

Global Energy Solutions
For Prosperity and Climate Neutrality



Klimaneutrale Kohle- und Gaskraftwerke

Das Energiesystem wirtschaftlich umbauen

Juni 2024

Global Energy Solutions e.V.
Lise-Meitner-Straße 9
89081 Ulm
Telefon: +49 731 / 85 07 12 82
www.global-energy-solutions.org
office@global-energy-solutions.org

Forschungsinstitut für anwendungsorientierte
Wissensverarbeitung/n (FAW/n)
Lise-Meitner-Straße 9
89081 Ulm
Telefon: +49 731 / 85 07 12 82
www.fawn-ulm.de
info@fawn-ulm.de

Diese Seite ist absichtlich weiß.

Autoren, Förderer und Danksagungen

Autoren

Tobias Orthen, Franz Josef Radermacher, Ulrich Begemann, Estelle Herlyn

Förderer

Ein besonderer Dank gilt der Vector Stiftung in Stuttgart für die langjährige Zusammenarbeit und die Unterstützung der Arbeiten an diesem Projekt. Gemeinsam mit dem Projekt „Global Energy Perspectives“, gefördert durch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), konnten diese Arbeiten erfolgreich durchgeführt werden.



Danksagungen

Für den während der gesamten Projektlaufzeit anhaltenden wertvollen inhaltlichen Austausch sei den involvierten Experten von Global Energy Solutions e.V. gedankt, insbesondere Bert Beyers, Christof von Branconi, Thomas Frewer, Jens Wagner und Hans-Jürgen Wernicke.

Ein großer Dank gilt Andreas Löschel und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl für Umwelt-/Ressourcenökonomik und Nachhaltigkeit an der Ruhruniversität Bochum, insbesondere Christoph Feldhaus und Johanna Ohlig, für die Zusammenarbeit in diesem Projekt allgemein und im Speziellen für die Umfragen zum Thema Carbon Capture. Außerdem vielen Dank an Abderrazak El Badraoui für seine Beiträge zur Klassifizierung von Ländergruppen in Hinblick auf eine erfolgreiche Energie- und Klimawende.

Für Unterstützung unterschiedlicher Art sei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n (FAW/n) gedankt, insbesondere Jürgen Dollinger, Michael Gerth, Oleksandra Shtein und Regina Simon gedankt. Ein großer Dank gilt Nikolas Lokau für seine Arbeiten bei der Formatierung und im Layout. Vielen Dank an Ilse und Gerhard Wendlik für die Unterstützung bei der administrativen Projektarbeit.

Executive Summary

Den Autorinnen und Autoren dieses Berichts ist kein technisch machbares, ökonomisch tragfähiges und global umsetzbares Gesamtkonzept für den Umgang mit der Energie- und Klimakrise bekannt – schon gar nicht in der Form, dass es für bald 10 Milliarden Menschen Wohlstand, Freiheit und die Einhaltung der Ziele für globalen Klima- und Umweltschutz erreicht.

Das vorliegende Projekt entwickelt daher im Tandem mit dem Projekt „Global Energy Perspectives“ eine „Referenzlösung für ein weltweites klimaneutrales und Wohlstand schaffendes Energiesystem“. Das Lösungs-Narrativ des entwickelten Ansatzes wird „All in“ genannt. Dabei wird auf alle technologischen Optionen zurückgegriffen, offene Märkte werden befürwortet und die Restaurierung und nachhaltige Bewirtschaftung Natur spielt eine wichtige Rolle zur Erreichung sozialer, ökonomischer und ökologischer Ziele. Im politischen Bereich besitzt hingegen das Narrativ „All electric“ einen enormen Einfluss. In diesem Ansatz werden sämtliche fossile Energieträger durch Neue Erneuerbare Energien (Wind und Sonne) ersetzt. Da diese im ersten Schritt ausschließlich Energie in Form von Strom produzieren, muss in der Folge ein Großteil der Endanwendungen, die Verbraucher, elektrifiziert werden. Aktuell basiert ein Großteil energetischer Anwendungen aber auf dem Einsatz von Energie in Form von Molekülen: Kohle, Gas und Öl sowie daraus abgeleitete Produkte wie Diesel, Kerosin oder Benzin. Dahinter steckt, dass die Natur große Energiespeicherleistungen (nur) über Moleküle realisiert hat, nicht über Strom.

Der vorliegende Bericht diskutiert einerseits die Ansätze „All in“ und „All electric“ auf der Ebene der Narrative. Andererseits beschäftigt er sich auf der ökonomisch-technischen Ebene mit zwei Technologiebereichen, die im Kontext der Narrativ-Diskussion besonders interessant sind: (1.) den Kohlekraftwerken, die weltweit für etwa 20-25 % der Treibhausgas-Emissionen verantwortlich sind, aber eine enorme Bedeutung für den Wohlstandaufbau der Entwicklungs- und Schwellenländer haben und (2.) den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, von denen weltweit rund 1,4 Milliarden im Einsatz sind (davon etwa 400 Millionen Lkw) und die als Rückgrat der Mobilität und des Güterverkehrs ebenfalls eng mit den Wohlstandsambitionen der Nicht-Industriestaaten verbunden sind.

Im Ergebnis ist eine globale Energie- und Klimawende im Sinne des „All electric“-Ansatzes mit teils enorm höheren Kosten für die jeweilige Gesellschaft verbunden. Durch die gezielte Förderung einzelner Technologiepfade wird das Potential für eine

hohe techno-ökonomische Effizienz verspielt, das in einem technologieoffenen „All in“-Ansatz steckt. Dieses Geld fehlt an anderer Stelle, z. B. im Bildungsbereich, zur Bewältigung der Herausforderung einer immer älter werdenden Bevölkerung, der Digitalisierung, des Umweltschutzes etc. Außerdem löst ein „All electric“-Ansatz das Klimaproblem nicht. Dies ist vielleicht mit das wichtigste Argument für den Vorzug des „All in“-Ansatzes; denn hier existiert eine realistische Chance auf Klimaneutralität im Zeitraum von 2050-2070 und ein wirtschaftliches (BIP-) Wachstum für die Entwicklungs- und Schwellenländer von durchschnittlich 6 % pro Jahr zwischen 2025-2050.

Eine große Chance und ein wichtiges Lösungskonzept besteht in der Kombination der Kohlekraftwerke mit den Verbrennungsmotoren. Mithilfe des großflächigen Einsatzes von Carbon-Capture-Technologie können CO₂-Emissionen direkt an ihrer Punktquelle, den Kohlekraftwerken abgefangen werden, um dann zusammen mit Wasserstoff zu synthetischen Kraftstoffen weiterverarbeitet zu werden. Methanol als direktes Syntheseprodukt und dessen Derivate wie Methanol-Benzin, -Diesel, -Kerosin und -Schiffsdiesel sind dabei wichtig.

Allein in China existiert ein Potential für die Umrüstung von Kohlekraftwerken auf Carbon Capture von etwa 250-565 Gigawatt mit Vermeidungskosten von unter 60 US-Dollar pro Tonne CO₂, inklusive Abfangen, Verflüssigung des CO₂ und dessen Transport zu einer geeigneten Lagerstätte. Das entspricht etwa 25-50 % des chinesischen Kohlekraftwerksparks, wobei in China etwa die Hälfte der weltweiten Kapazität installiert ist.

Betrachtet man die gesamte Wirkungskette im Mobilitätssektor, von der Bereitstellung der notwendigen Energie bis hin zum tatsächlichen Fahren auf der Straße (Well-to-Wheel) zeigt sich für unterschiedliche Szenarien, dass Konzepte unter Einbeziehung synthetischer Kraftstoffe in einer globalen Betrachtung in Bezug auf die Systemkosten günstiger abschneiden als Mobilitätskonzepte, die rein auf batterieelektrischen Fahrzeugen und damit auf einer Elektrifizierung des Verkehrs beruhen.

Dies spiegelt einen generellen Trend wider, dass nämlich Technologiemix-Szenarien kostengünstiger und besser zur Zielerreichung geeignet sind als eingeschränkte Technologiepfade.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary.....	iii
1 Einleitung.....	10
1.1 Zielsetzung des Berichts	12
1.2 Aufbau und Gliederung des Berichts	13
2 Kontext	15
2.1 Der Konflikt um den „richtigen Weg“ in die Zukunft	15
2.2 Im Widerspruch: Ein Blick auf die internationale Debatte	18
2.3 „Der Elefant im Raum“ – Die Faktenlage zu Emissionen und der Nutzung von fossiler Energie mit Kohle	21
2.4 Versuch einer Erklärung	23
3 Die zentralen Probleme der globalen Energieversorgung	25
3.1 Energiearmut der Entwicklungs- und Schwellenländer.....	28
3.2 CO ₂ -Ausstoß der Entwicklungs- und Schwellenländer – Die UN-Position...	34
3.3 CO ₂ -Entwicklung in den Industrieländern und Kosten	37
3.4 Bestandsaufnahme der NDCs der Entwicklungs- und Schwellenländer.....	43
4 Nutzung von Kohle und Einsatz von Verbrennungsmotoren – Status quo und Perspektiven weltweit	46
4.1 Die zentrale Bedeutung der Kohlekraftwerke – Tendenz wachsend	46
4.2 Die „Switch Coal“-Bewegung.....	54
4.3 Die zentrale Bedeutung der Verbrennungsmotoren – Tendenz wachsend .	62
4.4 Die Probleme der Elektro-Mobilität.....	69
4.5 Ankündigungen nach Dubai	73
5 Die Alternativen für das Energiesystem.....	75
5.1 „Kampf“ der Narrative	75
5.2 „All Electric“ und strikte Defossilisierung.....	76
5.3 „All in“ und zwei Säulen für ein Energiesystem.....	79
5.4 Umbau statt Abriss mit gleitenden Übergängen	83
5.5 Die Wiederentdeckung von CCUS im Energiesektor.....	84
5.6 Synthetische Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren nutzen	87

6	Systemische Überlegungen.....	93
6.1	Kohle- und Gaskraftwerke klimafreundlich mit CCUS betreiben	93
6.2	Einblick China: Umrüstung der bestehenden Kohlekraftwerke.....	99
6.3	Vergleich der Kosten unterschiedlicher Antriebssysteme.....	105
6.4	LKW und Verbrenner (HVO).....	115
6.5	Case-Study: Indien	119
6.6	Nature-based Solutions nutzen und finanzieren.....	131
	Anhang.....	134
	A.1 Expertenbefragung in Australien	134
	A.2 Bevölkerungsbefragung zu CCS-Technologien.....	146
	Literaturverzeichnis	200

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CO ₂ -Emissionen pro Kopf (konsumbasiert) und der Human Development Index, der sich aus der Lebenserwartung, Bildung und Lebensstandard zusammensetzt. Abbildung aus: Our World in Data (2024a)	26
Abbildung 2: Primärenergieverbrauch weltweit nach Energiequelle. Abbildung aus: Our World in Data (2024b).....	27
Abbildung 3: Energieverbrauch pro Energieverbrauch pro Kopf weltweit für das Jahr 2022. Die Angaben sind in Kilowattstunden (kWh). Abbildung aus: Our World in Data (2023b)	30
Abbildung 4: Stromerzeugung pro Kopf weltweit für das Jahr 2022. Die Angaben sind in Kilowattstunden (kWh). Abbildung aus: Our World in Data (2023d)	30
Abbildung 5: Jährliche CO ₂ -Emissionen von 1952-2022 für die OECD-Staaten, die Vereinigten Staaten, Deutschland, Großbritannien und Frankreich. Abbildung aus: Our World in Data (2023a).....	38
Abbildung 6: Globaler Einsatz von Kohle von 2002-2026. Quelle: IEA (2023a).	49
Abbildung 7: Globale Investitionen in Kohle. Abbildung aus IEA (2023c)	53
Abbildung 8: Mittlere Windleistungsdichte und durchschnittliches Solarenergiepotential einzelner Länder und Regionen. Abbildung aus: McKinsey & Company (2022b).....	56
Abbildung 9: Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und daraus resultierendes Risiken für einzelne Länder in Abhängigkeit der Wirtschaftsleistung pro Kopf. Abbildung aus: McKinsey & Company (2022b)	57
Abbildung 10: Langfristige Chancen für eine gelingende Energiewende aufgrund der Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen wie Wind- und Solarenergie aber auch kritischer Rohstoffe. Abbildung aus: McKinsey & Company (2022b)	58
Abbildung 11: Die Entwicklung der LCOE von Windkraft, PV und Kohlekraftwerken in China, Indien und Deutschland.. Abbildung aus: Switch Coal (2023).....	59
Abbildung 12: Levelized Full System Costs of Electricity (LFSCO _E) für die Bereitstellung der Energie von 100 % bzw. von 95 % mit der entsprechenden Technologie generiert werden muss. Abbildung aus: Idel, R. (2022).	60
Abbildung 13: Motorisierungsgrad der Länder der Welt.: Daten aus OICA (2020) ...	63
Abbildung 14: Bestand und Neuzulassungen von Lkw 2019-2045. Abbildung aus: BCG (2021)	66
Abbildung 15: Entwicklung der schweren Lkw, Busse und Fernbusse im EU-Referenzszenario 2020. Abbildung aus: European Commission (2021)	67

Abbildung 16: Anteil elektrischer Fahrzeuge für unterschiedliche Fahrzeugkategorien zwischen 2022 und 2040 für ein Basis-Szenario (schwarz) und ein beschleunigtes Szenario (grau). Abbildung aus: McKinsey & Company (2022a)	69
Abbildung 17: Kumulierte Emissionen existierender Kohlekraftwerke auf Basis des aktuellen Alters nach Region, 2022-2100. Abbildung aus: IEAGHG (2023)	86
Abbildung 18: Netto-Stromerzeugung von neuen Anlagen im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011)	94
Abbildung 19: Effizienzen von neuen Anlagen im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011).	95
Abbildung 20: Investitionskosten von neuen Anlagen im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011).	95
Abbildung 21: Levelized Cost of Electricity von neuen Kohlekraftwerken im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011). [Obj]	96
Abbildung 22: Levelized Cost of Electricity von neuen Gaskraftwerken im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011)	96
Abbildung 23: Auswirkung der Effizienz des Kraftwerks auf (a) die CO ₂ -Vermeidungskosten und (b) die Stromgestehungskosten (Levelized Costs of Electricity, LCOE) ohne Aufschlag für CO ₂ -Vermeidungskosten für umgerüstete Kohlekraftwerke und neue Kohlekraftwerke mit CCS. Abbildung aus: IEAGHG (2011)	98
Abbildung 24: Techno-ökonomische Analyse des CCUS-Umrüstungspotentials und Speichermöglichkeiten chinesischer Kohlekraftwerke. Abbildung aus: Yang, L. (2022)	100
Abbildung 25: Trend über mögliche Kostenentwicklungen pro Tonne abgefangenes CO ₂ für CC-Technologien erster und zweiter Generation. Abbildung aus: Yang, L. (2022)	102
Abbildung 26: CO ₂ -Vermeidungskosten abhängig von der kumulierten jährlichen CO ₂ -Vermeidungsmenge. Abbildung aus: Wei, N. (2021)	104
Abbildung 27: Ausgewählte Prozesse zur Herstellung von Powerfuels. Abbildung aus dena (2018a)	106
Abbildung 28: Well-to-Weel (WtW)-Nachfrage in TWh pro Jahr im Jahr 2050 für 42 Szenarien. Abbildung aus FVV (2021)	110
Abbildung 29: Gesamte inkrementelle Kosten der Energie-/Kraftstofflieferkette und Fahrzeuge bis 2050 in Milliarden Euro. Abbildung aus FVV (2021)	111

Abbildung 30: Vergleich der Gesamtemissionen verschiedener Antriebskonzepte auf Grundlage einer Lebenszyklusanalyse. Abbildung aus FVV (2020).....	114
Abbildung 31: Weltweite HVO-Produktionskapazität 2020, Prognose für 2025. Abbildung aus: Statista (2021).....	116
Abbildung 32: Screenshot der “Tankstellenkarte“ für HVO-haltige Dieselkraftstoffe in Europa. Farbige Markierungen beschreiben die unterschiedlichen HVO-Anteile der Kraftstoffe, z. B. HVO 100 (rot, vollsynthetisch), HVO-Beimischungen 1 (dunkelblau, 20-50 % HVO-Anteil), HVO-Beimischungen 2 (hellblau, weniger als 15 % HVO-Anteil)	117
Abbildung 33: Abgasqualität von HVO und von einem HVO/Diesel 30/70-Gemisch im Vergleich zu 100% Diesel. Abbildung aus: Aatola, H. et al. (2008)	118
Abbildung 34: Kosten von Sattelzugmaschinen abhängig von der Antriebsart. Abbildung aus: Ökoinstitut et al. (2020).....	119
Abbildung 35: Indiens Energieversorgungssystem nach Regionen und Erzeugungstechnologien.	121
Abbildung 36: Schematische Darstellung der Energiesystem-Simulation von Global Energy Solutions.	123
Abbildung 37: Weltweit abgefangenes CO ₂ im Sustainable Development Scenario der Internationalen Energieagentur, IEA.....	128
Abbildung 38: Co-Elektrolyse zur Herstellung von synthetischem Kerosin und Diesel. Abbildung aus: Peters et al. (2022)	130

1 Einleitung

Die Welt befindet sich aus der Perspektive der Zivilisationsentwicklung in einer bedrohlichen Phase. Durch das Zusammenwirken von technischen und sozialen Innovationen hat es der Mensch geschafft, sich mit zeitweise exponentiellem Bevölkerungswachstum und bald rund 10 Milliarden Menschen über die gesamte Erde zu verbreiten. Zentrale Voraussetzungen dafür sind und waren technische und soziale Innovationen. Diese laufen jedoch gegen die endliche Ressourcenbasis der Erde und Rebound-Effekte spielen eine negative Rolle. In der Folge belasten die Folgen der menschlichen Ausbreitung zunehmend die Balance der Ökosysteme in der Form, dass das Klimasystem aus den Fugen gerät und vermehrt Dürren und andere Extremwetter auftreten. Zusätzlich nehmen die Spannungen zwischen den einzelnen Nationalstaaten im Wettbewerb um Macht und Ressourcenzugriff zu.

Dabei wird die Situation für Entscheidungsträger immer komplexer und unübersichtlicher, weil einerseits immer mehr Staaten und weitere Akteure wie Firmen und Nichtregierungsorganisationen mitgestalten wollen und dies auch können. Andererseits gehen die Entwicklungen immer schnell voran, beispielsweise im Bereich der Automatisierung und der Digitalisierung, z. B. mit den neusten Entwicklungen im Bereich der „lernenden Algorithmen“, der sogenannten künstlichen Intelligenz.

Die globale Staatengemeinschaft hat sich mit dem Abkommen von Paris und den Nachhaltigkeitszielen (Sustainable Development Goals, SDGs) im Jahr 2015 auf zwei Verträge/Programmatiken verständigt, die einerseits das Klimaproblem in den Griff bekommen und andererseits ein angemessenes Wohlstandsniveau für die breite Masse der Menschen ermöglichen sollen. Es gibt Lösungsvorschläge zum Umgang mit Einzelthemen, wie den Ausbau der Erneuerbaren Energien, der Energieeffizienz oder klimaschonendes Kochen für ländliche Regionen in Afrika und Südostasien. Dabei gehen unterschiedliche Akteure jeweils eigene Wege: Der Staat Frankreich setzt auf den substanziellen Ausbau der Atomkraft und hat kürzlich zur Schaffung einer Allianz von über 30 Staaten für dieses Ziel beigetragen. Das Unternehmen Tesla war lange der Vorreiter bei der Elektromobilität und sieht sich mittlerweile mit einer erheblichen Konkurrenz von chinesischen Firmen konfrontiert. Deutschland hatte lange Zeit die Speicherung und sogar den Export von Kohlenstoffdioxid (CO₂) verboten und ist erst kürzlich im Rahmen einer neuen Carbon Management Strategie davon abgerückt.

Was auffällt ist, dass ein international abgestimmtes Gesamtbild weitestgehend fehlt, das die SDGs und das Klimaabkommen von Paris ernst nimmt und versucht, darauf aufbauend eine machbare Lösungsstrategie zu entwickeln. Das Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung (FAW/n) und der Global Energy Solutions e.V. (GES) sind diesem Problem auf den Grund gegangen und haben im Rahmen des Projekts „Global Energy Perspectives“ mit Förderung des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) und zwölf Unternehmen/Organisationen der Wirtschaft einen solchen Lösungsvorschlag entwickelt, ein globales Referenzmodell, das in Form eines Berichts im Juni 2023 veröffentlicht wurde.¹

Der vorliegende Bericht bildet eine gleichwertige Ergänzung zu diesem Referenzmodell, weil es sich explizit mit der Rolle der Kohlekraftwerke und mit dem Einsatz von synthetischen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren beschäftigt. Dies sind zwei zentrale Handlungsfelder. Beides war von Seiten des BMZ im Rahmen des Projekts Global Energy Perspectives ausgeschlossen worden und sollte nicht behandelt werden. Aus Sicht des FAW/n und von GES sind dies jedoch zwei Themenbereiche, die für ein vollständiges Bild einer globalen Energiewende essentiell sind. Der vorliegende Bericht sowie der Bericht zum Projekt Global Energy Perspectives sind in diesem Sinne komplementär und fußen auf derselben Analyse der Gesamtsituation. In diesem Sinne sind inhaltlich Überschneidungen und Ergänzungen der beiden Projekte unausweichlich, ja geradezu gewollt, um eine ganzheitliche Lösungsoption für eines der drängendsten Probleme aufzeigen zu können: Klima- und Umweltschutz bei gleichzeitigem Wohlstand für bald zehn Milliarden Menschen auf der Erde. Wobei zunächst unklar war, ob das Ziel überhaupt erreichbar ist. Glücklicherweise ist das gelungen. Der vorliegende Bericht für die Vector Stiftung stellt die bisher noch fehlenden Elemente zur Verfügung. Die Beteiligten danken der Vector Stiftung, dass sie diesen Arbeiten ermöglicht hat.

¹ Vgl. GES (2023).

1.1 Zielsetzung des Berichts

Im Rahmen der Untersuchungen, wie eine Transformation des globalen technisch-ökonomischen Systems hin zu Netto-Null-Emissionen im Zeitraum bis 2050/2070 gelingen kann, betrachtet dieser Bericht aus dem Bereich der Punktquellen der Treibhausgasemissionen insbesondere die Kohlekraftwerke sowie den aus dem Bereich der Mobilität die Fahrzeugflotte mit Verbrennungsmotoren. Diese beiden Bausteine sind aktuell mit enormen Mengen an CO₂-Emissionen verbunden und stellen gleichzeitig wichtige Elemente für den Wohlstand und den angestrebten Wohlstandsaufbau der Staaten dar. Deshalb wird untersucht, wie auf der Basis neuer Technologien der Bestand an heute fossil betriebenen Kraftwerken und Industrieanlagen mithilfe des Abfangens von CO₂ und seiner anschließenden Recyclierung/Weiterverwendung bzw. Speicherung (Carbon Capture and Usage/Storage, CCUS) in ein klimaneutrales Gesamtsystem eingebunden werden kann.

Besonders an diesem Ansatz ist das Zusammenwirken eines technischen und eines natürlichen biologischen Kohlenstoffkreislaufs. Abgefangenes CO₂ könnte in Kombination mit Low-Carbon-Wasserstoff zu synthetischen Kraftstoffen verarbeitet und so weitergenutzt werden, indem damit entweder wiederum Kraftwerke oder Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren betrieben werden. Das wäre der Fall des Carbon Capture and Usage (CCU) als Element des technischen Kohlenstoffkreislaufs. Der biologische Kreislauf ergänzt dies in der Form, dass das schließlich doch durch z. B. den Verbrennungsmotor emittierte CO₂ durch Naturbasierte Lösungen wieder aus der Atmosphäre entnommen wird. Dazu zählt z. B. die Speicherung durch Aufforstung oder durch Humusbildung in der Landwirtschaft. Im Fall des großen technischen Kohlenstoffkreislaufs wird das CO₂ an Kraftwerken abgefangen, verflüssigt, transportiert und durch Carbon Capture and Storage wieder in die Erde gepresst, im geeignetsten Fall in ehemalige Öl- oder Gaskavernen, aus denen ursprünglich der fossile Energieträger entnommen wurde. Dies ist als „Enhanced Oil Recovery“ in den USA seit über 30 Jahren eine etablierte Technologie, um fossile Felder weiter auszufördern.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts wird nun insbesondere untersucht, ob sich dieser Weg rechnet, obwohl heute oft behauptet wird, dass die neuen erneuerbaren Energien, insbesondere Photovoltaik und Wind, die preiswertere Lösung seien, um die

Energie- und Klimaprobleme zu lösen. Hier spielten nicht nur die technische Machbarkeit, sondern auch Aspekte der Wirtschaftlichkeit und der globalen Kooperation eine entscheidende Rolle. Eine Leitidee ist „Umbau statt Abriss“. Dies steht in direktem Gegensatz zu dem alternativen Weg „all electric und strikte Defossilisierung“.

1.2 Aufbau und Gliederung des Berichts

Neben der Einleitung besteht dieser Bericht aus weiteren sechs Kapiteln. Durch den Bericht ziehen sich zwei Handlungsstränge, nämlich die Ebene der öffentlichen Diskussion und des „Wordings“, der Narrative, auf der einen Seite, bei der es um die Deutungshoheit in der Debatte zum richtigen Umgang mit dem Energie- und Klimaproblem geht. Hier fallen die wesentlichen Leitentscheidungen, häufig sehr unkluge Festlegungen, wie der vorliegende Bericht zeigt. Die zweite Ebene ist die technisch-naturwissenschaftliche, die um wirtschaftliche Betrachtungen ergänzt wird. Häufig besteht zu wenig Austausch zwischen den dominierenden Akteuren der beiden Ebenen. Das soll im vorliegenden Bericht anders gemacht werden.

Die Kapitel 2 und 3 bereiten die Grundlage für die eigentlichen Untersuchungen.

