durchschnittlichen Primärenergieverbrauch von Wohngebäuden um 16% bis 2030 und von 20-22% bis 2035. Das zentrale Langfristziel ist ein emissionsfreier Gebäudebestand in der EU bis 2050. Bis Mai 2026 sind die Anforderungen der europäischen Gebäuderichtlinie EPBD von den Mitgliedstaaten in nationales Recht umzusetzen, so auch in Deutschland. Das zentrale Gesetz zur Gebäudeeffizienz in Deutschland ist dabei das Gebäudeenergiegesetz (GEG). Der Prozess der Novellierung des GEG im Jahr 2023 durch die Ampelkoalition war von erheblichen Kontroversen begleitet und zeigte die Bedeutung des Prozesses der Gesetzgebung und politischen Transformations-Gestaltung an sich auf, neben den eigentlichen Inhalten der Gesetzesnovelle. Die inhaltliche Umsetzung der europäischen Gebäude-Effizienzrichtlinie EPBD in deutsches Recht, vor allem im Gebäudeenergiegesetz, ist Ende 2024 durch das vorzeitige Ende der Ampelkoalition und erwartete Neuwahlen auf Bundesebene beeinflusst. Eine nachhaltige inhaltliche Gestaltung durch die bisherige Bundesregierung ist nicht mehr zu erwarten. Es ist davon auszugehen, dass das energiepolitische Programm der CDU maßgeblich für die politische Gestaltung der wichtigen Energieeffizienzgesetzgebung in den Verbrauchssektoren in den nächsten Jahren sein wird. Das Ende einer nächsten regulären vierjährigen Legislaturperiode ab 2025 wird bereits das Jahr 2029 sein. Die Umsetzung des politischen Programms der nächsten Bundesregierung würde in diesem Fall die letzte sein, die unter normalen Umständen noch nennenswerten Einfluss auf die Ziele für den Energieverbrauch der verschiedenen Sektoren in Deutschland bis 2030 haben könnte.

Das im Mai 2024 verabschiedete Grundsatzprogramm der CDU formuliert in Bezug auf das Einsparen von Energie und die Steigerung der Energieeffizienz folgende Leitlinien (CDU, 2024):

- Ausrichten des Handelns an den Klimazielen des Pariser Abkommens von 2015
- Der Klimaschutz soll marktwirtschaftlich und auf Basis von Anreizsystemen organisiert werden
- Emissionshandel als zentrales Instrument
- Technologieoffenheit
- Erneuerbare Energie sollen deutlich ausgebaut werden
- Energie soll sicher, sauber und bezahlbar sein

Die Formulierungen des CDU-Grundsatzprogramms sind schwerpunktmäßig auf die Energieangebotsseite und deren technologischen Optionen ausgerichtet. Die Reduzierung des Energieverbrauchs wird einmal genannt, die Steigerung der Energieeffizienz zweimal explizit erwähnt, einmal davon direkt auf Technologien bezogen. Suffizienzstrategien wie in der Handlungsempfehlung I_2b und verhaltensbezogene Ansätze zur Energieeinsparung spielen erwartungsgemäß keine Rolle und werden nicht erwähnt. Implizit umfasst der genannte Emissionshandel auch die Reduktion des Energieverbrauchs als eine Möglichkeit der Reduktion von Treibhausgasemissionen. Welche Anteile an der Reduktion der Treibhausgasintensität einerseits der Energiebereitstellungssektor und andererseits die absolute Senkung des Energieverbrauchs hat, ist somit vor allem durch marktwirtschaftliche Faktoren, sprich die Kosten bestimmt. Das Grundsatzprogramm zeigt von seiner Formulierung und damit dem gesetzten Aufmerksamkeitsfokus eine klare Tendenz: Es wird in dem Programm ein starker Fokus auf marktorientiertes Wirtschaftswachstum gesetzt; die Mechanismen zur Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch werden hingegen nicht explizit erwähnt. Finden sich die Schwerpunkte so in der tatsächlichen wirtschaftlichen und energiebezogenen Entwicklung in Deutschland wieder, dürfte eher mit Szenarien mit verhältnismäßig geringem Rückgang des Energieverbrauchs oder sogar einem de facto Anstieg des Energieverbrauchs zu rechnen sein. Energieeinsparungen müssten sich durch die gesetzten Marktanreize einstellen. Marktorientierte Instrumente begünstigen insofern auch eher Rebound-Effekte, wie in der Handlungsempfehlung I_2b genannt, da freie finanzielle Budgets durch kostenminimierendes Handeln zusätzlichen, derzeit noch treibhausgasintensiven Konsum auslösen können.

Ohne erhebliche Energieeinsparungen sind einerseits entsprechend hohe Investitionen und ein sehr hohes Tempo beim Ausbau und der gleichzeitigen Defossilisierung des Energiebereitstellungssektors erforderlich. Die Handlungsempfehlungen, die auf die Defossilisierung der Energiebereitstellung setzen (III_Umwandlungssektoren), sowie diejenigen, die auf einen Energieträgerwechsel in den technischen Prozessen der Endverbrauchssektoren setzen (siehe in II_Endverbrauchssektoren) erhalten in diesem Politikumfeld eine besondere Bedeutung. Das Grundsatzprogramm der CDU nennt dabei z. B. die Kernkraft auch in 2024 eine „zurzeit“ unverzichtbare Option für den Energiesektor in Deutschland und setzt sich das Ziel, den weltweit ersten Fusionsreaktor zu bauen. Da bei marktwirtschaftlichen, kostenorientierten Instrumenten das Technologieangebot und seine Kostenstruktur eine entscheidende Rolle spielen, werden sich auch die Akzente in der Forschungsförderung in den Schwerpunktsetzungen zwischen erhöhtem dekarbonisiertem Energieangebot, Energieträgersubstitutionen und der Senkung der Energienachfrage wiederfinden. Explizit genannt wird in dem Programm z. B. auch die Forschungsförderung zu nuklearen Abfällen. Dem Grundsatzprogramm nach dürfte ein Emissionshandel auch im Gebäude- und Verkehrssektor in Deutschland erhalten bleiben (bzw. durchgängig eingeführt) oder ausgebaut werden. Die Machbarkeit eines langfristigen Netto-Null-2050 Szenarios, das den Schwerpunkt auf ambitionierte Energieeinsparziele legt (z. B. langfristig um 30% bis 45% bezogen auf den Endenergieverbrauch 2018 für alle Sektoren), dürfte unter dieser Politik schwer realisierbar sein im Vergleich zu Szenarien, die auf einen sehr ambitionierten und bezüglich der installierten Leistungen hohen Ausbau klimaneutraler Technologien im Energiesektor setzen.

Die erwartete Notwendigkeit einer Koalitionsbildung für die nächste Bundesregierung lässt ebenfalls erwarten, dass Einflüsse der energiepolitischen Programme der weiteren regierungsrelevanten Parteien im Deutschen Bundestag die Politik bezüglich der Energienachfrage und Energieeffizienz in Deutschland mitbestimmen werden.

3.c.2 Ausbau der Wärmeversorgung von Gebäuden über Wärmepumpen und Wärmenetze bis 2030

ID	Handlungsempfehlung Netto-Null-2050 Wegweiser
II_4a	Endverbrauchssektor: Gebäude Die CO₂-arme Versorgung mit Raumwärme und Warmwasser zählt zu den Schlüsselementen für ein Netto-Null-Deutschland. Im Gebäudebereich werden Minderungen des heutigen mittleren Endenergiebedarfs um ca. 50% für möglich gehalten. Notwendig sind verstärkte Sanierungsraten und -tiefen und gleichzeitig eine erhebliche Beschleunigung des Abbaus von fossilen Wärmeversorgungen bis 2030.
II_4b	Notwendig ist ein Zubau an Wärmepumpen zur Gebäudeversorgung von mind. 400.000-500.000 Anlagen pro Jahr bis 2030 und darüber hinaus. Das entspricht einer Verfünfachung der 2021 in Deutschland neu installierten Wärmepumpen. Hierzu müssen vielfach regulatorische Hemmnisse beispielsweise im Bau- und Bergrecht abgebaut werden.
II_4c	Der Ausbau der Nah- und Fernwärmenetze muss sich künftig auf einen verstärkten Anschluss von Gebäuden und eine Einbeziehung von solarer Wärme, Tiefengeothermie, Großwärmepumpen, Biomasse und saisonalen Wärmespeichern fokussieren. Hierzu ist auch eine Transformation bestehender Wärmenetze zu niedrigeren Temperaturen erforderlich.
Reality-Check	Für die Transformation der Wärmeversorgung von Gebäuden hat die Regierung der „Ampel-Koalition“ das Ziel ausgegeben, ab 2024 pro Jahr 500.000 neue Wärmepumpen zu installieren. Nachdem 2023 ein Branchenrekordjahr mit 356.000 abgesetzten Wärmepumpen zu verzeichnen war, wurde im ersten Halbjahr 2024 ein regelrechter „Markteinbruch“ konstatiert (IWR, 2024): Bis Ende des ersten Halbjahres 2024 wurden 90.000 Wärmepumpen in den Markt gebracht (BDH, 2024). Gegen Ende 2024 zeichnet sich ein Absatz von knapp unter 200.000 Geräten ab, ein Rückgang von ca. 45% gegenüber dem Vorjahr 2023 (IWR, 2024). Neben den Wärmepumpen stellt die Wärmeversorgung über Wärmenetze (Nah- und Fernwärme) eine wesentliche Säule für die Defossilisierung des Gebäudesektors dar. Anfang 2024 waren ca. 1,3 Mio. Wohngebäude in Deutschland an die Fernwärme angeschlossen. Am 12. Juni 2023 fand auf Bundesebene ein sogenannter „Fernwärmegipfel“ zwischen Wirtschaftsministerium und Bauministerium statt, bei dem das Ziel beschlossen wurde, die Anzahl der an Wärmenetze angeschlossenen Gebäude bis 2045 zu verdreifachen. Demnach sollen mittelfristig ca. 100.000 Gebäude pro Jahr neu an Wärmenetze angeschlossen werden (BMWK et al., 2023). Dabei ist zu beachten, dass der Anschluss an ein Wärmenetz an sich keine Reduzierung von Treibhausgasemissionen mit sich bringt. Maßgeblich ist daher, parallel zu steigenden Wärmenetzanschlüssen auch die Wärmeeinspeisung entsprechend dem Netto-Null-Ziel bis 2045 zu dekarbonisieren. Die zentralen bundesdeutschen Gesetze und Verordnungen für die sog. „Wärmewende“ bei Gebäuden, d.h. insbesondere den Zubau von Wärmepumpen im Rahmen energetischer Gebäudesanierungen und dem Ausbau von Wärmenetzen sind unter anderem das Gebäudeenergiegesetz (GEG) und das Wärmeplanungsgesetz (WPG), wobei das Baurecht auf Ebene der Bundesländer die zentralen regulatorischen Vorgaben für das tatsächliche Baugeschehen insbesondere bei den Wärmenetzen schafft. Um baurechtliche Hürden zu

beseitigen, wurde auf dem Fernwärmegipfel 2023 erklärt, dass aktuelle rechtliche und förderpolitische Rahmenbedingungen deutlich verbessert werden sollen und der Anschluss an Wärmenetze insbesondere für Neukunden deutlich attraktiver gestaltet werden soll. Hier steht insbesondere der Mietwohnungsbestand im Fokus, bei dem für die Umstellung auf eine gewerbliche Wärmelieferung zunächst entsprechende rechtliche Voraussetzungen zu schaffen sind. Auf dem Fernwärmegipfel 2023 wurde daher beschlossen, die Wärmelieferverordnung und § 556c Bürgerliches Gesetzbuch zu den Betriebskosten der Wärmelieferung zu verbessern, die aktuell als Hemmnis für den Anschluss bestehender Gebäude an Wärmenetze wahrgenommen werden (BMWK et al., 2023). Hierzu gehört auch die Novellierung der AVBFernwärmeV, der Verordnung über die Allgemeinen Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme. Sie regelt wesentliche einzuhaltende Bedingungen bei der Belieferung mit Wärme. Deren Novellierung sollte Investitionsanreize durch verbesserte Vertragsgestaltungsmöglichkeiten für Wärmenetzbetreiber und Eigentümer setzen. Nachdem es der Bundesregierung nicht gelungen war, sich auf einen Entwurf zur AVBFernwärmeV vom Juli 2024 zu einigen, hat das Bundeswirtschaftsministerium im Dezember 2024 nach dem Aus der Ampelkoalition einen Entwurf in die Länder- und Verbändeanhörung eingebracht, mit dem Ziel, diese vor Weihnachten noch ins Kabinett zu bringen. Wichtige Verbände der Wärmelieferanten wie der BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) und der VKU haben sich hierzu durchweg kritisch positioniert: Entgegen dem Entwurf vom Juli weise der aktuelle Referentenentwurf eine eindeutige Schiefelage zugunsten der Verbraucher auf und sei für den Ausbau der Fernwärme nicht nur wenig förderlich, sondern könnte diesen sogar gefährden. Eine novellierte AVBFernwärmeV entsprechend dem aktuellen Referentenentwurf solle daher aus Sicht der Wärmelieferanten wegen immenser Investitionsunsicherheiten und einem enorm erhöhten bürokratischen Aufwand in seiner jetzigen Form gar nicht verabschiedet werden (BDEW & VKU, 2024). Dies zeigt, dass selbst das Schaffen der rechtlichen Grundlage für einen beschleunigten Ausbau der Fernwärmeversorgung und den Abbau regulatorischer Hemmnisse mit erheblichen Prozessunwägbarkeiten verbunden ist.

