



STRUKTURWANDEL: Kohlenstoffbasierte Industrien in Mitteldeutschland auf dem Weg in neue Märkte

**– Wirtschaftliche Ausgangslage und
Entwicklungspotentiale**





Basisstudie im Rahmen des STARK-Projekts unter dem Titel: **„Strukturwandel: Kohlenstoffbasierte Industrien in Mitteldeutschland auf dem Weg in neue Märkte - Wirtschaftliche Ausgangslage und Entwicklungspotentiale“**. Die Studie ist in Zusammenarbeit mit dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH und dem Unternehmensberater Arvid Friebe durchgeführt worden. Auftraggeber ist der Forum Rathenau e.V. Der Verein wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Bibliographische Angaben:

Herausgeber: Forum Rathenau e.V.
Veröffentlicht: Erstveröffentlichung (Version 1.0): 18.03.2025
Überarbeitete Fassung (Version 2.0): 17.07.2025
Autor*innen: Christoph Zeiss, Dr. Jan Bitter-Krahe, Maximilian Hoffmann Wuppertal Institut;
Projektteam: Dr. Kerstin Schmidt, Melanie Bitzer, Madita Flohe, Lilli Isabell Förster,
Helena Tiare Herre, Ludmilla Martens, Thies Schröder
Kontakt: info@forum-rathenau.de
Webseite: www.forum-rathenau.de

Impressum:

Forum Rathenau e.V. (Hrsg.)
Andresenstraße 1A
06766 Bitterfeld-Wolfen
Tel.: 03494/6579210

TEILBERICHT V



Perspektiven der Kreislaufwirtschaft im Kontext einer Kohlenstoffwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

5.1 Einführung: Kreislaufwirtschaft in der Kohlenstoffwirtschaft	5
5.2 Studienauftrag für den Teilbericht V.....	5
5.3 Methodik und Systemgrenzen	5
5.4 Stand der Forschung und Kernaussagen.....	6
5.4.1 Kohlenstoff- und Kreislaufwirtschaft als Zwillingskonzepte	6
5.4.2 Interdisziplinäre Anforderungen an eine zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft	7
5.4.3 Nutzbarmachung von Kohlenstoff-Abfallströmen	7
5.4.4 Bewertung der Rolle von CCS in der Kreislaufwirtschaft	8
5.5 Systematische Diskussion relevanter Strategien.....	9
5.5.1 Strategien zur Reduktion des Kohlenstoffbedarfs	10
5.5.2 Strategien zur Verlängerung der Nutzungsdauer.....	11
5.5.3 Strategien zur Rückführung und Wiederverwertung.....	12
5.5.4 Geschäftsmodelle für zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft	13
5.5.5 Regionale Empfehlungen für das Mitteldeutsche Revier.....	14
5.6 Zusammenfassung und Fazit	17
5.7 Literatur	19
Anhang: Workshop-Konzept Zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft	21
Abbildungsverzeichnis	25

5.1 Einführung: Kreislaufwirtschaft in der Kohlenstoffwirtschaft

Im Kontext einer Kohlenstoffwirtschaft im Mitteldeutschen Revier spielen Kohlenstoff-Kreisläufe eine zentrale Rolle. Gerade vor dem Hintergrund des EU Green Deal (Europäische Kommission, 2021) und der damit angestrebten ressourcenleichten und klimaneutralen Industrie, dem Circular Economy Action Plan der EU (Europäische Kommission, 2020) und der im Dezember 2024 verabschiedeten Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie der Bundesrepublik Deutschland (BMUV, 2024) sowie weiteren nationalen und internationalen politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklungen wird die Notwendigkeit zur Transformation in Richtung einer ganzheitlich gedachten Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) besonders deutlich. Insbesondere unter Betrachtung von Kohlenstoff als Ressource (Rohstoff/Grundstoff) im Sinne der Kohlenstoffwirtschaft wird dabei der Querbezug der beiden Themenfelder offensichtlich.

5.2 Studienauftrag für den Teilbericht V

Im Kontext einer Kohlenstoffwirtschaft im Mitteldeutschen Revier spielen Kohlenstoff-Kreisläufe eine zentrale Rolle. Ziel dieses Teilberichtes ist die konzeptionelle Verknüpfung der beiden Themenfelder Kohlenstoffwirtschaft und Kreislaufwirtschaft auf Basis der Erkenntnisse der Teilberichte zu den Akteuren der Kohlenstoffwirtschaft im Mitteldeutschen Revier sowie zu den Kohlenstoffkreisläufen. Ergänzend wurden vorliegende Arbeiten des Wuppertal Instituts zum Thema Kreislaufwirtschaft (u. a. im Zukunftslabor Zirkuläre Wertschöpfung im Projekt In4climate. NRW im Rheinischen Revier) integriert.

Der Teilbericht, der im Rahmen des Projekts „Strukturwandel – Kohlenstoffbasierte Industrien in Mitteldeutschland auf dem Weg in neue Märkte – Wirtschaftliche Ausgangslage und Entwicklungspotentiale“ durchgeführt wurde, soll die konzeptionelle Verknüpfung der beiden Themenfelder „Kohlenstoffwirtschaft“ und „Kreislaufwirtschaft“ auf Basis einer umfassenden Literaturanalyse, bisherigen Projektergebnissen sowie vorliegender Arbeiten des Wuppertal Instituts zum Thema Kreislaufwirtschaft aufzeigen. Da eine vollumfängliche Analyse der möglichen Schnittstellen zwischen Kreislaufwirtschaft und Kohlenstoffwirtschaft im Mitteldeutschen Revier - inklusive der dafür notwendigen Analyse und Einbindung der relevanten Akteur*innen - über den Umfang des Projektes hinausgehen würde, münden die durchgeführten konzeptionellen Arbeiten insbesondere in der Zusammenfassung der zentralen Erkenntnisse der Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Berichts sowie der Konzeption eines (cross-sektoralen) Stakeholder-Workshops, der die Diskussion in der Region sowie die Transformation hin zu einer Kohlenstoff-Kreislaufwirtschaft anstoßen kann.

5.3 Methodik und Systemgrenzen

Ziel der vorliegenden explorativen Analyse, die im Rahmen des Projekts „Strukturwandel – Kohlenstoffbasierte Industrien in Mitteldeutschland auf dem Weg in neue Märkte – Wirtschaftliche Ausgangslage und Entwicklungspotentiale“ durchgeführt wurde, war die konzeptionelle

Verknüpfung der beiden Themenfelder „Kohlenstoffwirtschaft“ und „Kreislaufwirtschaft“ auf Basis einer umfassenden Literaturanalyse, bisherigen Projektergebnissen sowie vorliegender Arbeiten des Wuppertal Instituts zum Thema Kreislaufwirtschaft.

Der Bericht gliedert sich wie folgt: Zunächst wird der aktuelle Stand der Forschung zur konzeptionellen Verknüpfung von Kohlenstoff- und Kreislaufwirtschaft aufgearbeitet (siehe Kapitel 5.4). Die Ergebnisse der Literaturanalyse werden im Folgenden diskutiert und mit weiteren Projektergebnissen bzw. Erkenntnissen in Bezug auf das Mitteldeutsche Revier sowie Vorarbeiten des Wuppertal Instituts in Verbindung gebracht (siehe Kapitel 5.5). Auf Basis der explorativen Analyse schließt der Bericht mit einem Fazit (siehe Kapitel 5.6). Das erarbeitete Workshop-Konzept befindet sich im Anhang dieses Berichts.

Der Teilbericht wurde im Zeitraum zwischen Mai 2024 und Februar 2025 erstellt.

5.4 Stand der Forschung und Kernaussagen

5.4.1 Kohlenstoff- und Kreislaufwirtschaft als Zwillingiskonzepte

Keine nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft ohne eine Kreislaufwirtschaft - keine umfassende Kreislaufwirtschaft ohne eine zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft

In der Literatur wird die Zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft (ZKW) meist als Teil einer umfassenden Kreislaufwirtschaft betrachtet, wobei hierbei sowohl übergreifende als auch sektorspezifische Forschung besteht, namentlich in den Bereichen Kraftstoffe, Biomasse, Kunststoffe und Textilien (vgl. Appolloni et al., 2023; Koytsoumpa et al., 2021; Pires Da Mata Costa et al., 2021; Sankaran, 2023). So betrachtet Frieden (2021) die technologische Weiterentwicklung und Skalierung von CO₂-Abscheidung und Nutzung (Carbon Capture and Utilization, CCU) als notwendige Bedingung für die Etablierung einer tatsächlichen Kreislaufwirtschaft. Umgekehrt sei die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft eine Grundlage dafür, Kohlenstoff aus nachhaltigen Quellen zu gewinnen (Frieden, 2021). Vielmehr bedürfe es einer umfassenden Kreislaufwirtschaft, wenn die Nachfrage nach Kohlenstoffen (insbesondere in der chemischen Industrie) zukünftig aus nicht-fossilen Quellen gedeckt werden soll – unter anderem aus Gründen der Klimaneutralität (Frieden, 2021). Denn einerseits berge die Kreislaufwirtschaft insbesondere hinsichtlich des chemischen und mechanischen Recyclings von Kunststoffen Potentiale (Frieden, 2021). Andererseits könnten abgeschiedene Kohlenstoffe aus industriellen Prozessen wiederum nach Prinzipien der Kreislaufwirtschaft als Grundstoff zurück in den Stoffkreislauf gebracht werden, anstatt – wie im Falle von CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) – „verklappt“ bzw. deponiert zu werden (Frieden, 2021). Pires Da Mata Costa et al. (2021) betonen in diesem Zusammenhang insbesondere, dass CCU auch ein wichtiger Schritt sei, um die Produktion und das Recycling von Kunststoffen als CO₂-intensive Prozesse klimaneutral zu gestalten. Die starke Verschränkung zwischen der ökologischen Bewertung von Produktions- und Recycling-Prozessen, der Herkunft hierfür aufgewendeter Energie sowie dem Einsatz von CCU oder CCS zeigt sich dabei insbesondere mit dem Blick auf die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) von Lausselet et al. (2017) für den norwegischen Waste-To-Energy-Sektor. In dieser LCA schneidet die konventionelle Energiegewinnung aus Abfall ökologisch besser gegenüber dem Recycling und der Anwendung von CCS ab, wobei jedoch als wichtige Prämisse

der LCA die Annahme eingeführt wird, dass mit zunehmendem Recycling auch der Bedarf nach fossilen Energieträgern steigt.