Kapitel 2 beschreibt den Kontext der international geführten Debatte zum Thema Energie- und Klimaproblem und zeigt insbesondere auf, warum seit Jahrzehnten der Diskussion auf globalem Niveau wenig Fortschritte in der Praxis stattgefunden haben.

Kapitel 3 beschreibt die wesentlichen Trends und Probleme bei der globalen Energieversorgung, insbesondere die Problematik, gleichzeitig den Wohlstandserwartungen der Entwicklungs- und Schwellenländer gerecht zu werden und dennoch das Umwelt- und Klimasystem nicht aus dem Gleichgewicht zu bringen.

Kapitel 4 behandelt die beiden Hauptaspekte der vorliegenden Forschungsarbeit, nämlich den globalen Park an Kohlekraftwerken und die Flotte an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Hier wird zudem hergeleitet, warum es aus Sicht der Autoren dieses Berichts nur darum gehen kann, einem Umbau des aktuellen wirtschaftlich-technischen Systems unter sinnvoller Einbeziehung der Kohlekraftwerke und der Verbrennungsmotoren zu realisieren, anstatt diese Systembereiche komplett auszuphasen bzw. die eingesetzten Technologien zu verbieten.

Kapitel 5 zeichnet die Argumentationslinien zweier Lösungsnarrative für die Energie- und Klimaprobleme nach, nämlich den Ansatz „all electric und strike Defossilisierung“ sowie den Ansatz „all in“, bei dem das Energiesystem auf „zwei Säulen“ basiert. Hier wird eine sinnvolle Kombination volatiler Neuer Erneuerbarer Energien (Wind und Sonne) und „fossil-grüner“ in Grundlast betriebener Energien gefordert.

Kapitel 6 geht auf technischer Ebene in die einzelnen Bausteine und deren Kombination ein, die zur Realisierung des Szenarios der „zwei Säulen“ notwendig sind, sodass ein Umbau des aktuellen Systems stattfinden kann.

Des Weiteren wird an verschiedenen Stellen herausgestellt, in welchen Bereich unbedingt weitere Forschung notwendig ist. Insbesondere der Bereich „MINT² und Governance“ sollte in weiteren Arbeiten tiefer erforscht werden, weil letztlich die Regelsysteme einer Gesellschaft entscheiden, welche Technik zum Einsatz kommen darf, welche gefördert wird und welche nicht. Die ist z. B. für Carbon Capture entscheidend, weil diese Technologie beispielsweise in Deutschland immer noch verboten ist, auch wenn es Initiativen in der aktuellen Bundesregierung gibt, dies zu ändern. Durch das Verbot unterschiedlicher Technologien wird der Raum von Lösungsoptionen verringert, was im Normalfall die übrigen Lösungsoptionen kostspieliger macht bzw. dazu führen kann, dass Probleme überhaupt nicht gelöst werden können.

Dies ist ein Grund dafür, dass in diesem Bericht insbesondere die Lösungsoptionen „all in“ und „all electric“ gegenübergestellt werden. Dabei wird die Relevanz von MINT in der Kombination der Governance ersichtlich und erneut bestätigt, dass sogenannte Technologiemix-Szenarien diejenigen sind, die eine umfassende Lösung der Energie- und Klimaprobleme in Kombination mit einer Verbesserung der Lebensbedingungen der Menschen weltweit überhaupt erst ermöglichen.

² Die Abkürzung „MINT“ bezeichnet die Fachbereich Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik.

2 Kontext

2.1 Der Konflikt um den „richtigen Weg“ in die Zukunft

Weltweit nehmen die Klimagasemissionen nach wie vor zu, während sich die Hauptakteure der internationalen Klimapolitik und Teile eines großen gesellschaftlichen Umfelds mit „tiefer“ Verankerung in nationalen und internationalen Politikprozessen Jahr für Jahr auf Weltklimakonferenzen treffen. Im Jahr 2023, auf der letzten Konferenz COP28, gab es in Dubai etwa 80.000 Besucher.

An vielen Punkten der internationalen Debatten hat die Europäische Union eine Vorreiterrolle, auch weil sie gerade in ärmeren Ländern viel Geld mit Klimabezug einsetzt – auch um die Debatte zu beeinflussen. Deutschland zieht dabei viele Fäden. Es verwundert nicht, dass die deutsche Politik mit 500 offiziellen Mitarbeitern aus ihrem Umfeld in Dubai vertreten war. Dies, obwohl wegen aktueller politischer Erfordernisse die gesamte Mannschaft des Wirtschafts- und Klimaministeriums kurzfristig ihre Beteiligung abgesagt hatte.

Der von Deutschland wesentlich mitbestimmte internationale Klimadiskurs vermeidet grundsätzlich das entscheidende Thema: dass nämlich Klimaschutz nur global möglich ist. Wir müssten in der Folge erhebliche Finanzmittel in den Globalen Süden transferieren. Dort sind die CO₂-Vermeidungskosten sehr gering, aber das wollen wir nicht. Stattdessen konzentriert sich unsere Politik seit langem auf das internationale Ausphasen der fossilen Energieträger – vor allem der Kohle – obwohl die in Deutschland eingesetzte Bruttoenergie nach wie vor zu über 65 % auf fossilen Energieträgern beruht. Dabei hat sich die Kohlenutzung in jüngster Zeit wieder massiv verstärkt. Deutschland ist an dieser Stelle wenig glaubwürdig, aber beharrlich.

Der „Petersberger Klimadialog“ ist in diesem Kontext immer ein wichtiger Vorbereitungstermin für die Debatten auf der Weltklimakonferenz. Hier werden oft entscheidende Debatten mit Blick auf den nächsten Klimagipfel geführt. In Vorbereitung auf Dubai ging es in ungewohnter Offenheit und als Kontroverse um die Frage, ob fossile Energieträger oder fossile Emissionen das Problem sind. Fossile Emissionen resultieren aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern, sofern die Emissionen nicht abgefangen werden. Das Abfangen heißt „Carbon Capture“. Je nachdem, ob der Kohlenstoff danach weiterverwendet oder eingelagert wird, spricht

man von Carbon Capture and Usage (CCU) bzw. Storage (CCS). Ist beides gemeint, verwendet man die Abkürzung CCUS.

Carbon Capture ist der Weg, wie fossile Energieträger klimaneutral werden können. Angesichts der unglaublichen Volumina an fossilen Emissionen und der sehr engen Zeitsituation zur Verminderung der CO₂-Emissionen ist deshalb Carbon Capture für viele Beobachter zentral zur Bewältigung der Herausforderungen im Klimabereich.

Naturwissenschaftlich ist der Sachverhalt einfach: Treiber des globalen Klimawandels sind Treibhausgase, insbesondere CO₂-Emissionen. Kann man diese – z. B. an Kohlekraftwerken – verhindern, sind die Kohlekraftwerke keine Bedrohung mehr für das Klima. Diese Sicht wird aber im Kernbereich der deutschen Klimadebatte strikt abgelehnt. Deswegen kann der Eindruck entstehen, dass es nicht so sehr um das Klima geht, als darum, ein Monopol der Neuen Erneuerbaren (Wind und Sonne) bei der Energieversorgung zu schaffen.

Wenn jemand Kohle als Energieträger mit Carbon Capture weiterhin einsetzen möchte, handelt es sich dabei um einen Versuch der Fortschreibung ungeeigneter veralteter Lösungen, z. B. durch Konzerne und deren Eigentümer, die nur ihr altes Geschäftsmodell weiter betreiben wollen, auch wenn das auf Kosten der Umwelt und des Klimas geht.

Auf der Ebene der **Vereinten Nationen** ist das Narrativ nicht überraschenderweise dasselbe, beeinflussen doch Deutschland und Europa neben anderen Industriestaaten über ihre Fördermittelvergabe für Entwicklungs- und Schwellenländern auch stark das dortige Geschehen.

Noch während der letzten Klimakonferenz im Dezember 2023 in Dubai rief UN-Generalsekretär António Guterres die knapp 200 Staaten der Welt auf, sich zusammenzurufen und den Ausstieg aus Kohle, Öl und Gas im Abschlusstext festzuschreiben. Gleichzeitig betonte er, dass insbesondere sich entwickelnden Länder stark von fossilen Energien abhängig sind.³

Selbst in offiziellen Publikationen von UNIDO, die UN-Organisation für die weltweite Förderung industrieller Entwicklung, ist das Narrativ der erneuerbaren Energien klar erkennbar.⁴ An keiner Stelle werden die Widersprüche so deutlich wie hier, ist doch

³ Vgl. UN (2023).

⁴ Vgl. UNIDO (2024).

die Verfügbarkeit von ausreichend Energie unbedingt notwendige Voraussetzung für jegliche Industrialisierung. Bis heute gibt es kein einziges Land, dem ohne die Nutzung fossiler Energien eine erfolgreiche Industrialisierung gelungen ist.

Schließlich sei auch auf den Council of Engineers for the Energy Transition (CEET) verwiesen, ein Beratergremium für den UN-Generalsekretär. Neben dem Direktor des UN Sustainable Development Solutions Network, Jeffrey Sachs, steht auch UNIDO-Generaldirektor Dr. Gerd Müller dem CEET vor.

Auch wenn das Gremium erst vor gut eineinhalb Jahren seine Arbeit aufgenommen hat, zeigt ein Blick in bisher veröffentlichte Policy Briefs, dass jenseits der erneuerbaren Energien und des Themas Energieeffizienz wenig publiziert wurde.⁵

Selbst in diesem Gremium gestaltet es sich mehr als schwierig, den technologischen Lösungsraum zu weiten. In dem Gremium ist die Diskussion zum Umgang mit der Schweren Industrie sehr wichtig – FAW/n und GES nehmen über Prof. Franz Josef Radermacher und Dr. Tobias Orthen an der Arbeit des CEET teil. Allerdings hat es einige Zeit gedauert, bis das Thema Carbon Capture über die sogenannten, hard-to-abate sectors, z. B. Stahl und Zement, hinaus diskutiert wurde.⁶ Erst jetzt wird das Thema Carbon Capture in Breite behandelt, nachdem die Klimakonferenz in Dubai in aller Deutlichkeit klar gemacht hat, dass es ohne nicht geht. Das Primat der Erneuerbaren findet seinen Weg also in Teilen sogar in dieses Gremium der Ingenieure.

Dass sich das beschriebene Narrativ bis heute hält, wurde zuletzt im März 2024 beim Berlin Energy Transition Dialogue (BETD) deutlich, das sich seit 2015 zu einem bedeutenden internationalen Forum für die globale Energiewende entwickelt hat. Auf der Webseite ist unter anderem zu lesen: *„An energy transition that achieves one hundred percent renewable energy is possible. [...] A renewables-based energy supply is also a powerful job engine that will provide skilled employment and grow prosperity as it promotes a reliable, locally sourced energy system based on decentralised, resilient technologies.“*⁷

Warum wird diese Argumentationslinie so stark verfolgt? Sie soll den Ansatz **„all electric und strikte Defossilisierung“** absichern, der z. B. in Deutschland das Bild

⁵ Vgl. CEET (2024).

⁶ Vgl. UNFCCC (2023b).

⁷ BETD (2024).

bestimmt. Erneuerbare Energien, insbesondere Solar und Wind, haben ausschließlich Vorteile und deswegen muss viel Geld in diesen Wirtschaftszweig fließen. Das hat Monopolcharakter.

2.2 Im Widerspruch: Ein Blick auf die internationale Debatte

Schon beim Petersberger Dialog im Sommer 2023 wurde deutlich, dass der „all electric“-Ansatz international keine Chance hat, sobald Entwicklungs- und Schwellenländer an der Diskussion teilnehmen. Dazu zählt zum Beispiel das Ausphasen der Kohle um jeden Preis. Zum Petersberger Klimadialog kamen dann im Jahr 2023 auch die Organisatoren der Klimakonferenz COP28 in Dubai, die Vereinigten Arabischen Emirate, nach Bonn.

Aus Sicht der Autoren ist der internationale Blick anders und viel realistischer als der deutsche Blick. Dort wird die zukünftige Energieversorgung nicht auf die Nutzung erneuerbarer Energien reduziert. Stattdessen finden sich in den entsprechenden Abschlusserklärungen Formulierungen, die klar erkennen lassen, dass die fossilen Energien im Spiel bleiben werden.

Ein sehr kontrovers diskutiertes Thema war hier die Frage eines Ausstiegs aus den fossilen Energien gegenüber einem Ausstieg aus den fossilen Emissionen, was eine Weiternutzung der fossilen Energieträger erlaubt, wenn verhindert wird, dass bei ihrer Nutzung CO₂ in die Atmosphäre gelangt.

In der Abschlusserklärung hieß es dazu schließlich: *„A ROLE FOR CARBON MANAGEMENT: There is a clear role for carbon management – through afforestation and technological solutions – in a just transition. However, the extent of the role of **technical solutions outside of hard-to-abate sectors**⁸ was the substance of much debate. While some representatives saw the need to support broader deployment of **carbon management technologies for existing fossil fuel facilities**, caution was voiced by other representatives due to concerns about the cost, unclear timescales, potential to delay the transition, and environmental impacts“.*⁹

⁸ Hervorhebungen in diesem Unterkapitel sind durch die Autoren vorgenommen worden und sind im Originaltext nicht enthalten.

⁹ AA (2023), S. 2.

Der relativ neue Begriff „Carbon Management“ zeigt eine Verlagerung vom Fokus auf fossile Energieträger hin zu einem stärkeren Fokus auf fossile Emissionen. Es ist nicht verwunderlich, dass ein solcher Wandel bei der letzten COP in Dubai stattgefunden hat. Präsident der Konferenz war Sultan Ahmed Al-Jaber, Chef des größten Energiekonzerns der Vereinigten Arabischen Emirate, der Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC) mit Sitz in Abu Dhabi. Fossile Energieträger sind die Basis für den Wohlstand auf der Arabischen Halbinsel. Auch für erneuerbare Energien wird dort viel getan, weil die enorm großen Sonnenwüsten entsprechendes Potential mitbringen. Fossile Energieträger bleiben aber bis auf Weiteres das Rückgrat und eine Garantie für die Zukunft. Natürlich gilt das auch für China, Indien, Russland, Indonesien, Südafrika und viele andere mehr. Gerade auch die sich entwickelnden Länder wollen – und müssen – ihre fossilen Ressourcen nutzen. Um diesen Grundkonflikt der internationalen Klimadebatte wurde in Dubai bis zur letzten Minute gerungen, insbesondere um die zulässigen und die unzulässigen Technologien. Die Konferenz musste in die Verlängerung gehen.

Leider schafft es die Komplexität der Debatte auf internationalen Konferenzen kaum in die Medien. Daher scheint es sinnvoll zu sein, einmal ausführlich aus der Abschlusserklärung zu zitieren, denn häufig schaffen es nur Ausschnitte in die breite Berichterstattung und jede Organisation stellt die eigenen Interessen stärker heraus. Wichtig ist hier, dass die Autoren bei der vorliegenden Studie und auch bei der eingangs erwähnten Studie für das BMZ alle Bausteine in den Analysen im Sinne einer Technologieoffenheit mitberücksichtigen. Das Zitat lautet:

„28. Further recognizes the need for deep, rapid and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5 °C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches:

- (a) Tripling renewable energy capacity globally and doubling the global average annual rate of energy efficiency improvements by 2030;*
- (b) Accelerating efforts towards the phase-down of unabated coal power;*
- (c) Accelerating efforts globally towards **net zero emission energy systems, utilizing zero- and low-carbon fuels well before or by around mid-century;***

(d) *Transitioning away from fossil fuels in energy systems, in a just, orderly and equitable manner, accelerating action in this critical decade, so as to achieve net zero by 2050 in keeping with the science;*

(e) **Accelerating zero- and low-emission technologies**, including, *inter alia*, renewables, nuclear, **abatement and removal technologies such as carbon capture and utilization and storage, particularly in hard-to-abate sectors**, and low-carbon hydrogen production;

(f) *Accelerating and substantially reducing non-carbon-dioxide emissions globally, including in particular methane emissions by 2030;*

(g) *Accelerating the reduction of emissions from road transport on a range of pathways, including through development of infrastructure and **rapid deployment of zero and low-emission vehicles**;*

(h) *Phasing out inefficient fossil fuel subsidies that do not address energy poverty or just transitions, as soon as possible;*

*29. Recognizes that transitional fuels can play a role in facilitating the energy transition while ensuring energy security;*¹⁰

Die bewusst nicht präzisen Formulierungen führten nach Abschluss der Klimakonferenz zu weiteren Streitigkeiten über die Deutungshoheit und die Frage, ob eine Abkehr von den fossilen Energien beschlossen wurde oder nicht. Während die deutsche Außenministerin Baerbock interpretierte „*Die Klimakonferenz besiegelt de facto das Ende des fossilen Zeitalters.*“, konstatierte der saudische Energieminister Bin Salam „*Was wir erreicht haben, ist ein À la carte Menü, aus dem sich jedes Land aussuchen kann, welche Maßnahmen es umsetzen will.*“¹¹

¹⁰ UNFCCC (2023a), S. 5.

¹¹ Fuhr, L. (2024).

2.3 „Der Elefant im Raum“ – Die Faktenlage zu Emissionen und der Nutzung von fossiler Energie mit Kohle

Schaut man sich die letzten Jahrzehnte die Entwicklung im Klimabereich an, dann stellt man eine dauernde Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre fest – konträr zu den internationalen Zielvisionen, wo es darum geht, die Erderwärmung auf maximal 2 °C (besser 1,5 °C) zu begrenzen. Etwa alle 10 Jahre liegt der Klimateffekt bei etwa 0,13 °C Erwärmung. Auch der oft proklamierte Übergang zu einer rein erneuerbaren Energieproduktion findet in der Realität nicht statt, obwohl man seit Jahrzehnten verhandelt, wie Klimaschutz gestaltet werden soll.

Die weltweiten CO₂-Emissionen steigen stetig weiter an. So beliefen sich die Emissionen im Jahr 2023 auf 36,8 Milliarden Tonnen, was einem Anstieg von 1,1 % gegenüber dem Vorjahr entspricht.¹² Getrieben durch die wirtschaftlichen Aufholprozesse in den Schwellen- und Entwicklungsländern stößt die Welt mehr und mehr CO₂ aus, was in völligem Einklang mit dem Pariser Klimaschutzabkommen geschieht. Einzig die Corona-Pandemie hat in Folge des erzwungenen Stillstands von Teilen der Weltökonomie kurzfristig zu einem (allerdings nur geringem) Rückgang der CO₂-Emissionen geführt. Das korrespondiert zu der relativ einfachen Erkenntnis, dass weniger ökonomische Aktivität, weniger CO₂ und – man kann das auch so lesen – **weniger Wohlstand** bedeutet.

Betrachtet man die fossilen Emissionen, spiegeln sich in diesen Zahlen insbesondere die wirtschaftlichen Entwicklungsprozesse in Indien und China wider: Während die fossilen Emissionen in Indien (+8,2 %) und China (+4,0 %) zunahmen, gingen sie in Europa (-7,4 %) und den Vereinigten Staaten (-3,0 %) zurück und verringerten sich geringfügig im Rest der Welt (-0,4 %).¹³

Die weltweiten Emissionen aus Kohlekraftwerken beliefen sich im Jahr 2023 auf ziemlich genau 10 Milliarden (Giga-) Tonnen CO₂, was einem Anteil von 25 % an den Gesamt-CO₂-Emissionen entspricht.¹⁴ Es ist offensichtlich, dass selbst eine Teilreduktion dieser Emissionen durch die Anwendung von CCS-Technologien von

¹² Vgl. Friedlingstein, P. et al. (2023).

¹³ Vgl. Friedlingstein, P. et al. (2023).

¹⁴ Vgl. Global Energy Monitor (2024).

großem Wert für den Klimaschutz wäre. Global gesehen nehmen fossile Energieträger also weiterhin zu.

So wurden in 2023 69,5 Gigawatt an Kohlekraftwerkskapazitäten in Betrieb genommen, 21 Gigawatt wurden stillgelegt. Die meisten neuen Kohlekraftwerke kamen in China hinzu. Damit sind weltweit aktuell 2.130 Gigawatt installierte Leistung in Betrieb. Weitere 578 Gigawatt sind in Entwicklung.¹⁵ Der Anstieg der fossilen Emissionen wird also weiter anhalten, wenn nicht neue technologische Lösungen im Umfeld der Kraftwerke so eingesetzt werden, dass diese emissionsfrei betrieben werden. Dies gilt umso mehr, weil ein Großteil der heute installierten Kapazitäten zwischen 0 und 19 Jahren alt ist und wegen der langen Laufzeiten von üblicherweise 40 Jahren noch lange Zeit nicht planmäßig abgeschaltet werden wird.

Der steigende Bedarf und die vermehrte Nutzung von Kohle hat auch damit zu tun, dass sich der weltweite Bezug von Energie infolge des Ukraine-Kriegs verändert hat. In der Folge sah sich Deutschland vom russischen Gas abgeschnitten und damit war ein Eckpfeiler des erfolgreichen deutschen ökonomischen Systems beseitigt. Es wurde mit ziemlicher Panik nach alternativen Energiequellen gesucht, vor allem nach anderen Gasquellen.

Flüssiggas, LNG, z. B. aus den USA, hat die Lücken gefüllt. Das ist ein sehr teurer Schritt, der außerdem wegen der Probleme der Leckagen bei LNG selbst mit erheblichen, eher verdeckten CO₂-Emissionen verbunden ist. Das Gas selbst ist teilweise das Ergebnis von „Fracking“, das in Deutschland generell und insbesondere im eigenen Land abgelehnt wird. Wegen unserer ökonomischen Stärke konnten wir dennoch unsere Gas-Lücken füllen, indem wir sehr hohe Preise gezahlt haben.

In der Folge stiegen die Preise für LNG global stark an, was dazu führte, dass insbesondere Entwicklungsländer nicht mehr in der Lage waren, die geforderten Preise zu zahlen. Ihr Ausweichen bestand in der vermehrten Nutzung von günstigerer Kohle.¹⁶ Und auch Deutschland blieb nach Ausbruch des Ukraine-Krieges und dem Ausstieg aus der Atomenergie keine andere Lösung als vermehrt auf importierte Kohle zu setzen.¹⁷

¹⁵ Vgl. Global Energy Monitor (2024).

¹⁶ Vgl. Reçber, S. (2022).

¹⁷ Vgl. Käufer, T. (2023).

Dass außerdem eine neue Erdgasleitung, die „Trans-Sahara-Pipeline“, von Afrika nach Europa gebaut werden soll, fügt sich ins Bild und wird von den Entwicklungsländern zurecht als „Heuchelei“ bezeichnet.¹⁸

Unter dem Strich steht die Erkenntnis, dass heute über 80 % der weltweit erzeugten Energie fossilen Ursprungs ist, während nicht einmal 10 % aus neuen erneuerbaren Energien (Wind und Sonne) stammen.¹⁹ Die Aussicht darauf, dass sich das Verhältnis bis 2050 – dem anvisierten Zeitpunkt für Netto-Null-Emissionen – umdrehen wird, ist schlecht.

2.4 Versuch einer Erklärung

Es stellt sich die Frage, ob es eine schlüssige Erklärung für die beschriebenen Widersprüchlichkeiten, Inkohärenzen und technologischen Verengungen gibt. Eine solche würde die Hypothese liefern, dass politisch das Ziel verfolgt wird, dass die Schwellen- und Entwicklungsländer keinen (weiteren) Weg des wirtschaftlichen Aufholens gehen sollen und dass in den klassischen Industrieländern Wohlstandsverluste herbeigeführt werden sollen, um auf diese Weise die ökologischen Probleme zu lösen und den Klimawandel in den Griff zu bekommen: Weniger Wohlstand bedeutet weniger CO₂. Weniger Wohlstand wiederum entsteht, wenn weniger Energie zu höheren Kosten als zuvor bereitgestellt wird. Dies ist der „einfache“ Weg die Herausforderungen im Bereich des Umwelt- und Klimaschutzes zu bewältigen, der sicher nicht mehrheitsfähig ist, wenn er voll verstanden würde.

Natürlich nicht von irgendeiner Art zentraler Instanz geplant, so scheint es doch so zu sein, dass sich das Krisenmanagement der reichen Staaten in Richtung dieser Art „Lösung“ entwickelt. Auch hätte dieser Weg mit einer Erreichung der 17 UN-Nachhaltigkeitsziele nichts mehr zu tun, ist doch die Agenda 2030 eine auf Wachstum setzende Agenda, in deren Kern es um die gleichzeitige weltweite Verfolgung von Entwicklungs- UND Umwelt- und Klimaschutzanliegen geht.

Legt man die beschriebene Hypothese zugrunde, werden viele der heute beobachtbaren Phänomene schlüssig: Die Energieerzeugung wird auf erneuerbare Energien reduziert. CO₂-Zertifikate werden problematisiert und damit verhindert, dass

¹⁸ Vgl. Drechsler, W.; Lumme, C. (2022).

¹⁹ Vgl. IEA (2023).

in Breite kostengünstigere und zugleich Entwicklung fördernde internationale Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden. Grüner Wasserstoff und grüner Strom aus Entwicklungsländern werden durch Regulatorik verteuert. Somit bleibt heimische erneuerbare Energie als Geschäftsmodell zum Beispiel in Deutschland erhalten, woran bestimmte Branchen und Gruppen sehr gut verdienen. Der aktuell eingeschlagene Weg hat also auch Nutznießer. Weiter verfolgbar bleibt er nur dann, wenn die neuen Erneuerbaren ihre Monopolstellung behalten, damit man unvermeidbar diese nutzen muss, wobei die exorbitant hohen Kosten aus dem Staatshaushalt getragen werden, was indirekt zur Verarmung beiträgt, jedoch – wie zuvor beschrieben – nicht für alle.

Gegenbewegungen haben sich auf der Klimakonferenz in Dubai formiert. Die Entwicklungs- und Schwellenländer und schon gar nicht die Staaten mit reichen fossilen Energien lassen sich nicht auf diesem Weg ein.