Durch die Novelle des Gebäudeenergiegesetzes in 2023 wurden die darin enthaltenen Vorgaben zu Heizungssanierungen an das Vorliegen von Ergebnissen der kommunalen Wärmeplanung gekoppelt, und damit am geplanten Ausbau der Wärmenetze in der jeweiligen Kommune. Damit sind die gesetzlichen Vorgaben des GEG, die den Ausbau von Wärmepumpen beschleunigen sollen, von einem komplexen Planungsprozess abhängig, der viele Kommunen vor erhebliche Herausforderungen stellt und angesichts der Transformationsziele für 2030 einen langen Zeithorizont eröffnen: Erst bis zum 30. Juni 2028 sind in allen deutschen Gemeinden Wärmepläne zu erstellen, für Städte über 100.000 Einwohner bis zum 30. Juni 2026. Der Sache nach ist es sinnvoll und nachvollziehbar, dass Gebäudeeigentümern zunächst die Information vorliegen soll, ob ein Anschluss an ein Wärmenetz in den nächsten Jahren in Frage kommt, bevor sie eine Einzelversorgung des Gebäudes z. B. über eine eigene Wärmepumpe umsetzen. Denn wo ein Wärmenetz geplant ist, sollen natürlich hohe Anschlussquoten erreicht werden. Durch die Abhängigkeit vom Vorliegen eines Wärmeplanes bis 2026 bzw. 2028 wird somit aber ein Zeithorizont für die Investitionsentscheidungen der Eigentümerinnen aufgemacht, der mit einem sehr ehrgeizigen Zubau von 500.000 Wärmepumpen in jedem der kommenden Jahre kaum vereinbar scheint. Tatsächlich liegt die Erwartung von ca. 260.000 neu installierten Wärmepumpen 2025 nur bei gut der Hälfte des anvisierten kurzfristigen Zubaus (IWR, 2024).

Klar verbesserte Rahmenbedingungen, um kurzfristig einen Zubau von 500.000 Wärmepumpen pro Jahr zu erreichen, mittelfristig mindestens 100.000 Gebäude jährlich an zunehmend dekarbonisierte Wärmenetze anzuschließen und somit die Transformationsrate für eine klimaneutrale Wärmeversorgung von Gebäuden bis 2045 zu erreichen, lassen sich trotz entsprechender Initiativen derzeit nicht erkennen.

3.c.3 Flottenentwicklung der Batterie-, Hybrid- und Wasserstoff-Pkws auf 15 bis 17 Millionen bis 2030

ID	Handlungsempfehlung Netto-Null-2050 Wegweiser
II_3a	Endverbrauchssektor Transport Bis 2030 muss der Transportsektor zu einem großen Teil emissionsarm bzw. emissionsfrei werden, um das CO₂-Budget einzuhalten. Um dies umzusetzen, müssen bis dahin 15-17 Mio. Batterie-, Hybrid- und Wasserstoff-Pkw eingesetzt, also etwa jährlich 1,5-2 Mio. in den deutschen Markt integriert werden; dies entspricht einer Verzehnfachung der Neuzulassungen von 2020. Um ökologische Nebenfolgen zu vermeiden, ist dabei gleichzeitig eine Reduktion der Gesamtzahl der Pkw anzustreben, z. B. durch neue Sharing-Konzepte oder durch den Umstieg auf emissionsarme Verkehrsmittel wie Bus, Bahn und Fahrrad. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom, den daraus entstehenden Effizienzanforderungen und der noch nicht ausgebauten Wasserstoffinfrastruktur muss der Fokus bis 2030 verstärkt auf batterieelektrischen Fahrzeugen liegen.
Reality-Check	Das Ziel, bis 2030 in Summe 15 bis 17 Mio. zugelassene Batterie-, Plug-in-Hybrid- und Wasserstoff-Pkw in Deutschland zu erreichen, wurde aus dem zielkonformen Netto-Null-2050-Szenario (Simon et al., 2021) abgeleitet und bedeutet einen Anstieg des Marktvolumens dieser Fahrzeugkonzepte auf in Summe 1,5 bis 2 Mio. Neufahrzeuge pro Jahr. Die Flottenentwicklung entspricht der Größenordnung aus anderen zielkonformen Szenarien, die zum Teil noch höhere Zahlen annehmen (z. B. 21 Mio. Elektrofahrzeuge bis Ende 2030 in den Langfristszenarien von Gnann et al., 2024a). Die Ampel-Regierungskoalition hatte sich 2021 das Ziel gesetzt, ca. 15 Mio. vollelektrische, d.h. batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) bis 2030 zu erreichen. Der starke Anstieg der Verkaufszahlen von BEV sowie Plug-in Hybriden (PHEV) nach der Einführung der Kaufprämien ("Umweltbonus") für Elektrofahrzeuge ab dem 1. Juli 2016 erreichte bislang in Summe ein Maximum von über 830.000 Neufahrzeugen im Jahr 2022 (KBA, 2023) und etwa 700.000 Fahrzeugen im Jahr 2023 (KBA, 2024a). Dabei erreichte der Anteil der BEV an diesen Neufahrzeugen im Jahr 2023 ein Maximum von 75%. Wasserstofffahrzeuge spielen derzeit noch eine kleine Rolle aufgrund der hohen Fahrzeugkosten und der geringen Anzahl an Wasserstofftankstellen (derzeit ca. 100 in Deutschland (BDEW, 2024a)). Durch den Umweltbonus gefördert wurden zwischen Juli 2016 und Dezember 2023 in Summe nur 475 Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge (BMW, 2024a), die Zahl der Brennstoffzellenfahrzeuge im Bestand wird im unteren vierstelligen Bereich angegeben. Nach Gnann et al. (2024b) ist langfristig „die fast vollständige Umstellung auf Elektrofahrzeuge, nach heutigem Kenntnisstand, die entscheidende Säule zur Treibhausgasneutralität im Pkw-Verkehr“. Zum 1. Januar 2024 wurde ein Fahrzeugbestand von ca. 2,3 Mio. BEV und PHEV erreicht (KBA, 2024c), bis Ende 2024 wird die Zahl voraussichtlich unter 3 Mio. bleiben. Damit müsste die jährliche Zahl an neu zugelassenen Batterie-, Plug-in-Hybrid- und Wasserstoff-Pkw auf 2 bis 2,5 Mio. steigen, um das Flottenziel aus dem Szenario Netto-Null-2050 bis Ende 2030 noch zu erreichen, eine beschleunigte Entwicklung, die sich bislang aus den Maßnahmen weder auf der politischen noch der wirtschaftlichen Seite ableiten lässt. Im Vergleich zum BEV-Ziel der Ampelkoalition von 15 Mio. bis 2030 wird bis Ende 2024 ein Bestand von nur ca. 1,8 Mio. Fahrzeugen erreicht. Der Umweltbonus von Elektrofahrzeugen durch Kaufprämien wurde in der Vergangenheit als die wichtigste Maßnahme genannt, deren Einführung in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern jedoch spät erfolgte. So konnte in Norwegen bereits im Jahr 2020 für BEV ein Marktanteil von 54% und einschließlich der PHEV ein Anteil von ca. 75% für Fahrzeuge mit Elektroantrieb erreicht werden. Hier spielten auch weitere geschaffene Anreize eine Rolle, wie insbesondere der Erlass der Zulassungsgebühr und der Mehrwertsteuer (s. Möring-Martínez et al. 2024), aber auch kostenloses Parken und geringere Maut in Innenstädten (Steuer, 2021). In Deutschland wurden in Summe bis Ende 2023 etwa 2,2 Mio. BEV und PHEV gefördert (BMW, 2024a). Die vorzeitige Beendigung des Umweltbonus für BEV im Dezember 2023 ein Jahr vor dem geplanten Auslaufen Ende 2024 (für PHEV endete die Förderung bereits zum 01.01.2023) wurde von der Bundesregierung als erforderlich bezeichnet, „weil das Urteil des Bundesverfassungsgerichts zum Klima- und

Transformationsfonds Schwerpunktsetzungen im Haushalt notwendig gemacht hat" (Bundesregierung 2023). Ohne Kaufprämie sank die Zahl der BEV- und PHEV-Neufahrzeuge im Jahr 2024 gegenüber 2023 bislang für den Vergleichszeitraum Januar bis einschließlich Oktober um 17,8%, bei BEV allein um 26,6% (KBA 2024b). Das plötzliche Ende des Umweltbonus stieß bei den Autoherstellern auf heftige Kritik, teilweise wurden die vollen Kaufprämien von Herstellern zunächst übernommen und teilweise wurde der Hersteller-Anteil auch 2024 weiter gewährt oder mit Preisnachlässen reagiert (ADAC, 2024). Der dennoch erfolgte deutliche Rückgang der Verkaufszahlen stellt den Transformationspfad in Frage. So sind in den neuesten Szenarienrechnungen von Gnann et al. (2024b) die Zahlen der bis 2030 möglich erscheinenden Elektrofahrzeugflotte mit 12,4 bis 13,4 Mio. deutlich geringer, dabei ist der Anteil der BEV mit 10,6 bis 11,7 Mio. weiterhin hoch. Auch diese deutlich langsamere Flottenentwicklung würde ab 2025 ein jährliches Neufahrzeugvolumen erfordern, das mindestens Faktor 4 über den derzeitigen BEV-Verkaufszahlen liegt. Als wesentlicher Grund des korrigierten Szenarios wird von Gnann et al. (2024b) neben dem Auslaufen der Kaufpreisförderung auch die verspätete Überarbeitung der europäischen Energiesteuerrichtlinie (Energy Taxation Directive) genannt, die mittels an den CO₂-Emissionen ausgerichteten Energiesteuersätzen die Elektrifizierung beschleunigen soll.

Im Gegensatz dazu stellt der BDEW die Erreichbarkeit von 15 Mio. BEV bis 2030 noch nicht in Frage, sofern politische Maßnahmen den Hochlauf wieder beschleunigen (BDEW, 2024b). Dies wird gestützt durch die Analyse des Expertenbeirats Klimaschutz in der Mobilität (EKM), der in einem Policy Brief zwar eine Flottenentwicklung von nur bis zu 10,5 Mio. Elektrofahrzeugen mit den derzeitigen Maßnahmen für möglich hielt (noch unter Annahme des ursprünglichen Umweltbonus), aber zahlreiche mögliche weitere Maßnahmen für eine Beschleunigung der Flottenentwicklung diskutiert (EKM, 2023). Nach Berechnungen in einer neueren Studie (Agora Verkehrswende, 2024) wird Deutschland bis 2030 unter den aktuellen Bedingungen nur etwa 9 Mio. zugelassene Elektrofahrzeuge erreichen. In einem Zielszenario wird argumentiert, dass nur ein weiteres Maßnahmenbündel der Bundesregierung und ein Beitrag chinesischer Hersteller im unteren Preissegment von etwa 2,2 Mio. Fahrzeugen (bei 15% Marktanteil) eine Zielerreichung ermöglichen würden.

Als weitere konkrete Maßnahmen und Entwicklungen für den beschleunigten Hochlauf der Elektromobilität werden in diesen und anderen Studien von Experten u.a. gefordert:

- stabile politische Rahmenbedingungen und weitere Förderungen effizienter BEV (z. B. Sozialleasing, wie in Frankreich bereits umgesetzt)
- günstigere massentaugliche Elektrofahrzeuge von deutschen Herstellern im Markt
- E-Fahrzeug-Quoten für Hersteller und gewerbliche Flotten
- Steuererleichterungen für Unternehmen, die auf E-Fahrzeuge umsteigen, etwa bei der Dienstwagenbesteuerung und durch Abschreibungsvergünstigungen
- höhere CO₂-Bepreisung der fossilen Kraftstoffe, schrittweise weitere Verschärfung der EU-Flottenemissionsziele, emissionsabhängige Energiesteuern
- stärkere Ausrichtung der Kfz-Steuer am CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge und weiterhin Befreiung der BEV von der Kfz-Steuer
- Erhöhung des Drucks auf Diesel- und Benzinfahrzeuge durch Zufahrtsbeschränkungen in Städten
- Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur, da viele Haushalte keine eigene Lade- und Eigenstromnutzungsmöglichkeit haben, insbesondere von Schnellladesäulen
- ergänzend zu öffentlichen Ladepunkten mehr Ladeoptionen in privaten und gewerblichen Gebäuden integrieren
- Unterstützung von Zulieferern und Herstellern bei der Umstellung auf klimafreundliche Technologien

Auch beim erforderlichen Ausbau der Ladeinfrastruktur erscheint ein zielkonformer Pfad noch in weiter Ferne. Der Koalitionsvertrag der Ampelregierung sah eine Million öffentliche Ladepunkte bis zum Jahr 2030 vor, heute (Stand Ende Nov. 2024) sind in Deutschland ca. 140.000 öffentlich zugängliche Ladepunkte an etwa 73.900 Ladestationen vorhanden (BnetzA, 2024a). Ein beschleunigter Ausbau der Ladeinfrastruktur beispielsweise durch die Subventionierung öffentlicher Ladeinfrastrukturen oder das Erleichtern der Errichtung privater Lademöglichkeiten würde entsprechend positive Effekte auf die BEV-Nachfrage haben (Agora Verkehrswende, 2024).