5.4.2 Interdisziplinäre Anforderungen an eine zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft

Die zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft bedarf technologischer, regulatorischer, ökonomischer und sozio-kultureller Herangehensweisen

Ähnlich wie im bisherigen Forschungsstand zur Kreislaufwirtschaft begreifen auch Newman et al. (2023) die Etablierung einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft als eine Aufgabe, die über technologische und regulatorische Maßnahmen hinausgeht. Vielmehr bedürfe es neben ökonomischen auch sozio-kultureller Adaptionen, um Wirtschaft und Gesellschaft so zu transformieren, dass Kohlenstoff nachhaltig verwaltet wird, anstatt unreflektiert konsumiert zu werden. Das Argument baut dabei auf dem Verständnis auf, dass Kohlenstoff eine zu begrenzende Ressource ist, die einer umfassenden Nachvollziehbarkeit und nachhaltigen Handhabung bedarf. Dafür erforderlich sei die Erfüllung dreier Bedingungen: Erstens müssten Kohlenstoffe jenseits fossiler Quellen zugänglich, nutzbar und rezyklierbar sein sowie in ihrer breiten sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkung nachverfolgbar sein (Newman et al., 2023). Dafür bedürfe es, zweitens, Technologien, die sowohl die Verfügbarkeit als auch die Verwendbarkeit von Kohlenstoffen als Grundlagen für Produktionsprozesse bereitstellen (Newman et al., 2023). Neben diesen technologischen Änderungen betonen die Autor*innen drittens die Rolle von Verhaltensänderungen seitens der Konsument*innen für vollständig geschlossene und nachhaltige Kohlenstoffkreisläufe (Newman et al., 2023).

Als einen beispielhaften Sektor, an dem einige der genannten Punkte aufgezeigt werden können, kann die Modeindustrie herangezogen werden. So haben Appolloni et al. (2023) bestehende Überlegungen zur zirkulären Kohlenstoffwirtschaft auf den Mode-Sektor ausgeweitet, der auch für die Kreislaufwirtschaft eine prominente Rolle einnimmt. So fokussiere sich der bisherige Kreislaufansatz im Modesektor auf die Wiederverwendung von Kleidung, Textilien und Fasern; für eine umfassende Kohlenstoff-Zirkularität benötige es jedoch eines umfassenderen Frameworks (Appolloni et al., 2023). Erforderlich seien demnach fundamentale Veränderungen im energetischen und chemischen Produktionsmodell der Modeindustrie sowie eine Veränderung der Rolle von Konsument*innen, die zukünftig stärker als Prosument*innen¹ in Marktdynamiken eintreten müssten (Appolloni et al., 2023).

5.4.3 Nutzbarmachung von Kohlenstoff-Abfallströmen

Die Inwertsetzung von Kohlenstoff- Abfallströmen ist machbar

Eine relevante ökonomische Bedingung, die für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen von hoher Relevanz ist, betrifft die Frage, wie sich unvermeidbare Abfallströme wieder in Wert setzen lassen. Das gilt auch für unvermeidlich anfallende Kohlenstoffe als Abfallstrom im Besonderen. Hiermit setzten sich Tcvetkov et al. (2019) auseinander, indem sie die wirtschaftliche Dynamik und die voraussichtliche Entwicklung der globalen CCU- und CCS-

¹ Prosument*in ist ein Kofferwort aus den Begriffen „Produzent*in“ und „Konsument*in“ und beschreibt eine Doppelrolle, in der Menschen gleichzeitig beispielsweise Energie produzieren (zum Beispiel über Photovoltaik-Anlagen) und konsumieren.

Projekte untersuchten. Dabei kommen sie zu dem Ergebnis, dass nicht nur die Menge des abgeschiedenen Kohlenstoffs zunimmt, sondern auch des wiederverwendeten (Tcvetkov et al., 2019). Im Ergebnis werde abgeschiedener Kohlenstoff aus nicht-fossilen Quellen bereits jetzt als Wertstoffstrom gehandelt, wobei sich diese Entwicklung mit einer Verbesserung und Skalierung von Grundlagentechnologien, der Ausweitung von CO₂-Märkten sowie politischen Regulationen zur Defossilisierung konsolidieren und verstärken werde (Tcvetkov et al., 2019) (siehe Abbildung 5.1).

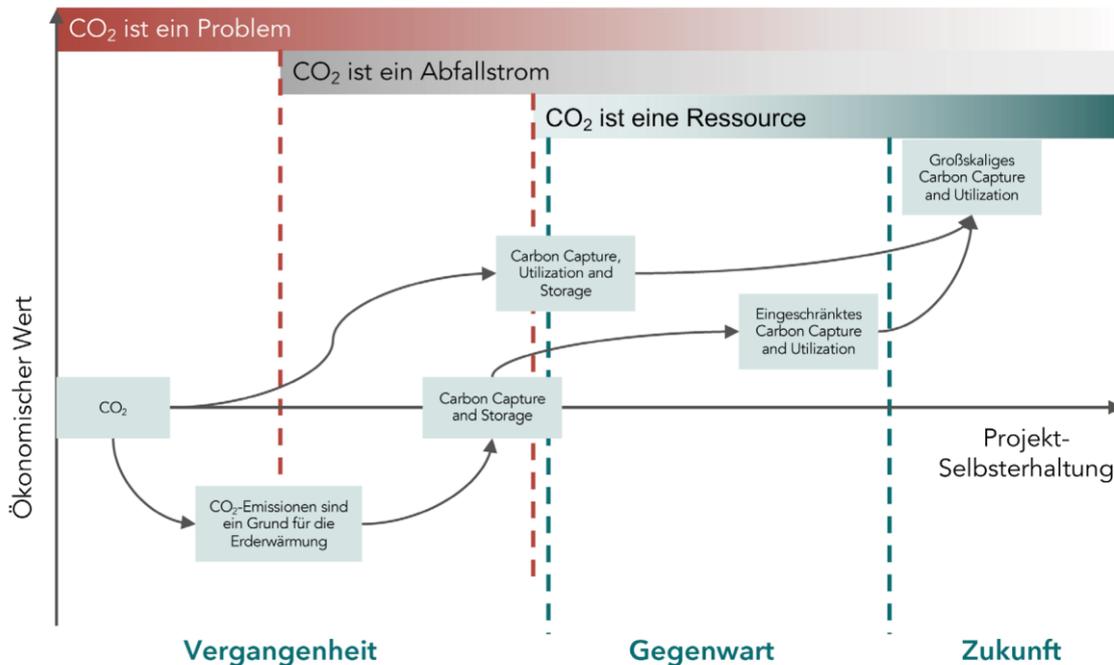


Abb. 5.1: Entwicklung des ökonomischen Werts von Kohlenstoffen (eigene Darstellung nach Tcvetkov et al. (2019))

Sankaran (2023) nennt im Zusammenhang mit der Herstellung von bilanziell klimaneutralen Kraftstoffen insbesondere die Stakeholderkooperation, Lieferketteninnovation sowie Lieferkettensicherheit als relevante zu berücksichtigende Faktoren. Koytsoumpa et al. (2021) beleuchten die Potentiale der Kohlenstoffwirtschaft für eine zirkuläre Bioökonomie. Mittels Bioenergie in Kombination mit CCU (Bio-energy conversion with Carbon Capture and Utilization, BECCU) könnten aus Sicht der Autor*innen Kohlenstoffströme, die gegenwärtig als Abfallströme bei der biogenen Energiegewinnung anfallen, zur Gewinnung CO₂-basierter Antriebsstoffe genutzt werden (Koytsoumpa et al., 2021).