Fest steht aber auch: Aus einer gesamtgesellschaftlichen oder volkswirtschaftlichen Perspektive ist die Verfolgung eines solchen Weges kaum vertretbar. Auch sollte er eigentlich nicht durchsetzbar sein, es sei denn, es gelingt, genügend viele Menschen von seiner Alternativlosigkeit zu überzeugen.

3 Die zentralen Probleme der globalen Energieversorgung

Die Energiekrise in den 1970er Jahren hat dazu geführt, dass sich Staaten und Gesellschaften intensiv damit beschäftigt haben, das Thema Energie proaktiv anzugehen. In den 1970er Jahre kamen 3 Effekte zusammen: 1) man bemerkte, dass einige Formen fossiler Energie zu Umweltzerstörungen führen, 2) es baute sich die Angst davor auf, dass fossile Energieträger irgendwann erschöpft sein könnten (insbesondere Öl, das sogenannte Peak-Oil-Thema) und 3) dass man anfang, über die Risiken der zu damaligen Zeit vielversprechendsten Energiequelle zu diskutieren, der Atomenergie.²⁰ Davor schien Energie erst einmal in beliebigem Umfang vorhanden zu sein und einen attraktiven, energieintensiven Lebensstil für immer mehr Menschen möglich zu machen.

Dass es erst so spät dazu kam, dass sich nicht nur die Naturwissenschaften konzeptionell mit dem Thema Energie beschäftigten (alle Prozesse können letztlich darauf zurückgeführt werden, wie viel Energie sie benötigen oder umwandeln²¹) ist erstaunlich. Denn auf Grundlage der Energie können sowohl ökonomische, soziale, politische, aber auch kulturelle Prozesse (teilweise) beschrieben werden.²² Über 80 % der heute verwendeten Energie ist fossilen Ursprungs, sodass bei deren Verbrennung CO₂ entsteht. Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und dem Human Development Index, der sich aus der Lebenserwartung, dem Bildungsniveau und dem Lebensstandard zusammensetzt, also über reine ökonomische Faktoren hinaus geht, um die menschliche Lebenssituation zu beschreiben. Es ist klar zu erkennen, dass ein höherer Energieverbrauch, und damit höhere Emissionen, im aktuellen technisch-ökonomischen System mit einem höheren Wohlstandsniveau zusammenhängen. Gleichzeitig möchte man natürlich für alle Menschen ein möglichst hohes Niveau realisieren, stößt aber an die Grenzen dessen, was der Planet an CO₂-Emissionen (stellvertretend für die anderen Treibhausgase) verkraften kann.

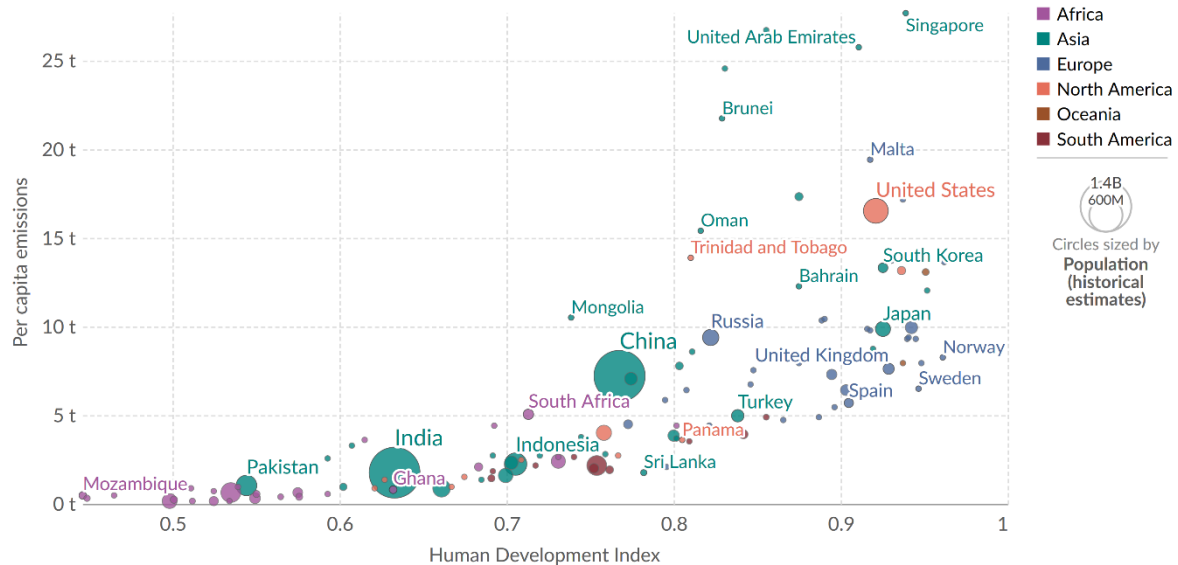
²⁰ Vgl. Graf, R. (2023).

²¹ Vgl. Graf, R. (2023), S. 2.

²² Vgl. Graf, R. (2023).

Consumption-based CO₂ emissions per capita vs. Human Development Index, 2021

Consumption-based emissions¹ are measured in tonnes per person. The Human Development Index (HDI) is a summary measure of key dimensions of human development: a long and healthy life, a good education, and a decent standard of living.



Data source: Global Carbon Budget (2023); Population based on various sources (2023); UNDP, Human Development Report (2021-22) (2022)

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

1. **Consumption-based emissions:** Consumption-based emissions are national or regional emissions that have been adjusted for trade. They are calculated as domestic (or 'production-based' emissions) emissions minus the emissions generated in the production of goods and services that are exported to other countries or regions, plus emissions from the production of goods and services that are imported. Consumption-based emissions = Production-based - Exported + Imported emissions

Abbildung 1: CO₂-Emissionen pro Kopf (konsumbasiert) und der Human Development Index, der sich aus der Lebenserwartung, Bildung und Lebensstandard zusammensetzt. Abbildung aus: Our World in Data (2024a)²³

Können diese Probleme über die Bereitstellung erneuerbarer Energie gelöst werden? Wie ist der aktuelle Stand? Die installierte Leistung der erneuerbaren Energie lag Ende 2023 weltweit bei 3.870 GW. Der Zuwachs betrug 473 GW (+13,9 %) gegenüber dem Vorjahr. Solarenergie hatte einen Anteil von 1.419 GW, Wasserkraft von 2.268 GW und Windkraft von 1.017 GW. Der Zuwachs bei der Solarenergie betrug 346 GW (+32 %), der von Windkraft 116 GW (+13 %) und der von Wasserkraft 7 GW. Damit dominieren Solarenergie und Windkraft den Zubau an erneuerbaren Energien.²⁴

Zu beachten ist, dass die jährlichen Vollaststunden bei Windkraft bei 2.600 bis 4.500 Stunden liegen und die von Photovoltaikanalgen zwischen 900 und 2.300 Stunden.

²³ Vgl. Our World in Data (2024a).

²⁴ IRENA (2024).

Die installierte Leistung muss um diese Werte berichtigt werden, um verschiedene Energiequellen vergleichen zu können.

In allen Weltregionen ist die Kapazität der erneuerbaren Energien in den letzten zehn Jahren prozentual stark gestiegen. Die größte Dynamik war in Mittel- und Südostasien zu verzeichnen. Allein auf China entfiel ein Zuwachs von 63 % sowie auf USA und Europa von 10 % und 7 %. Ozeanien, Australien und Afrika folgten mit 9,4 %, 8,4 % sowie 4,6 %. Mit einem Anteil von 37,6 % besitzt China den größten Anteil an der installierten Leistung. Am Ende der Tabelle steht Afrika mit 1,6 % (62 GW).

Dies liest sich wie eine Erfolgsgeschichte und das nahe Ende des fossilen Zeitalters. Dem steht jedoch eine genauere Betrachtung der Energiemengen und -ströme entgegen. Betrachtet man nicht die installierte Leistung, sondern die tatsächlich genutzte Energie, relativiert sich das Bild erheblich. Abbildung 2 zeigt den Primärenergieverbrauch seit 1940 nach Energiequellen. Die Dominanz fossiler Quellen ist ungebrochen.

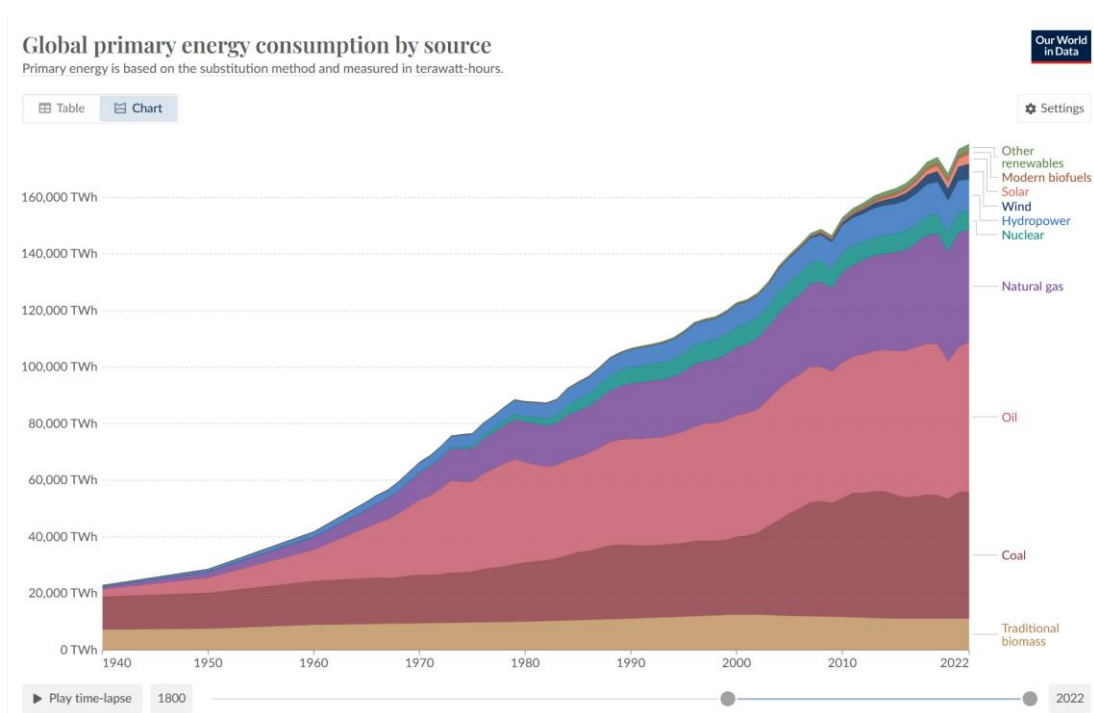


Abbildung 2: Primärenergieverbrauch weltweit nach Energiequelle. Abbildung aus: Our World in Data (2024b)²⁵

²⁵ Vgl. Our World in Data (2024b).

Tabelle 1: Veränderung des Primärnergieverbrauchs zwischen 2012 und 2022.

Global primary energy consumption by source [source: Our World in Data]						
	2012	2022	Absolute Change	Relative Change	Share form total 2022	
Primary energy from other renewables	1.335 TWh	2.414 TWh	1079 TWh	81%		
Primary energy from biofuels	762 TWh	1.199 TWh	437 TWh	57%		
Primary energy from solar power	278 TWh	3.448 TWh	3170 TWh	1140%		1,9%
Primary energy from wind power	1.455 TWh	5.488 TWh	4033 TWh	277%		3,1%
Primary energy from hydropower	9.986 TWh	11.300 TWh	1314 TWh	13%		
Primary energy from traditional biomass	11.441 TWh	11.111 TWh	-330 TWh	-3%		
Total primary energy from renewables	25.257 TWh	34.960 TWh	9.703 TWh	38%		
Share form total	16,0%	19,5%				
Primary energy from nuclear power	6.500 TWh	6.702 TWh	202 TWh	3%		
Primary energy from natural gas	33.203 TWh	39.413 TWh	6210 TWh	19%		22,0%
Primary energy from oil	49.114 TWh	52.970 TWh	3856 TWh	8%		29,6%
Primary energy from coal	44.023 TWh	44.854 TWh	831 TWh	2%		25,1%
Total primary energy from non renewables	132.840 TWh	143.939 TWh	11.099 TWh	8%		
Share form total	84,0%	80,5%				
Total	158.097 TWh	178.899 TWh	20.802 TWh	13%		

Zwischen 2012 und 2022 wuchs der Energieverbrauch um 20.802 TWh (+13 %) auf insgesamt 178.899 TWh. Diesen Mehrverbrauch deckten die Erneuerbaren mit 9.703 TWh und die nicht Erneuerbaren – im wesentlichen Kohle Öl und Gas – mit 11.099 TWh. Trotz massiver Begünstigung der Erneuerbaren Energien stieg deren Anteil am Gesamtenergieverbrauch lediglich um 3,5 % auf 19,5 %. Noch ernüchternder sieht die Bilanz von Solar und Windkraft aus. Die Erzeugungstechnologien, die die Wende bringen sollen, besitzen einen vernachlässigbaren Anteil von 1,9 % bzw. 3,1 %.

3.1 Energiearmut der Entwicklungs- und Schwellenländer

Als „Entwicklungsländer“ (developing countries) werden im Allgemeinen Staaten bezeichnet, deren Industrie weniger weit entwickelt und deren Human Development Index (HDI) im Vergleich zu anderen Staaten geringer ist. Sogenannte „Schwellenländer“ werden im Englischen häufig als „emerging economies“ bzw. auch als „economies in transition“ bezeichnet. Sie stehen an der Schwelle zu einem Zustand mit höherem HDI und verfügen bereits über eine breitere industrielle Basis. Diese Bezeichnungen sind jedoch teilweise umstritten und nicht einheitlich. Die Weltbank beispielsweise klassifiziert streng nach Bruttonationaleinkommen pro Kopf nach vier Kategorien: high income, upper-middle income, lower-middle income und low income countries. Andere Einteilungen sprechen von Industrieländern und Nicht-

Industrieländern. Veraltet und nicht mehr verwendet sind die Begriffe „erste Welt“, „zweite Welt“ und „dritte Welt“.

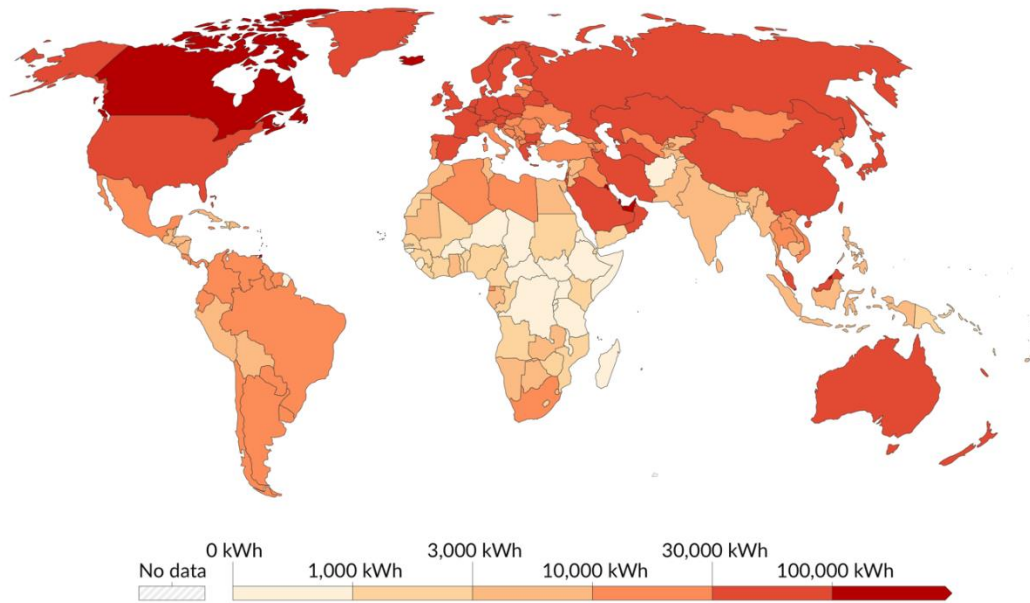
Wie bereits ausgeführt, hängen Wohlstand, Energie und CO₂-Emissionen eng miteinander zusammen. Entwicklungsstaaten zeichnen sich daher dadurch aus, dass in den jeweiligen Wirtschaften wenig Energie umgesetzt wird bzw. umgelegt auf die Bewohner wenig Energie pro Kopf zur Verfügung steht. Dies betrifft sowohl Primärenergie als auch Endenergie. Primärenergie ist einfach gesprochen alles, was am Anfang der Wertschöpfung in eine Volkswirtschaft hinein geht, z. B. Kohle, Gas und Öl, aber auch Biomasse. Jedoch verbrauchen die Menschen und die Unternehmen die Energie in anderer Form, z. B. in Form von Elektrizität, die aber erst unter Nutzung von Primärenergiequellen wie Kohle erzeugt werden muss. Dabei treten Verluste auf, sodass Primärenergie und Endenergie sich in ihrem Zahlenwert unterscheiden.

Abbildung 3 zeigt den Endenergieverbrauch pro Kopf für die einzelnen Staaten der Welt anhand eines Farbspektrums. Helle Farben mit teilweise weniger als 1.000 Kilowattstunden (kWh) pro Kopf und Jahr finden sich vor allem in Subsahara-Afrika. Die kräftigsten Töne in Rot-Orange finden sich in Nordamerika, Westeuropa und Australien, des Weiteren auch in rohstoffreichen Staaten wie Saudi-Arabien, Russland, China oder dem Iran, obwohl diese Staaten kein so hohes Durchschnittseinkommen pro Kopf haben, wie z. B. die USA oder westeuropäische Staaten. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Elektrizität in Abbildung 4, die besonders für die Haushalte aber ebenfalls für die Industrie extrem wichtig ist. Besonders zu beachten ist, dass einzelne Haushalte beispielsweise in Westeuropa zwischen 30.000 und 100.000 kWh pro Kopf und Jahr umsetzen. Hier wird nicht nur der Stromverbrauch betrachtet. In der Grafik wird auch der Industrieverbrauch des Landes auf die Bevölkerung umgelegt.

Gewaltig, fast schon erschreckend ist der gravierende Unterschied zwischen den einzelnen Staaten weltweit. Zwischen den niedrigsten Werten von 1.000 kWh pro Kopf und Jahr und den höchsten Werten von 100.000 kWh liegt ein Faktor 100. Da Energie die Grundlage für die Art von Lebensstandard ist, die sich die meisten Menschen der Welt vorstellen, ist das „Entwicklungsproblem“ am besten als Problem der Energiearmut zu verstehen. So interpretiert es auch Bill Gates in seinem Buch „Wie wir die Klimakatastrophe verhindern: Welche Lösungen es gibt und welche Fortschritte nötig sind“.

Energy use per person, 2022

Measured in kilowatt-hours per person. Here, energy refers to primary energy using the substitution method.

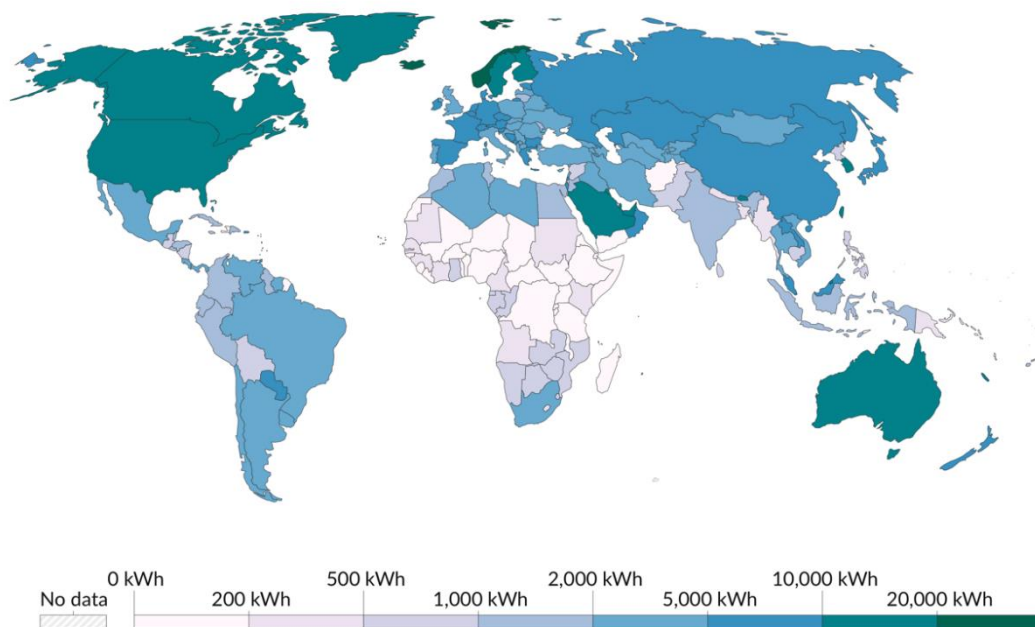


Data source: U.S. Energy Information Administration (2023); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023); Population based on various sources (2023)
OurWorldInData.org/energy | CC BY

Abbildung 3: Energieverbrauch pro Kopf weltweit für das Jahr 2022. Die Angaben sind in Kilowattstunden (kWh). Abbildung aus: Our World in Data (2023b)²⁶

Per capita electricity generation, 2022

Annual average electricity generation per person, measured in kilowatt-hours.



Data source: Ember - Yearly Electricity Data (2023) and other sources

OurWorldInData.org/energy | CC BY

Abbildung 4: Stromerzeugung pro Kopf weltweit für das Jahr 2022. Die Angaben sind in Kilowattstunden (kWh). Abbildung aus: Our World in Data (2023d)²⁷

Country/Region	2019	2022	Absolute Change	Relative Change
China	33,921.18 TWh	36,138.06 TWh	+2,216.88 TWh	7%
Egypt	993.52 TWh	1,042.99 TWh	+49.47 TWh	5%
Germany	2,811.78 TWh	2,603.25 TWh	-208.54 TWh	-7%
India	8,357.20 TWh	8,954.85 TWh	+597.65 TWh	7%
Indonesia	2,093.46 TWh	2,437.86 TWh	+344.40 TWh	16%
Iran	3,149.17 TWh	3,335.62 TWh	+186.45 TWh	6%
Malaysia	1,156.85 TWh	1,234.01 TWh	+77.16 TWh	7%
Mexico	2,056.37 TWh	2,179.55 TWh	+123.18 TWh	6%
Morocco	243.96 TWh	238.13 TWh	-5.83 TWh	-2%
Oman	373.08 TWh	411.18 TWh	+38.10 TWh	10%
Peru	231.13 TWh	242.42 TWh	+11.29 TWh	5%
Philippines	499.77 TWh	512.25 TWh	+12.48 TWh	2%
Russia	7,330.66 TWh	6,927.51 TWh	-403.16 TWh	-5%
Saudi Arabia	2,972.73 TWh	3,191.14 TWh	+218.41 TWh	7%
South Africa	1,413.92 TWh	1,261.53 TWh	-152.39 TWh	-11%
United Arab Emirates	1,232.82 TWh	1,334.28 TWh	+101.46 TWh	8%
Venezuela	449.42 TWh	439.91 TWh	-9.51 TWh	-2%
Africa	5,057.13 TWh	5,058.22 TWh	+1.09 TWh	0%
Asia	74,179.66 TWh	77,566.51 TWh	+3,386.85 TWh	5%
Central America (EI)	304.49 TWh	308.11 TWh	+3.62 TWh	1%
Eastern Africa (EI)	450.32 TWh	467.16 TWh	+16.85 TWh	4%
European Union (27)	12,418.17 TWh	11,520.51 TWh	-897.66 TWh	-7%
High-income countries	56,951.73 TWh	54,949.85 TWh	-2,001.88 TWh	-4%
Lower-middle-income countries	19,699.92 TWh	20,557.24 TWh	+857.33 TWh	4%
North America (EI)	26,636.83 TWh	26,283.33 TWh	-353.51 TWh	-1%
OECD (EI)	52,260.13 TWh	50,431.78 TWh	-1,828.35 TWh	-3%
South America	4,390.09 TWh	4,511.96 TWh	+121.87 TWh	3%
Upper-middle-income countries	55,019.76 TWh	57,188.05 TWh	+2,168.29 TWh	4%
Western Africa (EI)	705.32 TWh	774.14 TWh	+68.82 TWh	10%
World	136,105.72 TWh	137,236.67 TWh	+1,130.95 TWh	1%

Tabelle 2: Verbrauch fossiler Energie 2019 und 2022.²⁸

Auch bei solchen umfassenderen Studien, die sich heute nicht nur auf einen Baustein der globalen Energiewende, wie die Kohlekraftwerke, beziehen, gibt es zunehmende

²⁶ Vgl. Our World in Data (2023b).

²⁷ Vgl. Our World in Data (2023d).

²⁸ Richie und Rosado (2017).

Tendenzen, verstärkt die Klimaziele zu verfolgen und gewissermaßen unter allen Umständen einen Pfad für Netto-Null-Emissionen zu finden, ohne die Wohlstandserwartungen der ärmeren Staaten wirklich ernst zu nehmen. Zuvor ist davon auf UN-Ebene immer die Rede. Aber wenn es ernst wird, werden die nötigen Maßnahmen nicht ergriffen. Insbesondere werden regionale Begebenheiten oftmals nicht ausreichend berücksichtigt, wie ein interdisziplinäres Team aus überwiegend afrikanischen Wissenschaftlern bemängelt.²⁹ Der reiche Teil der Welt steht offenbar nicht hinter den Absichtserklärungen und Zielvereinbarungen; wie immer schon, Papier ist geduldig. Es entsteht der Eindruck, dass die anderen damit zufrieden sein sollen, was sie haben.