Für das Erreichen der Ziele eines klimaneutralen Verkehrs wird von Verkehrsexperten und Umweltverbänden auch die Notwendigkeit der Reduktion der Fahrleistungen und der Gesamtzahl der Pkw gesehen. In der Statistik ist jedoch bislang ein kontinuierlicher Anstieg der Pkw-Zulassungszahlen und gefahrenen Kilometer zu beobachten. So erreichte der Pkw-Bestand mit 49,1 Millionen Fahrzeugen zum 01.01.2024 einen neuen Höchststand (KBA, 2024c) (zum Vergleich: 2020 waren es 47,7 Millionen Pkw). Dennoch wird in zielkonformen Szenarien i.d.R. davon ausgegangen, dass die Zahl der Pkw langfristig abnimmt, beispielsweise in den Flottenmodellierungen nach (Gnann et al., 2024b) zwischen 2020 und 2045 um ca. 7%. Dem zugrunde liegen die Annahmen, dass die Fahrleistungen des motorisierten Individualverkehrs (MIV) abnehmen und entsprechend der öffentliche

	Personennahverkehr und der Schienenverkehr insgesamt zunehmen. Als Ursachen werden soziodemografische Treiber wie das Einkommen privater Haushalte, die Entwicklung der Fahrkosten und eine verstetigte Änderung des Mobilitätsverhaltens infolge der COVID19-Pandemie gesehen, die letztlich auch zu einer reduzierten Fahrzeugflotte führen. Konzepte wie autofreie Städte, Car-Sharing und ein massiver Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs werden als mögliche Elemente einer zukünftig anderen Mobilität mit weniger Pkw-Anteil genannt (BUND, 2021; UBA, 2023b), aber auch regulative Maßnahmen, die zu höheren Gesamtkosten des Pkw-Betriebs führen, können einen modalen Wechsel beschleunigen. Eine zukünftig entsprechend ausgerichtete Verkehrspolitik zeichnet sich in der Mehrheit der derzeitigen Programme der politischen Parteien jedoch nicht ab.
--	---

3.c.4 Elektrifizierung und Wasserstoffeinsatz in der Industrie bis 2030

ID	Handlungsempfehlung Netto-Null-2050 Wegweiser
II_5a	Rahmenbedingungen Schaffung von politischen Rahmenbedingungen und finanziellen Unterstützungsprogrammen entlang der gesamten industriellen Wertschöpfungsketten, um Vorgaben und Investitionssicherheit für großskalige Umbaumaßnahmen (z. B. Elektrifizierung, Wasserstoffeinsatz und weitere synthetische Rohstoffe sowie alternative Produktionsprozesse) in der Industrie zu schaffen und zukünftige Nachfragen nach Niedrigemissionsproduktionen zu sichern.
Reality-Check	In den letzten Jahren wurden wichtige Schritte zur Förderung der industriellen Dekarbonisierung unternommen. Politische Instrumente wie Carbon Contracts for Difference (CCfD) (BMWK, 2024b), der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (European Commission, 2021) und die Nationale Wasserstoffstrategie (BMWK, 2023) bieten wichtige Ansätze. Diese Maßnahmen werden flankiert von EU-Initiativen wie dem Fit for 55-Paket (European Parliament, 2024) und dem Green Deal Industrial Plan (European Commission, 2024a). Allerdings zeigt sich in Deutschland eine Diskrepanz zwischen ambitionierten Klimazielen – wie der Klimaneutralität bis 2045 – und ihrer praktischen Umsetzung. Bürokratische Hürden, langwierige Genehmigungsverfahren und die oft kurzfristige Priorisierung politischer Maßnahmen behindern den notwendigen Transformationsprozess (Handelsblatt, 2024). Ein Beispiel hierfür ist die Förderung von Wasserstofftechnologien. Obwohl die Nationale Wasserstoffstrategie ambitioniert ist, bleibt der Zugang zu preiswertem Wasserstoff schwierig. Dies ist aber eine essentielle Grundlage für industrielle Investitionen in wasserstoffbasierte Technologien. Wasserstoff soll aber mittelfristig weiterhin knapp und teuer bleiben in Europa (Epico, 2024). Laut der Importstrategie der Bundesregierung (BMWK, 2024c) sollen bis 2030 zwar 95–130 TWh Wasserstoff bereitgestellt werden, jedoch ist der Großteil davon importabhängig (50–70 %). Die Bundestagswahl 2025 wird entscheidend sein, da sie eine neue Regierung mit möglicherweise veränderten Prioritäten hervorbringen wird. Die Regierungsbildung nach der Wahl wird somit maßgeblich bestimmen, ob die notwendigen Rahmenbedingungen und finanziellen Unterstützungsprogramme in der nächsten Legislaturperiode weiterentwickelt oder teilweise rückgängig gemacht werden.

	Die Transformation der deutschen Industrie erfordert immense Investitionen, laut BDI bis 2030 rund 1,4 Billionen Euro Mehrinvestitionen (BDI, 2024a). Gleichzeitig stellen hohe Energiepreise und die Unsicherheiten nach der Energiekrise infolge des Ukraine-Kriegs erhebliche Belastungen dar, insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs) (Handelsblatt, 2024). Instrumente wie CCfDs spielen hier eine Schlüsselrolle: Sie gleichen die Differenz zwischen Produktionskosten emissionsarmer und konventioneller Technologien aus. Pilotprojekte der Bundesregierung zeigen Potenzial, doch bleibt die langfristige Finanzierung angesichts hoher Staatsschulden und eines möglichen Regierungswechsels ungewiss (BDI, 2022). Der CBAM soll Carbon Leakage verhindern und den Wettbewerbsnachteil europäischer Unternehmen durch CO₂-Kosten gegenüber Drittstaaten reduzieren. Seine Umsetzung wird jedoch auf EU-Ebene weiter verhandelt und Unsicherheiten über seine Effektivität und Komplexität bestehen (BDI, 2024b).
--	---

ID	Handlungsempfehlung Netto-Null-2050 Wegweiser
II_5b	Zertifizierung Entwicklung von Zertifizierungssystemen / Labels für CO₂-Footprints von Industrieprozessen (z. B. für Zement und Stahl sowie Stahlprodukte, wie z. B. Autos, hergestellt mit grünem Stahl). Dadurch wird eine Preissteigerung von Industrieprodukten möglich, während gleichzeitig deren internationale Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt bewahrt und ein Carbon Leakage verhindert werden kann.
Reality-Check	Die Einführung von Zertifizierungssystemen oder Labels für CO₂-Footprints (Product Carbon Footprint, kurz PCF) von Industrieprozessen stellt eine zentrale Maßnahme dar, um die Transformation der deutschen Industrie hin zur Klimaneutralität voranzutreiben. Die Maßnahme verfolgt das Ziel, Transparenz über die Emissionsintensität von Produkten wie Zement, Stahl und Stahlprodukten (z. B. Autos aus grünem Stahl) zu schaffen (Tholen & Kiyar, 2020; European Commission, 2024b). Sie soll nicht nur die Marktnachfrage nach klimafreundlichen Produkten steigern, sondern auch eine Preisdifferenzierung ermöglichen, die höhere Produktionskosten ausgleicht, ohne die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu gefährden oder Carbon Leakage zu riskieren. Die Umsetzung von Zertifizierungssystemen erfordert eine klare politische Unterstützung, insbesondere im Hinblick auf regulatorische Vorgaben und deren europäische Harmonisierung (BASF, 2024). Vor den Neuwahlen 2025 zeigt sich bei den deutschen Parteien eine differenzierte Haltung zu solchen industriepolitischen Maßnahmen. Das Wahlergebnis 2025 wird daher maßgeblich beeinflussen, ob und wie diese Maßnahme umgesetzt wird. So dürfte beispielsweise eine Regierung unter grüner oder rot-grüner Führung die Maßnahme priorisieren, während eine konservativ-liberale Regierung möglicherweise zögerlicher agiert. Die deutsche Industrie steht in einem globalen Wettbewerb, insbesondere in emissionsintensiven Sektoren wie Zement und Stahl. Hier bietet die Maßnahme sowohl Chancen als auch Herausforderungen. Ein Hauptanliegen ist, dass durch höhere Kosten für klimafreundliche Produkte Marktanteile an weniger regulierte Länder verloren gehen könnten. Die Einführung von Instrumenten wie dem Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) auf EU-Ebene ist entscheidend, um dies zu verhindern (European Commission, 2021). Der CBAM könnte die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen schützen, indem er die CO₂-Kosten für Importe anpasst. Die Einführung von Zertifizierungssystemen kann

	Unternehmen außerdem dazu motivieren, ihre Produktionsprozesse zu dekarbonisieren. Allerdings erfordert dies hohe Investitionen in neue Technologien, die nur durch eine stabile und langfristige Förderpolitik finanziert werden können. Instrumente wie Carbon Contracts for Difference (CCfD) könnten hier eine Schlüsselrolle spielen, indem sie den Unternehmen Preisstabilität für emissionsarme Technologien bieten (BMWK, 2024b). Letztlich könnten deutsche Unternehmen durch klare CO₂-Labels eine Vorreiterrolle auf internationalen Märkten einnehmen, insbesondere in Regionen, die ebenfalls auf klimafreundliche Produkte setzen. Dies könnte den Export von beispielsweise „grünem“ Stahl und anderen emissionsarmen Produkten fördern. Die Umsetzung eines soliden Zertifizierungssystems steht vor mehreren Hürden: • Komplexität entlang der Wertschöpfungskette: Bei Primärprodukten wie Stahl oder Zement ist die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks relativ klar, da Inputs und Outputs gut dokumentiert werden können. Problematisch wird es, wenn Recyclingmaterialien hinzukommen, da der CO₂-Fußabdruck der Bestandteile schwer zurückzuverfolgen ist. Besonders komplex ist die Zertifizierung von Endprodukten wie Autos, da hier theoretisch alle Einzelteile und Prozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette zertifiziert werden müssten. BASF schlägt daher vor, eine digitale Austauschplattform aufzubauen, um besonders die Scope 3 PCFs transparenter zu kommunizieren (BASF, 2024). • Fehlende Standards und Grenzwerte: Es gibt bislang keine einheitlichen und spezifischen Definitionen, ab wann ein Produkt als „grün“ gilt, weshalb beispielsweise für die Chemieindustrie eine branchenspezifische Guideline erstellt wurde (TFS, 2024). Diese baut auf bestehenden Standards auf, wie der Norm DIN EN ISO 14067 (DIN 2018) oder dem Treibhausgas-Protokoll (Bhatia & Ranganathan, 2004). Ohne klare Grenzwerte und harmonisierte Standards besteht die Gefahr von Marktverzerrungen und Greenwashing. Ansätze wie das XCarb-Zertifikat von ArcelorMittal (ArcelorMittal, 2024) zeigen, dass pragmatische Lösungen möglich sind. Für Stahl und Zement gibt es hierfür Definitionen von IEA, die für die Erstellung von Standards helfen können (IEA, 2024). Auch die flächendeckende Nutzung von Tools wie SCOTT von BASF könnte helfen, um einheitliche und strukturierte PCFs zu generieren (BASF, 2024).
--	--

ID	Handlungsempfehlung Netto-Null-2050 Wegweiser
II_5c	Stahl Bis 2030 sollten für die Primärstahlherstellung 50-70% der kohlebasierten Hochöfen durch den Neubau von Niedrigemissionstechnologien ersetzt werden. Bis 2030 ist die Schlüsseltechnologie die Direktreduktion. Erdgasbasiert ist diese jetzt bereits industriereif und dient als Brückentechnologie bis genügend Wasserstoff für die wasserstoffbasierte Direktreduktion verfügbar ist. Ab 2040 sollte die strombasierte Eisenelektrolyse marktreif sein und von da an ebenfalls für die Primärstahlherstellung eingesetzt werden. CCS kann im Stahlsektor die Reduktion der Emissionen beschleunigen.
II_5d	Stahl Verstärkte Investitionen in Forschung und Entwicklung der wasserstoffbasierten und strombasierten Primärstahlherstellung in direkter Kooperation mit der Stahlindustrie, um frühzeitige Einsatzfähigkeit und Upscaling dieser Niedrigemissionstechnologien zu ermöglichen, zum Beispiel um ab bzw. vor 2040 die Eisenelektrolyse zur Marktreife zu bringen.

Reality-
Check

Die politischen Rahmenbedingungen für die Transformation der Stahlindustrie sind stark von nationalen und europäischen Klimazielen abhängig. Die EU strebt an, bis 2050 klimaneutral zu werden (European Commission 2020). Die Novellierung des Emissionshandelssystems (ETS) (UBA, 2023c) sowie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (Europäischer Rat 2024) sollen für eine fairere Wettbewerbslandschaft sorgen. Die Bundesregierung hat bereits erste Klimaschutzverträge (CCfDs) an Unternehmen vergeben (BMW, 2024d), um die Mehrkosten klimafreundlicher Technologien auszugleichen. Die anstehende Bundestagswahl 2025 stellt jedoch einen Unsicherheitsfaktor dar: Je nach Wahlausgang könnte sich die Priorisierung von Klimaschutzmaßnahmen ändern. Während eine klimafreundlich ausgerichtete Bundesregierung weiterhin auf Förderinstrumente wie CCfDs und staatliche Investitionsprogramme setzen würde, könnte eine wirtschaftsliberale Ausrichtung die Finanzierung solcher Programme reduzieren oder einstellen.

Die deutsche Stahlindustrie befindet sich derzeit in einer wirtschaftlich schwierigen Lage. Zwar wurden große Dekarbonisierungsprojekte angekündigt und umfassende Transformationspläne vorgestellt (Eurofer, 2024), doch die Branche steht vor erheblichen Herausforderungen. Laut dem Strom-Report liegen die Strompreise in Deutschland etwa 40 % über dem EU-Durchschnitt (Strom-Report, 2024), was die Produktion von grünem Stahl weniger wettbewerbsfähig macht. Hinzu kommt, dass der globale Stahlmarkt von Überkapazitäten geprägt ist, insbesondere durch günstige Exporte aus China (wire, 2024). Infolgedessen verzeichnen deutsche Unternehmen rückläufige Auftragszahlen (WV Stahl, 2024a).

Die Umstellung auf wasserstofffähige DRI-Anlagen erfordert enorme Investitionen. Die Wirtschaftsvereinigung Stahl schätzt den Investitionsbedarf für die Dekarbonisierung der Stahlindustrie auf rund 30 Milliarden Euro (WV Stahl, 2021). Diese angespannte wirtschaftliche Situation hat zuletzt zu Schlagzeilen geführt: Während ThyssenKrupp seine Dekarbonisierungspläne überdenkt (Katanich, 2024) und bis 2030 11.000 Stellen in Deutschland abbauen will (ZEIT Online, 2024), hat ArcelorMittal seine Pläne zur Dekarbonisierung der Produktion in Europa offiziell auf Eis gelegt (Hanke, 2024). Die Politik fordert von den Unternehmen, ihrer sozialen Verantwortung gerecht zu werden und betriebsbedingte Kündigungen zu vermeiden (Hanke, 2024). Gleichzeitig verlangt die Wirtschaftsvereinigung Stahl von der Politik einen wirksamen Außenhandelsschutz vor unfairem Wettbewerb, eine deutliche und langfristige Absenkung der Energiekosten sowie Planungssicherheit unabhängig von Legislaturperioden und Wahlterminen (WV Stahl, 2024b).

Forschungs- und Entwicklungsprojekte wie SALCOS (SalzgitterAG, 2024), tkH2Steel (thyssenkrupp, 2024) oder DRIBEH2 (BMW, 2024e) sowie deren finanzielle Förderung sind weiterhin essentiell für die erfolgreiche Dekarbonisierung der deutschen Stahlindustrie. Ihr Fortbestehen und die Entwicklung neuer Projekte hängen jedoch maßgeblich von der weiteren wirtschaftlichen Entwicklung der Stahlbranche ab.