5.4.4 Bewertung der Rolle von CCS in der Kreislaufwirtschaft

CCS- eine Säule der nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft, oder die Fortsetzung linearer Kohlenstoffströme

Die bestehende Literatur zu einer Zirkulären Kohlenstoffwirtschaft ist sich darin einig, dass diese ein relevanter Bestandteil einer umfassenden Kreislaufwirtschaft sein muss. Unstimmigkeiten bestehen jedoch bei der Frage, welche Rolle dem CCS aus einer kreislaufwirtschaftlichen Perspektive zukommen soll und darf. Während zahlreiche Ansätze CCS als notwendigen Bestandteil einer bilanziell klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft sehen (vgl. Zeiss, 2025a),

betrachten beispielsweise Centi et al. (2024) CCS als unvereinbar mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft. Demnach sei CCS ein Vehikel zur Verlängerung linearer Geschäfts-, Produktions- und Nutzungsmodelle und somit der linearen Führung von Kohlenstoff im Allgemeinen. Gegensätzlich hierzu steht die Auffassung von Alsarhan et al. (2021), die CCS im Rahmen ihrer Konzeption einer Circular Carbon Economy als Bestandteil der R-Strategie Reduce betrachten und damit in den oberen R-Strategien verorten (siehe Abbildung 5.2). Hierbei ist jedoch anzumerken, dass Centi et al. (2024) sich weitaus stärker mit der konzeptionellen Überlegung von Synergien zwischen der Kreislaufwirtschaft und der Kohlenstoffwirtschaft befassen, während Alsarhan et al. (2021) ihren Fokus auf die einzelnen Technologien und Szenarien der Kohlenstoffwirtschaft im Allgemeinen setzen. Ein wichtiger Aspekt der Debatte um die Notwendigkeit von CCS besteht darin, dass ein Verzicht auf diese Technologie nur mittels umfassender gesellschaftlicher Änderungen und Suffizienzmaßnahmen möglich wäre, deren gesellschaftlicher Rückhalt als umstritten angesehen werden kann. Eine bislang nicht abschließend zu beantwortende Frage bleibt dabei, welche Rolle die Kreislaufwirtschaft in diesem Kontext spielen kann.

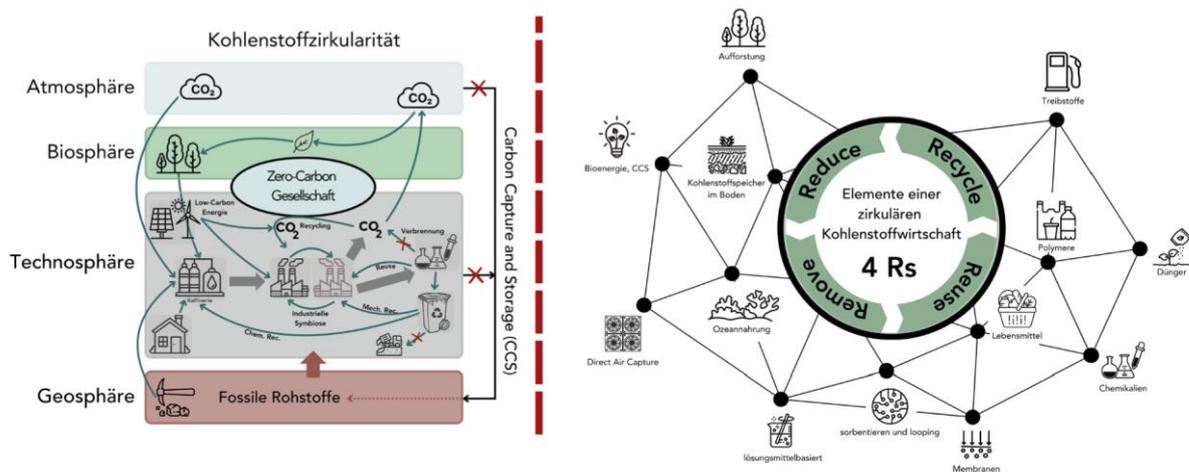


Abb. 5.2: Grafische Gegenüberstellung bestehender Konzepte einer Zirkulären Kohlenstoffwirtschaft (eigene Darstellung nach Centi et al. (2024) und Alsarhan et al. (2021))

5.5 Systematische Diskussion relevanter Strategien

Abgesehen von Centi et al. (2024) und Alsarhan et al. (2021) konzentriert sich ein Großteil der verfügbaren Literatur auf die technologischen und regulativen Herausforderung der Skalierung von Technologien der Kohlenstoffabscheidung und -nutzung, ohne jedoch die konzeptionellen, analytischen und systemischen Zusammenhänge zur Kreislaufwirtschaft detailliert zu beleuchten. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft wird in diesen Fällen als Vehikel genutzt, um die Anliegen der (nachhaltigen) Kohlenstoffwirtschaft sowie deren technologischen, ökonomischen und sozialen Herausforderungen zu thematisieren. Vielfach wird stillschweigend angenommen, dass die Prinzipien der Kohlenstoffwirtschaft mit denen der Kreislaufwirtschaft konzeptuell und praktisch ohne größere Herausforderungen vereinbar sind. Im Folgenden sollen die bestehenden

Positionen zu den Synergien und Unterschieden der Kreislauf- und der Kohlenstoffwirtschaft daher analytisch und konzeptionell angereichert werden.

Ein grundlegendes Instrument, welches das Konzept der Kreislaufwirtschaft in prägnante Strategien übersetzt, sind die sogenannten R-Strategien (Potting et al., 2016). Ein Vorteil der R-Strategien ist es, dass sie übergreifende Prinzipien konturieren, deren Ausgestaltung jedoch auf vielerlei Wegen geschehen kann – d. h. eine einzelne R-Strategie beschränkt sich nicht auf politische, kulturelle, soziale, technologische oder ökonomische Lösungsansätze, sondern ist grundsätzlich offen für Kombinationen dieser Ansätze. Die Gliederung der nachfolgenden Diskussion zu Grundlagen und Bedingungen einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft aus Perspektive der Kreislaufwirtschaft ist daher an das Instrument der R-Strategien angelehnt. Darüber hinaus sollen bestehende Überlegung zum Aufbau zirkulärer Geschäftsmodelle auf den Stoffstrom der Kohlenstoffe übertragen werden.

Die R-Strategien – und daran angelehnt auch die nachfolgende Diskussion – folgen einer hierarchischen Ordnung basierend auf dem Beitrag zur Umsetzung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft (Potting et al., 2016). Strategien mit kleinerer Ordnungszahl (R0: Refuse, R1: Rethink, R2: Reduce) haben einen größeren Hebel in Bezug auf Zirkularität als diejenigen mit einer mittleren (R3: Reuse, R4: Repair, R5: Refurbish, R6: Remanufacture, R7: Repurpose) oder hohen Ordnungszahl (R8: Recycle, R9: Recover), von denen letztere am nächsten an einem linearen Wirtschaftssystem bleiben.

5.5.1 Strategien zur Reduktion des Kohlenstoffbedarfs

Kohlenstoffbedarf verringern- Refuse, Rethink und Reduce

In vielen Strategiepapieren für eine nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft, wie dem Eckpunktepapier der Carbon Management Strategie oder dem Eckpunktepapier der Langfriststrategie Negativemissionen der deutschen Bundesregierung, wird eine vollständigen Defossilisierung und eine weitestgehende Dekarbonisierung anvisiert (vgl. BMWK, 2024a, 2024c). Technologien wie CCU oder CCS sollen bestenfalls nur dort angewendet werden, wo CO₂-Emissionen unvermeidbar sind, während vermeidbare Emissionen unter anderem durch die Substitution von Energieträgern und die Umstellung von Produktionsprozessen wegfallen. Begründet werden kann dies in mehrfacher Hinsicht. Einerseits wird der erhebliche Aufwand, der mit der Abscheidung, dem Transport, der Aufbereitung oder Speicherung von Kohlenstoffen (insbesondere CO₂) einhergeht dadurch auf ein Mindestmaß reduziert und fossile Geschäftsmodelle zunehmend unattraktiv. Andererseits gehen mit der Positivbilanzierung von Treibhausgasemissionen soziale und ökologische Folgen einher, die neben dem Ziel der Klimaneutralität ebenfalls von hoher Relevanz für eine nachhaltige Entwicklung sind. So werden, Stand heute, in vielen Szenarien zu einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft der Import synthetischer Grund- und Kraftstoffe sowie die Verwendung von Biomasse im Rahmen von Bioenergie in Kombination mit CCS (Bio-energy with Carbon Capture and Storage, BECCS) als grundlegend angesehen, um bilanziell negative Emissionen zu erzeugen (vgl. Espert & Zeiss, 2025).

BECCU wird insbesondere bei der Herstellung CO₂-basierter Antriebsstoffe, als zusätzliche Wertschöpfungsoption für Abfallverbrennungsanlagen sowie bei der biogen-basierten Beifeuerung in der Zementproduktion eine wichtige Rolle zugesprochen (Koytsoumpa et al.,

2021). Allerdings gehen sowohl die heimische Produktion von Biomasse als auch der Import synthetischer Kraftstoffe mit sozialen und ökologischen Folgekosten einher, wie dem Verlust von Habitaten und einer zusätzlichen Belastung der Biodiversität, einem zusätzlichen Flächenverbrauch, einer Konkurrenz zur Ernährungssicherheit sowie generell konkurrierender Ansprüche an die Flächennutzung (vgl. SRU, 2024; Wagner, 2023). Insgesamt kommen also auch Direct Air Capture, die Herstellung synthetischer Kraftstoffe und BECCS einem Ressourcenverbrauch (unter anderem von Energie, seltenen Erden, Fläche) gleich, der ganz grundsätzlich auf ein Mindestmaß zu reduzieren ist. Dies deckt sich mit den obersten drei R-Strategien der Kreislaufwirtschaft. Diese stellen die effektivsten Maßnahmen zur Herstellung einer Kreislaufwirtschaft - und in diesem Fall einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft - dar, mit deren Hilfe auf zusätzlichen Ressourcenverbrauch verzichtet und dieser reduziert wird. Im Kontext des Mitteldeutschen Reviers bezieht sich der Ansatz „Kohlenstoffbedarf verringern“ zum Beispiel auf die Abkehr von fossilen Brennstoffen zur Strom- und Wärmeerzeugung und der Abkehr von der Erzeugung von chemischen Grundstoffen im mitteldeutschen Chemiedreieck. Prägnantestes Beispiel ist die TotalEnergies Raffinerie Mitteldeutschland, die in großem Maßstab fossile Brennstoffe aus Rohöl sowie Naphta und Methanol für die Petrochemie herstellt. Durch das Ende der fossilen Brennstoffe und die Notwendigkeit, fossile Rohstoffe in der Grundstoffchemie zu ersetzen, ergeben sich hier tiefgreifende Veränderungen in den lokal genutzten Kohlenstoffströmen.