Tabelle 2 zeigt einerseits den Energiehunger sich wirtschaftlich stark entwickelnder Länder und andererseits, dass geringer Wohlstand insbesondere in Verbindung mit fossilen Vorkommen im eigenen Lande zu einem deutlichen Zuwachs beim Verbrauch fossiler Energien in den letzten Jahren geführt haben. Nahezu ausschließlich bei den High-income-countries sank der Verbrauch von Kohle, Öl und Gas. Klimaschutz muss man sich leisten können. Ferner zeigt die Tabelle, dass dem absoluten Rückgang bei der Verwendung fossiler Energieträger in den OECD-Staaten von -1.828 TWh eine deutlich größere Zunahme bei den Upper-middle-income-countries (+2.168 TWh) und den Lower-middle-income-countries (+857 TWh) gegenüberstanden.

Auch, wenn durch Elektrifizierung und allgemeinen technischen Fortschritt ohne Einfluss auf den Wohlstand Energieeinsparungen von ca. 10 % möglich sein sollten, vermittelt Tabelle 3 einen Eindruck des noch ungedeckten Energiebedarfs. Einem Pro-Kopf-Energiebedarf von 41.000 TWh in Deutschland stehen Verbräuche von ca. 10.000 TWh in Ägypten, 7.100 TWh in Indien und 3.900 TWh in Afrika gegenüber.

Folgende Schlussfolgerungen drängen sich auf:

- Fossile Energieträger besitzen bei der aktuellen aber auch bei der zukünftigen Energieversorgung eine überragende Rolle.
- Middle- und Low-income-countries können sich eine Energieversorgung mit erneuerbaren Energien mittelfristig noch nicht leisten.

²⁹ Vgl. Mulugetta, Y. et al. (2022).

- Middle- und Low-income-countries besitzen einen erheblichen zusätzlichen Energiebedarf.
- Eine Defossilisierung von fossilen Kraftwerken, Zement- und Stahlwerken und anderen CO₂-intensiven Quellen ist der einzige realistische Weg zu geringeren weltweiten Emissionen. Hierbei kommen CCS-Technologien zum Einsatz.

Tabelle 3: Primärenergieverbrauch pro Kopf 2022.³⁰

Country/Region	2019	2022	Absolute Change	Relative Change
China	28,277 kWh	31,051 kWh	+2,774 kWh	+10%
Egypt	9,920 kWh	9,960 kWh	+41 kWh	0%
Germany	44,468 kWh	40,977 kWh	-3,490 kWh	-8%
India	6,732 kWh	7,143 kWh	+412 kWh	+6%
Indonesia	8,474 kWh	9,854 kWh	+1,380 kWh	16%
Iran	37,636 kWh	38,133 kWh	+497 kWh	+1%
Malaysia	37,824 kWh	39,587 kWh	+1,763 kWh	+5%
Mexico	17,903 kWh	19,009 kWh	+1,106 kWh	+6%
Morocco	7,267 kWh	6,855 kWh	-412 kWh	-6%
Oman	81,071 kWh	90,751 kWh	+9,681 kWh	+12%
Peru	9,950 kWh	9,835 kWh	-114 kWh	-1%
Philippines	5,104 kWh	5,067 kWh	-38 kWh	-1%
Russia	57,486 kWh	55,459 kWh	-2,027 kWh	-4%
Saudi Arabia	82,989 kWh	87,707 kWh	+4,718 kWh	+6%
South Africa	25,511 kWh	22,351 kWh	-3,160 kWh	-12%
United Arab Emirates	134,878 kWh	148,577 kWh	+13,698 kWh	+10%
Venezuela	21,231 kWh	21,683 kWh	+452 kWh	+2%
Africa	4,188 kWh	3,944 kWh	-244 kWh	-6%
Asia	18,214 kWh	19,140 kWh	+925 kWh	+5%
European Union (27)	38,611 kWh	36,129 kWh	-2,482 kWh	-6%
High-income countries	57,949 kWh	56,469 kWh	-1,480 kWh	-3%
Lower-middle-income countries	6,522 kWh	6,658 kWh	+136 kWh	+2%
North America	56,745 kWh	55,937 kWh	-808 kWh	-1%
South America	16,362 kWh	16,805 kWh	+443 kWh	+3%
Upper-middle-income countries	25,917 kWh	27,390 kWh	+1,473 kWh	+6%
World	21,013 kWh	21,039 kWh	+26 kWh	0%

³⁰ Richie und Rosado (2017).

Einige wichtige Studien, die sich mit der globalen Energiewende und Netto-Null-Szenarien beschäftigen, sind:

- IEA – International Energy Agency (2021). *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*.³¹
- IRENA – International Renewable Energy Agency (2021). *World Energy Transitions Outlook: 1,5 °C Pathway*.³²
- BP (2023). *Energy Outlook 2023*.³³
- Shell (2021). *The Energy Transition Scenarios*.³⁴

Im Abschlussbericht des Projekts “Global Energy Perspectives“ wurden diese Studien miteinander verglichen, zum Untersuchungszeitpunkt lag die Studie von BP in ihrer Version von 2022 vor. Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Analyse für den vorliegenden Bericht ist die Erkenntnis, dass in allen genannten Studien der Einsatz von Carbon Capture-Technologien eine wichtige Rolle spielen wird. Natürlich existieren Unterschiede in der Ausgestaltung und im Umfang des Einsatzes, doch als Baustein wird dieser Technologiepfad in jedem Fall benötigt.

3.2 CO₂-Ausstoß der Entwicklungs- und Schwellenländer – Die UN-Position

Wie in Kapitel 2 bereits erläutert, existiert ein massiver Zielkonflikt zwischen dem Übereinkommen von Paris (Pariser Klimavertrag) und den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen (SDGs). Im Wesentlichen geht es darum, gleichzeitig einen massiven Wohlstandsaufbau zu realisieren und dabei die Umwelt und das Klimasystem in Takt zu halten. Das ist die alte Kernfrage der Nachhaltigkeit seit 1972, der “Brandrede” von Indira Gandhi zum Thema. Die Situation hat sich seitdem nur wenig verbessert.

Alle Klimabelange werden auf UN-Ebene unter dem Dach der Klimarahmenkonvention UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) behandelt. Ihr

³¹ Vgl. IEA (2021).

³² Vgl. IRENA (2021).

³³ Vgl. BP (2023).

³⁴ Vgl. Shell (2021).

aktuell wichtigstes Instrument ist der Pariser Klimavertrag, der die Staaten in drei Gruppen im Sinne ihrer Verpflichtungen innerhalb des Vertrags unterteilt: Annex-1-Staaten, Annex-2-Staaten und Nicht-Annex-1-Staaten. Die Begriffe sind historisch gewachsen und gehen auf das Dokument des ersten Klimavertrags, das Kyoto-Protokoll von 1997, zurück, weil die unterschiedlichen Staatengruppen dort in den jeweiligen Anhängen aufgelistet wurden. Annex-1-Staaten sind die Industriestaaten, die sich dadurch auszeichnen, den Klimawandel maßgeblich verursacht zu haben, weil sie durch ihre Industrialisierung einen Großteil der historischen Emissionen erzeugt haben. Annex-1-Staaten haben sich in Paris dazu verpflichtet, ihre Treibhausgas-Emissionen absolut zu reduzieren. Annex-2-Staaten sind eine Untergruppe dieser Industriestaaten aus Annex 1, und zwar diejenigen, die sich zusätzlich dazu verpflichtet haben, die Entwicklungsländer beim Umgang mit dem Klimawandel zu unterstützen, z. B. durch die Bereitstellung von Technologien. Nicht-Annex-1-Staaten sind Nicht-Industrieländer, also die eigentlichen Entwicklungsländer.

Es fällt auf, dass es in dieser Einteilung keine Schwellenländer gibt. Auch das ist teilweise historisch bedingt, weil Ende der 1980er bis Anfang der 1990er Jahre, als das Kyoto-Protokoll verhandelt wurde, die Rolle der Schwellenländer, wie z. B. Chinas, auf den Klimawandel noch nicht so gravierend war. Andererseits hat China während der Verhandlungen des Paris-Vertrags darauf beharrt, weiterhin Nicht-Annex-1-Staat zu bleiben, weil es weiterhin seine Emissionen erhöhen und sich unter keinen Umständen zu einer absoluten Reduktion verpflichten wollte.

Im Paris-Vertrag schlugen die Unterzeichnerstaaten als Grundprinzip jeweils selbst vor, was sie bereit sind, für den Klimaschutz zu tun. Mehr war verhandlungstechnisch nicht zu erreichen. Leider hat die Welt bei der Klimakonferenz 2009 in Kopenhagen die große Chance nicht genutzt, in Fortführung des Kyoto-Vertrags ein globales Cap-and-Trade-System zu vereinbaren. Damit wäre die heutige Situation vermieden worden. Die USA und China haben die damaligen Verhandlungen mit einem klaren Veto beendet.

Seitdem gibt es nur noch selbstgewählte Vorschläge. Diese Vorschläge heißen Nationally Determined Contributions (NDCs) und sind erst einmal unverbindlich. Das Klimasekretariat sammelt alle NDCs, unterzieht sie in regelmäßigen Abständen alle paar Jahre einem Review und vergleicht die freiwilligen Zusagen der Staaten in der Summe mit dem, was aus wissenschaftlicher Sicht notwendig wäre, um die

Erderwärmung auf 2 °C (besser 1,5 °C) zu begrenzen. Nicht überraschend reicht die Summe der freiwilligen Beiträge der Staaten nicht aus. Die Welt befindet sich auf einem Pfad in Richtung 3-4 °C Erwärmung.

Entscheidend ist dabei der Charakter der NDCs der Industriestaaten (Annex-1-Staaten) im Vergleich zu denen der Entwicklungs- und Schwellenländer. Wie erwähnt müssen Industrieländer ihre Emissionen absolut reduzieren. Die anderen Staaten versprechen hingegen die Höhe ihrer Emissionen vom angestrebten Wirtschaftswachstum zu entkoppeln. Das sind relative Reduktionen. Anders gesagt: es geht darum, eine höhere CO₂-Effizienz zu erreichen. Für jeden Punkt Wirtschaftswachstum sollen geringere zusätzliche Emissionen anfallen als für den letzten Zuwachs. Die Emissionen wachsen also absolut weiter. Der entscheidende Punkt ist jedoch, dass selbst diese (relativen) Anstrengungen nur vorgesehen werden, wenn eine gewisse Menge finanzieller Unterstützung der Industriestaaten gezahlt wird. Die NDCs der Entwicklungsländer sind also an Bedingungen geknüpft, weswegen sie auch „**Conditional NDCs**“ genannt werden. Laut Paris-Vertrag dürfen diese Staaten ihre Emissionen also absolut erhöhen.

Das passt zu den SDGs, den globalen Nachhaltigkeitszielen, insofern, als dass SDG 8 (Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum) in seinem Unterziel 8.1 fest schreibt, dass für die am wenigsten entwickelten Staaten ein jährliches Wirtschaftswachstum von mindestens 7 % erreicht werden soll.

Fassen wir das Beschriebene in Form einiger Zahlen zusammen: Die weltweite Bevölkerung wird sich von heute rund 8 Milliarden auf rund 10 Milliarden Menschen im Jahr 2050 um 25 % erhöhen. Dieser Zuwachs findet in den Entwicklungs- und Schwellenländern statt, vor allem in Afrika und Südostasien. Allein durch die größere Zahl an Menschen, aber zusätzlich durch die Arbeit an den SDGs und den gerechtfertigten Wunsch nach besseren Lebensbedingungen – und vor allem nach mehr Energie – wird es zu einem höheren Wirtschaftswachstum kommen. Verschiedene Studien gehen von einer Steigerung von heute rund 160.000 TWh auf teilweise rund 230.000 TWh aus, ein Plus von 40 %. Die Treibhausgas-Emissionen werden also mit höherem Energieverbrauch steigen, wenn das technisch-ökonomische System sich nicht signifikant ändert. Das Bild kennt die Welt von China, das in den letzten 30 Jahre mehrere 100 Millionen Menschen aus der Armut gebracht

hat, zugleich aber seine CO₂-Emissionen massiv gesteigert hat. Das sind heute so viele Emissionen, wie diejenigen aller OECD-Staaten zusammen.

In der in Kapitel 1 erwähnten Referenzlösung für eine Welt, in der die Zielkonflikte zwischen Klima- und Wohlstandszielen überwunden werden, wird ein Wachstum der jährlichen Wirtschaftsleistung von durchschnittlich 6 % für die Entwicklungsländer angestrebt. In dieser Form geschieht das nur in der Referenzlösung. Ansonsten wird dieser Punkt bevorzugt ausgeklammert. 6 % ist ambitioniert, scheint aber realisierbar und ist deutlich weniger als China „vorgelegt“ hat. Es würde dem international anerkannten Recht auf nachhaltige Entwicklung gerecht und könnte damit der Jahrzehnte alten Forderung der Entwicklungs- und Schwellenländer nachkommen, dass wirtschaftliche Entwicklung Priorität vor Umwelt- und Klimaschutz hat.

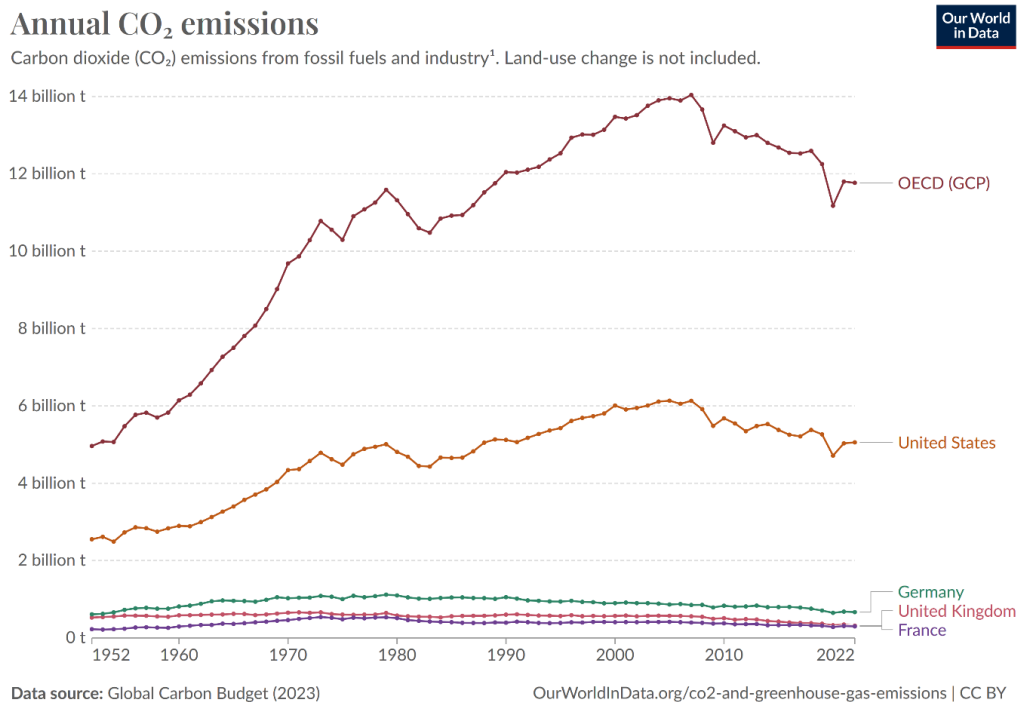
Der Streit über die Prioritäten hatte seit dem Welt-Umweltgipfel 1972 in Stockholm Fortschritte beim Umwelt- und später beim Klimaschutz auf internationaler Ebene blockiert. Gleichzeitig skizziert der Bericht zur Referenzlösung einen Weg und notwendig zu erfüllende Bedingungen, um diesen Wohlstandszuwachs klimafreundlich zu gestalten. Auch diese sind ambitioniert, scheinen aber nicht gänzlich unrealistisch zu sein.

Aktuell scheitert es jedenfalls an den Zahlungen der Industriestaaten und insgesamt an interessanten Angeboten dieser an die Entwicklungs- und Schwellenländer, Anstrengungen zum Klimaschutz zu unternehmen. Solche Angebote sind letztlich im Eigeninteresse der Industriestaaten und rücken dann ins Eigeninteresse der Entwicklungs- und Schwellenländer, wenn sie lukrative finanzielle Anreize und Angebote zu technischer sowie organisatorischer Unterstützung auf dem Pfad zu Net Zero in diesem Jahrhundert enthalten. Das Verständnis für die Notwendigkeit ist aber bei den reichen Länder nach nie vor völlig unterentwickelt.

3.3 CO₂-Entwicklung in den Industrieländern und Kosten

Wie erwähnt, haben die Industrieländer (Annex-1-Länder) im Rahmen des Paris-Vertrags zugesagt, ihre Emissionen absolut zu reduzieren. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der energiebedingten CO₂-Emissionen für einzelne Staaten sowie für die Gruppe der OECD-Staaten über den Verlauf von 70 Jahren von 1952-2022. Tatsächlich sind die Emissionen der OECD-Staaten und insbesondere auch die der

USA seit 2007 gesunken, wenn auch nicht konstant. Man sieht sehr klar, dass die Emissionen durch wirtschaftliche Einbrüche, durch die Finanzkrise 2008/2009 und durch die Covid-19-Pandemie 2020, gesunken und im danach recht schnell wieder gestiegen sind.



1. Fossil emissions: Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO₂) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO₂ includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

Abbildung 5: Jährliche CO₂-Emissionen von 1952-2022 für die OECD-Staaten, die Vereinigten Staaten, Deutschland, Großbritannien und Frankreich. Abbildung aus: Our World in Data (2023a)³⁵

Im Vergleich zu Ländern mit weniger stark entwickelten Industrien und geringerem Lebensstandard wird in Industrieländern bereits sehr viel Energie konsumiert, wie Abbildung 3 und Abbildung 4 oben zeigen. Bei diesen Staaten geht es also stärker darum, das Energiesystem in Richtung Klimafreundlichkeit umzubauen. Das wirft automatisch die Frage auf, wie mit den aktuellen Anlagen zur Energieerzeugung, der gesamten Infrastruktur und den Geräten und Anlagen umgegangen werden soll, die diese (fossile) Energie bisher umgesetzt haben. Alle diese Anlagen haben einen hohen Wert und befinden sich teilweise noch in der Finanzierung, sind also noch nicht abgeschrieben. In ihnen sind wertvolle Ressourcen gebunden, ebenso große

³⁵ Vgl. Our World in Data (2023a).

Volumina bereits emittierter CO₂-Emissionen bei ihrer Herstellung. Anders als bei Staaten, die ein Energiesystem erst einmal aufbauen müssen, geht es auch nicht nur um Kosten und CO₂-Emissionen der Neuinstallationen im Vergleich, sondern es geht auch darum, Kosten durch frühzeitige Abschreibung von Anlagen und Infrastruktur zu vermeiden.

Da eine Einschätzung der Kosten der globalen Energiewende besonders schwierig ist, müssen die folgenden Zahlen unter dem Vorbehalt großer Unsicherheiten betrachtet werden. Dennoch bieten sie eine Orientierung bzgl. der Größenordnung der Kosten und zeigen auf, wie sich unterschiedliche Pfade für einen klimafreundlichen Auf- bzw. Umbau der jeweiligen staatlichen Energiesystem vergleichen.

Großangelegte Rechnungen haben beispielsweise die Internationale Energieagentur (IEA)³⁶ und McKinsey & Company³⁷ vorgenommen. Hier tauchen u. a. Unterschiede bei der Berücksichtigung verschiedener Kostenpunkte auf. Betrachtet die IEA vorrangig die notwendigen Investitionen im Bereich der Energieerzeugung und Verteilung, so geht der McKinsey-Ansatz stärker in die Richtung „Total Cost of Ownership“ und berücksichtigt zusätzlich Kosten, die auf Privathaushalte und Firmen zukommen, weil sie in Zukunft vermehrt auf strombasierte Anwendungen setzen, z. B. Autos oder Heizsysteme; auch Investitionen in Wälder und Landwirtschaft und deren Kapazität zur CO₂-Aufnahme sind zusätzlich berücksichtigt.

Die IEA kalkuliert global jährliche Investitionen zwischen 3-4,5 Billionen US-Dollar.

McKinsey kalkuliert hingegen zwischen 2021-2050 jährlich, sogar rund 9,2 Billionen US-Dollar, über den Zeitraum von 30 Jahren also insgesamt rund 275 Billionen US-Dollar. Wichtig ist hier, dass es um einen Net Zero-Pfad geht, bei dem die Welt innerhalb einer Erwärmung von maximal 1,5 °C bleibt. Wer die Kosten tragen soll und wie das Ganze organisiert werden soll, war bewusst nicht Gegenstand der Betrachtungen; ob das Programm umsetzbar ist, genauso wenig. Allerdings wird mehrfach darauf hingewiesen, dass ärmere Länder und Staaten, die stark von fossilen Energieträgern abhängen, einen größeren Aufwand betreiben müssten als die anderen. Außerdem bestünde die Gefahr, dass etwa 2,1 Billionen US-Dollar an Anlagen auf Basis fossiler Energie abgeschrieben werden müssten (und damit zu sog.

³⁶ Vgl. IEA (2021).

³⁷ Vgl. McKinsey & Company (2022c).

„Stranded Assets“ werden). Dies vor allem in China und Indien, wo dort viele noch junge Kohlekraftwerke stehen, die vor weniger als 15 Jahren gebaut wurden.

Am Beispiel Deutschland sieht man, dass es sich durchaus lohnt, unterschiedliche Szenarien zu betrachten und insbesondere die jeweilige Philosophie mitzudenken, spricht die Annahmen zu hinterfragen, die hinter den jeweiligen Szenarien stehen. Die Deutsche Energieagentur (dena) hat in ihrer Leitstudie Integrierte Energiewende³⁸ vor der Novellierung des deutschen Klimaschutzgesetzes unterschiedliche Ansätze betrachtet, wie die Zukunft eines deutschen Energiesystems aussehen könnte. Damals war das Ziel, die Emissionen bis 2050 zwischen 80 und 95 % zu reduzieren. Die dena hat vier Szenarien miteinander verglichen: zwei Elektrifizierungs-Szenarien und zwei Technologiemit-Szenarien, jeweils für die Zielmarke 80 % beziehungsweise 90 % Reduktion.

Ausgangspunkt ist die Aussage, dass (Stand 2018) die aktuellen Maßnahmenpakete nur zu einer Reduktion von 62 % bis 2050 führen würden. Vergleicht man nun die Technologiemit-Szenarien mit den Elektrifizierungs-Szenarien, so zeigt sich, dass die Szenarien mit Technologiemit aufsummiert bis 2050 „bis zu 600 Milliarden Euro kostengünstiger [sind] als solche, die verstärkt auf strombasierte Anwendungen setzen“.³⁹ Die geringsten Investitionen von 1,2 Billionen Euro bis 2050 treten mit Technologiemit beim Ziel von 80 % auf, die höchsten Kosten von 2,2 Billionen Euro verursacht ein stark auf Strom aufgebautes Energiesystem mit einem 90 %-Reduktionsziel. Ähnlich wie bei der globalen Analyse der IEA müssen hier außerdem noch erhebliche zusätzliche Kosten hinzugerechnet werden, die z. B. auf der Seite der Industrie getätigt werden müssen. Im dena-Bericht heißt es dazu: „Diese Mehrinvestitionen müssten allen Szenarien entsprechend zugerechnet werden und die Kostendifferenz zwischen den Technologiemit- und den Elektrifizierungs-Szenarien würde sich tendenziell eher vergrößern.“⁴⁰

Ein großer Kostenpunkt ist neben dem Ausbau der Neuen Erneuerbaren Energien (Wind und Sonne) der Ausbau der Transport- und Verteilnetze für den Strom. Am Beispiel der Frage, ob das Gasnetz und die vorhandenen Gasspeicher in Deutschland

³⁸ Vgl. dena (2018a).

³⁹ dena (2018a), S. 10.

⁴⁰ dena (2018a), S. 21.

weitergenutzt werden sollen oder nicht lässt sich für einen spezifischen Sektor ein Kostenvergleich vornehmen:

Will man rein strombasiert den Bedarf an Energie decken, ohne Gasspeicher und Gasleitungen, wird es so teuer, dass frontier economics weitere Betrachtungen gar nicht erst vorgenommen hat. Energiespeicher und der Umstieg auf direkte Stromanwendungen in der Fläche rechnen sich nicht.⁴¹ Vergleicht man die Szenarien, in denen Energie in Form von Strom die Anwendungen betreibt und Gas als Speicher verwendet werden kann, sinken die Kosten bereits enorm. Nutzt man Gas als Brennstoff inklusive der vorhandenen Speicher und des Transportnetzes hingegen in gewissem Umfang weiter, lassen sich jährlich 12 Milliarden Euro bis 2050 einsparen. Im Vergleich von fünf größeren Klimaneutralitäts-Szenarien⁴² lassen sich große Unterschiede auf der technologischen und regulatorischen Seite erkennen, z. B. über die anvisierte Menge an Stromerzeugung aus Photovoltaik und Wind, daraus resultierend die installierte Leistung an regelbarer Kraftwerkskapazität zum Ausgleich der Volatilität aber auch der Menge an gespeichertem CO₂ und dessen anteilige Zusammensetzung, ebenso technische CO₂-Senken und biologische CO₂-Senken. Andererseits gibt es auch Gemeinsamkeiten, z. B., dass ein Großteil des notwendigen Wasserstoffs importiert werden muss, dass die technische Abscheidung von CO₂ an Punktquellen über CCUS notwendig ist und dass es einen starken Anstieg bei der Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen und Wasserstoff geben wird.

Alle diese Studien sind jedoch vor dem Entstehen der Carbon Management-Strategie der Bundesregierung entstanden, als CCUS in Deutschland im Wesentlichen nicht diskutiert wurde. In Deutschland ist laut Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG)⁴³ die Anwendung von CCUS in extremer Weise gesetzlich limitiert: 1,3 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr im Einzelfall und 4 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr in Deutschland insgesamt sind die oberen Grenzen im Geltungsbereich des Gesetzes. Das Gesetz lässt den Bundesländern bei der Freigabe oder dem Verbot weitgehend freie Hand, sodass Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern bereits eindeutige Gesetze erlassen haben, die CO₂-Speicherung verbieten. Außerdem besteht die Anforderung, dass das abgeschiedene CO₂ in Lagerstätten in unmittelbarer Nähe zur erzeugenden

⁴¹ Vgl. Frontier Economics (2018).