Grüner Wasserstoff ist der Schlüssel für eine klimaneutrale Stahlproduktion. Aktuell fehlen jedoch sowohl ausreichende Mengen als auch die notwendige Infrastruktur. Die Bundesregierung plant bis 2030 den Aufbau einer Elektrolysekapazität von 10 GW (BMW, 2023). Laut einer Studie von Agora Energiewende benötigt die deutsche Stahlindustrie allein bis 2030 etwa 19 TWh pro Jahr (Agora, 2024) sowie den Aufbau einer geeigneten Infrastruktur zu dessen Bereitstellung (Epico, 2024).

Neben der Umstellung der Stahlproduktion im Inland zeigen neueste Ergebnisse des Ariadne-Projekts, dass der Import von halbfertigem Stahl Kostenvorteile bringen könnte und damit die Wettbewerbsfähigkeit der nationalen Wertschöpfungskette insgesamt erhöht. Mit einer solchen Maßnahme würde die Stahlindustrie Teile der Stahlherstellung in Länder auslagern, in denen erneuerbare Energien und vor allem Wasserstoff günstiger verfügbar sind (Verpoort et al., 2024). Da Stahl ohnehin ein global gehandeltes Gut ist und im starken internationalen Wettbewerb steht, bietet die Verlagerung von Teilen der Wertschöpfungskette Chancen sowohl für Import- und Exportnationen als auch für deren Handelsbeziehungen (Bilici et al., 2024).

ID	Handlungsempfehlung Netto-Null-2050 Wegweiser
II_5e	Zement Circa 2/3 der CO₂-Emissionen aus der Zementindustrie sind prozessbedingt, ca. 1/3 energiebedingt. Zurzeit ist keine Technologie verfügbar, um prozessbedingte Emissionen der Zementindustrie innerhalb des Herstellungsprozesses entscheidend zu reduzieren. Somit stellt die Zementindustrie einen Ausnahmesektor dar, bei dem für Netto-Null eine Dekarbonisierung der Energieträger allein nicht ausreicht. Daher können nicht-vermeidbare Prozessemissionen hier nur durch Carbon Capture und Storage (CCS) verhindert werden. Um diese spezifische Form von CCS baldmöglichst in der Praxis einsetzen zu können, sind Diskussionen in Politik und Gesellschaft sowie Entwicklung und Koordination geeigneter technischer, infrastruktureller und rechtlicher Lösungen notwendig.
Reality-Check	Die deutsche Zementindustrie ist für etwa 20 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen jährlich verantwortlich, was rund 2 % der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen entspricht (KEI, 2022). Etwa zwei Drittel dieser Emissionen sind prozessbedingt und resultieren aus der chemischen Reaktion bei der Klinkerherstellung (Kalkstein wird zu Klinker gebrannt). Diese Emissionen entstehen direkt durch die Zersetzung von Kalziumkarbonat (CaCO₃) zu Kalziumoxid (CaO) und CO₂ und sind technisch derzeit nicht vermeidbar. Das verbleibende Drittel der Emissionen ist energiebedingt. Damit ist klar: Allein die Umstellung auf CO₂-freie Energieträger reicht nicht aus, um klimaneutral zu werden. Der Einsatz von Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) ist daher unverzichtbar, um nicht-vermeidbare Prozessemissionen zu adressieren. Die Zementindustrie steht vor enormen Herausforderungen, gleichzeitig bietet sie aber auch Potenziale zur Dekarbonisierung. Während CCS eine wichtige Rolle spielt, gibt es auch Ansätze wie „Reuse, Reduce and Recycle“ (HOLCIM, 2023a). Dabei geht es darum, den Zementverbrauch zu reduzieren, Recycling zu fördern und alternative Materialien zu nutzen, um den Klinkeranteil im Zement zu verringern. Suffizienzmaßnahmen wie „Building more with less“ (HOLCIM, 2024a) und das Recycling von altem Zement („Build new from old“) könnten hier eine wichtige Rolle spielen (Cembureau, 2024). Einige Unternehmen in der Zementindustrie setzen bereits auf innovative Projekte zur CO₂-Reduktion: • CEMEX Rüdersdorf verfolgt einen kombinierten Ansatz: Effizienzmaßnahmen und der Einsatz alternativer Energieträger sollen die CO₂-Emissionen senken. Im Projekt „CO2ncrete ch2emicals“ sollen 125.000 Tonnen biogenes CO₂ für die Herstellung von Sustainable Aviation Fuels (SAF) genutzt werden. Weitere 1,3 Millionen Tonnen fossiles CO₂ sollen im Rahmen des Projekts „CO2LLECT“ in geologischen Speichern gespeichert werden (CEMEX, 2023). • HOLCIM plant ebenfalls, CCU auszuweiten und CO₂ für die Herstellung von e-Fuels (z. B. e-Methan, e-Methanol, e-Kerosin), Basischemikalien (z. B. Polyurethane, Harnstoff) und Baumaterialien zu nutzen. HOLCIM setzt auf eine validierte Roadmap, die von der Science Based Targets Initiative (SBTi) geprüft wurde, und fokussiert sich auf Lösungen, die langfristig den Klinkeranteil reduzieren (HOLCIM, 2024b). CCS ist in Deutschland nach wie vor ein kontroverses Thema. Die gesellschaftliche Skepsis, insbesondere aufgrund von Sicherheitsbedenken und dem „Not-In-My-Backyard“-Effekt (NIMBY), erschwert die Umsetzung (Braun, 2017). Die Bundesregierung hat mit dem CCS-Gesetz von 2012 zwar Pilotprojekte erlaubt, jedoch verfügen die Bundesländer über Vetorechte, was die praktische Umsetzung stark einschränkt (DIP, 2012). Ein Gesetzesentwurf zu dessen Änderung wurde von der aktuellen Regierung bereits vorgelegt (BMWK, 2024f).

Die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS steigt laut einer Studie des Wuppertal Instituts (2023), wenn die Technologie als unverzichtbare Lösung für nicht-vermeidbare Emissionen kommuniziert wird. Dennoch bleiben Zweifel an der Langzeitsicherheit der CO₂-Speicher bestehen. Sichtbare und erfolgreiche Demonstrationsprojekte sind daher notwendig, um Vertrauen in die Technologie zu schaffen.

Ein flächendeckender Einsatz von CCS erfordert eine neue Infrastruktur für den Transport und die Speicherung von CO₂ (VDZ, 2024). Dazu gehören CO₂-Pipelines für den sicheren Transport sowie zugängliche geologische CO₂-Speicher. Ein Beispiel für erfolgreiche Infrastrukturentwicklung ist der Hafen von Antwerpen, der lokale Akteure zusammengebracht hat, um CO₂-Transport und -Speicherung zu ermöglichen (Port of antwerp bruges 2024). Auch in Deutschland könnten Häfen als „Kickstarter“ für die CO₂-Infrastruktur fungieren. Ohne geeignete Infrastruktur ist die gesamte CCS-Wertschöpfungskette jedoch blockiert. Ein weiteres Problem ist die Qualität des CO₂: Wenn verschiedene Akteure CO₂ in Pipelines einspeisen, müssen Spezifikationen und Standards für Reinheit und Aggregatzustand definiert werden (VDZ, 2024).

Die hohen Kosten von CCS (derzeit 80–110 Euro pro Tonne CO₂ ohne Transport und Speicherung) stellen eine erhebliche Hürde dar (VDZ, 2024). Der aktuelle CO₂-Preis im EU-ETS schwankt zwischen 50 und 80 Euro pro Tonne CO₂ (EMBER, 2024). Um CCS wirtschaftlich tragfähig zu machen, sind Carbon Contracts for Difference (CCfD) ein zentrales Instrument. CCfDs bieten finanzielle Sicherheit, indem sie die Differenz zwischen den aktuellen CO₂-Vermeidungskosten und dem CO₂-Preis ausgleichen (BMWK, 2024b). Eine klare politische Unterstützung für CCfDs ist jedoch notwendig, um Planungssicherheit zu schaffen.

Darüber hinaus wird der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU ab 2026 schrittweise eingeführt. CBAM belegt Importe von Zement aus Ländern mit niedrigeren Klimastandards mit einem CO₂-Preis und soll so Carbon Leakage verhindern (European Commission, 2021). Dies könnte deutschen Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil verschaffen und den Druck erhöhen, emissionsarme Technologien wie CCS zu implementieren.

Ein weiterer Faktor ist die Energieversorgung: CCS erfordert große Energiemengen (VDZ, 2024), weshalb Unternehmen wie HOLCIM bereits Offshore-Windanlagen in der Ostsee sichern, um langfristig bezahlbare und klimafreundliche Energiequellen zu gewährleisten (HOLCIM, 2023b).

Effizienzmaßnahmen wie Waste Heat Recovery bieten zusätzliche Potenziale. Technologien wie der Organic Rankine Cycle (ORC) von Unternehmen wie Orcan (Orcan, 2024) nutzen Abwärme zur Stromerzeugung (McKinsey, 2023).

3.c.5 Erforderlicher Ausbau des Strom-Übertragungsnetzes

III_6a

Umwandlungssektor: Stromsektor

Es gibt mehrere Schlüsseltechnologien, für die mit weiteren politischen Maßnahmen und mit konkreten jahresscharfen Ausbauzielen die Marktimplementierung voranschreiten muss, insbesondere Windkraft (on- und offshore), Photovoltaik, Elektrolyseure, unterschiedliche Energiespeichertechnologien, Hochspannungs- Gleichstrom-Übertragungsnetze und smarte Stromnetztechnologien, Elektrofahrzeuge (einschl. Wasserstoff-Brennstoffzellen), (Groß-)Wärmepumpen etc.

Reality-
Check

Der massive Ausbau des Höchstspannungsnetzes ist ein wichtiger Baustein der Energiewende, um die zunehmend fluktuierende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und den hohen zusätzlichen Strombedarf zur Dekarbonisierung verschiedener Verbrauchssektoren realisieren zu können (BDEW, 2024b). Dies zeigen auch Ergebnisse von zeitlich und räumlich aufgelösten Energiesystemmodellierungen unter der Annahme hoher Anteile erneuerbaren Stroms (s. z. B. Simon et al., 2022). Im deutschen Netzentwicklungsplan (NEP) der Bundesnetzagentur (BNetzA) werden konkrete Ausbaumaßnahmen für die nächsten Jahre definiert, die basierend auf einem Szenariorahmen zum NEP Strom für notwendig erachtet werden. Dieser Szenariorahmen wird von den Übertragungsnetzbetreibern alle 2 Jahre vorgelegt und anschließend in einem öffentlichen Konsultationsprozess zur Diskussion gestellt. Die aktuellen Szenarien für den kommenden NEP stellen drei Varianten für die Szenariojahre 2037 und 2045 dar, welche die Bandbreite der wahrscheinlich erachteten Entwicklungen hinsichtlich zeitlicher Systemtransformation, Wasserstoffversorgung, Ausbau erneuerbarer Stromerzeuger und Elektrifizierungsgrad abbilden (ÜNB, 2024). Die Szenarien erreichen einen Bruttostromverbrauch 2045 im Bereich von 967 bis 1351 TWh, wobei in allen Szenarien ein Import von Wasserstoff und anderen synthetischen Energieträgern als notwendig vorausgesetzt wird. Das mittlere Szenario B berücksichtigt dabei wichtige Ankerpunkte der Systementwicklungsstrategie (BMWK, 2024g). Der europäische Ten-Year Network Development Plan (TYNDP, 2024) gibt den Rahmen für die Berücksichtigung neuer Interkonnectoren und Austauschkapazitäten mit Inbetriebnahmen bis zum Jahr 2037 vor.

In der Stellungnahme des BDEW zum aktuellen Szenariorahmen werden relevante Szenarioannahmen in Frage gestellt, die sich auf die Berechnung des erforderlichen Netzausbaus auswirken, wie etwa zu den sektoralen Stromnachfragen, dem Elektrifizierungspotenzial in der Industrie und zum Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (BDEW, 2024b). Der BDEW bemängelt, „dass sich der Szenariorahmen Strom und der Szenariorahmen Gas und Wasserstoff in den Annahmen, aber auch in den jeweils herangezogenen Referenzwerten (s. insb. die eingangs jeweils genannten Kennzahlen) teils nicht unerheblich unterscheiden“ und dies den Vergleich der jeweils dargestellten Transformationspfade erschwert. Zudem weist der BDEW in seiner Stellungnahme darauf hin, dass die Ausbauplanung für das Stromnetz die Entwicklung der Wasserstoffinfrastrukturen berücksichtigen muss, da die großskalige Wasserstoffherzeugung einerseits große erneuerbare Strommengen benötigt, ein möglicher Transport von Wasserstoff aber auch den Ausbau des Stromnetzes dämpfen kann.

Aufgrund von langen Genehmigungsverfahren, Klagen und Bürgerprotesten sowie begrenzten Ressourcen bei der Umsetzung hinkt der Ausbau des Übertragungsnetzes den Anforderungen der Energiewende seit Jahren hinterher. Eine Folge davon sind zunehmend erforderliche Maßnahmen des Netzengpassmanagements, die im Jahr 2023 über 3 Milliarden Euro Kosten verursacht haben. Darunter sind Redispatch-Maßnahmen der am Markt befindlichen Kraftwerke in Höhe von ca. 27 TWh im Jahr 2023, darunter ca. 10 TWh Abregelungen von Anlagen der erneuerbaren Stromerzeugung, vor allem von Windkraftanlagen, um Netzengpässe zu vermeiden (BNetzA, 2024d). Unter der Ampelregierung soll durch Bürokratieabbau die Geschwindigkeit bei Vorhabensrealisierungen verdoppelt worden sein (Bundesregierung, 2024a). Aufgrund der in der Regel erheblichen Eingriffe in Landschaft und Natur und der Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung sowie der steigenden Kosten und Finanzierungsprobleme ist eine grundsätzliche Entspannung beim Thema Netzausbau jedoch nicht in Sicht.

Nach der Bundesnetzagentur ist für die Energiewende derzeit ein Netzausbaubedarf von rund 16.900 km Hochspannungsleitungen ermittelt, davon ist die BNetzA für etwa 9.600 km zuständig (BNetzA, 2024b). Laut BNetzA sind bis Ende 2024 rund 2.800 km neue Leitungen genehmigt, d.h. wird für die entsprechenden Projekte das umfangreiche Genehmigungsverfahren abgeschlossen sein. Von den geplanten Leitungen werden bis Ende 2024 240 km in Betrieb sein, bis zum Ende des Jahres 2030 sollen es 4.516 km sein (BNetzA, 2024b). Weitere Informationen zum Ausbaufortschritt finden sich in den Monitoringberichten der BNetzA (BNetzA, 2024c).