5.5.2 Strategien zur Verlängerung der Nutzungsdauer

Kohlenstoffbindung verlängern- Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose

Auch die Bindungsdauer von Kohlenstoffen in Gebrauchsgegenständen und Materialien der Technosphäre kommt eine entscheidende Rolle bei der Nachhaltigkeitsbewertung des Kohlenstoffeinsatzes zu. Während die Bindungsdauer beispielsweise in synthetischen Kraftstoffen vergleichsweise kurz ist, also nur eine Art „Umweg“ nimmt, bevor es in die Atmosphäre entweicht, können beispielsweise langlebige Polymere, aber auch Baumaterialien Kohlenstoffe für lange Zeiträume binden. Kohlenstoffe, die in Materialien und Gegenständen gebunden sind, deren Verbleib sicher ist und für die eine transparente Kontrollierbarkeit besteht, sind „gut verwaltete“ Kohlenstoffe - um zu dem Bild zurückzukommen, das Newman et al. (2023) für ein nachhaltiges Kohlenstoffmanagement zeichnen.

Hier kommt die eigentliche Stärke des Kreislaufwirtschaftsansatzes für eine nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft zum Tragen. Ganz im Sinne dessen geht es daher zunächst primär darum, kohlenstoffhaltige Produkte (oder Produkte aus Herstellungsprozessen mit unvermeidbaren CO₂-Emissionen) auf eine möglichst lange Nutzungsdauer und intensive bzw. vielfache Nutzungen zu konzipieren sowie so zu designen, dass Reparaturen oder die Wiederverwendung von Bauteilen möglich sind. Für die Kunststoffindustrie, die nach wie vor von Kohlenstoffen als Grundstoff abhängig ist, würde dies beispielsweise bedeuten, dass Geschäftsmodelle, die vom Verkauf von Einweg-Kunststoffen abhängig sind, durch solche ersetzt werden, die eine vielfache und langfristige Nutzung fördern. Im Baubereich wiederum könnten Zement und Kalk eingespart werden, indem mehr saniert, weniger neu und wenn, dann zirkulär sowie mit Rohstoffen natürlicher Herkunft gebaut wird. Während die R-Strategien R3-R7 in der Kreislaufwirtschaft also auf die Verlängerung von Produktlebensdauern abzielen, bedeutet dies, adaptiert auf eine nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft, die Bindungsdauer von Kohlenstoffen zu verlängern. Einerseits soll dadurch

der Bedarf an Kohlenstoffen insgesamt reduziert werden, andererseits erleichtert dies den Umgang mit als Abfall anfallenden Kohlenstoffströmen, die in ihrer Quantität gemindert werden.

Der Ansatz „Kohlenstoffbindung verlängern“ adressiert im Mitteldeutschen Revier zum Beispiel die Kunststoffindustrie und Bauwirtschaft. Durch eine Fokussierung auf langlebige Produkte und Komponenten in Kombination mit nutzungs- statt verkaufsorientierten Geschäftsmodellen können gebundene Kohlenstoffe länger im Nutzungskreislauf gehalten werden, bevor ihre – oftmals energie- und emissionsintensive – Verwertung als Abfallstrom notwendig wird. Ein Beispiel aus dem Mitteldeutschen Revier ist die Schüco PWS Produktions KG in Weißenfels, die sich auf die Herstellung und den Vertrieb von Kunststoffsystemen, insbesondere Kunststofffenstern, spezialisiert hat und dabei besonderen Wert auf die Kreislaufwirtschaftsfähigkeit ihrer Produkte legt.

5.5.3 Strategien zur Rückführung und Wiederverwertung

Kreislaufführung von Kohlenstoffabfällen- Recycle und Recover

Zu guter Letzt sollte aus kreislaufwirtschaftlicher Perspektive derjenige Kohlenstoff, der in Produktionsprozessen unvermeidbar anfällt oder aus der Technosphäre als Abfallstrom ausscheidet, weitestgehend wieder in einen Kreislauf zurückgeführt werden. Auch hier ist darauf zu achten, dass die Produkte, die aus solchen Kohlenstoffen (nur mittelbar fossilen bis nicht-fossilen Ursprungs) hergestellt werden, wiederum eine möglichst lange Nutzungsdauer haben. Indem in der Kreislaufwirtschaft Abfallströme im Allgemeinen wieder in Wert gesetzt und einer Nutzung zugeführt werden sollen, können hierbei insbesondere Synergien zu kohlenstoffintensiven Abfallströmen entstehen. Beispiele hierfür sind die Altreifenpyrolyse oder auch das Recycling von Matratzen, was sowohl aus kreislaufwirtschaftlicher als auch hinsichtlich einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft Vorteile bietet. Ein weiteres Beispiel ist die verstärkte Getrenntsammlung von Bioabfällen, die in einer stofflichen und energetischen Kaskadenführung in Kombination mit BECCS potenzielle Negativemissionen erzeugen können, die bei einer Kompostierung oder thermischen Verwertung nur in geringerem Ausmaß realisiert würden.

Mit Blick auf die letzte R-Strategie – R9: Recover – bieten CCU und CCS im Rahmen der Kohlenstoffwirtschaft wiederum Möglichkeiten die thermische Verwertung von unvermeidbaren Restabfällen klimafreundlicher zu gestalten. Übergeordnetes Ziel aus kreislaufwirtschaftlicher Perspektive ist es dennoch, diese unvermeidbaren Restabfälle auf ein Mindestmaß zu reduzieren, wobei hier darauf zu achten ist, dass eine potenzielle klimaneutrale thermische Verwertung von Restabfällen nicht zulasten der Vermeidung von Restabfällen wirkt.

Beispiele für den Ansatz „Kreislaufführung von Kohlenstoffabfällen“ im Mitteldeutschen Revier beziehen sich unter anderem auf die verbesserte Sammlung, Sortierung und stoffliche oder chemische Verwertung von Kunststoffabfällen durch die lokalen bzw. regionalen Abfallwirtschaftsbetriebe oder privatwirtschaftliche Anbieter sowie den effizienten Betrieb von Müllheizkraftwerken zur Strom- und Wärmeproduktion. In Sachsen plant die Firma Mura Technology am Standort von Dow in Böhlen die Errichtung einer Anlage zum chemischen Recycling von bis zu 120.000 t Kunststoff/Jahr. Sie soll auch mehrschichtige Mischkunststoffe, die bislang als nicht trennbar gelten und in der Verbrennung landen, in Ausgangsstoffe für die Herstellung neuer Produkte umwandeln.

Die Verknüpfung des Konzepts der R-Strategien mit einer zirkulären, nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

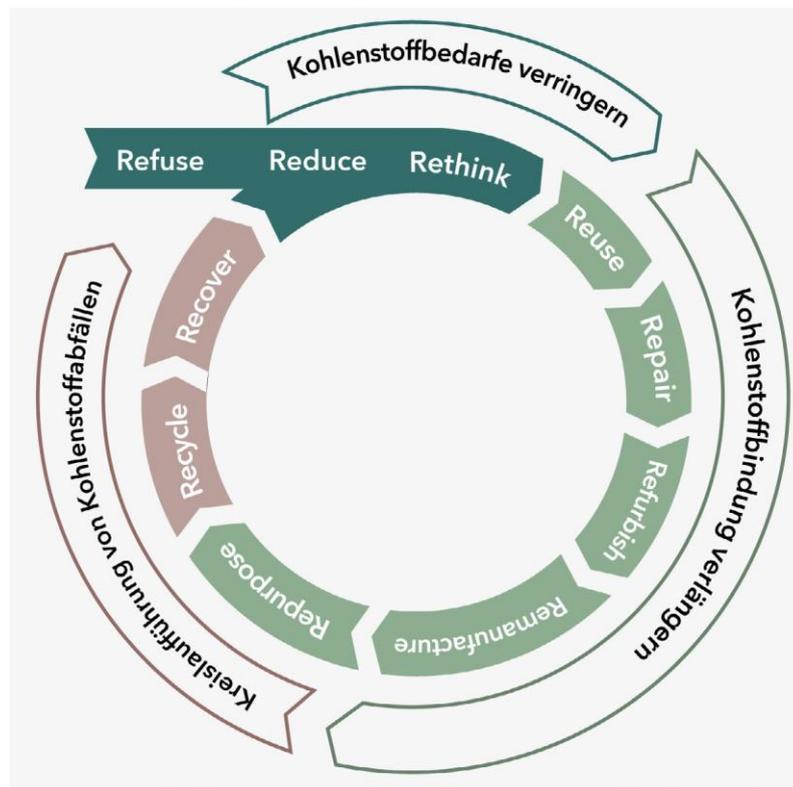


Abb. 5.3: R-Strategien und ihr Verhältnis zu zirkulären, nachhaltigen Kohlenstoffströmen (eigene Darstellung)