⁴² Vgl. dena (2022).

⁴³ Gesetz von 2012 mit letzter Änderung in 2021.

Anlage verpresst werden soll und die Lagerstätten das im gesamten Lebenszyklus der CO₂-Quelle erzeugte CO₂ speichern soll, was beispielsweise den Export zu günstigen Speicherorten in Norwegen verhindert.

Eckpunkte zur neuen Carbon Management-Strategie sehen nun vor, dass diese Hürden abgebaut werden. CCUS soll (natürlich) bei Prozessen angewandt und gefördert werden, bei den Emissionen schwer oder nicht vermeidbar sind, z. B. bei der Zementproduktion. Außerdem können auch Gaskraftwerke damit ausgestattet werden, dürfen jedoch nicht staatlich gefördert werden, wohingegen Kohlekraftwerke vom Anschluss an CO₂-Transportinfrastruktur und damit von CCUS allgemein ausgeschlossen werden. Hier lebt das alte „Feindbild“ Kohle weiter. Die neue Strategie ist ein wichtiger Meilenstein für eine sinnvolle Ausgestaltung der Energiewende insgesamt und erweitert das Spektrum zulässiger technologischer Lösungen. In Anlehnung an die Erkenntnisse der dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ ist davon auszugehen, dass sich dadurch der Kostenvorteil von Technologiemix-Szenarien gegenüber Elektrifizierungs-Szenarien zusätzlich verstärken wird.

Erste Hinweise in diese Richtung liefert eine neue Studie von McKinsey,⁴⁴ die einen „Zukunftspfad Stromversorgung“ skizziert, der CCUS an Gaskraftwerken in Deutschland bereits berücksichtigt. Im Vergleich zum geplanten Ausbau der Neuen Erneuerbaren Energien, wie er im „Osterpaket“ der Bundesregierung vorgesehen ist, können die Kosten um kumuliert rund 150 Milliarden Euro bis 2035 gesenkt werden. Der Endkundenstrompreis läge bei etwa 42-44 Cent pro Kilowattstunde, was um 10 % günstiger im Vergleich zu den Auswirkungen der aktuellen Planungen ist, die wohl zu rund 47-49 Cent führen würden. Gleichzeitig können die Zeiten, in denen wenig Neue Erneuerbare Energien zur Verfügung stehen, fast vollständig ohne Importe abgedeckt werden, was die Versorgungssicherheit steigert. Die Klimaziele werden im selben Maße erreicht.

Abschließend lässt sich sagen, dass es eine enorme Bandbreite von Lösungsansätzen für die Ausgestaltung der globalen, aber auch der jeweiligen nationalen Energiewenden gibt. Wichtig ist zu betonen, dass die Pfade bereits in diesem Jahrzehnt im Wesentlichen vorbestimmt werden, weil die Investitionen in derlei Infrastruktur und Kraftwerkskapazitäten hoch und vor allem langfristig angelegt sind.

⁴⁴ Vgl. McKinsey & Company (2024).

Technologieoffenheit ist kein „Buzzword“, sondern ein Mittel, um Kosten zu reduzieren. Die immer noch zu stemmenden, dann aber reduzierten Kosten bleiben enorm hoch, sodass ein Weg ohne Technologieoffenheit wahrscheinlich dazu führen wird, dass die Realisierbarkeit eines solchen Vorhabens insgesamt infrage gestellt wird. Eine sozialverträgliche und im internationalen Kontext friedliche Ausgestaltung des globalen Umwälzungsprozesses der Energiesysteme wird umso unwahrscheinlicher, je größer die Kosten werden.

3.4 Bestandsaufnahme der NDCs der Entwicklungs- und Schwellenländer

Im Klimaabkommen von Paris haben sich die Staaten darauf geeinigt, dass jedes Land selbst bestimmt, wie viel es zum Klimaschutz beitragen kann und will. Im Rhythmus von fünf Jahren reichen die Staaten ihre Beiträge, die sogenannten Nationally Determined Contributions (NDCs) bei einer zentralen Stelle, dem UN-Klimasekretariat (UNFCCC), ein. Das Klimasekretariat prüft dann die Summe der Klimaschutzbeiträge, die NDCs, und vergleicht diese mit den Klimaschutzzielen, auf die sich die Staaten im Rahmen des Klimaabkommens geeinigt haben, also die Erwärmung auf maximal 2 °C (besser 1,5 °C) zu begrenzen.

Der beschriebene Mechanismus ist, wenig überraschend, nicht dazu geeignet, die Klimaschutzziele zu erreichen. Zumindest ist das der Eindruck, wenn man z. B. den Emission Gap Report 2023 des United Nations Environmental Panels (UNEP) liest. Hier wird es bereits als Fortschritt gewertet, dass acht Jahre nach der Verabschiedung des Parisabkommens die Anzahl an Staaten, die ein Net Zero-Ziel in ihren nationalen Gesetzen verankert haben, von 88 auf 97 Staaten gestiegen ist. Allerdings sagt der Bericht außerdem, dass das Vertrauen in Umsetzung dieser staatlichen Versprechen weiterhin gering sei.⁴⁵

Im Jahr 2020 untersuchte eine Studie über alle bis dato eingereichten NDCs, ob diese eher ein Hebel für mehr Ausgleich und Fairness in Sachen Klimaschutz seien oder doch eher die Achilles-Ferse des Paris-Abkommens, weil nur über den Weg der NDCs eine Erreichung der Klimaziele vorgesehen ist.⁴⁶ Die Ergebnisse gehen stark in

⁴⁵ Vgl. UNEP (2023).

⁴⁶ Vgl. Pauw, W. P. et al. (2019).

Richtung der letzten Interpretation. Der Umfang der von den ärmeren Staaten angemeldeten Unterstützung zur Umsetzung der eigenen NDCs, also die Konditionierung, übersteigt die zugesagten Finanzvolumina für diese Zwecke in großem Umfang. Außerdem wird herausgearbeitet, dass häufig die Grundlagen für eine finanzielle Unterstützung gar nicht existieren, weil z. B. keine Kostenkalkulationen für einzelne Klimaschutzmaßnahmen in den NDCs der ärmeren Staaten enthalten sind. In der Folge ist es unmöglich, geeignete Investmentpläne auszuarbeiten.

Warum das so ist, zeigt eine kürzlich veröffentlichte Umfrage zu den NDCs der International Renewable Energy Agency (IRENA). So gibt es kaum Entwicklungs- und Schwellenländer, die in den kommenden Jahren auf die Nutzung fossiler Energieträger verzichten wollen. Das ist ganz im Sinne der Natur der konditionierten NDCs und der SDGs. Wohlstandszuwachs hat Vorrang gegenüber Klimaschutz und wenn letzterer doch stattfinden soll, dann nur gegen finanzielle Unterstützung durch die reicheren Staaten. Allerdings wird bekräftigt, dass man durchaus bereit wäre, die eigenen NDCs zu verschärfen. Klimaschutz soll vorrangig über den Zubau erneuerbarer Energien, den Netzausbau und über Energieeffizienzmaßnahmen stattfinden. Was zur Umsetzung fehlt, ist jedoch geeignetes Personal sowie Daten, um ein so umfangreiches Programm wie die NDCs überhaupt planen und umsetzen zu können. Damit die NDCs überhaupt eine Chance auf eine erfolgreiche Umsetzung haben, müssen die Klimabeiträge der ärmeren Staaten dekonditioniert werden. An allen bemängelten Punkten müssen Verbesserungen stattfinden, d. h., dass am Ende ein realistischer Plan für den Klimaschutz und die notwendigen Maßnahmen für jedes Land erstellt werden muss, um darauf aufbauend eine geeignete Finanzierung und eine Umsetzungsstrategie auf Basis internationaler Kooperation erarbeitet werden kann.

Eine solche Dekonditionierung ist ein Feld, das viel mehr Forschung bedarf. Dies umfasst Arbeiten im Bereich Naturwissenschaft, Ökonomie und Technik. Auch die Governance, der regulatorische Rahmen für eine Dekonditionierung ist ein wichtiges Thema, weil z. B. alle nationalen NDCs schließlich zusammengeführt und bewertet werden müssen. Die Metriken und Methoden für die Datenerhebung und Planung sollten daher möglichst synchronisiert werden. All das erfordert ein enormes Maß an internationaler Organisation, die nur über geeignete Regelungen realisiert werden kann.

Erste Vorarbeiten in diese Richtung hat das Projektteam bereits unternommen. Der Schlüssel ist hier eine Methodik, um die einzelnen Staaten dieser Welt nach bestimmten Indikatoren klassifizieren zu können, z. B. in Bezug auf das aktuelle jährliche Wirtschaftswachstum, den jährlichen Bevölkerungszuwachs, die in den NDCs anvisierten Zeitpunkte für Net Zero, erwartete Verbesserungen der Energieeffizienz etc. Weitere Ausführungen zu dieser Vorarbeit finden sich im Abschlussbericht des Projekts „Global Energy Perspectives“, das, wie erwähnt, von Global Energy Solutions und dem FAW/n Ulm Mitte 2023 abgeschlossen wurde. In dem Bereich der Dekonditionierung der NDCs gibt es noch viel Forschungsbedarf.

4 Nutzung von Kohle und Einsatz von Verbrennungsmotoren – Status quo und Perspektiven weltweit

Kohle und Öl bilden zusammen mit Gas die drei wichtigsten Energieträger des aktuellen Energiesystems. Die Nutzung von Kohle zur Produktion von Strom als auch zur Versorgung der Industrie ist ein wesentlicher Baustein des aktuellen Wirtschaftssystems und damit die Grundlage für den Wohlstand. Dieser Wohlstand wäre ohne Verbrennungsmotoren, das Öl sowie daraus abgeleitete Produkte wie Benzin, Diesel, Schiffsdiesel und Kerosin nicht denkbar. Diese Kraftstoffe treiben die Motoren an und bilden damit die energetische Grundlage für die vorhandene Mobilität und damit die weltweiten Handelsströme. Im Hinblick auf die Begrenzung der Treibhausgas-Emissionen zur Bekämpfung des Klimawandels muss sichergestellt werden, dass die Emissionen aus der Nutzung von Kohle, Gas und Öl nicht in die Atmosphäre gelangen. Um die Dimension und Komplexität dieser Aufgabe zu verstehen, wird in diesem Kapitel die Bedeutung und der Status quo bzgl. Kohle und bzgl. des Verbrennungsmotors beschrieben.

4.1 Die zentrale Bedeutung der Kohlekraftwerke – Tendenz wachsend

Weltweit existieren 6.580 Kohlekraftwerke mit einer Kapazität von 2.130 Gigawatt (GW).⁴⁷ Diese erzeugen 55 % des Strombedarfs (10.212 Terawattstunden, TWh) und verursachen dabei recht genau 10 Milliarden Tonnen CO₂. Das sind rund 25 % der globalen Treibhausgas-Emissionen aus fossilen Energieträgern und der Industrie (39 Milliarden Tonnen). Werden zusätzlich zu CO₂ auch die anderen THGs wie Methan und Lachgas berücksichtigt, ist der Anteil rund 20 % von insgesamt dann 53 Milliarden Tonnen.

Kohle ist als Rohstoff allerdings nicht nur für die Stromproduktion interessant. Zusätzlich zum Elektrizitätsbereich deckt Kohle etwa 40 % des Energiebedarfs der Industrie. Dies vor allem auch wegen des Einsatzes von Kohle in der Metallindustrie, insbesondere der Stahlproduktion. Neben der Rolle als Energielieferant hat Kohle bzw.

⁴⁷ Vgl. Global Energy Monitor (2024).

der daraus gewonnen Koks eine wichtige Funktion dabei, unerwünschte Elemente wie Sauerstoff während der Herstellung von Stahl über den Weg vom Eisenerz über Eisen zu entfernen. Der Einsatz von Kohle ist je nach Wirtschaftsbereich also mehr als ein Energiethema. Ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften spielen ebenfalls eine große Rolle.

Zuerst ist es sinnvoll, einige Eckdaten zum Rohstoff Kohle, der vorhandenen Mengen und ihrer globalen Verteilung zu verstehen. Im Jahr 2021 wurden die weltweiten Kohlereserven durch BP auf 1.074.108 Millionen Tonnen (Mt) geschätzt.⁴⁸ Wie bei Rohstoffen allgemein üblich bezieht sich der Begriff „Reserven“ auf nachgewiesene Vorkommen, die mit aktuellen technischen Möglichkeiten gewonnen werden können. Außerdem muss sich die Förderung wirtschaftlich lohnen. Ressourcen hingegen sind Rohstoffe, die vorhanden sind, aber z. B. aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen aktuell noch nicht gewonnen werden (können).

In Bezug auf Kohle konzentriert sich der weit größere Anteil der Reserven auf den asiatisch-pazifischen Raum (42,8 %), gefolgt von Nordamerika (23,9 %), CIS⁴⁹ (17,8 %), Europa (12,8 %), den Nahen Osten & Afrika (1,5 %) sowie Süd- und Zentralamerika (1,3 %). Bezogen auf einzelne Länder, kann die USA die größten Reserven vorweisen (23,2 %), dann Russland (15,1 %), Australien (14 %), China (13,3 %), Indien (10,3 %), Deutschland (3,3 %), Indonesien (3,2 %), Ukraine (3,2 %), Polen (2,6 %) und Kasachstan (2,4 %). BP berechnet außerdem die „Reserves-to-production ratio“, welche anzeigt für wie viele Jahre die Kohlereserven bei derzeitigen Produktionsniveaus ausreichen. Demnach hat die Welt noch 139 Jahre, bis die Reserven aufgebraucht sind. Dieser Wert differiert je nach Region und den dort vorhandenen Vorkommen. Nordamerika kommt demnach noch 484 Jahre mit seiner Kohle aus, die CIS-Länder 367 Jahre und Europa für etwa 300 Jahre. In der Asien-Pazifik-Region, in der der Kohleverbrauch sehr hoch ist, sowie im Nahen Osten & Afrika, die sehr geringe Vorkommen bei steigendem Energieverbrauch aufweisen, reichen die Reserven für weitaus weniger als 100 Jahre.⁵⁰

⁴⁸ Vgl. BP (2021), S. 45.

⁴⁹ CIS meint „Commonwealth of Independent States“ und bezieht sich auf Russland, Armenien, Aserbaidschan, Weißrussland, Moldawien, Kasachstan, Kirgisistan, Tadschikistan, Turkmenistan und Usbekistan.

⁵⁰ Vgl. BP (2021), S. 46.

Wie sieht es nun mit der Entwicklung der Kohle in den kommenden Jahrzehnten aus? Genug Reserven sind jedenfalls vorhanden. Der Bericht „The Political Economy of Coal“⁵¹ sortiert die Länder, für die Kohle eine Rolle spielt, in vier Kategorien: 1. Staaten, die Kohle ausphasen, 2. etablierte Kohlenutzer, 3. Staaten, die in die Kohlenutzung einsteigen und 4. Exporteure von Kohle. Jede Gruppe hat ihre eigenen Argumente zur Nutzung, Interessen im globalen Umfeld und bestimmte Interessenvertreter, die die nationale und internationale Politik beeinflussen. Die aktuell dominierenden Trends beziehen sich auf die ersten beiden Gruppen, diejenigen Staaten, die aus der Kohle aussteigen und diejenigen, die etablierte Kohlenutzer sind, aber absehbar nicht aussteigen, sondern eher Kapazitäten aufbauen.

Auf der einen Seite befinden sich die Industriestaaten auf einem Pfad weg von der Kohle. Seit den 1980er Jahren nimmt der Konsum von Kohle in der Europäischen Union ab. In den USA ist dieser Trend seit den 2000er Jahren zu beobachten. Währenddessen nahm und nimmt der Einsatz von Kohle in den aufstrebenden Ökonomien zu. Wenig überraschend ist insbesondere China die treibende Kraft hinter dieser Entwicklung. Haben die Industriestaaten um das Jahr 2000 herum etwa 50 % der globalen Kohle eingesetzt, wird dieser Anteil in den nächsten Jahren nach Angaben der Internationalen Energieagentur auf zwischen 5-10 % fallen. China und Indien vereinten im Jahr 2000 zusammen etwa 35 % der globalen Kohlenachfrage. Aktuell ist allein China bereits bei 50 %, die indische Nachfrage wird weiterhin steigen und im Jahr 2026 werden beide zusammen bei etwa 70 % liegen. Global betrachtet ist der Zuwachs an Kohle in Asien größer als die Abnahme in den USA und der Europäischen Union. Mit 8,24 Milliarden Tonnen im Jahr 2022 und 8,5 Milliarden Tonnen im Jahr 2023 wurden nach einem geringen Einbruch während der Covid-19-Pandemie gleich zwei Rekordnachfragen verzeichnet.

Dort wo wirtschaftliches Wachstum zu großen Anteilen durch den Ausbau der Infrastruktur und eine erhöhte Nachfrage nach Energie getrieben ist, wächst der Einsatz von Kohle. Insbesondere wirtschaftliche Faktoren wie bezahlbare Energiepreise, Aufbau und Erhalt von Einkommen und industrielle Entwicklung sind die wichtigsten Treiber.⁵² Das erklärt den hohen Einsatz in China und vermehrt auch in anderen asiatischen Staaten.

⁵¹ Vgl. Jakob, M.; Steckel, J. C. (2022).

⁵² Vgl. Jakob, M.; Steckel, J. C. (2022), S. 320.

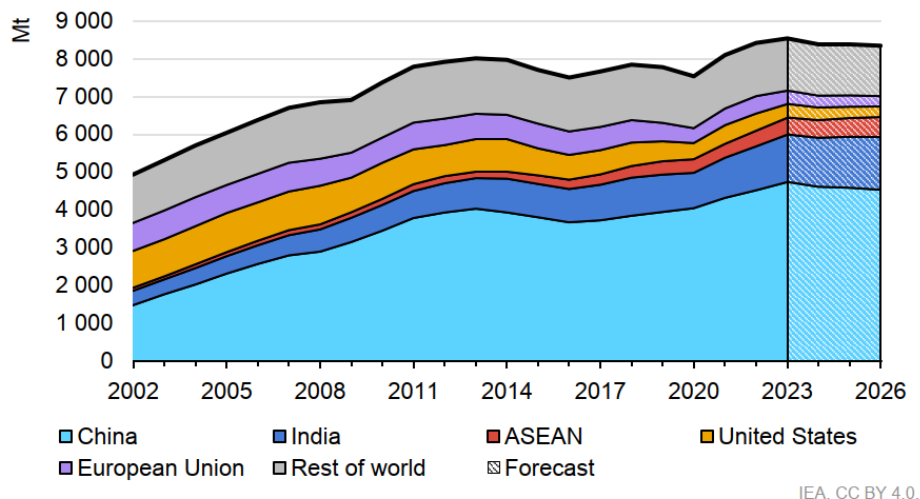


Abbildung 6: Globaler Einsatz von Kohle von 2002-2026. Quelle: IEA (2023a).

Die Industriestaaten sind dabei, ihr Energiesystem so umzubauen, dass die Treibhausgas-Emissionen sinken. Allerdings befinden sie sich bereits auf einem hohen Wohlstandsniveau. Die entscheidende Frage ist, ob der Aufbau von Industrie, erhöhter Nachfrage nach Strom und Energie im Allgemeinen und ein daran gekoppeltes Wirtschaftswachstum von vorneherein klimafreundlich möglich ist.

Betrachtet man die Ankündigungen in politischen Dokumenten und nationalen Entwicklungsplänen und vergleicht diese mit dem, was wirklich passiert, stellt man fest, dass die Ebene der Worte mit der Ebene der praktischen Umsetzung nicht deckungsgleich ist. Einerseits besteht für ein Drittel der Kohlekraftwerke mit insgesamt 580 GW Kapazität das Ziel ihrer Abschaltung. Auch der Rest der Kraftwerke (1.400 GW) ist im Rahmen unterschiedlicher Net-Zero-Ziele ebenfalls von Klimaschutzplänen betroffen. Dass die weltweiten Bemühungen zum Klimaschutz Auswirkungen auf die Entwicklung der Kohlekapazitäten haben, sieht man daran, dass nach dem Paris-Abkommen, also seit 2015, etwa Zweidrittel der global geplanten Kraftwerke abgesagt wurde. Nach Modellen der Internationalen Energieagentur müssten die Industriestaaten, genauer: die OECD, bis 2030 und der Rest der Welt bis 2040 komplett aus der Kohle ausgestiegen sein, um das 1,5 °C-Klimaziel zu erreichen.⁵³ Pro Jahr bis 2040 würde das für die Nicht-OECD-Länder bedeuten, dass 91 GW pro Jahr an Kapazität abgeschaltet werden müsste. Das ist 4,5-mal so viel wie im Jahr 2022 stillgelegt wurde. Dabei sind die 571 GW geplanten und im Bau befindlichen Kraftwerke noch nicht mit eingerechnet.

⁵³ Vgl. Global Energy Monitor et al. (2023).

Obwohl sich durch die Klimapolitik viel an der ursprünglichen Planung geändert hat und viele Szenarien für die Erreichung der Klimaziele gerechnet wurden und international bekannt sind, spielt die Kohle weiterhin eine große Rolle. Aktuell sind immer noch auf 33 Länder verteilt Kraftwerkskapazitäten von 350 GW in Planung, 192 GW befinden sich im Bau.⁵⁴ Das ist rund ein Viertel des aktuell laufenden Volumens. China baut mit einer Geschwindigkeit von einem Kohlekraftwerk pro Woche seine Kapazitäten aus. Das entspricht Zweidrittel der global entwickelten Kapazität.

In wirtschaftlich aufstrebenden Staaten ist Kohle immer noch die günstigste Energiequelle, insbesondere dann, wenn die Kosten für Kapital zur Finanzierung von Energieprojekten hoch sind. In Staaten mit niedrigen und mittleren Einkommen liegen diese in der Regel bei über 10 %, z. B. in Indonesien und Vietnam.⁵⁵ Kohlekraftwerke sind hier wegen der unterschiedlichen Finanzierungsstruktur pro Megawatt günstiger als erneuerbare Energien.

Zusätzlich zu den geringen Kosten ist die entsprechende Technologie etabliert. Projekte sind daher leicht plan- und umsetzbar.^{56,57} Durch die langjährige Nutzung und die breite Erfahrung im globalen Kontext fühlen sich politische Entscheidungsträger in der Lage, ein Energiesystem auf der Basis von Kohle verlässlich betreiben zu können. Das Management eines Systems mit einem großen Anteil erneuerbarer Energie wird als weniger verlässlich, schwieriger und daher als unsichere Alternative gesehen. Hier geht es insbesondere um die Volatilität von Sonne und Wind, weswegen man die grundlastfähige Kohle favorisiert. Andere Faktoren sind, dass die erneuerbare Technologie importiert werden muss, der Markt aber noch nicht so groß und etabliert ist. Zusätzlich benötigt man ein System unterschiedlicher technischer Komponenten für die Integration von erneuerbaren Energien, wie z. B. Stromspeicher-Systeme, Gaskraftwerke zur Abfederung von Volatilität und eine geeignete Netzstabilisierung. Aber auch geeignete regulatorischen Rahmenbedingungen sind wichtig, weil z. B. Spot-Märkte etabliert werden müssen, die im Vergleich zu Terminmärkten komplexer in der Umsetzung sind. Das alles stellt vor allem Staaten mit weniger ausgereiften

⁵⁴ Vgl. Global Energy Monitor et al. (2023), S. 3.

⁵⁵ Vgl. Global Energy Monitor et al. (2023), S. 323.

⁵⁶ Vgl. MCC (2018).

⁵⁷ Vgl. BP (2023).

regulatorischen und technischen Kapazitäten vor enorme Herausforderungen.⁵⁸ Profiteur ist die Technologie rund um die Kohle.

Bemerkenswert ist, dass die Auswirkungen des Klimawandels dazu führen, dass mehr Kohlekraftwerke gebaut werden. Denn zunehmend bereiten den Staaten Hitzewellen Probleme. Die hohen Temperaturen haben einerseits Auswirkungen auf die Menge des Wassers in den Stauseen, was die Stromerzeugung mittels Wasserkraft verringert. Andererseits steigt der Stromverbrauch an, weil in großem Umfang Klimaanlage eingesetzt werden. Diese Kombination hat in China vermehrt zu Stromausfällen geführt, weswegen das Thema „sichere Energieversorgung“ auf der politischen Agenda weiter nach oben gerückt ist. Auch die erhöhten Energiepreise, insbesondere die erhöhten Gaspreise im Zuge des Ukraine-Kriegs, haben die Debatte über Versorgungssicherheit zusätzlich beeinflusst. Einige chinesische Provinzen hatten verstärkt auf Gas gesetzt, um Kohle zu ersetzen, doch zusätzlich zu hohen Gaspreisen haben auch die Spannungen mit den USA, die einer der weltweit größten Gaslieferanten sind, dazu geführt, dass diese Strategie wegen Bedenken einer zuverlässigen Versorgung der Bevölkerung überdacht wird. Heimische Kohle – ohne Abhängigkeit vom internationalen Markt und politischen Einflussfaktoren – erfährt daher eine Renaissance.

Auch wenn China häufig für sein autokratisches Regime und die Verletzung von Menschenrechten kritisiert wird, werden im Rahmen verschiedener Veranstaltungen zum Thema Klimaschutz doch recht große Hoffnungen auf dieses Regime gesetzt. Anders als im demokratischen Indien kann der zentralistische Machtapparat in China seine selbst gesteckten Ziele besser erreichen. Auch auf der Klimakonferenz in Dubai wurde immer wieder gefragt, ob China seine Ziele nicht verschärfen könne, um beispielsweise die Emissionen seiner Kohlekraftwerke schneller herunterzufahren als bisher geplant. Die Hoffnungen liegen auf der Gestaltungsmacht der Zentralregierung und deren Wirkung auf eine Ökonomie mit rund 1,3 Milliarden Menschen. Chinas Pläne sehen vor, seine Emissionen bis 2030 noch zu erhöhen, um dann innerhalb von 30 Jahren bis 2060 Net Zero zu erreichen.