Auch in der Systementwicklungsstrategie (SES) werden Aussagen zum erforderlichen Netzausbau gemacht. Die SES soll sektorübergreifend die Transformation zu einem treibhausgasneutralen Energiesystem beschreiben und dabei eine Grundlage für Netzausbauplanungen Strom und Gas/Wasserstoff unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen darstellen. Als Ergebnis von zugrundeliegenden systemoptimierenden Szenariorechnungen wird erwähnt, „dass ein Ausbau der deutschen Austauschkapazitäten mit den elektrischen Nachbarn auf 80 bis 90 GW sinnvoll sein kann“. Verglichen mit den auf Basis aller aktuellen Planungen erreichbaren 60 GW Austauschkapazität ergibt sich also die Handlungsempfehlung, den Bedarf und Nutzen weiterer Interkonnectoren mit den Nachbarländern zu prüfen. Die Größenordnung des geplanten innerdeutschen

Übertragungsnetzausbau wird mit den Szenariorechnungen bestätigt, wobei die Rolle von Netzverstärkungen (Umbeseilungen und Ersatzneubau in bestehenden Trassen) betont wird, damit der Netzausbaubedarf minimiert werden kann.

Die Netzentwicklungsplanung der ÜNB orientiert sich an volkswirtschaftlichen und optimierten Markt- und Netzmodellen, die Flexibilitäten „top-down“ als verfügbar voraussetzen, was für die Dimensionierung der Querschnitte im europäischen Verbundnetz und die Erarbeitung der Vorhaben im Bundesbedarfsplangesetz als sachgerecht und richtig angesehen wird (BDEW, 2024b). Allerdings wird bemängelt, dass die Anforderungen und Planungen der einzelnen Verteilnetzbetreiber für den gesamten Planungsprozess mehr berücksichtigt werden müssen. Zudem gibt es an der Vorgehensweise der ÜNB aus Expertensicht schon seit vielen Jahren Kritik. So wird angeführt, dass der Netzausbaubedarf durch eine Kappung von Einspeisespitzen deutlich verringert werden kann, was zu geringeren Netzentgelten und damit zu niedrigeren Strompreisen führt und laut Energiewirtschaftsgesetz den Übertragungsnetzbetreibern bei der Netzausbauplanung gesetzlich vorgeschrieben ist (Jarass & Neumann, 2024). Die derzeitige Vorgehensweise würde zu einer enormen Überdimensionierung führen und die Netzentgelte unnötig erhöhen.

Alle demokratischen Parteien in Deutschland sehen die Notwendigkeit eines Stromnetzausbaus für das Gelingen der Energiewende und betonen hierbei die Rolle der Digitalisierung und der Beschleunigung von Genehmigungsverfahren. Es gibt aber einzelne Aspekte, zu denen unterschiedliche Positionen bestehen, insbesondere hinsichtlich der folgenden Fragestellungen:

- Welche Rolle können dezentrale Energiesysteme zur regionalen Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien spielen, um den notwendigen Ausbau des zentralen Übertragungssystems zu minimieren?
- Inwiefern kann durch mehr Bürgerbeteiligung und Transparenz sowie durch den Einsatz von Erdkabeln die Akzeptanz des Netzausbaus erhöht werden?
- Wie können in der Netzausbauplanung netzoptimierende Speicher, intelligente Verteilnetze und Flexibilitätspotenziale der Sektorenkopplung besser berücksichtigt werden?
- Wie können gegenüber einer stark politisch geprägten Planung, die sich an möglichen volatilen Erzeugungsspitzen orientiert, mehr marktwirtschaftliche Anreize im Netzausbau eine Rolle spielen und so zu einem möglichst kostengünstigen und effizienten Gesamtsystem führen?

Auch aus diesen Positionierungen werden zahlreiche offene Fragen der weiteren Ausgestaltung des Netzausbaus deutlich. Der bisherige Anstieg der Netzentgelte reflektiert die Integrationskosten infolge des Ausbaus der erneuerbaren Energien, die sich in den weiteren Phasen der Energiewende kontinuierlich erhöhen werden. Die geschätzten Investitionen in den Netzausbau bis 2045 liegen derzeit für das Übertragungsnetz bei 328 Milliarden, für das Verteilnetz werden nochmal 323 Milliarden genannt (Bauermann et al., 2024). Die dadurch erforderliche Erhöhung der jährlichen Investitionen in die Stromnetze von 15 auf 34 Milliarden Euro ist erheblich, erscheint aber realisierbar angesichts der Wirtschaftsleistung Deutschlands (das Bruttoinlandsprodukt im Jahr 2023 betrug laut dem Statistischen Bundesamt über 4.185 Milliarden Euro). Es werden für die Netzbetreiber jedoch erhebliche Risiken gesehen, „darunter steigende Rohstoffpreise, Engpässe bei kritischen Komponenten wie Transformatoren, dem Ausbau von erneuerbaren Energien und Flexibilitäten im Netz sowie mögliche Verzögerungen in den Genehmigungsverfahren“ (Bauermann et al., 2024). Kritische Stimmen zum Netzausbau kommen vor allem von den Umweltverbänden, die eine stärkere Berücksichtigung von ökologischen Auswirkungen in der Planung fordern und von lokalen Interessengruppen und Bürgerinitiativen, die Beeinträchtigungen durch den Netzausbau ablehnen. Der derzeit geplante Einsatz von Erdkabeln zur Vermeidung von Widerständen erhöht laut BNetzA die Kosten des Übertragungsnetzausbaus um über 35 Milliarden Euro.

3.c.6 Erhöhung des jährlichen Ausbaus von PV und Windkraft als zentrale Säulen eines klimaneutralen Energiesystems

ID	Handlungsempfehlung Netto-Null-2050 Wegweiser
III_6b	Erneuerbarer Strom wird die Primärenergie der Zukunft sein. Ein konsequenter Ausbau im europäischen Verbund ist der Schlüssel für die weitgehende Defossilisierung des Energiesystems. Für die Einhaltung des CO ₂ -Budgets müssen die Ausbaukorridore für Erneuerbare-Energie-Technologien deshalb so weit erhöht werden, dass die erneuerbaren Anteile an der Stromerzeugung bis 2035 etwa 90% und bis 2040 annähernd 100% erreichen.
III_6c	In naher Zukunft ist ein verstärkter Ausbau von Windkraft und Photovoltaik essentiell, um die grundlegende Transformation des Stromsektors und die Erzeugung von grünem Wasserstoff und anderen CO ₂ -neutralen Brennstoffen voranzutreiben. Im EEG 2023 und Windenergie-auf-See-Gesetz wurden mittlerweile sehr ambitionierte Ausbauziele festgelegt.
Reality-Check	Ein erheblicher Zubau zusätzlich installierter Leistung für eine erneuerbare Stromerzeugung in Deutschland, d.h. im zweistelligen Gigawatt-Bereich pro Jahr, ist zentral für das Erreichen des Netto-Null-Ziels. Photovoltaik und Windenergieanlagen sind in Deutschland dabei absehbar das Rückgrat einer defossilisierten Stromerzeugung und der erneuerbaren Elektrifizierung der Bedarfssektoren bis 2045. Das zentrale, technologieoffene quantitative Ziel für 2030 formuliert das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG): Bis 2030 sollen mindestens 80% des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Ende des ersten Halbjahres 2024 betrug dieser Deckungsanteil 57% (Bundesregierung, 2024b). Gleichzeitig stammten 61,5% des in Deutschland erzeugten Stroms aus erneuerbaren Primärenergiequellen. Bis 2030 sollen gemäß EEG 2023 an Gebäuden und Freiflächen Solaranlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von 215 GWp installiert sein. Das entsprechende Ziel für 2024 von 88 GW wurde dabei bereits im Mai 2024 erreicht. Mitte Dezember des Jahres wurde bereits eine gesamte installierte Nettoleistung der Photovoltaik von 96,1 GW berichtet (ISE, 2024). In einem halben Jahr konnten also ca. 8 GW Peak-Leistung errichtet werden. Für das 2030-Ziel ist ab Beginn 2025 ein weiterer Nettozubau von ca. 120 GWp zu erreichen, was gut 20 GWp pro Jahr entspricht. Diese Größenordnung konnte zumindest im Jahr 2024 in etwa realisiert werden. Eines der zentralen Vehikel, um den PV-Ausbau weiter zu beschleunigen, ist das sog. Solarpaket I. Es trat 2024 in Kraft und adressiert zahlreiche regulatorische und baurechtliche Aspekte mit dem Ziel der Vereinfachung und Ausweitung, darunter die Installation sog. Balkonkraftwerke, gemeinschaftliche Gebäudeversorgung mit PV-Strom bei Mehrfamilienhäusern, Erweiterung des Mieterstrommodells und sog. Agri-PV als eine kombinierte Nutzung von Flächen für die Landwirtschaft und die solare Stromgewinnung. Auch wenn damit bei weitem nicht alle wesentlichen Hemmnisse des PV-Ausbaus beseitigt sind, ermöglicht es die Erschließung zusätzlicher Potenziale. Durch die hohe Akzeptanz der Solarenergienutzung zur Stromerzeugung in Deutschland ist davon auszugehen, dass die Photovoltaik eine herausragende Rolle bei der Defossilisierung der Stromerzeugung in Deutschland einnehmen wird und die im EEG formulierten Ziele für 2030 bei aktuellen Rahmenbedingungen in einem realistisch erreichbaren Rahmen liegen. Für das Erreichen der EEG-Ziele von 309 GW in 2035 und 400 GW in 2040 sind Zubauraten von gut 18 GWp jährlich erforderlich, dann allerdings in einem Bereich des vorhandenen Solarpotenzials mit höherer Ausschöpfung des günstigen Flächenpotenzials und mit höheren Anforderungen an die Integration in das deutsche Stromsystem mit entsprechendem Bedarf an Stromspeicherkapazitäten und Management-Systemen. Das EEG 2023 legt auch die Ausbauziele für die Windenergie an Land (onshore) fest. Bis 2030 sollen Anlagen mit einer installierten Leistung von 115 GW errichtet sein. Dabei ist zu beachten, dass die Dekommissionierung alter Windenergieanlagen durch einen entsprechend höheren Bruttozubau zu kompensieren ist. Mitte 2024 war eine kumulierte Leistung

von 62 GW zu verzeichnen. Dabei sollten bereits Ende 2024 laut EEG-Ziel 69 GW Gesamtleistung am Netz sein. Dem nötigen weiteren Nettozubau von 7 GW in der zweiten Hälfte 2024, immerhin mehr als 10% der bestehenden installierten Onshore-Leistung, steht ein erwarteter Zubau im Jahr 2024 von 3,6 bis 4,1 GW gegenüber. Der Zubau in der 1. Jahreshälfte blieb noch hinter diesen Erwartungen zurück (WindGuard, 2024a). Dabei sind, um das EEG-Ziel für 2030 zu erreichen, von 2025 bis 2030 jährlich Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von knapp 10 GW ans Netz zu bringen. Dies sind Zubauraten, die seit 2014 auch in den zubaustärksten Jahren kaum zur Hälfte erreicht wurden (WindGuard, 2024a). Von 2019 bis 2023 lag der mittlere Zuwachs eher bei 2 GW/a, also nur ca. einem Fünftel des benötigten jährlichen Zubaus. Um die Windenergienutzung an Land, anders als bei der Solarenergienutzung an Gebäuden, wird seit Jahren eine kontroverse und teils hochgradig emotionale Debatte geführt. In diesem ohnehin bereits schwierigen Akzeptanzumfeld ist für die Zielerreichung der jährliche Zubau von Windenergieanlagen also um das Vielfache zu steigern. Mit dem vorzeitigen Aus der Ampelkoalition Ende 2024 tritt mit dieser zusätzlichen Diskontinuität in den politischen Rahmenbedingungen ein weiteres Hemmnis für die Verbesserungen der Rahmenbedingungen für den erheblich beschleunigten Windenergieausbau hinzu. Schon die Ausbauziele für 2030 scheinen somit so gut wie nicht mehr erreichbar. Die gesetzlich anvisierten mindestens 157 GW in 2035 würden einen weiteren stetigen Leistungszubau von 8 GW pro Jahr bei dadurch schrumpfenden verbleibenden Flächenpotenzialen bedeuten.

Mehr noch als die Windenergienutzung auf Landflächen ist die Offshore-Windenergie durch langfristig geplante, dezidierte Großprojekte geprägt, deren Inbetriebnahme Leistungssprünge in verhältnismäßig großen Stufen am Netz bedeutet. Die Offshore-Ausbauziele sind dementsprechend in einem eigenen Gesetz, dem Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG) geregelt, auf das das EEG verweist. Bis 2030 sollen demnach Off-Shore-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 30 GW am Netz sein. Für 2035 ist die Zielsetzung 40 GW und für 2045, dem Jahr für das Netto-Null-Ziel, 70 GW installierte Gesamtleistung auf See. Ende der ersten Hälfte 2024 waren 8,9 GW Gesamtleistung offshore in Betrieb. 377 MW speisten dabei in der ersten Jahreshälfte 2024 erstmals in das Netz ein. (WindGuard, 2024b). Entsprechend den langfristig bestehenden Planungen wird in 2025 eine Erhöhung der installierten Gesamtleistung auf ca. 11 GW erwartet. Und die aktuellen Planungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrologie (BSH) geben Anlass zu Optimismus: Demnach wird prognostiziert, dass das Mindestziel für 2035 von 40 GW mit erwarteten 50 GW Gesamtleistung sogar übertroffen wird. Voraussetzung ist, dass alle erforderlichen Flächen bezuschlagt werden und die Inbetriebnahme der Offshore-Parks zum geplanten Zeitpunkt auch tatsächlich stattfindet. Das BSH legt die entsprechenden Flächen für den Ausbau in seinem Flächenentwicklungsplan (FEP) fest. Der letzte Entwurf des FEP vom Juni 2024 umfasst Flächenfestlegungen und Netzanbindungsvorhaben bis zum Jahr 2037. Die genannten 50 GW in 2035 sind daher bereits Teil dieser Planung. Sie relativieren auch die ebenfalls darin festgestellte Erwartung, dass das gesetzliche Mindestziel von 30 GW im Jahr 2030 mit knapp 27 GW erwarteter installierter Leistung nicht vollständig realisiert wird. Um das längerfristige Ziel von 70 GW für das Jahr 2045 erreichen zu können, sind im FEP zusätzliche Flächen für Offshore-Windkraftanlagen im Umfang von mind. 9 GW auszuweisen (WindGuard, 2024b).