5.5.4 Geschäftsmodelle für zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft

Zirkuläre Geschäftsmodelle- eine Option für die zirkuläre Kohlenstoff

Eine Stärke des Konzeptes der Kreislaufwirtschaft ist es, dass es sich hierbei um ein Anliegen handelt, das sowohl ökologische als auch ökonomische Ziele verfolgt. Durch den effizienten Umgang mit Stoffströmen und der Inwertsetzung von Abfallströmen sollen Kostenvorteile maximiert und Umweltbelastungen minimiert werden. Dieses Postulat deckt sich jedoch häufig nicht mit linearen Wirtschaftsstrukturen, die über Jahrzehnte gewachsen sind. Zirkuläre Geschäftsmodelle sollen dabei unterstützen, Wege für etablierte und neue Unternehmen aufzuzeigen, wie mit Prinzipien der Kreislaufwirtschaft ein Business Case realisiert werden kann. Ausgehend von der Überlegung, dass auch Kohlenstoff bisher ein Stoffstrom war und ist, der dem linearen Weg des Take-Make-Dispose folgte, können bestehende und neue zirkuläre Geschäftsmodelle dabei unterstützen, Anknüpfungspunkte für einen ökonomisch effizienten Umgang mit Kohlenstoff aus unternehmerischer Perspektive zu identifizieren. Dies ist nicht nur für eine breite Skalierung der Kohlenstoffwirtschaft erforderlich, sondern auch, damit aus dem regulativ-politischen Konstrukt der Kohlenstoffwirtschaft eine resiliente Wirtschaftsstruktur erwächst.

5.5.5. Regionale Empfehlungen für das Mitteldeutsche Revier

Produkte der chemischen Industrie auf die R-Strategien ausrichten

Für das Mitteldeutsche Revier ergeben sich vor diesem Hintergrund Schlussfolgerungen, die sowohl allgemeiner als auch branchenspezifischer Ausrichtung sind. Für die chemische Industrie, die im Mitteldeutschen Revier eine hochrelevante Wirtschaftsstruktur darstellt, können zunächst allgemeine kreislaufwirtschaftliche Aussagen getroffen werden, die mit Blick auf die Reduktion des Kohlenstoffeinsatzes als Grundstoff sowie auf die Lebensdauer ihrer Produkte von Relevanz ist. So sei grundsätzlich zu konstatieren, dass in der chemischen Industrie aufgrund ihrer vorderen Position in der Wertschöpfungskette noch kaum Konzepte der Kreislaufwirtschaft Eingang gefunden haben (Wilts, 2023). Hier bedürfe es nämlich, neben der Umstellung auf nicht-fossile Rohstoffe, auch einer Veränderung der Geschäftsmodelle als solche, womit eine tiefgreifende Umstrukturierung verbunden ist.

Aktuell sind die Chemiebranche und ihre Geschäftsmodelle dadurch geprägt, kontinuierlich wachsende Mengen an Produkten auf den Markt zu bringen, während Konzepte des Recyclings nach der Nutzungsphase oder einer Verlängerung der Nutzungsphase eine nachgeschaltete Rolle haben (Wilts, 2023). Innerhalb der Chemiebranche ist man sich des endenden Geschäftsmodells zwar bewusst, doch gegenwärtig ist dieses nach wie vor hoch profitabel, weshalb bei der Transformation der Chemieindustrie die Herausforderung besteht, dass diese aus kurzfristigen Profit-Gründen in Länder mit weniger ambitionierten ökologischen Zielen abwandert (Wilts, 2023). Insbesondere Kunststoffe, als Schlüsselprodukt der Chemiebranche, verzeichnen weiterhin steigende Produktionsmengen mit einem zum großen Teil linearen Nutzungsverlauf, an dessen Ende oftmals bestenfalls die thermische Verwertung (R9: Recover) steht. Dabei sind viele Produkte aus Kunststoff gegenwärtig dadurch gekennzeichnet, dass sie einerseits für die einmalige Verwendung ausgelegt sind und andererseits eine Neuproduktion technisch wesentlich einfacher ist als das Recycling (Wilts, 2023).

Absehbar werden sich die Wertschöpfungsketten der chemischen Industrie wandeln. Wenn die Bereitstellung von Rohöl nicht mehr als Grundlage einer Kohlenstoffchemie genutzt werden kann, müssen andere Quellen erschlossen werden. Neben der Einfuhr biobasierter oder atmosphärisch basierter Kohlenwasserstoffe bietet sich hier die Nutzung des chemischen Recyclings an. Erste Beispiele wie bei Dow in Böhlen zeigen, dass die Chemieindustrie strategische Vorteile für die Errichtung und den Betrieb solcher Anlagen bietet. Eine Strategie zum Erhalt der Chemieindustrie in Mitteldeutschland sollte daher den Bau und Betrieb von Anlagen für chemisches Recycling – als Lückenschluss zwischen dem zu priorisierenden mechanischen Recycling und der thermischen Verwertung – als zentralen Bestandteil umfassen.

Aufgrund der engen Verknüpfung mit dem gesellschaftlichen Konsumverhalten braucht es jedoch, neben dem Design für Mehrweg und Rezyklierbarkeit, auch eine Verhaltensänderung seitens der Konsument*innen (Wilts, 2023). Um die Kohlenstoffintensität der Chemieindustrie zu reduzieren, bedarf es also neben der Substitution von fossilen Grundstoffen auch Nutzungskonzepte, die die Produkte der Chemieindustrie auf die verschiedenen R-Strategien ausrichten, wobei diese Neuausrichtung mit neuen Geschäftsmodellen kombiniert werden sollte, die durch die geeigneten politischen Rahmenbedingungen erleichtert und flankiert werden.

Mehr sanieren, weniger neu und wenn, dann zirkulär und nachwachsend bauen

Der Bausektor verbraucht große Mengen an Stahl, Glas, Aluminium und Beton sowie Zement und Kalk, die aus einer energieintensiven Produktion hervorgehen und zum Teil unvermeidbare CO₂-Emissionen bewirken (Braun et al., 2021). Indem die Neubauaktivität minimiert und die Wiederverwendung von Bauteilen maximiert wird, können damit auch beträchtliche Gewinne für eine nachhaltige Ausrichtung der Kohlenstoffwirtschaft erzielt werden. Angelehnt an die R-Strategien ist auch im Rahmen der „Bauwende“ zunächst darauf zu achten, die Nutzungsdauer von Gebäuden zu verlängern, indem diese eine Sanierung und Umnutzung erfahren. Falls es zum Neubau kommt, sollten zudem einerseits nachwachsende Rohstoffe verwendet werden, andererseits auf eine zirkuläre Bauweise geachtet werden. Das zirkuläre Bauen zeichnet sich dabei einerseits dadurch aus, dass möglichst viele Bauteile aus der Wiederverwendung (im Rahmen eines zirkulären Baustoffhandels) stammen, andererseits durch Baudesigns, die eine spätere Wiederverwendung von Bauteilen erleichtern. Hierbei können und sollten insbesondere nachwachsende Rohstoffe verwendet werden, bei denen zudem geprüft werden kann, inwiefern durch deren Einsatz potenzielle Negativemissionen entstehen. Da der Bausektor ein weit verzweigter Wirtschaftssektor und wichtiger Arbeitgeber ist, ist auch hierbei darauf zu achten, die Transformation des linearen Bausektors hin zur Zirkularität mit nachhaltig tragbaren Geschäftsmodellen zu kombinieren. Diese können beispielsweise an Leasing-Modelle, Reparatur, Wartung und Sanierung sowie alternative Bauweisen anknüpfen (Braun et al., 2021). Unterschiedliche Strategien und Maßnahmen eines zirkulären Bausektors sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

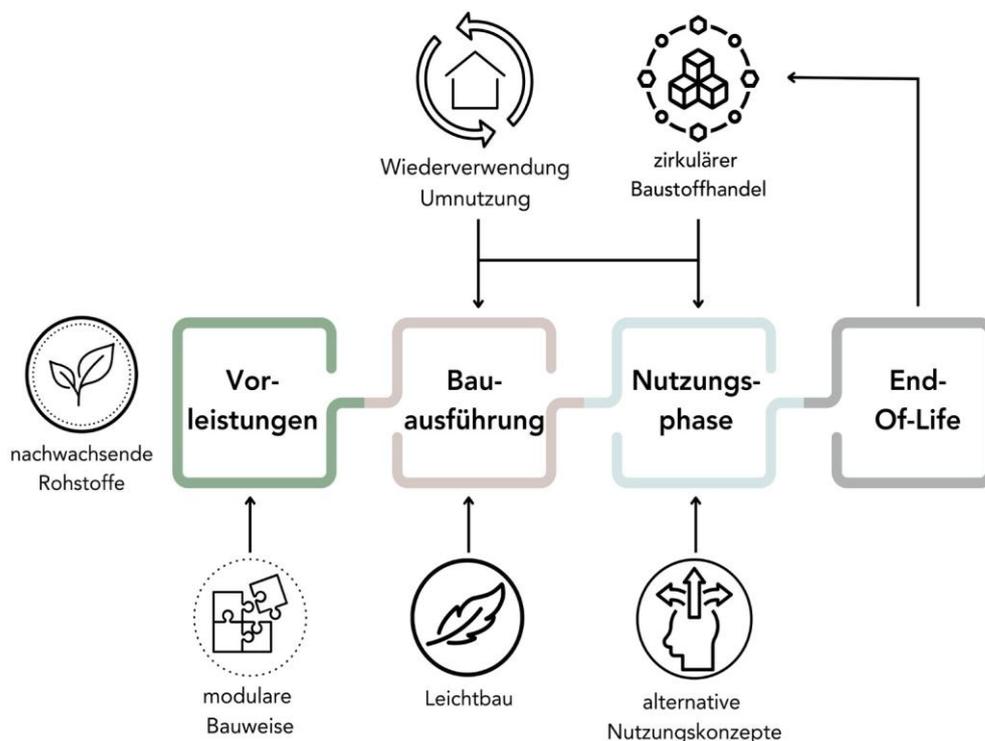


Abb.5.4: Strategien und Maßnahmen eines zirkulären Bausektors (eigene Darstellung nach von Braun et al. (2021))