Allerdings haben in China auch die einzelnen Provinzen eine gewisse Gestaltungsfreiheit in Bezug auf ihre Energiesysteme. Der avisierte Höhepunkt der

⁵⁸ Vgl. Jakob, M.; Steckel, J. C. (2022), S. 323 f.

Emissionen im Jahr 2030 führt nun zu einem Effekt, der „Climbing to the Peak“ genannt wird.⁵⁹ Weil es ab diesem Zeitpunkt kaum mehr möglich sein wird, neue Kohlekraftwerke zu planen, zu beantragen und zu bauen, genehmigen die unterschiedlichen Provinzen nun mehr Projekte als in den vergangenen Jahren. Interessanterweise sind daran aber nicht nur provinzeigenen Energiekonzerne beteiligt, sondern auch solche, die der Zentralregierung in Peking unterstellt sind.

Eine ähnliche Situation mit vielen Kraftwerksgenehmigungen gab es bereits im Zeitraum 2015-2016, nur dass die Zentralregierung viele dieser Genehmigungen 2017 wieder zurückgezogen hat, als sie ihren politischen Kurs geändert hat und den Anstieg von Emissionen begrenzen wollte. Um nicht wieder viele bereits genehmigte Kraftwerke zu verlieren, fangen die Provinzregierungen nun möglichst damit an, genehmigte Projekte möglichst schnell zu realisieren.

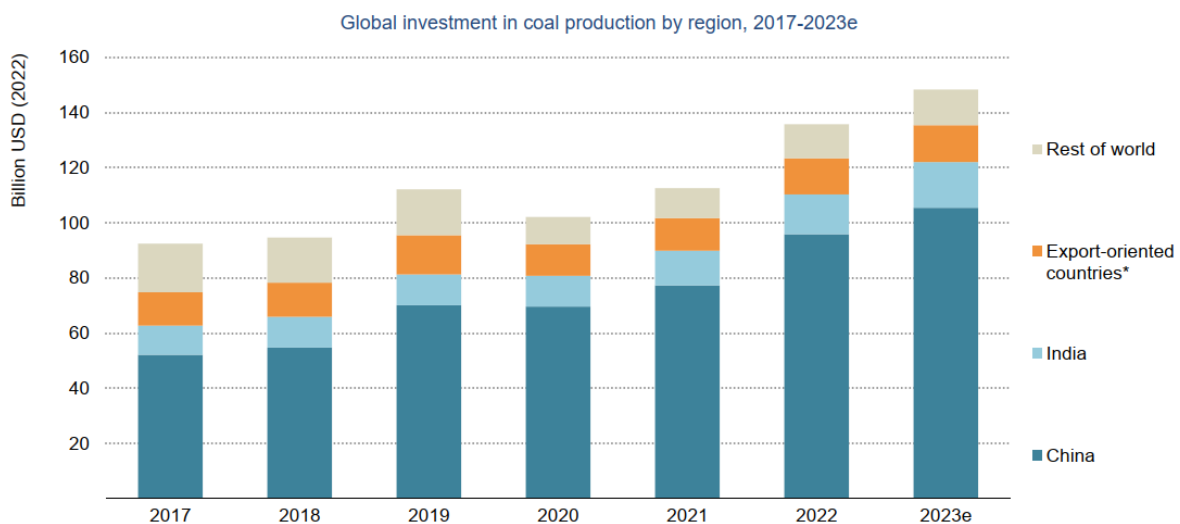
Ein weiterer Effekt zeigt, dass selbst in China nicht immer alles so umgesetzt wird, wie es geplant wird. Seit dem 11. Fünfjahresplan (2011-2015) hat die chinesische Regierung das Ziel, die Energieerzeugung in den Westen des Landes zu verschieben und mit den östlichen Regionen mit hoher Nachfrage über umfangreiche Netze zu verbinden. Ursprünglich waren Kohlekraftwerke zur Erzeugung geplant, die nun aber um erneuerbare Energiequellen erweitert und teilweise durch solche ersetzt wurden. In der Folge bauen die betroffenen Provinzen ihre Kapazitäten aus, um wie vorgesehen einen Teil in den Osten zu exportieren. Allerdings ziehen es die Provinzen, die laut Plan Strom importieren sollen vor, durch den Bau von Kapazitäten zur Stromerzeugung selbst Arbeitsplätze zu schaffen und Wertschöpfung bei sich zu generieren. Auch die Trockenperioden im Jahr 2022, die zu Problemen bei der Wasserkraft geführt haben, werfen Fragen auf, ob stromexportierende Provinzen auch dann noch genügend Energie exportieren würden, wenn ihre eigenen Systeme im Laufe der Zeit vor Problemen stehen sollten.

Insgesamt führen die genannten Effekte dazu, dass aktuell mehr Kohlekraft in China geplant und umgesetzt wird, als von der Zentralregierung angedacht war. Das geht so weit, dass sogar damit gerechnet wird, dass viele der ans Netz gehenden Kraftwerke aus ökonomischer Sicht über die normale Laufzeit von 40 Jahren nicht rentabel betrieben werden können. Mögliche Überkapazitäten in gewissen Regionen sind ein

⁵⁹ Vgl. CREA; Global Energy Monitor (2023).

Problem. Ein weiteres Problem ist, dass der Ausbau der Stromnetze nicht so voran geht, dass Überkapazitäten dorthin verlagert werden könnten, wo die Nachfrage da ist. Zudem scheint es Probleme beim Management der Netze zu geben, sodass die Provinzen lieber neue Kapazitäten bauen, um sich abzusichern.

Man sollte also vorsichtig sein mit der Annahme, dass China sicher die Ziele erreicht, die es sich selbst gesteckt hat. Überlegungen dazu, was zu tun ist, wenn sich außerplanmäßige Entwicklungen wie oben beschrieben abzeichnen, sind daher wertvoll. Auch in China gibt es eine Diskrepanz zwischen offiziellen Erklärungen, Planungen und Zielen und dem, was real passiert. Im vorliegenden Fall eine außerplanmäßige Zunahme an Kohlekraftwerken.



* Export-oriented countries = Australia, Indonesia, Russia, Colombia and South Africa.
 Note: 2023e = estimated values for 2023.

IEA, CC BY 4.0.

Abbildung 7: Globale Investitionen in Kohle. *Abbildung aus IEA (2023c)*⁶⁰

Auch die globalen Investitionen in Kohle spiegeln dieses Bild. Abbildung 7 zeigt einen konstanten Anstieg der jährlichen Investitionen in Kohle seit 2017 von rund 90 auf fast 150 Milliarden US-Dollar. Eine Ausnahme bildet die kurzzeitige Abnahme von 2019 auf 2020 wegen der Covid-19-Pandemie. Aber selbst die Investitionen im Jahr 2020 sind höher als die im Jahr 2018 vor der Pandemie. China hat in diesem Zeitraum seinen Anteil an den weltweiten Emissionen von etwas mehr als 50 % auf etwa 70 %

⁶⁰ Vgl. IEA (2023c), S. 98.

gesteigert. Die Summe der globalen Investitionen ohne China hat sich kaum verändert. Der Zuwachs ist also fast ausschließlich den Entwicklungen in China geschuldet. Nennenswert ist außerdem, dass Indien seine Investitionen zwischen 2017 und 2023 in etwa verdoppelt hat. Die Investitionen der Kohle-exportierenden Länder (Russland, Kolumbien, Südafrika, Indonesien und Australien) sind in etwa gleichgeblieben. Diese Zahlen stützen die Erkenntnis, dass exportorientierte Staaten vorrangig an der Sicherung ihrer Einnahmen und einer stabilen Situation auf dem Weltmarkt interessiert sind. China und Indien betreiben energieintensive Wirtschaftsprogramme, für die Kohle als etablierte und kostengünstige Technologie ein maßgeblicher Treiber ist. Oben wird beschrieben, dass Kohle nicht nur für die Stromerzeugung wichtig ist, sondern aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften auch eine große Rolle in der Industrie spielt, insbesondere bei der Verarbeitung von Metallen. Am bekanntesten ist der Einsatz von aus Kohle gewonnenem Koks für die Herstellung von Stahl aus Eisen. Stahl, aber auch andere Metalle werden überall in der Wirtschaft gebraucht, dringend auch für die globale Energiewende: z. B. Kupfer für Stromleitungen und Nickel für Batterien. Indonesien als kohleexportierendes Land mit reichen Vorkommen der genannten Metalle argumentiert daher so, dass die Gewinnung, Verarbeitung und der Export dieser Materialien unerlässlich sei, wenn der Umstieg auf ein klimafreundliches, stärker strombasiertes Energiesystem gelingen soll.

In Indonesien werden 25 % der Kohlekraftwerke eigens von Industrieunternehmen betrieben, was die Bedeutung von Kohle für die indonesische Wirtschaft und ihre Exportkapazitäten unterstreicht. Indonesien erlaubt daher den Betrieb von Kohlekraftwerken unter den Bedingungen, dass diese einen Mehrwert in Bezug auf natürliche Rohstoffe („added value to natural resources“) generieren, worunter auch die Metallverarbeitung zählt. Selbst im europäischen Regelwerk zur Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten von Finanzierungsinstrumenten (Taxonomie) zählen solche Projekte zur Rubrik nachhaltige Investitionen.

4.2 Die „Switch Coal“-Bewegung

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, wird ein Großteil des Stroms weltweit über Kohlekraftwerke hergestellt. Unter dem Stichwort „Switch Coal“ lassen sich all

diejenigen Konzepte zusammenfassen, die einen baldigen Abriss bestehender fossiler Stromerzeugungsanlagen und den Ersatz dieser durch Wind- und PV-Anlagen fordern. Betrachtet man rein die Emissionen, die bei der Stromerzeugung entstehen, ist es verständlich, sich mit einem solchen Ansatz zu beschäftigen, vor allem, wenn man Carbon Capture bei Kohlekraftwerken für unrealistisch hält oder prinzipiell ablehnt. Allerdings nehmen die veröffentlichten Konzepte für Netto-Null-Emissionen unter völligem Ausstieg aus der Kohle in der Regel wenig Rücksicht auf die regionalen Gegebenheiten. So unterscheiden sich die Vorräte an Kohle, Öl und Gas auf der einen Seite und das Potenzial von Wasserkraft, Wind und Sonne sowie Energiespeichern auf der anderen Seite, in den einzelnen Ländern stark. Hinzu kommt, dass sich die Staaten auf dem Weg zu Netto-Null an unterschiedlichen Positionen befinden. Im Folgenden wird aufgezeigt, welche Schwachstellen Strategien aufweisen, die „Abriss und Neubau“ verfolgen und welche Anforderungen an die Entwicklung belastbarer, länderspezifischer Defossilierungsstrategien zu stellen sind.

Stellvertretend für die „Abriss und Neubau“-Strategien wird eine Studie von SwitchCoal.org betrachtet, da hier für den übergeordneten Ansatz typische Argumentationslinien verwendet werden. SwitchCoal ist eine Initiative des „ZETT Zero Emission Think Tank“ und von „Goodfuture“ Berlin, Deutschland. In der Veröffentlichung „Switch coal profitably to renewable energy“⁶¹ wird dargelegt, dass Kohlekraftwerke in Entwicklungs- und Schwellenländern kurzfristig abgeschaltet und durch Wind- und PV-Anlagen auf einer Fläche von 100 km auf 100 km in der Umgebung der abzuschaltenden Kraftwerke ersetzt werden könnten. Das hätte den Vorteil, dass der Netzanschluss des Kraftwerks weiterverwendet werden kann und somit Infrastrukturkosten für Netze zum Anschluss der Wind- und PV-Anlagen verringert würden.

Wie in Kapitel 3.1⁶² bereits erwähnt wurde, müssen länderspezifische Gegebenheiten ausreichend berücksichtigt werden, um Pfade hin zu einem erneuerbaren Energiesystem entwickeln zu können. SwitchCoal differenziert in dieser Hinsicht nicht in dem notwendigen Umfang.

Wie unterschiedlich das Energiegewinnungspotenzial aus Wind und Sonne weltweit ist, zeigen Abbildung 8. Die Windleistungsdichte unterscheidet sich je nach Land um

⁶¹ Vgl. SwitchCoal (2023).

⁶² Vgl. Mulugetta et al. (2022).

den Faktor 16, das Solarenergiepotenzial um den Faktor 2. Erheblich sind auch die Unterschiede der Länder in Bezug auf ihre Finanzkraft.

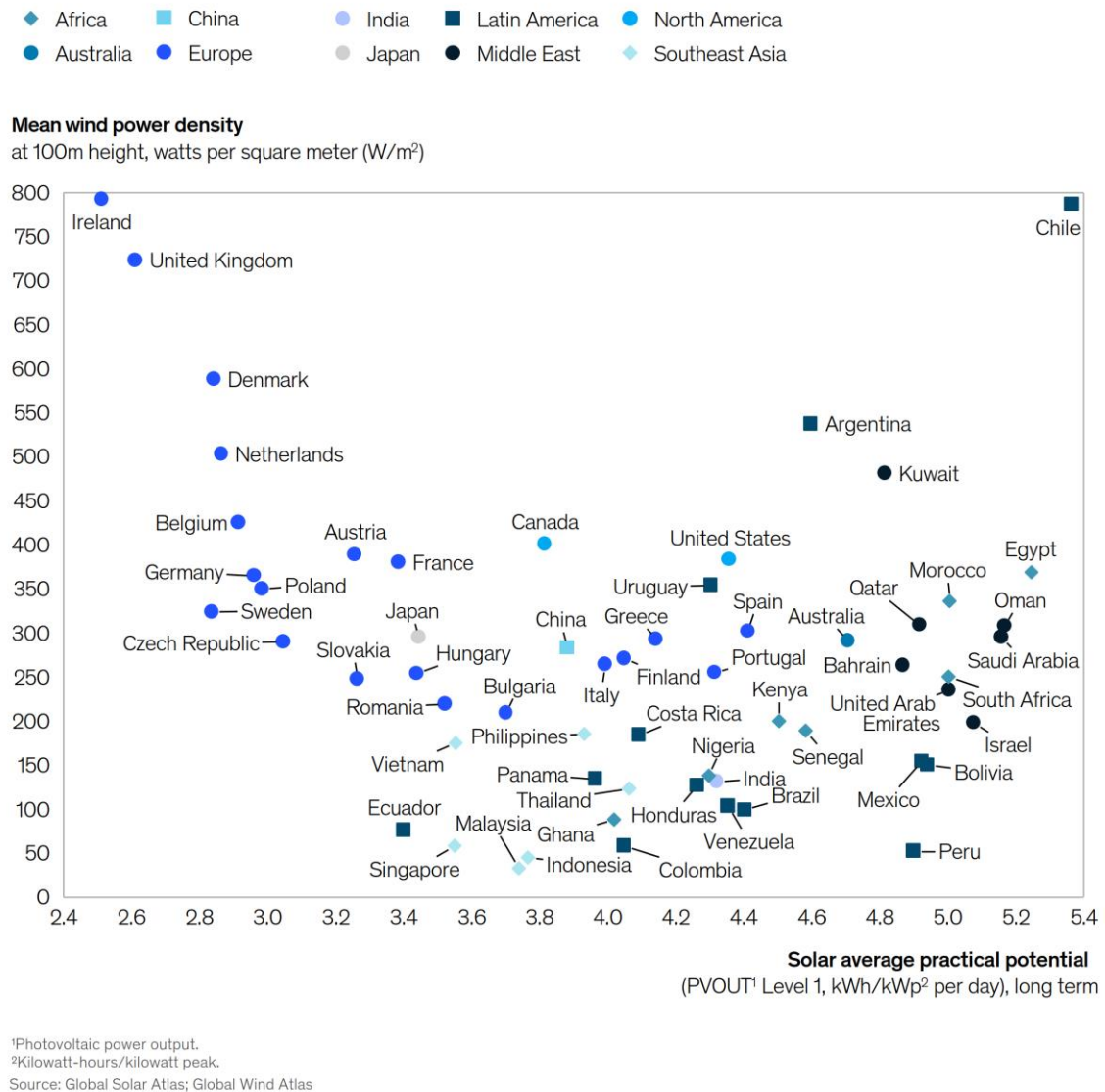
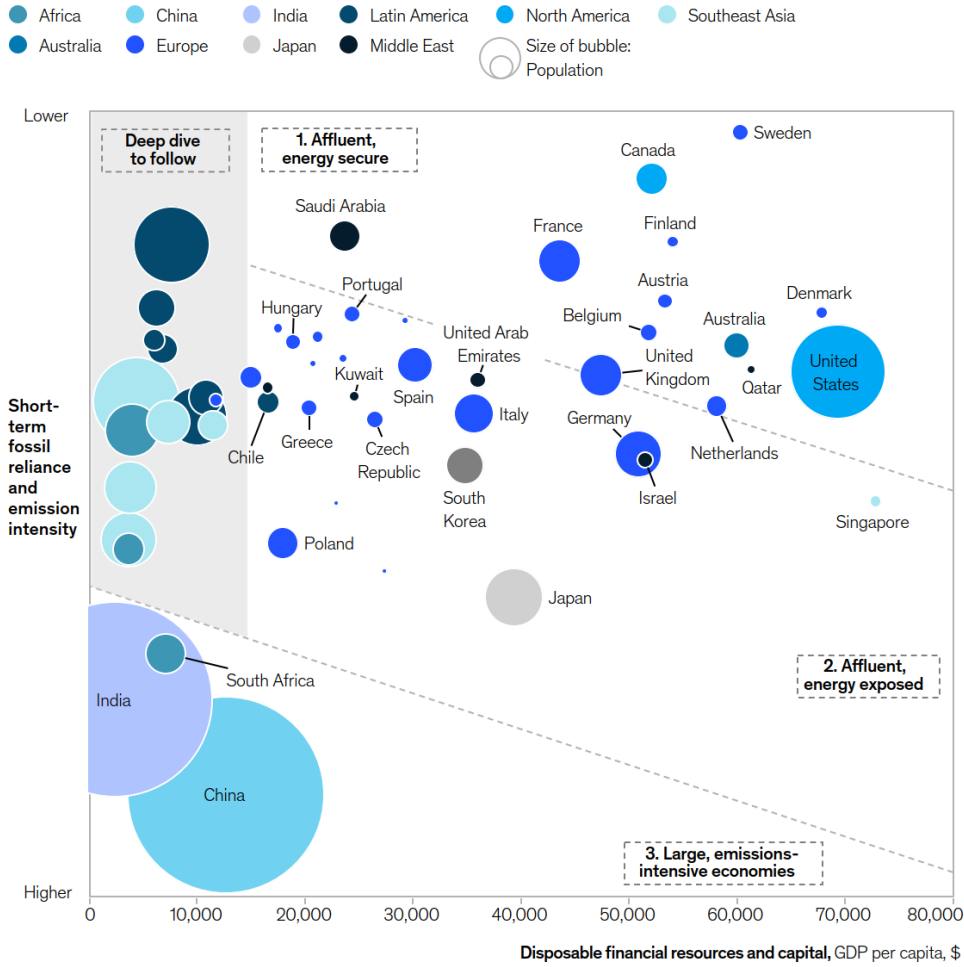


Abbildung 8: Mittlere Windleistungsdichte und durchschnittliches Solarenergiepotential einzelner Länder und Regionen.
Abbildung aus: McKinsey & Company (2022b)⁶³

Andere Kriterien wie die wirtschaftliche Abhängigkeit von fossilen Energieträgern aufgrund der ökonomischen Ausgangslage oder die Verfügbarkeit von kritischen Rohstoffen werden nicht berücksichtigt. Fließen diese Kriterien jedoch mit ein, zeigt sich ein sehr differenziertes Bild, wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt ist. Für die Diskussion zum Abriss von Kohlekraftwerken stehen drei Hauptakteure auf

⁶³ Vgl. McKinsey & Company (2022b), S. 26.

diesem Gebiet in Abbildung 9 hervor. Indien, China und Südafrika sind alle stark von fossilen Energieträgern abhängig und haben ein niedriges Pro-Kopf-Einkommen. Ein weiterer Kritikpunkt ist die Verwendung von unrealistischen Kostenannahmen für den Neubau von Neuen Erneuerbaren im Vergleich zu existierenden fossilen Kraftwerken. SwitchCoal verwendet bei der Bewertung unterschiedlicher Defossilisierungspfade die unmittelbaren Stromgestehungskosten, sogenannte „Levelized Cost of Electricity (LCOE)“.

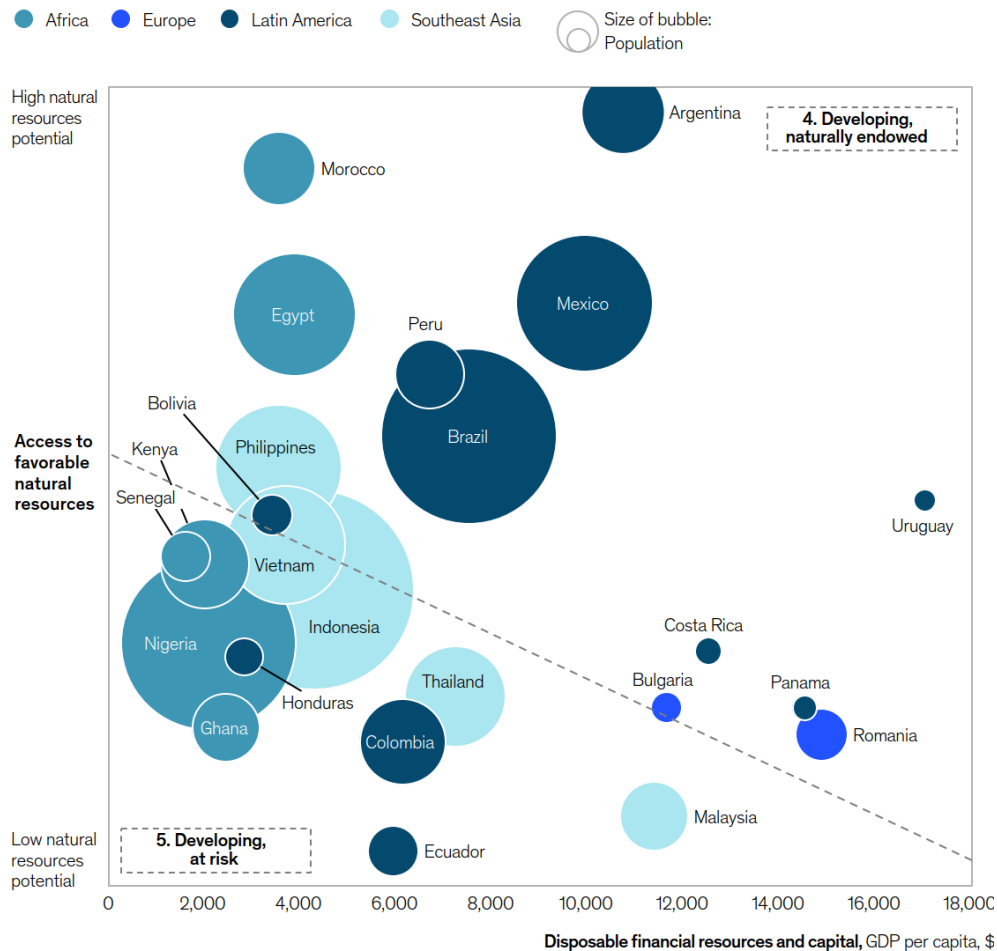


Source: McKinsey analysis

Abbildung 9: Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und daraus resultierendes Risiken für einzelne Länder in Abhängigkeit der Wirtschaftsleistung pro Kopf. Abbildung aus: McKinsey & Company (2022b)⁶⁴

⁶⁴ Vgl. McKinsey & Company (2022b), S. 5.

LCOE bezeichnet die Kosten, welche für die Energieumwandlung von einer anderen Energieform (z. B. Kohle oder Wind) in elektrischen Strom notwendig sind. Sie werden in der Regel in Euro oder Dollar je Megawattstunde (€/MWh bzw. \$/MWh) angegeben.



Source: McKinsey analysis

Abbildung 10: Langfristige Chancen für eine gelingende Energiewende aufgrund der Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen wie Wind- und Solarenergie aber auch kritischer Rohstoffe. Abbildung aus: McKinsey & Company (2022b)⁶⁵

Die Stromgestehungskosten ergeben sich aus den Kapitalkosten (inklusive der Finanzierungskosten von Fremdkapital), den fixen und den variablen Betriebskosten, den Brennstoffkosten sowie der angestrebten Kapitalverzinsung über den Betriebszeitraum. LCOE werden nach der Kapitalwertmethode berechnet und ermöglichen einen Vergleich von Kraftwerken mit verschiedenen Erzeugungs- und Kostenstrukturen.

⁶⁵ Vgl. McKinsey & Company (2022b), S. 6.

Die Methode eignet sich jedoch nur in solchen Fällen zum Vergleich, wenn Energieerzeugungseinrichtungen mit vergleichbaren Merkmalen betrachtet werden. Dies ist beim Vergleich von Grundlastkraftwerken wie Kohlekraftwerken mit fluktuierender nicht planbarer Wind- oder solarer Stromerzeugung nicht gegeben. Letztere benötigen deutlich leistungsfähigere Netze, um hohe Produktionsspitzen nutzen zu können, Backupkraftwerke sowie Speicher. Für einen aussagefähigen Vergleich sollten daher die „Levelized Full System Cost of Electricity (LFSCOE)“ miteinander verglichen werden. Abbildung 11 zeigt Kostenentwicklungen der LCOE aus der Studie SwitchCoal.