4. Fazit und Ausblick

Der Reality-Check adressiert verschiedene Schlüsselthemen für den Weg zur CO₂-Neutralität in Deutschland und baut dabei auf den Handlungsempfehlungen des in der ersten Phase des Projekts „Netto-Null-2050“ der Helmholtz-Klima-Initiative erarbeiteten Wegweisers auf. Der Reality-Check basiert auf Interviews mit identifizierten Praxisexpert:innen. Außerdem wurden über Kurzanalysen reale Entwicklungen mit Transformationspfaden im zielorientierten Netto-Null-2050-Szenario (Simon et al., 2022) verglichen sowie veröffentlichte Positionen von Akteur:innen wie z. B. Wissenschaftler:innen miteinbezogen.

Die durchgeführten Interviews konzentrierten sich auf fünf Hauptthemen:

- Konzentrierte Sonnenstrahlung zur Herstellung von solaren Brennstoffen
- Wiedervernässung von Mooren
- Sichere und dauerhafte Speicherung von CO₂ im Untergrund
- Wärme- und Kältebereitstellung und -speicherung
- Gasspeicherung im Untergrund oder in technischen Speichern

Die Produktion von Solarkraftstoffen ist für die Dekarbonisierung des Luft- und Seeverkehrs von großer Bedeutung, und daher muss diese Technologie beschleunigt werden, um einen Beitrag zu leisten und nicht hinter andere Produktionswege zurückzufallen. Der Bau einer 10-MW-Demonstrationsanlage bis 2030 (was als relativ optimistisch angesehen wurde) erfordert die Lösung einiger bedeutender technologischer (aber auch regulatorischer) Herausforderungen in den folgenden Jahren.

Zum Thema Wiedervernässung der Moore ist eine verbesserte Treibhausgasberichterstattung vorzuschlagen, indem Emissionsfaktoren z. B. nach biogeografischen Regionen bestimmt und z. B. alle Länder mit temperaten Mooren in die Forschung einbezogen werden. Zur Unterstützung der Moorwiedervernässung sind gesetzliche Anpassungen, finanzielle Anreize für Landwirte und eine vereinfachte Gesetzgebung erforderlich, während die Forschung durch Zusammenarbeit zwischen wissenschaftlichen Institutionen und relevanten Akteur:innen gestärkt werden sollte. Eine koordinierte Umsetzungsstrategie, einschließlich der Schaffung von „Kümmerer-Strukturen“, ist entscheidend, um die Moorschutzmaßnahmen effektiv voranzutreiben.

Für die Speicherung von CO₂ im Untergrund sind ebenfalls klare politische und rechtliche Rahmenbedingungen wie Kohlenstoffdioxidspeichergesetz und Carbon Management Strategie der erste Schritt zur Umsetzung. Um weitere Verzögerungen zu vermeiden, könnte CO₂ zunächst in Skandinavien eingespeichert werden, bis in Deutschland die Infrastruktur und Genehmigungen bereit sind. Bis 2030 sollten alle Voraussetzungen für die CO₂-Speicherung in Deutschland erfüllt und die nötigen politischen Entscheidungen getroffen sein.

Beim Thema Wärme- und Kältebereitstellung und -speicherung sind geothermische Speicher in flachen Horizonten besonders relevant für die Wärmetransformation, da sie breiter anwendbar, weniger riskant und kostengünstiger sind als tiefe Geothermie. Für den Markthochlauf sind die Entwicklung geeigneter Technologien, die Förderung von Materialien sowie die Schaffung eines genehmigungsrechtlichen Rahmens notwendig. Demonstrationsprojekte und die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft, Industrie, Politik und Kommunen sind entscheidend, um die Umsetzung voranzutreiben und die geothermischen Potenziale effizient zu nutzen.

Auch die Bestandsaufnahme und Nutzung vorhandener Infrastrukturen für Unterspeicher sowie die Entwicklung synthetischer Fuels sind wesentliche Schritte für die Speicherung erneuerbarer Energie und CO₂. Eine stabile, langfristige politische Planung ist notwendig, um Investitionen in Wasserstofftechnologien zu fördern und die entsprechenden Vorschriften anzupassen. Für den Erfolg dieser Technologien ist die Zusammenarbeit von Industrie, Wissenschaft, Politik und der Bevölkerung entscheidend, um Akzeptanz zu schaffen und die Energiewende voranzutreiben.

Als Ergebnis der Interview-gestützten, explorativen multikriteriellen Entscheidungsanalyse zur Implementierung der Handlungsempfehlungen lässt sich festhalten:

1. Durchführbarkeit von Handlungsempfehlungen: Die Durchführbarkeit der Umsetzung ausgewählter Empfehlungen wurde unter verschiedenen Gewichtungsszenarien bewertet, wobei sich herausstellte, dass spezifische Maßnahmen, wie die Transportnetzanalyse für alle Gase, als besser durchführbar angesehen wurden, wenn alle Kriterien gleich gewichtet wurden. Andere Maßnahmen, wie die Quantifizierung der Treibhausgasdynamik in wiedervernässten Mooren, zeigten eine bessere Durchführbarkeit, wenn Faktoren wie der Umsetzungsaufwand priorisiert wurden. Sekundäre Ergebnisse ergaben sich aus der Analyse der Robustheit des Umsetzungsprozesses. Zum Beispiel erforderten die CCS-Richtlinien eine umfassende Zusammenarbeit zwischen den Interessengruppen und der Gesellschaft, um durchführbar zu werden. Wenn eine solche Zusammenarbeit erreicht wird, könnte die Durchführbarkeit dieser Maßnahme erheblich steigen. Die Wasserstoffanalyse für die Speicherung und Menge sowie die Entwicklung der geothermischen Speicherung wurden ebenfalls als schwieriger eingestuft und erfordern weitere Forschung und die Einbeziehung von Interessengruppen.
2. Sensibilität der Entscheidungsfindung gegenüber Kriteriengewichtung: Die Sensibilitätsanalyse zeigte, dass die Rangfolge der Empfehlungen zwar über verschiedene Szenarien hinweg relativ stabil blieb, leichte Verschiebungen in den Präferenzen der Interessengruppen (z. B. eine stärkere Betonung des Umsetzungsaufwands) jedoch zu einer Neuordnung der am besten durchführbaren Maßnahmen führen könnten. Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, die mögliche Entwicklung der Prioritäten der Entscheidungsträger:innen und die Robustheit der vorgeschlagenen Maßnahmen zu berücksichtigen, betont aber auch die Bedeutung des Handelns.

Die Betrachtung der Entwicklungspfade im Energiesystem konzentrierten sich auf die folgenden ausgewählten Themen:

- die konsequente Minderung des Energiebedarfs und die aktuelle Energieeffizienzgesetzgebung,
- der Ausbau der Wärmeversorgung von Gebäuden über Wärmepumpen und Wärmenetze,
- die Flottenentwicklung der Batterie-, Hybrid- und Wasserstoff-Pkws,
- die Elektrifizierung und der Wasserstoffeinsatz in der Industrie,
- der Ausbau des Strom-Übertragungsnetzes und
- der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung.

Die Betrachtungen zur Effizienzentwicklung bezogen auf den End- und Primärenergieverbrauch zeigen, dass es mittlerweile gute europäische und nationale Weichenstellungen und Impulse aus der Politik gibt. Eine nachhaltige inhaltliche Gestaltung insbesondere des Gebäudeenergiegesetzes wird erst nach den vorgezogenen Bundestagswahlen durch die folgende Bundesregierung erfolgen. Insbesondere die genannten Schwerpunkte der CDU erscheinen - so sie denn trotz voraussichtlich erforderlicher Koalitionsbildung in

der tatsächlichen wirtschaftlichen und energiebezogenen Entwicklung in Deutschland umgesetzt werden - eher mit Szenarien mit verhältnismäßig geringem Rückgang des Energieverbrauchs oder sogar einem de facto Anstieg des Energieverbrauchs konsistent zu sein. Suffizienzstrategien wie in der Handlungsempfehlung I_2b und verhaltensbezogene Ansätze zur Energieeinsparung würden dann in der deutschen Politik eher keine große Rolle spielen. Die Machbarkeit eines langfristigen Netto-Null-2050 Szenarios, das den Schwerpunkt auf ambitionierte Energieeinsparziele legt (z. B. langfristig um 30% bis 45% bezogen auf den Endenergieverbrauch 2018 für alle Sektoren), dürfte unter dieser Politik schwer realisierbar sein.

In der Diskussion zur Transformation des Wärmesektors spielen der Ausbau der Wärmepumpen und der Wärmenetze die größte Rolle, wesentliche lokale Randbedingungen für deren Umsetzung werden aber erst in den kommenden Jahren durch die Kommunalen Wärmepläne gesetzt. Klar verbesserte Rahmenbedingungen, um kurzfristig einen Zubau von 500.000 Wärmepumpen pro Jahr zu erreichen, mittelfristig mindestens 100.000 Gebäude jährlich an zunehmend dekarbonisierte Wärmenetze anzuschließen und somit die Transformationsrate für eine klimaneutrale Wärmeversorgung von Gebäuden bis 2045 zu erreichen, lassen sich trotz entsprechender Initiativen derzeit nicht erkennen. Beispielsweise liegt die Erwartung von ca. 260.000 neu installierten Wärmepumpen 2025 nur bei gut der Hälfte des anvisierten kurzfristigen Zubaus.

Der Hochlauf von Elektrofahrzeugen, insbesondere von vollelektrischen Batteriefahrzeugen, konnte in den letzten Jahren nicht mit der erforderlichen Zahl an Neuzulassungen mithalten. Während das Ziel der ehemaligen Ampelkoalition bei 15 Millionen Fahrzeugen bis 2030 lag, liegt der Bestand Ende 2024 bei nicht einmal 2 Millionen BEV-Fahrzeugen. Um das Ziel doch noch zu erreichen, müssten ab Anfang 2025 die Verkaufszahlen um den Faktor 4 steigen. Das politische Ziel, und damit auch die Entwicklung in den meisten zielkonformen Szenarien, wird unter den bisherigen Randbedingungen, insbesondere nach dem Auslaufen der Kaufprämie, allgemein als nicht erreichbar gesehen, es werden aber zahlreiche zusätzliche Maßnahmen diskutiert, die eine neue Bundesregierung zeitnah angehen müsste.

Bei der Betrachtung des Industriesektors wurde im Hinblick auf politische Rahmenbedingungen und Unsicherheiten deutlich, dass trotz ambitionierter Klimaziele und Förderinstrumente wie CCfD/Klimaschutzverträge, Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) und der Wasserstoffstrategie die in Deutschland bestehenden Umsetzungsprobleme vor allem im Bürokratieaufwand, in langen Genehmigungsverfahren und politischen Unsicherheiten gesehen werden, insbesondere mit Blick auf die Bundestagswahl 2025. Aus Szenariostudien wird klar, dass die industrielle Transformation hohe Investitionen erfordert, die durch Energiepreise, globale Konkurrenz und begrenzte finanzielle Mittel der Unternehmen und des Staates erschwert werden. Instrumente wie CCfD können Abhilfe schaffen, sind aber langfristig unsicher. Grüner Wasserstoff und Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) sind zentrale Technologien, um die klimaneutrale Produktion zu erreichen. Jedoch fehlt es an Infrastruktur, ausreichender Verfügbarkeit und gesellschaftlicher Akzeptanz, während hohe Kosten die Implementierung bremsen. Zertifizierungssysteme für CO₂-Fußabdrücke und der Mechanismus CBAM könnten die Wettbewerbsfähigkeit klimafreundlicher Produkte stärken und Markttransparenz schaffen. Ohne harmonisierte Standards und Preisanreize drohen jedoch Marktverzerrungen und Carbon Leakage. Der Erfolg der Transformation hängt stark von der europäischen Zusammenarbeit (Green Deal, Fit for 55) und fairen Handelsbedingungen ab. Gleichzeitig könnten Exporte klimafreundlicher Produkte und grüne Importe strategische Vorteile schaffen.

Die Betrachtung des Ausbaus des Stromübertragungsnetzes zeigt ambitionierte Ziele u.a. im regelmäßig aktualisierten Netzentwicklungsplan und gleichzeitig enorme Verzögerungen bisheriger Projekte, die bereits zu regional hohen Redispatch-Kosten und Abregelungen insbesondere von Windkraftanlagen geführt haben. Kostenschätzungen gehen davon aus, dass sich die erforderlichen jährlichen Investitionen in Netztechnologien (Übertragungs- und Verteilnetz) aufgrund der Transformation des Stromsystems mehr

als verdoppeln müssen. Kritische Stimmen zum Netzausbau kommen vor allem von den Umweltverbänden, die eine stärkere Berücksichtigung von ökologischen Auswirkungen in der Planung fordern und von lokalen Interessengruppen und Bürgerinitiativen, die Beeinträchtigungen durch den Netzausbau ablehnen. Zudem wird das Verfahren der Ermittlung des Netzausbaus kritisiert, weil Flexibilitätspotenziale durch Sektorkopplungen und die zukünftige Wasserstoffinfrastruktur sowie die Möglichkeit der Spitzenkappung nicht oder nicht ausreichend Berücksichtigung finden. Aufgrund der in der Regel erheblichen Eingriffe in Landschaft und Natur und der Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung sowie der steigenden Kosten und Finanzierungsprobleme ist eine grundsätzliche Entspannung beim Thema Netzausbau jedoch nicht in Sicht. Bislang konnte nur ein Bruchteil der bis 2045 erforderlichen neuen Stromleitungen im Übertragungsnetz realisiert werden.