Startup-Strategie für Kohlenstoff in der Kreislaufwirtschaft erarbeiten

Kohlenstoffe kommen in verarbeiteter Form und auf biogener Basis in einer Vielzahl von Strukturen, Verbindungen und Mengen vor. Das können unsortierte und mit Störstoffen vermischte

Kunststoffabfälle oder auch Restbiomassen wie Stroh oder Straßenbegleitgrün sein. Dem stehen sehr unterschiedliche Bedarfe an Kohlenstoffen gegenüber, von Parkbänken bis zu hygienisch einwandfreien Medizinverpackungen und -produkten. Wenn Rohöl nicht mehr zur Verfügung steht, steigt die Nachfrage nach Alternativen, aber auch nach der Bereitstellung von Kohlenstoffqualitäten aus der Kreislaufwirtschaft. Aufgrund der Vielzahl der denkbaren Stoffströme wird es voraussichtlich Bedarf auch nach kleinteiligeren und innovativen Lösungen zur Nutzung des Kohlenstoffes aus einer Vielzahl von Quellen geben. Daher bietet sich dieses Zukunftsfeld für eine strategische Unterstützung von Startups und Universitätsausgründungen an. Diese Strategie kann insbesondere in Verbindung mit den Akteuren aus dem Mitteldeutschen Chemiesiedlungsraum ein Kristallisationspunkt für eine Technologie- und Unternehmensentwicklung im Rahmen der Kreislaufführung von Kohlenstoff werden.

Ideen und Vorschläge für Wertschöpfung suchen und sammeln

Die aktuelle Wertschöpfung der chemischen Industrie in Mitteldeutschland basiert auf der Umwandlung von Rohöl. Biobasierte oder Recyclinglösungen bieten aktuell noch zu wenig Pfade mit denen eine ähnlich hohe Wertschöpfung erzielt werden kann. Zusätzlich greifen einige der denkbaren politischen Instrumente zur Unterstützung der Wertschöpfung alternativer Pfade erst auf der Nutzungsseite, so dass es fraglich ist, ob die Grundstoffchemie davon profitieren würde. Daher wäre es sinnvoll, die Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Kohlenstoffchemie – von der Produktion über die Verarbeitung und den Verkauf bis zur Kreislaufführung – gemeinsam an einen Tisch zu bringen. Ziel sollte es sein, herauszufinden, welche politischen Instrumente und Optionen ihnen helfen könnten, den Übergang auf nicht-fossile Rohstoffe innerhalb der nächsten zehn Jahre so weit voranzutreiben, dass daraus eigenständige Geschäftsmodelle entstehen, die den Weg in die Klimaneutralität ebnen und zukunftsfähig gestalten. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist auch die Sensibilisierung für und Schaffung von umfassenden industriellen bzw. Unternehmenskooperationen auf Augenhöhe, die für einen ganzheitlichen zirkulären Wandel in der Region unerlässlich sind.

Monitoring und Stakeholder-Einbindung

Die Etablierung einer umfassenden zirkulären und nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft erfordert einen erweiterten Blick auf regionale und kohlenstoffintensive Produktions- und Konsummuster sowie Stoffströme. Dafür ist es erforderlich, analog zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft, die zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft als tiefgreifendes Anliegen zu erfassen und umzusetzen, und nicht nur als eine reine Angelegenheit der Abfallwirtschaft. Neben Haushalts- und Siedlungsabfällen sind daher verstärkt auch industrielle Stoffströme in Form von Rohstoffen für die Produktion sowie Gewerbeabfälle zu betrachten. Zwar existiert in Form der Regionalanalyse des Mitteldeutschen Reviers ein guter Überblick über die wirtschaftliche Struktur der Region, explizite Informationen und Zahlen über die (kohlenstoffintensiven) Stoffströme und (Sekundär-)Rohstoffbedarfe müssten jedoch kontinuierlich erfasst bzw. monitored werden. Hierfür ist ein enger Austausch mit den Industrien im Mitteldeutschen Revier erforderlich, insbesondere angesichts der Anforderung, Möglichkeiten der Inwertsetzung und Weiterverarbeitung (kohlenstoffintensiver) Abfallströme auszuloten und nachhaltig umzusetzen. Ein Stakeholder-Workshop (siehe Konzept im Anhang dieses Kapitels) kann hier einen ersten Ansatzpunkt bieten.

5.6 Zusammenfassung und Fazit

Die vorliegende explorative Analyse untersucht die konzeptionelle Verknüpfung von Kohlenstoffwirtschaft und Kreislaufwirtschaft und setzt einzelne Bezüge zum Mitteldeutschen Revier. In der bestehenden Literatur wird die zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft meist als Teil einer umfassenden Kreislaufwirtschaft betrachtet. CCU gilt dabei als wichtiges Element, um Kohlenstoffe aus nachhaltigen Quellen zu gewinnen und in Stoffkreisläufe zurückzuführen. Die Etablierung einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft erfordert jedoch nicht nur technologische und regulatorische Maßnahmen, sondern auch ökonomische und sozio-kulturelle Anpassungen. Verhaltensänderungen der Konsument*innen spielen eine entscheidende Rolle für vollständig geschlossene Kohlenstoffkreisläufe. Ein wichtiger Aspekt ist die Inwertsetzung von Kohlenstoff-Abfallströmen, die unter anderem durch Fortschritte in der CCU- und CCS-Technologie, die Ausweitung von CO₂-Märkten und politische Regulierungen zur Defossilisierung ermöglicht wird. CCS wird jedoch in Bezug auf die Verknüpfung von Kohlenstoff- und Kreislaufwirtschaft in der Literatur kontrovers diskutiert. Während einige es als notwendige Säule einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft betrachten, sehen andere es als unvereinbar mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft.

Ausgehend vom Stand der Forschung wurden die sogenannten R-Strategien der Kreislaufwirtschaft genutzt, um die Grundlagen und Bedingungen einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft zu diskutieren. Hierfür wurden drei grundlegende Ansätze herangezogen. Der Ansatz „Kohlenstoffbedarfe verringern“ orientiert sich an den am höchsten priorisierten R-Strategien (R0 - R2). In Bezug auf das Mitteldeutsche Revier sind die Abkehr von fossilen Brennstoffen in der Energieerzeugung und die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen zentrale Ansätze. Die Transformation energieintensiver Industrien wie der Chemie-, Kunststoff- und Metallindustrie bietet hierbei ein großes Potential. Der Ansatz „Kohlenstoffbindung verlängern“ - angelehnt an den mittleren R-Strategien R3 - R7 - zielt auf die Fokussierung der regionalen Industrie auf langlebige Produkte und Komponenten sowie nutzungsorientierte Geschäftsmodelle. Dies bezieht sich in Bezug auf das Mitteldeutsche Revier insbesondere auf die Kunststoffindustrie und Bauwirtschaft, die so gebundenen Kohlenstoff länger im Nutzungskreislauf halten können. Der dritte Ansatz „Kreislaufführung von Kohlenstoffabfällen“, der sich insbesondere an den unteren R-Strategien R8 und R9 orientiert, kann im Kontext des Mitteldeutschen Reviers zum Beispiel auf die verbesserte Sammlung, Sortierung und Verwertung von Kunststoffabfällen sowie den effizienten Betrieb von Müllheizkraftwerken bezogen werden. Die Entwicklung und Umsetzung neuer Geschäftsmodelle, die auf Prinzipien der Kreislaufwirtschaft basieren, ist entscheidend für die Skalierung der Kohlenstoffwirtschaft und die Schaffung einer resilienten Wirtschaftsstruktur.

Branchenspezifische Ansatzpunkte in Bezug auf das Mitteldeutsche Revier beziehen sich unter anderem auf die chemische Industrie. Die Umstellung auf nicht-fossile Rohstoffe, die Entwicklung von Mehrweg- und Recyclingkonzepten sowie die Anpassung der Geschäftsmodelle sind notwendig, um die Kohlenstoffintensität im Mitteldeutschen Revier zu reduzieren. Eine weitere relevante Branche für die nachhaltige, zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft ist die Bauwirtschaft. Die Minimierung von Neubauaktivitäten, die Maximierung der Wiederverwendung von Bauteilen, die Verwendung nachwachsender Rohstoffe und die Etablierung zirkulärer Bauweisen sind dabei zentrale Strategien. Weitere Ansatzpunkte bieten auch die Entwicklung einer Startup-Strategie für zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft, die Identifizierung von Wertschöpfungspfaden und

Geschäftsmodellinnovationen sowie das Monitoring kohlenstoffintensiver Stoffströme. Zusammenfassend bieten die Parallelen und Anknüpfungspunkte zwischen Kreislauf- und Kohlenstoffwirtschaft zahlreiche Transferpotentiale und sollten für die Transformation des Mitteldeutschen Reviers genutzt werden.