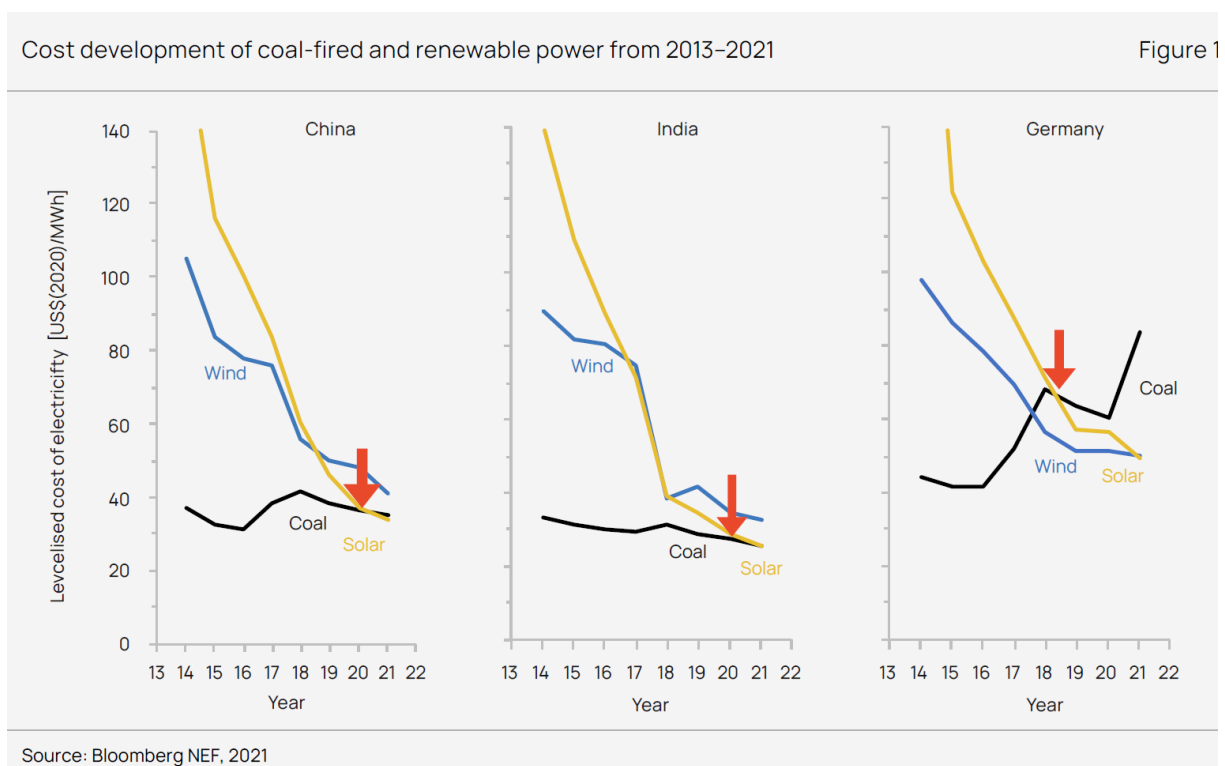


Abbildung 11: Die Entwicklung der LCOE von Windkraft, PV und Kohlekraftwerken in China, Indien und Deutschland..
Abbildung aus: Switch Coal (2023)⁶⁶

Auf Basis der LCOE wird abgeleitet, dass Windkraft und PV-Anlagen gegenüber Kohlekraftwerken einen Wettbewerbsvorteil besitzen. Ab dem Punkt, wo sich die gelbe Kostenkurve für Solarenergie und die schwarze Kostenkurve für Kohlekraft schneiden, ist die Solarenergie auf Basis dieser Betrachtung überlegen.

⁶⁶ Vgl. Switch Coal (2023), S. 4.

Setzt man stattdessen die vollständigen Kosten im Sinne der LFSCOE an, verändert sich das Bild, wie Abbildung 12 veranschaulicht. Hier werden nicht dieselben Kraftwerke wie in der SwitchCoal-Studie verwendet, sondern eine exemplarische Rechnung zur Veranschaulichung des Unterschieds zwischen LCOE und LFSCOE durchgeführt. Dargestellt sind die unterschiedlichen LFSCOE für die einzelnen Technologien jeweils für Texas und Deutschland im Vergleich. LFSCOE-100 bedeutet, dass 100 % der Energie plus Speicher aus der entsprechenden Quelle generiert werden muss, LFSCOE-95 bedeutet entsprechend, dass 5 % aus anderen Quellen stammen kann.

Im Vergleich zeigt sich, dass die LSFSCOE-95 für die traditionelleren Technologien basierend auf Biomasse, Kohle, Gas und Nuklearenergie nur geringfügig von den LSFSCOE-100 nach unten abweichen. Bei den Neuen Erneuerbaren halbieren sich die Kosten, wenn man nur 5 % aus anderen Quellen zusteuert. Das hängt damit zusammen, dass die Kosten für jedes Prozent mehr an Neuen Erneuerbaren (Wind und Sonne) nicht linear sondern überproportional wachsen.

Technology	Germany		Texas	
	LFSCOE-100	LFSCOE-95	LFSCOE-100	LFSCOE-95
	[USD/MWh]	[USD/MWh]	[USD/MWh]	[USD/MWh]
Biomass	104	90	117	95
Coal (USC)	78	67	90	72
Natural Gas CC	35	31	40	32
Natural Gas CT	39	36	42	37
Nuclear	106	90	122	96
Solar	1548	849	413	177
Wind	504	279	291	131
Wind & Solar	454	220	225	97

Abbildung 12: Levelized Full System Costs of Electricity (LFSCOE) für die Bereitstellung der Energie von 100 % bzw. von 95 % mit der entsprechenden Technologie generiert werden muss. Abbildung aus: Idel, R. (2022).⁶⁷

Die Kostensteigerungen entstehen vor allem durch die hohen Speicherkosten, um die Volatilität abzufangen. Für Texas nähern sich die Neuen Erneuerbaren bei der Betrachtung der LSFSCOE-95 den Kosten für die Grundlasttechnologien an, sind im

⁶⁷ Vgl. Idel, R. (2022).

Fall von Gas aber immer noch gut drei Mal so hoch. Deutschland hat schwierigere Verhältnisse für die Erzeugung Neuer Erneuerbarer als Texas, weswegen die Kosten für Wind- und Sonnenenergie hier insgesamt höher sind. Dies stützt eher den Ansatz der „zwei Säulen“ eines Energiesystems, statt den des kompletten Umstiegs auf erneuerbare Energien („all electric“). Für die Grundlastkraftwerke müssten hier noch die Kosten für den klimafreundlichen Betrieb mithilfe von Carbon Capture and Storage bzw. Usage hinzugerechnet werden, damit der Vergleich komplett wäre.

Ein weiterer Fehler, der auch bei SwitchCoal auftaucht, ist, dass entweder unberücksichtigt bleibt, dass die zum Vergleich stehenden fossilen Kraftwerke bereits existieren und aufgrund ihres für Entwicklungs- und Schwellenländern üblichen geringen Alters auch noch 30 bis 50 Jahre laufen werden und die Investitions- und damit Kapital- und Finanzierungskosten somit Null sind. Bei Switch Coal werden zwar nur die Betriebskosten angesetzt, diese aber so hoch, dass sie den Gesamtkosten entsprechen, die für die neu zu installierenden Solar- und Windanlagen anfallen.

Dies ist in Regionen mit vergleichsweise hohen Zinsen, wie in den Entwicklungs- und Schwellenländern, besonders relevant. Bei einem Unterschied der Schuldzinsen von angenommenen 4 % – was extrem niedrig angesetzt ist – zwischen einem Schwellen- und Industrieland verteuert dies bei einer Kreditlaufzeit von 15 Jahren die Investition um 80 % gegenüber demselben Investment in einem Industrieland mit niedrigeren Zinsen. Dies zeigt einerseits, wie vorteilhaft eine Weiternutzung bestehender Assets ist und andererseits, wie fehlerhaft ein Vergleich ist, der dies unberücksichtigt lässt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass es viel Spielraum gibt, die Annahmen und die Herangehensweise eines Modells so zu wählen, dass eine favorisierte Lösung herausgearbeitet werden kann. Aber selbst dann, wenn die Kostenrechnungen richtig wären und es ökonomisch sinnvoll wäre, die Kohlekraftwerke abzureißen und durch Neue Erneuerbare Energien zu ersetzen, ist das Thema der Kohleverstromung um viele weitere Facetten komplexer, wie Kapitel 4.1 beschreibt. Es spielen ökonomisch schädliche Eigeninteressen unterschiedlicher Akteursgruppen eine Rolle genauso wie die Trägheit der politischen Systeme, die einem schnellen Umstieg und der Verabschiedung von der Kohle im Wege stehen. Deswegen sollten Lösungen gesucht werden, die diese Interessensgruppen und die Grundlastkraftwerke insgesamt einbeziehen, statt sie kurzfristig eliminieren zu wollen.

4.3 Die zentrale Bedeutung der Verbrennungsmotoren – Tendenz wachsend

Mobilität ist ein wichtiger Faktor für wirtschaftliche Entwicklung. Deswegen betreiben beispielsweise große internationale Entwicklungsbanken wie die Europäische Investitionsbank komplexe Programme, um den Aufbau einer Transportinfrastruktur zu fördern.⁶⁸ Die zweitgrößte Organisation dieser Art in Asien, die Asian Infrastructure Investment Bank (AIIB), trägt diese Aufgabe sogar im Namen. Infrastruktur im Allgemeinen bezeichnet dabei Gebäude, Straßen, Telekommunikationsnetze aber auch Energieinfrastruktur. Mobilität und Transport fokussiert sich auf das Befördern von Personen und Gütern.

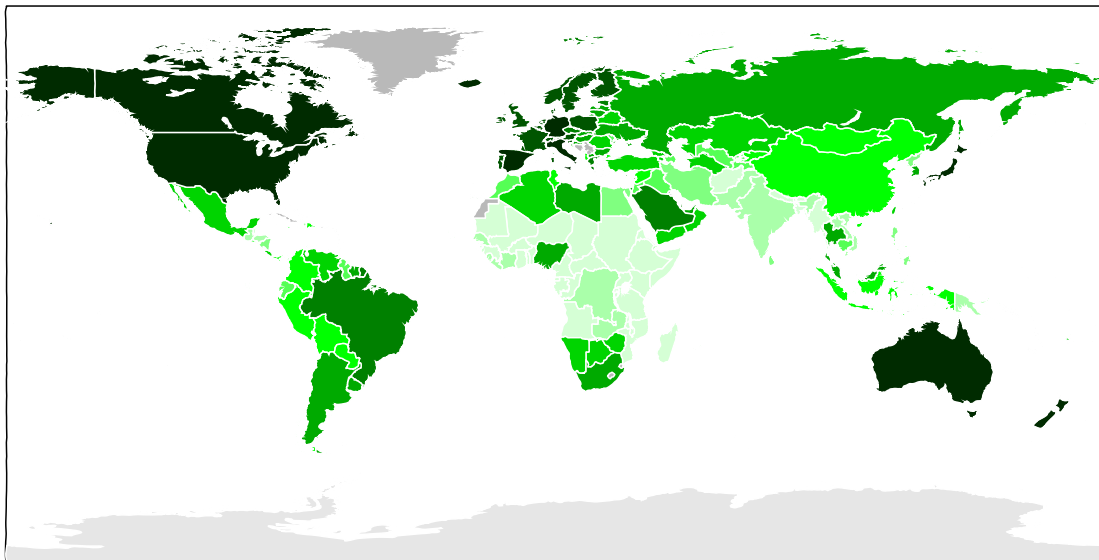
Seit etwa einem Jahrhundert ist die über alles dominierende Technologie für die Ermöglichung der Mobilität der Verbrennungsmotor. Dieser hat die Dampfmaschine in der Industrie und das Pferd für den Transport von Personen und leichten Gütern abgelöst. Der Verbrennungsmotor wird in unterschiedlichen Varianten durch raffinierte Produkte auf Basis von Erdöl angetrieben, z. B. durch Benzin, Diesel, Kerosin oder Schiffsdiesel. Manche Motoren verbrennen auch natürlich vorkommendes und dann komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas, CNG), flüssiges Gas (Liquified Petroleum Gas, LPG), das als Beiprodukt in Erdölraffinerien entsteht oder Alkohole wie Ethanol oder Methanol. Für Schiffe wird in letzter Zeit auch verstärkt an dem Einsatz von Ammoniak gearbeitet. Auch Wasserstoff kann in Motoren verbrannt werden. Aufgrund ihrer enormen Energiedichte dominieren jedoch Kraftstoffe auf Erdölbasis.

Der Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und Mobilität wird durch den Motorisierungsgrad deutlich. Abbildung 13 zeigt die Anzahl der Kraftfahrzeuge pro 1.000 Einwohner. Je dunkler der Farbton, desto mehr Fahrzeuge pro Person entfallen auf die jeweiligen Länder. Klar zu erkennen ist, dass die Industrieländer Europas und Nordamerikas zusammen mit Australien und Japan den höchsten Motorisierungsgrad zeigen. Der Wert in der EU lag 2022 bei 560 Fahrzeugen pro 1.000 Einwohner. Hingegen sinkt der Motorisierungsgrad rapide, wenn die Länder ärmer werden. Das

⁶⁸ Vgl. Fusiek, D. A. (2022).

Extrem ist Subsahara Afrika mit teilweise weniger als 10 Fahrzeugen pro 1.000 Einwohner.

Außerdem ist zu beobachten, dass die Anzahl der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren weltweit zunimmt. Das ist wenig erstaunlich, da auch die globale Wirtschaftsleistung konstant wächst. Lag die Gesamtzahl der Kraftfahrzeuge im Jahr 2005 noch bei knapp 900 Millionen, lag sie zehn Jahre später bei knapp 1,3 Milliarden, nur fünf Jahre später im Jahr 2020 bereits bei knapp 1,6 Milliarden.⁶⁹ Nicht nur ist die Anzahl konstant gewachsen, in den vergangenen Jahren hat sich sogar die Geschwindigkeit des Zuwachses gesteigert.



Motorisierungsgrad der Länder der Welt: ■ 601 und höher ■ 501–600 ■ 301–500 ■ 151–300 ■ 101–150 ■ 61–100 ■ 41–60 ■ 21–40 ■ 11–20 ■ 0–10

Abbildung 13: Motorisierungsgrad der Länder der Welt.: Daten aus OICA (2020)⁷⁰

Es gibt eine Reihe von empirischen Erkenntnissen, die ökonometrische Beziehungen zwischen der Mobilität der Menschen und verschiedenen Wirtschaftsindikatoren ableiten. Weil insgesamt mehr Daten erhoben werden und ausgewertet werden, kann der Zusammenhang zwischen Mobilität und wirtschaftlicher Entwicklung recht gut abgeschätzt werden. So zum Beispiel auf Basis von Daten bei der Erhebung von Straßenzöllen in China, aufgelöst sogar auf regionaler Ebene.⁷¹ Weil mittlerweile viele

⁶⁹ Vgl. Statista (2023).

⁷⁰ Vgl. OICA (2020).

⁷¹ Vgl. Li, B. et al. (2020).

Menschen Smartphones mit Internetzugang und vielfältigen Anwendungen nutzen, ist es sogar möglich, soziale und mobilitätsbezogene Daten aus einer Quelle zu kombinieren und daraus Aussagen über den Zusammenhang zwischen Mobilität und wirtschaftlicher Entwicklung abzuleiten.

In einer anderen Studie wurden Mobilitäts-Daten und Daten zu sozialem Verhalten auf Basis von Mobiltelefonen mit einem Big-Data-Ansatz analysiert, um herauszufinden, ob auf Grundlage dieser Daten Aussagen zum Wohlbefinden der Menschen und zum sozio-ökonomischen Entwicklungsstand gemacht werden können.⁷² Zwar betont die Studie, dass keine Kausalität zwischen einer höheren Ausprägung der Mobilität und dem sozio-ökonomischen Status einer Region festgestellt werden konnte, jedoch ist allein die starke Korrelation der beiden Größen ein wichtiger Hinweis. Hochentwickelte Regionen haben eine hohe Vielfalt an Mobilität. Auch anhand von Daten während der Ausgangsbeschränkungen in der Zeit der Covid-19-Pandemie lässt sich dieser Zusammenhang zeigen.⁷³

Durch die Verbrennung von fossilen Kraftstoffen spielt der Personen- und Güterverkehr natürlich eine bedeutende Rolle bei der Erzeugung von Treibhausgas-Emissionen und ist ein Treiber für den Klimawandel. Der straßengebundene Verkehr verursacht etwa 12 % der globalen CO₂-Emissionen. Dabei sind Pkw, Lkw, Motorräder und Busse inbegriffen. 60 % der Emissionen im Straßenverkehr stammen aus dem Personenverkehr (Pkw, Motorräder und Busse), die restlichen 40 % aus dem Straßengüterverkehr (Lkw und Transporter).^{74,75}

In der EU lag der Anteil der straßengebundenen Emissionen bei 21 %. Die Verteilung auf die einzelnen Verkehrsmittel entsprach etwa den weltweiten Anteilen. Emissions-einsparungen gelangen in den letzten Jahren nicht. Zwar tragen bessere Motoren und Abgastechnik sowie die Verwendung neuer Kraftstoffe (wie E10) zur Verringerung des Schadstoffausstoßes bei. Diese Maßnahmen werden jedoch durch das steigende Verkehrsaufkommen sowie die zunehmende Zahl hochmotorisierter Fahrzeuge mit höherem Kraftstoffverbrauch mehr als aufgewogen. Dieses Phänomen bezeichnet man als Rebound-Effekt, denn die erzielten Effizienzgewinne werden durch andere Effekte überkompensiert, in dem Fall die komplexere Ausführung des Fahrzeugs.

⁷² Vgl. Pappalardo, L. et al. (2016).

⁷³ Vgl. Canals, C. et al. (2020).

⁷⁴ Vgl. Destatis (2023a).

⁷⁵ Vgl. IEA (2019).

Zwischen 1990 und 2021 erhöhte sich der jährliche CO₂-Ausstoß im Straßenverkehr EU-weit um 21 %. Am deutlichsten stieg der CO₂-Ausstoß bei den leichten Nutzfahrzeugen (+49 %). Die CO₂-Emissionen von Lkw und Bussen erhöhten sich um 28 %, die der Pkw um 15%.⁷⁶

Entscheidend dafür, wie die Treibhausgas-Emissionen im Transportsektor in den kommenden Jahrzehnten (netto) reduziert werden können sind die Entwicklung unterschiedlicher politischer Einflussfaktoren aber auch technischer sowie wirtschaftlicher Faktoren. Mittlerweile zeigt sich, dass batterieelektrische Antriebe einen Teil der Pkw ersetzen kann; dies vor allem bei Fahrzeugen in Städten, die im Durchschnitt weniger als 100 km pro Tag fahren und wenig Gewicht transportieren. Je größer die Fahrdistanz und je größer das Gewicht der zu transportierenden Güter, desto schwieriger ist der Einsatz der Batterietechnologie, weil die Energiedichte in Batterien eben viel geringer ist als in Kraftstoffen auf Erdölbasis. Die Batterie wird größer und schwerer, braucht längere Ladepausen und ihre Leistungsfähigkeit wird durch Temperaturänderungen beeinflusst.

Daher ist die Frage nach den Antrieben für größere Fahrzeuge, wie schwere Lkw und Busse, besonders interessant. Diese lassen sich aufgrund der oben genannten Argumente nur schlecht elektrifizieren, sind aber mit 40 % ein wesentlicher Verursacher von CO₂-Emissionen und wegen des Gütertransports das Rückgrat der Wirtschaft. Entsprechend schwer ist eine Einschätzung über die Entwicklung der Lkw-Flotte für die nächsten Jahre – geschweige denn für die nächsten Jahrzehnte – zu machen.

Verschiedene Studien kommen zu teilweise komplett verschiedenen Aussagen, die sich natürlich aus den zugrundeliegenden Annahmen ergeben. So zeigt Abbildung 14 in einer Modellierung den Bestand und die Neuzulassungen von Lkw für Deutschland bis 2045. In diesem Beispiel wird die gesamte Flotte an Verbrennungsmotoren (grauer Balken) sukzessive durch Elektro- und Brennstoffzellen-Antriebe ersetzt (oranger und blauer Balken). In der Legende der Grafik ist allerdings bereits der Hinweis auf die anderen Entwicklungspfade versteckt: „Anmerkung: Im Zielpfad werden verbliebene Verbrennerfahrzeuge im Bestand mit 100 % grünen Kraftstoffen angetrieben“.

⁷⁶ Vgl. Destatis (2023b).

Die Europäische Kommission sieht hingegen eine andere Entwicklung, wie Abbildung 15 zeigt. In dem betrachteten Zeitraum steigt die Anzahl an Fahrzeugen, die auf der Verbrennung von Diesel basieren, sogar von sechs auf sieben Millionen Fahrzeuge an. Lediglich der erwartete Zuwachs der Gesamtflotte wird über Fahrzeuge mit Motoren zur Verbrennung von Gasen, mit Brennstoffzellen und mit Batterien gedeckt. Sollen die Emissionen der schweren Lkw gesenkt werden, müssen die verbliebenen Dieselmotoren Schritt für Schritt mit grünen synthetischen Kraftstoffen betrieben werden.

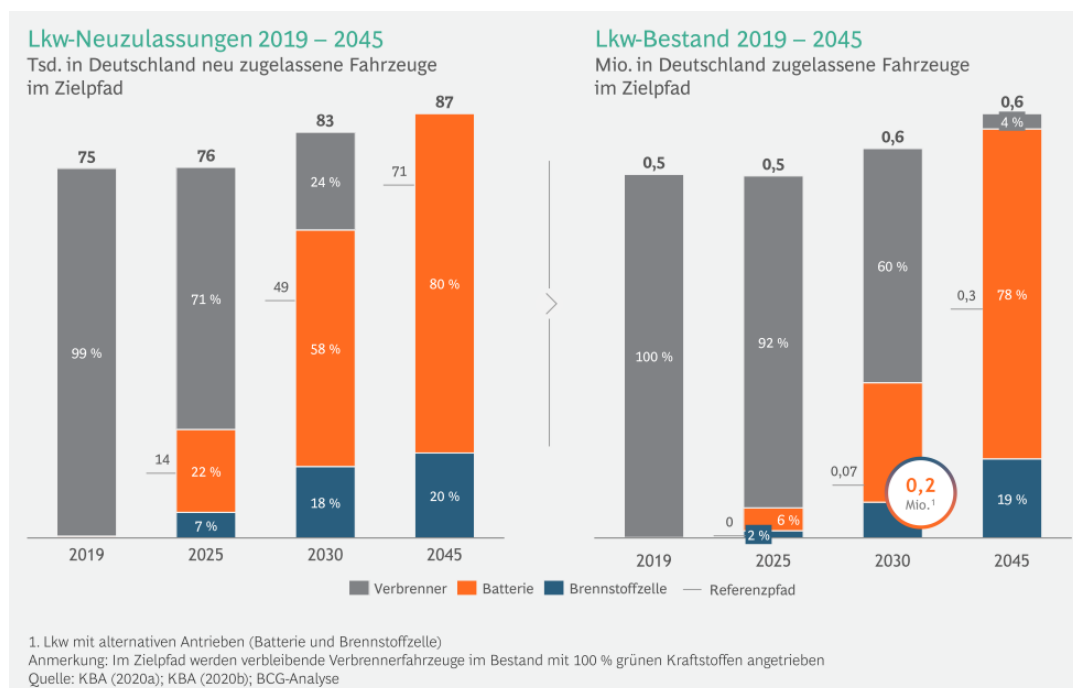


Abbildung 14: Bestand und Neuzulassungen von Lkw 2019-2045. Abbildung aus: BCG (2021)⁷⁷

Die bisher beschriebene Situation bezog sich auf Staaten, die bereits über eine gut funktionierende Wirtschaft mit hoher Leistungsfähigkeit verfügen. Hier geht es darum, eine möglichst sinnvolle Transition des Transportsektors hin zu weniger Emissionen bei zumindest gleichbleibender Leistungsfähigkeit zu organisieren. Für ärmere Staaten geht es vielmehr darum, ein Infrastruktursystem mehr oder weniger „auf der grünen Wiese“ aufzubauen (im konkreten Fall spricht man häufig von sog. „green field projects“).

⁷⁷ Vgl. BCG (2021), S. 117.

Figure 43: Outlook of HDVs by type and fuel

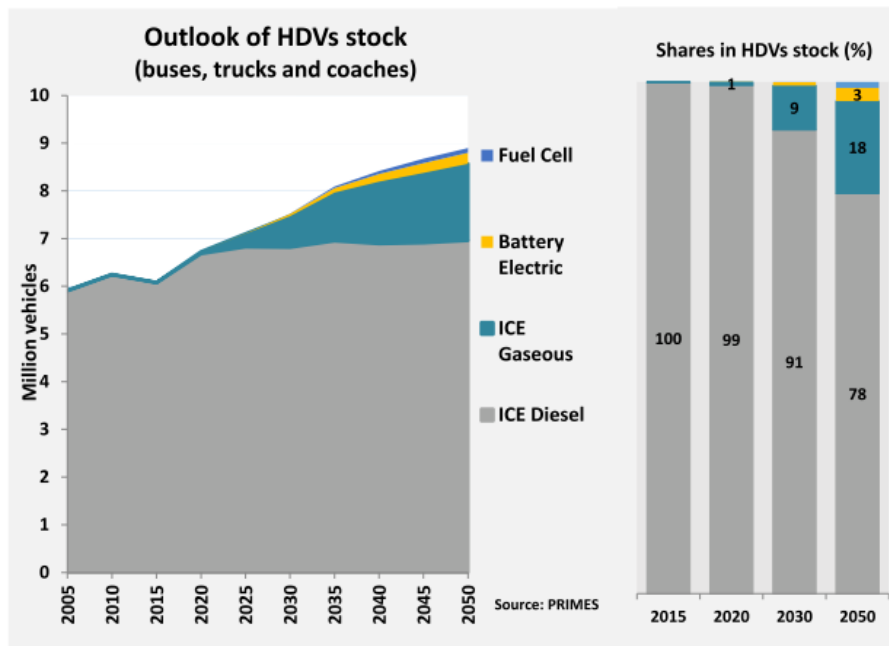


Abbildung 15: Entwicklung der schweren Lkw, Busse und Fernbusse im EU-Referenzszenario 2020. Abbildung aus: European Commission (2021)⁷⁸

Das sind verschiedene Ansätze, weil im ersten Fall bereits eine enorme Menge an Kapital in Infrastruktur gebunden ist, das man nicht einfach aufgeben sollte. Für Staaten im Aufbau müssen überhaupt erst Investitionen getätigt werden. Das ermöglicht eine höhere Flexibilität in der Gestaltung. Dennoch gelten die wirtschaftlichen und physikalischen Rahmenbedingungen in Bezug auf die Kosten und die verfügbaren Technologien, z. B. der bereits erwähnte Unterschied bei der Energiedichte bei Antrieben auf Basis von Kraftstoffen auf Molekülbasis oder bei Antrieben auf Basis von Batterien.