Der Ausbau der Photovoltaik und Windenergieanlagen, die in Deutschland das Rückgrat einer defossilisierten Stromerzeugung darstellen, hinkt in den letzten Jahren größtenteils einem zielkonformen Ausbaukorridor hinterher. Im Jahr 2024 konnte zumindest der PV-Ausbau die erforderliche Größenordnung erreichen, jedoch bestehen bei der Windenergie an Land teils erhebliche Akzeptanzprobleme und der Zubau lag in den letzten Jahren im Schnitt nur bei einem Fünftel der erforderlichen Leistung. Die ambitionierten Offshore-Ausbauziele könnten bis 2030 zumindest in der Größenordnung knapp erreicht werden, für das Erreichen des längerfristigen Ziels müssen aber noch zusätzliche Meeresflächen festgelegt und Netzanbindungsvorhaben geplant werden.

Das Hauptaugenmerk der Autor:innen liegt darauf, zu zeigen, wie man effektiv einen Reality-Check und eine iterative Feedbackschleife konzipieren und einsetzen kann, um die Wirksamkeit und Implementierbarkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen zu verbessern und gleichzeitig ein breiteres Spektrum von Interessengruppen in die Diskussion einzubeziehen. Es ist wichtig zu betonen, dass der Hauptzweck dieses Berichts darin besteht, eine Methodik zu entwickeln und zu testen. Daher wäre es notwendig, eine größere Anzahl von Interviews mit differenzierten Interessengruppen durchzuführen, um einen umfassenden Kontext für jede Handlungsempfehlung zu schaffen. Angesichts der großen Anzahl von Empfehlungen im Net-Zero-2050 Wegweiser ging ein solches Unterfangen über den Rahmen dieses Berichts hinaus.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Reality-Check-Bericht den Wert der wiederholten Einbindung von Akteur:innen und des Feedbacks bei der Verfeinerung und Umsetzung von Handlungsempfehlungen im Leitfaden „Net-Zero-2050“ hervorhebt. Durch die Konzentration auf die Entwicklung einer soliden Methodik legt der Bericht den Grundstein für zukünftige Bemühungen, die Einbindung von Interessengruppen zu vertiefen und umsetzbare, kontextbezogene Empfehlungen sicherzustellen. Dieser iterative Ansatz ist entscheidend, um die Lücke zwischen hochrangigen politischen Richtlinien und umsetzbaren Maßnahmen zu schließen, die Zusammenarbeit zu fördern und den Fortschritt bei der Erreichung der Netto-Null-Ziele zu beschleunigen.

5. Abkürzungsverzeichnis

BECCS	Bioenergy with Carbon Dioxide Capture and Storage (Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)
BEV	Battery Electric Vehicle (Elektroauto)
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage
CCU	Carbon Dioxide Capture and Utilization
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage
CH ₄	Methan (Kohlen-Tetrahydrid)
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ äq	Kohlendioxid-Äquivalent
CO ₂ -Neutralität	Ein Ansatz zur Balance zwischen CO ₂ -Quellen und -Senken
°C	Grad Celsius
EU	Europäische Union
EU-ETS	European Union Emissions Trading System

Netto-Null-2050 Reality-Check strategischer Handlungsempfehlungen

Gt Gigatonnen

H₂ Wasserstoff (Hydrogen)

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)

Mt Megatonnen

MW Megawatt

PJ Petajoule

PV Photovoltaik

UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen)

Literatur

ADAC (2024). Umweltbonus: Plötzliches Aus für die Förderung von E-Autos. ADAC, 11.01.2024, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/foerderung-elektroautos/>

Agora (2024). Klimaneutrales Deutschland. <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-studie#downloads>

Agora Verkehrswende (2024). Letzte Chance für 15 Millionen E-Autos bis 2030. Wie eine schnelle Transformation zur Elektromobilität in Deutschland noch gelingen kann und warum die Einbindung chinesischer Automobilhersteller dabei eine wichtige Rolle spielt (Langfassung). https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2024/15-Millionen-Ziel-China_mit-BCG/118_BCG-Studie_Elektroautos_Langfassung.pdf

ArcelorMittal (2024). XCarb®: towards net zero steel. <https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/xcarb>

BASF (2024). Keynote Präsentation DecarbConnectEU 2024: Carbon accounting & sustainable transformation, <https://decarbconnecteurope.com/wp-content/uploads/2024/06/Keynote-BASF-Carbon-Accounting-Presentation.pdf>

Bauermann, T., Kaczmarczyk, P., Krebs, T. (2024). Ausbau der Stromnetze: Investitionsbedarfe. IMK Study, Düsseldorf, https://www.imk-boeckler.de/fpdf/HBS-009011/p_imk_study_97_2024.pdf

Baležentis, T., & Streimikiene, D. (2017). Multi-criteria ranking of energy generation scenarios with Monte Carlo simulation. Applied energy, 185, 862-871. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.085>

BDEW (2024a). Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW aktualisiert Deutschlandkarte Wasserstoff und Biogas. 13.12.2024. <https://www.bdew.de/energie/bdew-aktualisiert-die-deutschlandkarte-wasserstoff-und-biogas/>

BDEW (2024b). Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Stellungnahme zum Entwurf des Szenariorahmens für den Netzentwicklungsplan Strom 2025. https://www.bdew.de/media/documents/20240930_BDEW-StN_Szenariorahmen-Strom2025_final.pdf

BDEW und VKU (2024). BDEW und VKU: Entwurf mit eindeutiger Schieflage - AVBFernwärmeV sollte in dieser Form nicht verabschiedet werden. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 05.12.2024. <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/entwurf-mit-eindeutiger-schieflage-avbfernwaermev-sollte-in-dieser-form-nicht-verabschiedet-werden/> (abgerufen am 17.12.2024)

BDH (2024). Heizungsabsatz: Wärmewende aktuell nicht auf Kurs. Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie. 29.07.2024. <https://www.bdh-industrie.de/presse/pressemeldungen/artikel/heizungsabsatz-waermewende-aktuell-nicht-auf-kurs> (abgerufen am 17.12.2024)

BDI (2022). Carbon Contracts for Difference: Was sind Klimaschutzverträge?. <https://bdi.eu/artikel/news/carbon-contracts-for-difference-was-sind-klimaschutzvertraege>

BDI (2024a). Transformationspfade für das Industrieland Deutschland | Langfassung. <https://bdi.eu/artikel/news/transformationenpfade-fuer-das-industrieland-deutschland-studie-langfassung>

BDI (2024b). Implementierung des CO₂-Grenzausgleichsmechanismus. <https://bdi.eu/publikation/news/implementierung-des-co2-grenzausgleichsmechanismus>

Bhatia, P. & Ranganathan, J. (2004). The Greenhouse Gas Protocol, <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>

Bilici, S., Holtz, G., Jülich, A., König, R., Li, Z., Trollip, H., Mc Call, B., Tönjes, A., Sudharma Vishwanathan, S., Zelt, O., Lechtenböhmer, S., Kronshage, S., Meurer, A. (2024). Global trade of green iron as a game changer for a near-zero global steel industry? - A scenario-based assessment of regionalized impacts, Energy and Climate Change, Volume 5, 100161, <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100161>

BMWK (2023). Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Downloads/Fortschreibung.pdf?__blob=publicationFile&v=4

BMWK, 8KU, AGFW, BDEW, BEE, Bundesverband Fernwärmeleitungen, B.KWK, BMWSB, BSW, Bundesverband Geothermie, BVES, BWP, DENEFF EDL_HUB, DGRV, DMB, Deutscher Städtetag, DGB, DUH, eco Verband, GdW, Rohrleitungsbauverband, Städte und Gemeindebund, VEDEC, ver.di, VKU, vzbv, ZIA. (2023). Mehr Tempo bei der Transformation der Wärmeversorgung, Wärmenetze klimaneutral um- und ausbauen. Erklärung Fernwärme-Gipfel. 12.06.2023. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0612-erklaerung-fernwaeme-gipfel.pdf?__blob=publicationFile&v=10 (abgerufen am 17.12.2024)

BMWK (2024a). Evaluation der „Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)“ - Abschlussbericht (Förderzeitraum: 2016-2023, gesamter Förderzeitraum). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und Technopolis Deutschland GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/evaluation-der-richtlinie-zur-foerderung-des-absatzes-von-elektrisch-betriebenen-fahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile&v=4

BMWK (2024b). Richtlinie zur Förderung von klimaneutralen Produktionsverfahren in der Industrie durch Klimaschutzverträge. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/foerderrichtlinie-klimaschutzvertraege-fri-ksv.pdf?__blob=publicationFile&v=6

BMWK (2024c). Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/importstrategie-wasserstoff.pdf?__blob=publicationFile&v=18

BMWK (2024d). Habeck überreicht Klimaschutzverträge. https://www.klimaschutzvertraege.info/news/habeck_ueberreicht_klimaschutzvertraege

BMWK (2024e). Grünes Licht für Grünen Stahl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/02/20240223-gruenes-licht-fuer-gruenen-stahl.html>

BMWK (2024f). Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-eines-gesetzes-zur-aenderung-des-kohlendioxid-speicherungs-gesetzes.pdf?__blob=publicationFile&v=2

BMWK (2024g). Die Systementwicklungsstrategie: Ein Rahmen für die Transformation zum klimaneutralen Energiesystem. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/ses.html>

BNetzA (2024a). Bundesnetzagentur. Liste der Ladesäulen (Stand Ende Nov. 2024). https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/E_Mobilitaet/Ladesaeulenregister_SEP.xlsx

BNetzA (2024b). Bundesnetzagentur (BNetzA). Stand der Genehmigungsverfahren der Bundesnetzagentur. Letzte Aktualisierung 28.11.2024. <https://www.netzausbau.de/Vorhaben/uebersicht/prognose/de.html>

BNetzA (2024c). Bundesnetzagentur (BNetzA). Monitoringbericht. <https://www.netzausbau.de/Vorhaben/uebersicht/report/de.html>

BNetzA (2024d). Bundesnetzagentur (BNetzA). Energiemarkt aktuell. Netzengpassmanagement im Jahr 2023. SMARD – Strommarktdaten für Deutschland, 17.05.2024. <https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/213590>

Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). Note—A preference ranking organisation method. *Management Science*, 31(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>

Braun, C. (2017). Not in My Backyard: CCS Sites and Public Perception of CCS. <https://doi.org/10.1111/risa.12793>

BUND (2021). Nachhaltige Urbane Mobilitätswende bis 2030: Forderungen an die Bundesregierung. Stand 3. Juni 2021. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND). https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/mobilitaet/Verkehr_Urbane_Mobilita__tswende_2030_BUND-Handlungskonzept.pdf

Bundesregierung (2023). Umweltbonus läuft aus. Schwerpunkte der Bundesregierung 18. Dezember 2023 <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte-der-bundesregierung/nachhaltigkeitspolitik/faq-umweltbonus-1993830>

Bundesregierung (2024a). Mehr Tempo für Deutschland. So sorgen wir für mehr Strom aus Wind und Sonne. 24. Juli 2024. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/erneuerbare-netzausbau-2194562>

Bundesregierung (2024b). So läuft der Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. 13.09.2024. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/ausbau-erneuerbare-energien-2225808> (aufgerufen am 17.12.2024)

Callo-Concha, D. (2018). Farmer perceptions and climate change adaptation in the West Africa Sudan savannah: Reality check in Dassari, Benin, and Dano, Burkina Faso. *Climate*, 6(2), 44.

CDU (2024). In Freiheit leben, Deutschland sicher in die Zukunft führen. Grundsatzprogramm der CDU Deutschlands. Christlich Demokratische Union Deutschlands. 07.05.2024. https://www.grundsatzprogramm-cdu.de/sites/www.grundsatzprogramm-cdu.de/files/downloads/240507_cdu_gsp_2024_beschluss_parteitag_final_1.pdf (abgerufen am 17.12.2024)

Cembureau (2024). CEMBUREAU's Net Zero Roadmap, <https://cembureau.eu/library/reports/cembureau-s-net-zero-roadmap/>

CEMEX (2023). Dekarbonisierungsstrategie der CEMEX, https://landesvertretung-brandenburg.de/wp-content/uploads/20230322CCS_MorningLounge_Cemex.pdf

DIN (2018). DIN EN ISO 14067 Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO 14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14067:2018, <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nagus/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:289443505>

DIP (2012). Gesetz zur Demonstration und Anwendung von Technologien zur Abscheidung, zum Transport und zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid, <https://dip.bundestag.de/vorgang/gesetz-zur-demonstration-und-anwendung-von-technologien-zur-abscheidung-zum/35126>

EKM (2023). Expertenbeirat Klimaschutz in der Mobilität (EKM). Den Hochlauf der Elektromobilität stärken: Instrumente zur Erreichung des 15 Millionen-Ziels. Policy Brief herausgegeben vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), November 2023, <https://expertenbeirat-klimamobilitaet.de/>

EMBER (2024). European electricity prices and costs, <https://ember-energy.org/data/european-electricity-prices-and-costs/>

Epico (2024). Ironing out the Transformation of EU Steelmaking: Actionable Pathways for Climate Neutrality, <https://epico.org/de/ironing-out-the-transformation-of-eu-steelmaking-actionable-pathways-for-climate-neutrality>

Eurofer (2024). Low-CO2 emissions projects in the EU steel industry, <https://www.eurofer.eu/issues/climate-and-energy/maps-of-key-low-carbon-steel-projects>

Europäischer Rat (2024). „Fit für 55“: Wie will die EU Emissionen außerhalb der EU angehen?, <https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-cbam-carbon-border-adjustment-mechanism/>

European Commission (2020). Long-term low greenhouse gas emission development strategy of the European Union and its Member States, <https://unfccc.int/documents/210328>

European Commission (2021). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a carbon border adjustment mechanism, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0564>

European Commission (2024a). The Green Deal Industrial Plan: Putting Europe's net-zero industry in the lead. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_en

European Commission (2024b). European Platform on LCA | EPLCA: Environmental Footprint. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>

European Parliament (2024). Fit for 55 package. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733513/EPRS_BRI\(2022\)733513_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733513/EPRS_BRI(2022)733513_EN.pdf)

Eversberg, D., Holz, J., & Pungas, L. (2023). The bioeconomy and its untenable growth promises: Reality checks from research. *Sustainability Science*, 18(2), 569-582

Gnann, T., Speth, D., Krail, M., Wietschel, M. (2024a). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - T45-Szenarien - Modul Verkehr. Karlsruhe, 15.10.2024, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Verkehr_V2_0_barrierefrei.pdf

Gnann, T., Speth, D., Krail, M., Wietschel, M. (2024b). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - O45-Szenarien - Modul Verkehr. Karlsruhe, 15.10.2024, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_Verkehr_Bericht.pdf

Goettsch, K. L. (2016). Working with global virtual teams: A case study reality check on intercultural communication best practices. *Global Advances in Business Communication*, 5(1), 3

Grajewski, M. (2024) pysmaa. <https://github.com/mgrajewski/pysmaa>.