Die Etablierung einer holistischen Kreislaufwirtschaft ist kein rein technologisches und ökonomisches Anliegen, das sich mit der Inwertsetzung von Abfallströmen befasst, sondern auch kulturelle und soziale Praktiken betrifft. Eine holistisch implementierte Kreislaufwirtschaft ermöglicht damit nicht nur einen effizienten Umgang mit Ressourcen innerhalb der Strukturen, wie wir sie im Status Quo kennen, sondern die Strukturen selbst und mit ihnen der Umgang mit Ressourcen verändern sich. Davon ausgehend sind Impulse in verschiedenste industrielle und wirtschaftliche Bereiche zu erwarten, deren Konsequenzen nicht vollständig abzusehen sind. Kommt es im Sinne der Kreislaufwirtschaft beispielsweise zu einem gesellschaftlich und kulturell fundamental anderem Verständnis und Umgang mit Gebrauchsgütern jeglicher Art, unter anderem indem deren Nutzungsintensität erhöht und Lebensdauer verlängert wird, hat dies sowohl Auswirkungen auf die Gesamtmenge der benötigten Ressourcen und anfallenden Abfallströme als auch auf die wirtschaftlichen Strukturen, in die diese Gebrauchsgüter eingebettet sind.

Skaliert ergeben sich hieraus weitreichende Konsequenzen für die Kohlenstofflastigkeit der Wirtschaft im Allgemeinen und über den genuinen Interessenbereich der Kohlenstoffwirtschaft hinaus. Neben technologischen, infrastrukturellen, politischen und wirtschaftlichen Anliegen und Herausforderungen der Abscheidung, Nutzbarmachung und des Transports von Kohlenstoffen und der Substitution von diesem als Grundstoff, ist die umfassende Etablierung einer Kreislaufwirtschaft daher ein elementarer Bestandteil eines holistischen Carbon Managements, das auf eine vollständige Defossilisierung und weitestgehende Dekarbonisierung der Industrie abzielt.

5.7 Literatur

Alsarhan, L. M., Alayyar, A. S., Alqahtani, N. B., & Khdary, N. H. (2021). Circular Carbon Economy (CCE): A Way to Invest CO₂ and Protect the Environment, a Review. *Sustainability*, 13(21), 11625. <https://doi.org/10.3390/su132111625>

Appolloni, A., Centi, G., & Yang, N. (2023). Promoting carbon circularity for a sustainable and resilience fashion industry. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 39, 100719. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100719>

BMUV. (2024). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf.pdf

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024a): *Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie*. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkte-derbundesregierung-fuer-eine-carbon-management-strategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (abgerufen am 07.11.2024)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024c): *Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe) - Eckpunkte*. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 07.11.2024)

Braun, N., Hopfensack, L., Fecke, M., & Wilts, H. (2021). *Chancen und Risiken im Gebäudesektor für die Umsetzung einer klimaneutralen und ressourceneffizienten zirkulären Wirtschaft: Vorstudie im Rahmen des Verbundvorhabens Circular Economy als Innovationsmotor für eine klimaneutrale und ressourceneffiziente Wirtschaft (CEWI)* (S. 6352 KB, 33 pages) [Application/pdf]. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://doi.org/10.48506/OPUS-7851>

Centi, G., Liu, Y., & Perathoner, S. (2024). Catalysis for Carbon-Circularity: Emerging Concepts and Role of Inorganic Chemistry. *ChemSusChem*, 17(21), e202400843. <https://doi.org/10.1002/cssc.202400843>

Espert, V., & Zeiss, C. (2025). *Übersicht einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft auf Basis eines Klimaneutralitätsszenarios*.

Europäische Kommission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

Europäische Kommission. (2021, Juli 14). *Der europäische Grüne Deal*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de

Frieden, F. (2021). *Carbon Capture and Utilization - A new building block for Circular Economy?* [Application/pdf]. <https://doi.org/10.17879/06039562454>

- Koytsoumpa, E. I., Magiri – Skouloudi, D., Karellas, S., & Kakaras, E. (2021). Bioenergy with carbon capture and utilization: A review on the potential deployment towards a European circular bioeconomy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111641. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111641>
- Lausset, C., Cherubini, F., Oreggioni, G. D., Del Alamo Serrano, G., Becidan, M., Hu, X., Rørstad, P. Kr., & Strømman, A. H. (2017). Norwegian Waste-to-Energy: Climate change, circular economy and carbon capture and storage. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.025>
- Newman, A. J. K., Dowson, G. R. M., Platt, E. G., Handford-Styring, H. J., & Styring, P. (2023). Custodians of carbon: Creating a circular carbon economy. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1124072. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1124072>
- Pires Da Mata Costa, L., Micheline Vaz De Miranda, D., Couto De Oliveira, A. C., Falcon, L., Stella Silva Pimenta, M., Guilherme Bessa, I., Juarez Wouters, S., Andrade, M. H. S., & Pinto, J. C. (2021). Capture and Reuse of Carbon Dioxide (CO₂) for a Plastics Circular Economy: A Review. *Processes*, 9(5), 759. <https://doi.org/10.3390/pr9050759>
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2016). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf>
- Sankaran, K. (2023). Turning black to green: Circular economy of industrial carbon emissions. *Energy for Sustainable Development*, 74, 463–470. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.05.003>
- SRU. (2024). *Renaturierung: Biodiversität stärken, Flächen zukunftsfähig bewirtschaften*. Geschäftsstelle des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU). https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2024_04_Renaturierung.html
- Tcvetkov, P., Cherepovitsyn, A., & Fedoseev, S. (2019). The Changing Role of CO₂ in the Transition to a Circular Economy: Review of Carbon Sequestration Projects. *Sustainability*, 11(20), 5834. <https://doi.org/10.3390/su11205834>
- Wagner, N. (2023). Wasserstoff aus Afrika: Hoffnung für wen? | Blätter für deutsche und internationale Politik. *Blätter für deutsche und internationale Politik*, 23(10). <https://www.blaetter.de/ausgabe/2023/oktober/wasserstoff-aus-afrika-hoffnung-fuer-wen>
- Wilts, H. (2023). *Wege aus der Sackgasse der Linearität: Chemische Produktion als Kreislaufwirtschaft*. 171, 84–89. <https://doi.org/10.8110/Wilts.pdf>
- Zeiss, C. (2025a). *Einordnung von Kohlenstoffströmen hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit und deren Auswirkungen auf Wertschöpfungspotentiale*.

Anhang: Workshop-Konzept Zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft

1 Hintergrund

Im Rahmen des Projekts „Strukturwandel: Kohlenstoffbasierte Industrien in Mitteldeutschland auf dem Weg in neue Märkte - Wirtschaftliche Ausgangslage und Entwicklungspotentiale“ wurde eine explorative Analyse zu Perspektiven der Kreislaufwirtschaft im Kontext einer Kohlenstoffwirtschaft - mit besonderem Fokus auf das Mitteldeutsche Revier - durchgeführt. Hierbei wurde der Stand der Forschung zur Verknüpfung von Kreislauf- und der Kohlenstoffwirtschaft analysiert und in den Kontext des Mitteldeutschen Reviers gesetzt, um Grundlagen für eine zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft (ZKW) in der Region herauszuarbeiten. Um den zirkulären Wandel in Richtung einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft konkret voranzutreiben, müssen in einem nächsten Schritt die Akteur*innen vor Ort hierfür sensibilisiert und in Bezug auf die strategische Gestaltung und Umsetzung im Mitteldeutschen Revier eingebunden werden. Der hier skizzierte Workshop soll hierfür einen ersten Ansatzpunkt bieten.

2 Ziele

Der vorgeschlagene Stakeholder-Workshop verfolgt vorrangig vier Ziele:

- Sensibilisierung und Wissensvermittlung in Bezug auf eine nachhaltige ZKW im Mitteldeutschen Revier
- Offenlegung und Diskussion von Herausforderungen und Chancen einer ZKW - allgemein und in Bezug auf die Region
- Erarbeitung von konkreten Ansatzpunkten und Lösungen für die Umsetzung einer ZKW im Mitteldeutschen Revier
- Vernetzung relevanter Stakeholder zur Thematik, um Erfahrungen und Wissen auszutauschen und konkrete Kooperationen anzustoßen

3 Akteur*innen

Für eine ganzheitliche und inklusive bzw. partizipative Strategieentwicklung und Umsetzung einer ZKW im Revier sollten nach Möglichkeit folgende Akteur*innen am Stakeholder-Workshop teilnehmen:

- Beispielhafte Unternehmensvertreter*innen der für eine Kohlenstoffwirtschaft relevanten Branchen
 - Chemieindustrie
 - Stadtwerke und Abfallversorger
 - Kunststoffverarbeiter
 - Bauwirtschaft
 - Zement- und Kalkindustrie
 - Bioökonomie
 - Land- und Forstwirtschaft
- Thematisch relevante Forschungsakteur*innen aus der Region
- Regionale Intermediäre, z.B. Vertreter*innen des Forum Rathenau e.V.
- Vertreter*innen von Verbänden, IHKs und weiteren Netzwerken, z.B. für Startups
- Vertreter*innen von relevanten Nichtregierungsorganisationen und zivilgesellschaftlichen Initiativen

Eine Übersicht der konkret einzubindenden Stakeholder lässt sich insbesondere aus den Ergebnissen aus dem Teilbericht 1 des Projekts ableiten. Für einen konstruktiven Workshop sollte die Teilnehmerzahl nach Möglichkeit zwischen 20 und 50 Personen liegen. Die Workshop-Größe ist jedoch auch von den verfügbaren Mitteln, den Räumlichkeiten und personellen Kapazitäten in Bezug auf Moderation und Co-Moderation für Kleingruppenarbeit abhängig.

4 Leitfragen

In Bezug auf die oben dargestellten Ziele lassen sich drei Themenblöcke bzw. Leitfragen für den Workshop formulieren, die im folgenden Abschnitt in einen Agendavorschlag überführt werden. Das vierte Ziel ist übergeordneter Natur und wird in allen drei Themenblöcken bzw. entlang des gesamten Stakeholder-Workshops adressiert.

Themenblock 1: Grundlagen einer nachhaltigen ZKW im Mitteldeutschen Revier

- Leitfrage: Welche Aspekte einer Kreislauf- oder einer Kohlenstoffwirtschaft sind für Ihre Organisation/Ihr Unternehmen relevant?
- Fokus: Vermittlung des Stands der Forschung zu einer ZKW und Verknüpfung mit vorhandenen Wissensständen und Erfahrungen der Teilnehmenden

Themenblock 2: Herausforderungen und Chancen einer nachhaltigen ZKW im Mitteldeutschen Revier

- Leitfrage: Welche Herausforderungen und Chancen existieren für Sie in Bezug auf die strategische Entwicklung und Umsetzung einer ZKW?
- Fokus: Darstellung und Ergänzung allgemeiner und Standort- bzw. Akteurspezifischer Herausforderungen und Chancen einer ZKW entlang der drei Ansätze „Kohlenstoffbedarfe verringern“, „Kohlenstoffbindung verlängern“, „Kreislaufführung von Kohlenstoffabfällen“

Themenblock 3: Ansatzpunkte und Lösungen für die Adressierung der Herausforderungen und Chancen sowie Umsetzung einer ZKW im Mitteldeutschen Revier

- Leitfrage: Mit welchen konkreten Lösungen kann eine ZKW vor Ort umgesetzt werden?
- Fokus: Sammlung und Entwicklung konkreter Lösungsansätze (Produkte, Stoffströme/-kreisläufe, Geschäftsmodelle, Kooperationen) entlang der drei Ansätze „Kohlenstoffbedarfe verringern“, „Kohlenstoffbindung verlängern“, „Kreislaufführung von Kohlenstoffabfällen“

5 Agendavorschlag

Agendapunkt	Ziel, Inhalt, Möglicher Ablauf
Ankommen & Begrüßung	Inhalt: Grußworte durch Veranstalter*innen, Moderator*in und ggf. weitere relevante Akteur*innen Evtl. Grußwort durch Staatssekretär*in, um die politische Verankerung des Themas zu verdeutlichen
Impuls: Hintergrund und Zielsetzung	Ziel: Rahmensetzung und Vermittlung der Workshop-Ziele Inhalt: Hintergründe und Kontext der Thematik sowie Ziele der Veranstaltung Möglicher Ablauf: Impulsvortrag (Präsentation) durch Moderator*in oder andere*n relevante*n Akteur*in

Agendapunkt	Ziel, Inhalt, Möglicher Ablauf
Interaktive Runde: Vorstellung der Beteiligten	<p>Ziel: Kennenlernen und Übersicht der Teilnehmenden</p> <p>Möglicher Ablauf: Kurze, moderierte Vorstellungsrunde mit Motivation/Zielsetzung für den Workshop</p>
Themenblock 1: Grundlagen	<p>Ziel: Schaffung und Vermittlung der Grundlagen für eine nachhaltige ZKW im Mitteldeutschen Revier</p> <p>Inhalt: Stand der Forschung zu ZKW (theoretische Grundlagen) und regionale bzw. individuelle Rahmenbedingungen/Anforderungen (praktische Grundlagen) Möglicher Ablauf:</p> <p>Präsentation des Stands der Forschung durch Moderator*in oder Expert*in</p> <p>Moderierte Diskussion im Plenum zur Klärung von Fragen und Ergänzung des Wissensstands</p> <p>Kurze Zusammenfassung der Diskussion durch Moderator*in oder Expert*in</p>
Impulse: Beispiele für ZKW aus der Praxis	<p>Ziel: Aktive Einbindungen von Akteur*innen, Präsentation von konkreten Beispielen</p> <p>Inhalt: Beispielhafte Präsentation (wenige Minuten) von zukunftssträchtigen Lösungen von Unternehmen im Bereich ZKW, Herausforderung und Lösungsansatz Möglicher Ablauf:</p> <p>Kurzimpuls Unternehmen 1</p> <p>Kurzimpuls Unternehmen 2</p> <p>Kurzimpuls Unternehmen 3</p>
Themenblock 2: Herausforderungen und Chancen	<p>Ziel: Darstellung und Ergänzung von Herausforderungen und Chancen einer ZKW im Mitteldeutschen Revier</p> <p>Inhalt: Allgemeine und Standort- bzw. Akteursspezifische Herausforderungen und Chancen einer ZKW Möglicher Ablauf:</p> <p>Kurzer Impulsvortrag zu aus der Theorie abgeleiteten Herausforderungen und Chancen durch Moderator*in oder Expert*in</p> <p>World-Café zur Sammlung/Ergänzung/Diskussion von Herausforderungen und Chancen, strukturiert nach den drei Ansätzen „Kohlenstoffbedarfe verringern“, „Kohlenstoffbindung verlängern“, „Kreislaufführung von Kohlenstoffabfällen“ - 3 oder 6 Tische (je nach Teilnehmendenzahl)</p> <p>Vorstellung der Diskussionsergebnisse durch Gruppenmoderator*innen</p> <p>Hinweis: es wird neben der Hauptmoderation eine Gruppenmoderation pro Tisch benötigt</p>
Agendapunkt	Ziel, Inhalt, Möglicher Ablauf

Themenblock 3: Ansatzpunkte und Lösungen	<p>Ziel: Sammlung und (Weiter-)Entwicklung von Lösungsansätzen in Bezug auf die Herausforderungen/Chancen bzw. Umsetzung einer ZKW im Mitteldeutschen Revier</p> <p>Inhalt: Konkrete Lösungsansätze (Produkte, Stoffströme/-kreisläufe, Geschäftsmodelle, Kooperationen) Möglicher Ablauf:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurzer Impulsvortrag zu möglichen Ansatzpunkten entlang der drei Ansätze „Kohlenstoffbedarfe verringern“, „Kohlenstoffbindung verlängern“, „Kreislaufführung von Kohlenstoffabfällen“ bzw. der R-Strategien • Moderierte Kleingruppenarbeit zur kooperativen Entwicklung konkreter, regionalspezifischer Lösungsansätze - mindestens 3 Gruppen (1 pro Ansatz, s.o.) • Vorstellung der Arbeitsergebnisse durch Gruppenmoderator*innen oder Teilnehmende der Kleingruppen • <i>Hinweis: es wird neben der Hauptmoderation eine Gruppenmoderation pro Kleingruppe benötigt</i>
Ausblick und Abschluss	<p>Ziel: Zusammenfassung und Abschluss der Veranstaltung</p> <p>Inhalt: Kernergebnisse des Workshops, nächste Schritte und Feedback der Teilnehmenden</p> <p>Möglicher Ablauf:</p> <p>Zusammenfassung des Tages und der Kernergebnisse durch Moderator*in</p> <p>Vorstellung der nächsten Schritte und ggf. Festhalten von Verantwortlichkeiten, Zielen und Deadlines</p> <p>Moderierte Feedback-Runde inkl. Dokumentation</p>
Verabschiedung und Ausklang	<p>Inhalt: Verabschiedungsworte durch Veranstalter*innen, Moderator*in und ggf. weitere relevante Akteur*innen sowie Möglichkeit zum Networking</p>

Die exakte Dauer der einzelnen Agenda-Punkte, die Gesamtdauer des Workshops, notwendige Pausen (inkl. Networking-Möglichkeiten) sowie die konkret eingesetzten Materialien und Methoden sind in Abhängigkeit der gewünschten Schwerpunkte sowie den konkreten Rahmenbedingungen (Teilnehmenden-Anzahl, ggf. Gruppenanzahl und -größe für die Arbeitsphasen, Räumlichkeiten, Moderation, Co-Moderation etc.) festzulegen. Die Umsetzung des gesamten Workshop-Konzept erfordert aber voraussichtlich mindestens einen vollen Workshop-Tag. Eine Aufteilung auf mehrere kürzere/kleinere Veranstaltungen oder einen mehrtägigen Workshop ist möglich.

Abbildungsverzeichnis

S. 8: Abb. 5.1: Entwicklung des ökonomischen Werts von Kohlenstoffen (eigene Darstellung nach Tcvetkov et al. (2019))

S. 9: Abb. 5.2: Grafische Gegenüberstellung bestehender Konzepte einer Zirkulären Kohlenstoffwirtschaft (eigene Darstellung nach Centi et al. (2024) und Alsarhan et al. (2021))

S. 13: Abb. 5.3: R-Strategien und ihr Verhältnis zu zirkulären, nachhaltigen Kohlenstoffströmen (eigene Darstellung)

S. 15: Abb. 5.4: Strategien und Maßnahmen eines zirkulären Bausektors (eigene Darstellung nach von Braun et al. (2021))