Greifswald Mire Centre (2020). Wetlands International and National University of Ireland, Galway (NUI), Peatlands in the EU. Common Agricultural Policy (CAP) after 2020. Position Paper, https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere_Briefings/202003_CAP%20Policy%20Brief%20Peatlands%20in%20the%20new%20EU%20Version%204.8.pdf (Aufruf am: 01.07.2023)

Handelsblatt (2024). Die Zukunft der Industrie: Ein Zukunftsplan für Deutschland. <https://veranstaltungen.handelsblatt.com/journal/industrie-4-0-download/>

Hanke, S. (2024). Stahlkocher legen Transformation auf Eis. <https://background.tagesspiegel.de/energie-und-klima/briefing/stahlkocher-legen-transformation-auf-eis>

HOLCIM (2023a). 2023 Climate Report. <https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2024-04/28022024-holcim-climate-report-2023.pdf>

HOLCIM (2023b). Grüne Energie für die Baustoffwende. <https://www.holcim.de/gruene-energie-fuer-die-baustoffwende>

HOLCIM (2024a). Building better with less. <https://www.holcim.com/what-we-do/decarbonizing-building/building-better-with-less>

HOLCIM (2024b). Keynote Präsentation DecarbConnectEU 2024: Climate turnaround also means a turnaround in building materials. <https://decarbconnecteurope.com/wp-content/uploads/2024/06/Keynote-Holcim.pdf>

Ibáñez-Forés, V., Bovea, M. D., & Pérez-Belis, V. (2014). A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective. *Journal of Cleaner Production*, 70, 259-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.082>

IEA (2024). Definitions for Near-Zero and Low-Emissions Steel and Cement, and Underlying Emissions Measurement Methodologies. <https://www.iea.org/reports/definitions-for-near-zero-and-low-emissions-steel-and-cement-and-underlying-emissions-measurement-methodologies>

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 2391 ff. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

ISE (2024). Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland 2024. Energy-Charts. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. 16.12.2024. https://energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm?l=de&c=DE (abgerufen am 17.12.2024)

IWR (2024). Wärmepumpenmarkt 2024 stark rückläufig: Bundesverband fordert gezielte Impulse beim Strompreis. Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien. 21.11.2024. <https://www.iwr.de/news/waermepumpen-markt-2024-stark-ruecklaeufig-bundesverband-fordert-gezielte-impulse-beim-strompreis-news38941> (abgerufen am 17.12.2024)

Jacob, D., El Zohbi, J., Köhnke, F., Abetz, V., Baetcke, L., Ball, C., Bauer, F., Beck, S., Berkel, M., Blome, T., Borchers, M., Brinkmann, T., Bruhn, D., Chi, Y., Dahmen, N., Dittmeyer, R., Dolch, T., Dold, C., Dornheim, M., Fogel, S., Förster, J., Fuchs, S., Gardian, H., Gawel, E., Görl, K., Groth, M., Hamedimastana-bad, H., Hampel, U., Harpprecht, C., Herbst, M., Heß, D., Kalhori, A., Kiendler-Scharr, A., Klassen, T., Koop-Jakobsen, K., Korte, K., Kuckshinrichs, W., Li, Z., Markus, T., Mayer, M., Mengis, N., Monnerie, N., O Corcora, T., Oschlies, A., Pardo Perez, L.C., Prats Salvado, E., Pregger, T., Preuschmann, S., Rau, B., Rechid, D., Reusch, T., Rho-den, I., Riehm, J., Roeb, M., Rolletter,

M., Sachs, T., Sattler, C., Sauer, J., Schaller, R., Schätzler, K., Schill, E., Schmidt-Hattenberger, C., Schultz, M., Simon, S., Steiner, U., Steuri, B., Stevenson, A., Sun, J., Thoni, T., Thrän, D., Unger, S., Vögele, S., Waczowicz, S., Weihermüller, L., Xiao, M., Yeates, C., Zwickel, P. (2023). Netto-Null-2050 Wegweiser - Strategische Handlungsempfehlungen und mögliche Wege für ein CO₂-neutrales Deutschland bis 2050.

Jarass L. J. und Neumann W. (2024). Der Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045 steht im Widerspruch zum Energiewirtschaftsgesetz. EWeRK 1/2024, Jahrgang 24, Seiten 1-27. <https://www.jarass.com/der-netzentwicklungsplan-strom-2037-2045-steht-im-widerspruch-zum-energiewirtschaftsgesetz/>

Katanich, D. (2024). Thyssenkrupp is revisiting its ambitious plan to produce green steel at its Duisburg site due to escalating costs. The German government has spent billions of Euros subsidising the project. <https://www.euronews.com/business/2024/10/07/german-steel-company-thyssenkrupp-may-rethink-plans-for-green-steel>

Katsagounos, I., Thomakos, D. D., Litsiou, K., & Nikolopoulos, K. (2021). Superforecasting reality check: Evidence from a small pool of experts and expedited identification. *European journal of operational research*, 289(1), 107-117

KBA (2023). Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern - Monatsergebnisse Dezember 2022. FZ 8. https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ8/fz8_202212.pdf?__blob=publicationFile&v=7

KBA (2024a). Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern - Monatsergebnisse Dezember 2023. FZ 8. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monatl_neuzulassungen_node.html

KBA (2024b). Neuzulassungen von Personenkraftwagen (Pkw) im Jahresverlauf 2024 nach Marken und alternativen Antrieben. Pressemitteilung Nr. 39/2024. Ausgabejahr 2024, Datum 15.11.2024. https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/AlternativeAntriebe/2024/pm39_2024_Antriebe_10_24_komplett.html

KBA (2024c). Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2024 gegenüber dem 1. Januar 2023. Zentrales Fahrzeugregister (ZFZR). https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html

KEI (2022). CO₂-intensive Zementherstellung. <https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/branchen/zementindustrie>

Koebisch, F., Gottschalk, P., Beyer, F., Wille, C., Jurasinski, G. & Sachs, T. (2020). The impact of occasional drought periods on vegetation spread and greenhouse gas exchange in rewetted fens. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 375, 20190685. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0685>

Lima, M. G. B., Visseren-Hamakers, I. J., Braña-Varela, J., Gupta, A. (2017). A reality check on the landscape approach to REDD+: Lessons from Latin America. *Forest Policy and Economics*, 78, 10-20.

Mareschal, B., & Brans, J. P. (1988). Geometrical representations for MCDA. *European journal of operational research*, 34(1), 69-77. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90456-0](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90456-0)

McKinsey (2023). Waste not: Unlocking the potential of waste heat recovery. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/waste-not-unlocking-the-potential-of-waste-heat-recovery>

Mengis, N., Kalhori, A., Simon, S., Harpprecht, C., Baetcke, L., Prats-Salvado, E., Schmidt-Hattenberger, C., Stevenson, A., Dold, C., El Zohbi, J., Borchers, M., Thrän, D., Korte, K., Gawel, E., Dolch, T., Heß, D., Yeates, C., Thoni, T., Markus, T., ... Dittmeyer, R. (2022). Net-zero CO2 Germany – A retrospect from the year 2050. *EarthsFuture*, 10, e2021EF002324. <https://doi.org/10.1029/2021EF002324>

Möring-Martínez, G., Senzeybek, M., Jochem, P. (2024). Clustering the European Union electric vehicle markets: A scenario analysis until 2035. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 135, 2024, 104372. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104372>

Orcan (2024). Orcan Energy: Wir machen aus Abwärme sauberen Strom. <https://www.orcan-energy.com/de/>

Port of Antwerp bruges (2024). Antwerp@C. <https://www.portofantwerpbruges.com/en/our-port/climate-and-energy-transition/antwerpc>

SalzgitterAG (2024). SALCOS. <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/>

Simon, S., Xiao, M., Harpprecht, C., Sasanpour, S., Gardian, H. & Pregger T. (2022). A Pathway for the German Energy Sector Compatible with a 1.5 °C Carbon Budget. *Sustainability*, 14(2), 1025. <https://doi.org/10.3390/su14021025>

Steuer, H. (2021). Warum E-Autos in Norwegen so populär sind. *Handelsblatt* 21.01.2021, online, <https://www.handelsblatt.com/politik/international/elektromobilitaet-warum-e-autos-in-norwegen-so-populaer-sind/26830672.html>

Strom-Report (2024). Strompreise Europa: Was Strom in der EU kostet. <https://strom-report.com/strompreise-europa/>

Tanneberger, F., Birr, F., Couwenberg, J., Kaiser, M., Luthardt, V., Nerger, M., Pfister, S., Oppermann, R., Zeitz, J., Beyer, C., van der Linden, S., Wichtmann, W. & Närmann, F. (2022). Saving soil carbon, greenhouse gas emissions, biodiversity and the economy: paludiculture as sustainable land use option in German fen peatlands. *Reg Environ Change* 22, 69. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01900-8>

TFS (2024). The Product Carbon Footprint Guideline for the Chemical Industry. https://www.tfs-initiative.com/app/uploads/2024/03/TfS_PCF_guidelines_2024_EN_pages-low.pdf

Netto-Null-2050 Reality-Check strategischer Handlungsempfehlungen

Tholen, L. & Kiyar, D. (2020). AG Industrie - Input- / Hintergrund-Papier CO₂-Fußabdruck. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/roadmap-2045-inputapier-co2-fussabdruck-ag-industrie.pdf?__blob=publicationFile&v=8

thyssenkrupp (2024). tkH2Steel®: mit Wasserstoff zur klimaneutralen Stahlproduktion. <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/klimastrategie/klimastrategie.html>

TYNDP (2024). Ten-Year Network Development Plan. <https://tyndp.entsoe.eu/>

UBA (2023a). Projektionsbericht 2023 für Deutschland. CLIMATE CHANGE 39/2023. Umweltbundesamt. Dessau. Dezember 2023. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_12_23.pdf (abgerufen am 19.12.2024)

UBA (2023b). Zwischenbericht Anreize zur Förderung eines nachhaltigen Mobilitätsverhaltens Stand der Forschung zu Wirkung und Einsatzmöglichkeiten materieller, immaterieller und spielerischer Anreize. UBA Texte 03/2024, Forschungskennzahl 3722 58 101 0 FB001276. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_06_2023_texte_91_2023_abschlussbericht_mobilitaetslabor.pdf

UBA (2023c). Der EU-Emissionshandel wird umfassend reformiert. [https://www.umweltbundesamt.de/themen/der-eu-emissionshandel-wird-umfassend-reformiert#:~:text=anklicken%20Mit%20der%20j%C3%BCngsten%20Reform,fit%2Dfor%2D55%E2%80%9C.&text=Der%20Europ%C3%A4ische%20Emissionshandel%20\(EU%20ETS,Prozent%20gegen%C3%BCber%201990%20zu%20mindern.](https://www.umweltbundesamt.de/themen/der-eu-emissionshandel-wird-umfassend-reformiert#:~:text=anklicken%20Mit%20der%20j%C3%BCngsten%20Reform,fit%2Dfor%2D55%E2%80%9C.&text=Der%20Europ%C3%A4ische%20Emissionshandel%20(EU%20ETS,Prozent%20gegen%C3%BCber%201990%20zu%20mindern.)

ÜNB (2024). Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045, Version 2025 Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH. Stand Juni 2024. https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2024-07/Szenariorahmenentwurf_NEP2037_2025.pdf

UNFCCC (2015). The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (Aufruf am: 01.08.2023)

VDZ (2024). Anforderungen an eine CO₂-Infrastruktur in Deutschland – Voraussetzungen für Klimaneutralität in den Sektoren Zement, Kalk und Abfallverbrennung. https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_CO2-Infrastruktur-Deutschland.pdf

Verpoort, P.C., Ueckerdt, F., Beck, Y., Bietenholz, D., Dertinger, A., Fleiter, T., Grimm, A., Luderer, G., Neuwirth, M., Odenweller, A., Sach, T., Schimmel, M., Sievers L. (2024). Transformation der energieintensiven Industrie. Wettbewerbsfähigkeit durch strukturelle Anpassung und grüne Importe. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. <https://doi.org/10.48485/pik.2024.019>

Vögele, S., Josyabhatla, V. T., Ball, C., Rhoden, I., Grajewski, M., Rübhelke, D., & Kuckshinrichs, W. (2023). Robust assessment of energy scenarios from stakeholders' perspectives. Energy, 282, 128326. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128326>

Von der Leyen (2024). Politische Leitlinien für die nächste Europäische Kommission 2024-2029. Ursula von der Leyen. Straßburg. 18. Juli 2024

WV Stahl (2021). Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2021_RZ_Web_neu.pdf

WV Stahl (2024a). Konjunktur-informationen. <https://www.wvstahl.de/stahlstandort-deutschland/konjunkturinformationen/>

WV Stahl (2024b). Statement: Gespräch der Stahlbranche mit Bundeskanzler Olaf Scholz. https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/20241209_Statement_Termin_Kanzleramt.pdf

WindGuard (2024a). Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland. Erstes Halbjahr 2024. Deutsche WindGuard GmbH. Varel. 18.07.2024

WindGuard (2024b). Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland. Erstes Halbjahr 2024. Deutsche WindGuard GmbH. Varel. 15.07.2024

wire (2024). Von Grau zu Grün – Herausforderungen für den europäischen Stahlmarkt.

https://www.wire.de/de/Media_News/News/Themen/Von_Grau_zu_Gr%C3%BCn_%E2%80%93_Herausforderungen_f%C3%BCr_den_europ%C3%A4ischen_Stahlmarkt#:~:text=Die%20%C3%9Cberkapazit%C3%A4ten%20resultieren%20aus%20steigenden,Indonesien%2C%20Malaysia%20und%20Vietnam%20versch%C3%A4rft.

Wuppertal Institut (2023). Akzeptanz von industriellem CCS in Nordrhein-Westfalen – Empfehlungen für Politik und Industrie. https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/publications/In_Brief_2023-11.pdf

ZEIT Online (2024). Thyssenkrupp-Stahl will 11.000 Stellen abbauen. <https://www.zeit.de/arbeit/2024-11/stahlbranche-stellen-abbau-thyssenkrupp>