Im Fall des afrikanischen Kontinents sprechen vielen Indikatoren dafür, dass sich über die nächsten Jahrzehnte ein enormes Wirtschaftswachstum mit entsprechenden Auswirkungen auf die Mobilität entwickeln wird.⁷⁹ Die Bevölkerung wird sich bis 2050 von 1,2 Milliarden auf 2,4 Milliarden Menschen verdoppeln, auch ziehen immer mehr Menschen (auch relativ) in Städte. Dabei wird die Mittelschicht und damit die Kaufkraft immer größer, was die Auslastung des öffentlichen Personenverkehrs nach oben treibt und damit immer mehr Menschen motivieren wird, ein eigenes Auto zu kaufen. Zudem

⁷⁸ Vgl. European Commission (2021), S. 80.

⁷⁹ Vgl. KPMG (2020).

wollen die Menschen einen angenehmeren Lebensstil. Weil auch bei uns die Verkaufszahlen für Automobile steigen, langsam auch für Elektrofahrzeuge, werden gebrauchte Verbrenner in Afrika immer erschwinglicher. Der durchschnittliche Preis in Kenia und Nigeria liegt zwischen 6.000-10.000 US-Dollar.⁸⁰

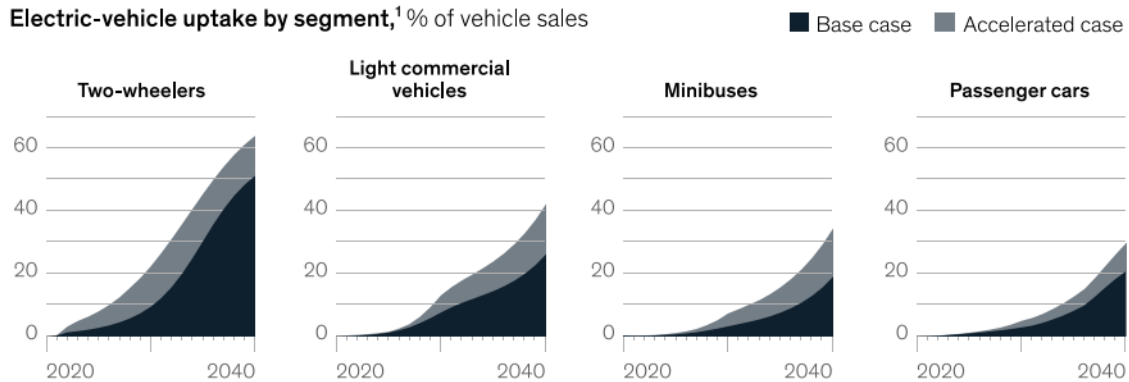
Konkret bedeutet das, dass sich die Absatzzahlen für neue Automobile in Afrika in den 15 Jahren von heute 1,3 Millionen auf etwa zehn Millionen annähernd verzehnfachen könnten. Für Ostafrika, inklusive Kenia, Uganda, Ruanda, Burundi, Tanzania und Südsudan erwartet KPMG, dass sich die Nachfrage auf 500.000 Fahrzeuge pro Jahr innerhalb der nächsten zehn Jahre verdoppeln wird. Diese breite Streuung zwischen einem Wachstum von Faktor zwei bis Faktor zehn innerhalb der nächsten zehn bis fünfzehn Jahre zeigt einerseits die Unsicherheit der Prognosen, andererseits geht der Trend klar nach oben.

Werden diese neuen Fahrzeuge nun Emissionen erzeugen oder nicht? Werden es batterieelektrische Fahrzeuge sein oder solche mit Verbrennungsmotoren? Eine Teilantwort wurde oben bereits gegeben, denn aktuell sind in Afrika vor allem die Fahrzeuge im Einsatz, die in anderen Teilen der Welt vorher bereits im Gebrauch waren. Mehr als 80 % der von Afrika importierten Fahrzeuge mit vier Rädern sind Gebrauchtwagen.⁸¹ An diesem Trend wird sich erst einmal auch nichts ändern, denn es ist nicht zu erwarten, dass das erste Auto, das jemand je besessen hat, direkt ein Neuwagen sein wird, dies schon aus Kostengründen. Außerdem sind gleichzeitig genügend Gebrauchtfahrzeuge auf dem Markt und die Nutzungsdauer dieser Fahrzeuge liegt bei etwa 15-20 Jahren.

Abbildung 16 zeigt die Zusammenfassung der Untersuchung von McKinsey&Company (2022): Motorräder mit zwei Rädern können auf einen Anteil von 50-60 % batterieelektrischer Antriebe wachsen. Dies ist ein Trend, den es bereits in Asien zu beobachten gibt. Danach folgen leichte kommerziell betriebene Fahrzeuge zwischen 25-40 % und Minibusse mit knapp 20-35 %, das Hauptverkehrsmittel des öffentlichen Nahverkehrs in diesen Ländern. Pkw bilden den kleinsten Anteil mit 20-30 % an elektrischen Fahrzeugen.

⁸⁰ Vgl. McKinsey & Company (2022a).

⁸¹ Vgl. McKinsey & Company (2022a).



¹In 5 markets (Ethiopia, Kenya, Nigeria, Rwanda, and Uganda), which make up ~60% of all vehicle sales in sub-Saharan Africa, excluding South Africa. Source: McKinsey Center for Future Mobility analysis, 2021

Abbildung 16: Anteil elektrischer Fahrzeuge für unterschiedliche Fahrzeugkategorien zwischen 2022 und 2040 für ein Basis-Szenario (schwarz) und ein beschleunigtes Szenario (grau). Abbildung aus: McKinsey & Company (2022a)⁸²

Umgekehrt betrachtet heißt das, dass in allem Fällen mehr als die Hälfte der Fahrzeuge aller Klassen (mit Ausnahme der Zweiräder) bis hin zu 80 % bei den privaten Pkw im Basisszenario im Jahr 2040 vermutlich mit Verbrennungsmotoren fahren werden.

4.4 Die Probleme der Elektro-Mobilität

Die weit überwiegende Anzahl der Entwicklungs- und Schwellenländer deckt ihren Strombedarf aktuell noch mittels fossiler Kraftwerke. Daher würde auch der für die E-Mobilität notwendig Strom aus fossilen Quellen stammen. Der Umstieg auf erneuerbare Energiequellen erfordert den Ausbau von Wind- und PV-Anlagen, leistungsfähiger Übertragungs- und Verteilungsnetze und zusätzlich den Aufbau eines weitverteilten Netzes von Ladestationen. Zur Überbrückung von Dunkelflauten und dem Umgang mit Leistungsspitzen sind Speicher und Backupkraftwerke notwendig. Eine derartige Struktur wächst nur über Jahrzehnte, wie in Europa zu beobachten ist. Unter den Finanzbedingungen von Entwicklungs- und Schwellenländern noch langsamer.

Solange die Stromerzeugung nicht weitgehend klimaneutral ist, entsprechen die CO₂-Emissionen, die einem in den Markt gebrachtes batterieelektrisches Fahrzeug (BEV) zuzuweisen sind, denen des schmutzigsten in Betrieb befindlichen fossilen

⁸² Vgl. McKinsey & Company (2022a), S. 11.

Kraftwerks.⁸³ Wäre das BEV ein Auto mit Verbrennungsmotor, so könnte dieses Kraftwerk nämlich in seiner Produktionsmenge um die vom BEV benötigte Strommenge heruntergefahren werden. Im Falle zahlreicher BEV könnte das Kraftwerk sogar vollständig abgeschaltet werden. Die dem BEV zuzurechnenden Emissionen entsprechen somit den Grenz-CO₂-Emissionen des Stromversorgungssystems. Diese Grenzemissionen entsprechen auch bei erheblichen Anteilen an erneuerbarer Erzeugung noch während der längsten Zeit des Jahres denen fossiler Kraftwerke.

Dieses Phänomen ist z. B. in Deutschland zu beobachten. Nach über 20 Jahren der Förderung und mittlerweile 50 % erneuerbarer Erzeugung in der Stromproduktion gibt es im Jahresdurchschnitt nur wenige Stunden im Jahr, in denen vollständig auf fossile Kraftwerke verzichtet werden kann.

Eine großflächige Elektrisierung des Verkehrs ist aus Gründen der CO₂-Emissionen daher erst sinnvoll, wenn ein erheblicher Teil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stammt. Hiervon sind aktuell die meisten Industrieländer, aber vor allem auch die meisten Entwicklungs- und Schwellenländer, weit entfernt. Auch in Bezug auf Luftschadstoffe, wie Stickstoffdioxid und Feinstaub, bieten BEV nicht notwendigerweise Vorteile gegenüber modernen Verbrennern. Ursache hierfür sind die u. a. in den letzten 20 Jahren in Europa schrittweise verschärften Abgasregeln. Fahrzeuge, die diesen Standards genügen, sind weltweit verfügbar.

Ein weiteres Problem sind die zur Herstellung der Batterien und Motoren von BEV notwendigen großen Mengen an Rohstoffen, die aktuell nach übereinstimmender Meinung der meisten Studien nicht in ausreichendem Maß bereitgestellt werden können, würde man weltweit einen kompletten Umstieg vom Verbrennungsmotor auf BEV anvisieren. Zudem besteht eine starke Abhängigkeit von wenigen Ländern wie China und Chile bei der Versorgung mit den notwendigen Rohstoffen. Probleme mit der Beachtung von Menschenrechten bei der Förderung der benötigten Rohstoffe kommen hinzu.

Um die politische Abhängigkeit zu reduzieren und die Gefahr volatiler Preise zu verringern, muss vor einer weltweiten Umstellung auf Elektromobilität das Angebot an kritischen Rohstoffen ausgeweitet werden, u.a. um die Lieferketten von China weg zu

⁸³ Vgl. Schmidt, U. (2020).

verlagern. Dies wird aber schwierig, denn es geht nicht nur um den Abbau, sondern auch um Chinas Vorherrschaft bei der Verarbeitung von Metallen und Mineralien.

Der von der Neuen Züricher Zeitung als „einflussreichster Energieanalytiker der Welt“ bezeichnete Daniel Yergin beschreibt die Situation wie folgt: „Was hinzukommt: Von der Entdeckung bis zur Förderung [von Rohstoffen, Anm. der Autoren] vergehen im Bergbau bis zu 20 Jahre. Die Herausforderungen in der Lieferkette werden unterschätzt. Es gibt eine große Kluft zwischen der politischen Rhetorik und dem, was tatsächlich am globalen Markt passiert. Die USA, Russland und Saudi-Arabien fördern 40 Prozent des Erdöls. Beim Kupfer werden 40 Prozent des Angebots in nur zwei Ländern produziert: in Chile und in Peru. Das macht es komplizierter.“⁸⁴

Ein großes Problem für die Emissionsminderung im Verkehrssektor durch den Einsatz von BEV liegt auch in der Reichweite der Batterien. Elektromobilität liefert in Ballungszentren, wo geringe Reichweiten nicht problematisch sind, einen nur kleinen Beitrag. Das liegt daran, dass die mit Abstand meisten Emissionen (zwei Drittel) bei nur 20 % aller Fahrten entstehen, nämlich bei jenen, die weiter als 20 Kilometer reichen. Der schwerpunktmäßige Einsatz von BEV in Ballungszentren löst das CO₂-Emissionsproblem daher nicht. Nicht anders sieht es im Güterverkehr aus: Hier fällt die Hälfte aller Emissionen bei einem Viertel der Fahrten an, durchgeführt von gerade einmal acht Prozent der Nutzfahrzeuge, diese sind zwischen 26 und 40 Tonnen schwer.⁸⁵

Elektromobilität erfordert erhebliche planbare Leistungsreserven des Stromerzeugungssystems. Planbarkeit in Bezug auf die Leistungsreserven des Stromsystems ist also für die Elektromobilität wichtig. Die Anforderungen aus der Elektrifizierung des Verkehrs an das Stromsystem sind erheblich und sollen zur besseren Nachvollziehbarkeit am Beispiel von Deutschland in groben Zügen quantitativ dargestellt werden. Eine Übertragung auf andere Länder ist mit diesem Verständnis anschließend einfacher möglich.

Der Energieverbrauch eines elektrisch angetriebenen Pkw beträgt ca. 25 kWh/100 km inklusive Heizung und Kühlung.⁸⁶ 47,72 Millionen Pkw mit einer durchschnittlichen Laufleistung von 15.000 km pro Jahr benötigen 179 TWh Strom pro Jahr. Aktuell liegt

⁸⁴ Hosp, G. (2024).

⁸⁵ Vgl. Delhaes, D. (2022).

⁸⁶ Vgl. Koch, T. (2022).

der gesamte elektrische Energieverbrauch in Deutschland bei 612 TWh pro Jahr. Ohne Berücksichtigung des Güterverkehrs entspricht der Strombedarf allein für die E-Mobilität von Pkw einem Zuwachs von annähernd 30 %. Unter der günstigen Annahme, dass alle Pkw möglichst gleichmäßig über den Tag verteilt geladen werden, ergibt sich bei einer Ladeleistung von 25 kW und einer Ladezeit von einer Stunde ein Ladeintervall von 58,4 Stunden, nach denen das Fahrzeug erneut geladen werden muss. Dividiert man die Anzahl der Fahrzeuge durch die Intervalldauer erhält man die notwendige minimale Anzahl an Ladepunkten von 817.123. Diese möglichst gleichmäßige Beladung aller Fahrzeuge drückt sich in der hohen Auslastung der Ladepunkte von 100 % aus. Die vom Stromversorgungssystem bereitzustellende Leistung berechnet sich aus Anzahl der Ladepunkte multipliziert mit der Ladeleistung zu 20,43 GW.

Geht man von den realistischeren Annahmen aus, dass die von der EU empfohlene Anzahl von einer Ladestation pro zehn Fahrzeuge zur Verfügung stehen, die Fahrzeuge mit 50 kW und 30 Minuten lang geladen werden und die Hauptladezeit zwischen 6 Uhr und 22 Uhr liegt, steigt die vom Stromsystem allein für batterieelektrische Pkw maximal bereitzustellende Leistung auf 283 GW, da die Auslastung der Ladepunkte gegenüber der vorangegangenen idealisierten Situation von 100 % auf 12,8 % sinkt. Zu Zeiten ohne E-Mobilität lag die Spitzenlast in Deutschland bei ca. 80 GW. Je größer die Ladepunktanzahl, desto größer kann die Ungleichmäßigkeit der Nachfrage sein und desto geringer sind die Einschränkungen (im Sinne von Wartezeiten) in Stoßzeiten. Denkt man an Urlaubsreise- oder Feierabendverkehr am Freitagnachmittag in Kombination mit der gegenüber dem Betankungsvorgang längeren Ladezeit, erscheint die EU-Empfehlung nicht übertrieben.

Diese einfache Berechnung zeigt, dass entweder ein Vielfaches der aktuellen Spitzenlast errichtet, finanziert und gesichert für eine weitgehende Elektrifizierung des Straßenverkehrs bereitgestellt werden muss, oder eine einschneidende Kontingentierung von Ladeleistung unumgänglich ist, sollten diese Leistungen nicht bereitgestellt werden.

Die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen wurden bei dieser Berechnung noch nicht berücksichtigt. Es versteht sich von selbst, dass die Schaffung derartig großer gesicherter Leistungsreserven allein für die E-Mobilität von Entwicklungs- und

Schwellenländern utopisch ist. Außerdem müssten neben der Erzeugungskapazität auch die Netze entsprechend ausgebaut werden.

Die Ausführungen zeigen, dass die Elektromobilität voraussichtlich für Entwicklungs- und Schwellenländer bis auf Weiteres eine Nischentechnologie bleibt, da die erforderlichen Investitionen in ein von erneuerbarer Erzeugung dominiertes Stromgesamtsystem extrem hoch sind und alternative und viel preiswertere Wege, z. B. über den Betrieb von Verbrennungsmotoren mit synthetischen Kraftstoffen existieren.

4.5 Ankündigungen nach Dubai

In der Berichterstattung über die letzte Klimakonferenz COP28 in Dubai wurden in den meisten Fällen drei Punkte hervorgehoben. So soll die globale Kapazität an erneuerbaren Energien bis 2030 verdreifacht werden. Im gleichen Satz der Abschlusserklärung steht, dass sich die Energieeffizienz im gleichen Zeitraum doppelt so stark verbessern soll. Als zweiter Punkt hat eine Erklärung von über 20 Staaten für Aufmerksamkeit gesorgt, die bis 2050 die Nuklearenergie verdreifachen wollen, u. a. wesentlich vorangetrieben von den Vereinigten Staaten von Amerika.

Als wichtigster Aussage der Konferenz wird wohl in Erinnerung bleiben, dass die Staaten bezüglich der Energieversorgung eine „transition away from fossil fuels“ erreichen wollen. Und zwar in einer gerechten/gleichberechtigten, vernünftigen und geordneten Weise, im englischen Original „just, orderly and equitable“. Um die Transition weg von fossilen Energien wurde lange gerungen, denn einige Staaten wollten die komplette Abkehr von den fossilen Energien, wogegen sich die Staaten mit wesentlichen fossilen Energiereserven jedoch gewehrt haben.

Kaum ist die Klimakonferenz vorbei und das Abschlussdokument finalisiert, geht der Kampf um die Interpretation der wichtigen Passagen der Abschlusserklärung jedoch weiter.⁸⁷ Einerseits durch direkte Äußerungen einzelner Personen, andererseits durch konkrete Ankündigungen einzelnen Staaten, wie sie ihr Energiesystem in Zukunft gestalten wollen. So hat beispielsweise der Energieminister Saudi-Arabiens im Januar 2024 auf einem Podium in Riad gesagt,⁸⁸ dass der entsprechende Paragraf 28 der

⁸⁷ Vgl. auch Kapitel 2.2

⁸⁸ Vgl. Lo, J. (2024).

Abschlussklärung, der neben den drei oben genannten Maßnahmen weitere fünf Maßnahmen enthält, ein „a la carte menu“ sei. Man könne wählen, was man macht. Daraus lässt sich ableiten, dass Saudi-Arabien z. B. keine Transition weg von fossilen Energien anstrebt, sondern sich auf andere Maßnahmen fokussiert, z. B. im Bereich der Nuklearenergie oder den Einsatz von Carbon Capture und anderen Entnahme-Technologien für CO₂.

Eine Ankündigung, die sich fast wie das Gegenteil der Abschlussklärung liest, macht Indien nur einen Monat nach der Klimakonferenz: Das Energieministerium plant in den nächsten acht Jahren 53,6 GW an Kohlekraftwerken zur Energieerzeugung in Betrieb zu nehmen⁸⁹ – zusätzlich zu den 26,4 GW, die sich aktuell bereits im Bau befinden. Mit rund 200 GW installierter Leistung macht Energie aus Kohlekraft in Indien aktuell bereits etwa 50 % aus. Indien möchte also zusätzlich zu etwa 13 % Zubau noch einmal um 25 % aufstocken. Ein solches Statement unmittelbar nach der Klimakonferenz zeigt, dass sich das Jahrzehnte alte Narrativ, dass Entwicklung Vorrang vor Klima- und Umweltschutz hat, auch nach der COP in Dubai weiter existiert. Dabei ist egal, wie die letztliche Formulierung der Abschlussklärung ausfällt. Interessant ist, dass Indien mit dieser Erklärung nicht einige Monate gewartet hat. Offensichtlich will Indien der Verfestigung bestimmter Narrative, wie "Ausstieg aus der Kohle", entschieden entgegentreten.

Diese beiden Beispiele zeigen, dass viel diskutiert, verhandelt und niedergeschrieben wird. In der Praxis jedoch ein sinnvoller Lösungsvorschlag fehlt, der die globale Gemeinschaft zumindest annähernd in eine Richtung bringt, die Klimaschutz mit dem Aufbau von Wohlstand verknüpft oder anders ausgedrückt: Papier ist geduldig, das konkrete Handeln in der Welt viel schwieriger. Das vorliegende Kapitel hat aufgezeigt, warum die etablierten Technologien rund um die Kohlenutzung und der Verbrennungsmotor mit in den Lösungsraum für das Energie- und Klimaproblem insbesondere unter zeitgleicher Förderung der UN-Nachhaltigkeitsziele, der SDGs, gehören. Strategien zu ihrem klimaneutralen Betrieb bzw. zur Beseitigung ihrer fossilen Emissionen sind gefragt, nicht das Verbot der Technologien selbst.

⁸⁹ Vgl. Varadhan, S. (2024).

5 Die Alternativen für das Energiesystem

Für die Begrenzung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre ist eine globale Energiewende hin zu einem klimafreundlichen System notwendig. Jede Region und jeder Staat startet dabei von einer individuellen Ausgangslage. Das betrifft den aktuellen Zustand des Wirtschaftssystems, die finanzielle Leistungsfähigkeit, aber auch geographische Faktoren in Hinblick auf fossile bzw. erneuerbare (Energie-) Ressourcen und die Beziehungen zu den angrenzenden Staaten.

Daraus folgt, dass es keine Pauschallösung hin zu einem klimafreundlichen Energiesystem gibt, das auch noch ein adäquates Niveau an Wohlstand garantiert. Dennoch gibt es einige Ansätze, an denen sich Gesellschaften orientieren können – jeweils mit Vor- und Nachteilen in der Umsetzung. Diese müssen gegeneinander abgewogen werden, um die bestmögliche Strategie für das Gelingen der Energiewende zu erarbeiten. Staatliche Lösungen sollten im besten Fall jedoch in regionale Konzepte eingebunden werden und am besten global kompatibel sein.

Dabei bilden die Grundlage für jegliche Umsetzung naturwissenschaftliche, technische sowie ökonomische und soziale Gegebenheiten. Diese gießt die Politik und andere einflussreiche Akteure in Erzählungen, sogenannte Narrative. Dies häufig auch, um einen anstehenden Transformationsprozess zum eigenen Vorteil nutzen zu können. Andererseits sind Narrative auch Grundlage für den benötigten Wandel – ohne eine entsprechende Erzählung lassen sich Gesellschaften nicht transformieren, denn Transformation bedeutet immer Veränderung. Veränderung hingegen erzeugt immer auch Widerstände.

5.1 „Kampf“ der Narrative

Die deutsche Energiewende stellt im internationalen Vergleich einen Sonderweg dar, denn kein anderes Land steigt gleichzeitig aus den fossilen Energien und der Kernkraft aus. Am Beispiel Deutschlands kann man sehr gut darstellen, welche unterschiedlichen Narrative miteinander um die Deutungshoheit und letztlich um die Ausgestaltung der Energiewende ringen.

Wie bei jeder Transformation wird es auch beim Umbau des Energiesystems Gewinner und Verlierer geben. Sehr lange hat es die fossile Industrie beispielsweise geschafft, ein effektives Handeln für mehr Klimaschutz zu verhindern bzw. hinauszuzögern. Je

nachdem, wie sich der Umbau des Energiesystems vollzieht, werden einzelne Sektoren mehr weniger Gewinne erzielen bzw. mehr oder weniger Verluste hinnehmen müssen. Daher ist es wichtig zu verstehen, dass viele Einzelinteressen an der Diskussion beteiligt sind, wobei nicht unbedingt das globale Ziel verfolgt werden muss, nämlich die Erderwärmung auf 2 °C (besser 1,5 °C) zu begrenzen. Häufig geht es darum, die eigenen wirtschaftlichen Ziele zu erreichen und zu maximieren. Das gilt für existierende genauso wie für aufstrebende Wirtschaftssektoren und die jeweils involvierten Akteure. Die beiden Extreme sind die Fortführung des Status quo mit fossilen Energien sowie der vollständige Umbau hin zur kompletten Energieversorgung mit erneuerbaren Energien, maßgeblich auf Basis von Wind und Sonne. Zwei unterschiedliche Ansätze zur Umsetzung der Energiewende, deren jeweilige Narrative sowie die Probleme und Argumentationslinien der Ansätze werden im Folgenden dargestellt. Diese sind die „all electric“-Philosophie mit dem Ziel der strikten Defossilisierung des Energiesystems sowie der „all in“-Ansatz bei dem das Energiesystem auf zwei Säulen aufgebaut ist. Letzterer wurde im Rahmen des Projekts „Global Energy Perspectives“ vom Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung und Global Energy Solutions erarbeitet.

5.2 „All Electric“ und strikte Defossilisierung

Startet man mit der Erkenntnis, dass die Verbrennung fossiler Energien die Ursache für CO₂-Emissionen und den Klimawandel ist, dass Strom ein wesentliches Element der Energieversorgung ist und dass Strom nicht nur durch die Verbrennung von Kohle und Gas, sondern auch über die Nutzung von Sonne und Wind hergestellt werden kann, so liegt es nahe, einfach geeignet viel erneuerbare Energien zu installieren, und den fossilen Strom durch grünen Strom zu ersetzen.

Die Entwicklung der Neuen Erneuerbaren Energien wie Photovoltaik und Windenergie haben die Welt der Energieerzeugung stark bereichert. Insbesondere deshalb, weil Wind- aber vor allem Sonnenenergie in enormen Mengen vorhanden ist. Der Ursprung der Desertec-Idee ist die Einsicht, dass man rechnerisch mit einem kleinen Teil der Sahara und der dort vorhandenen Sonnenenergie die ganze Welt mit Energie

versorgen kann.⁹⁰ Außerdem sind Wind und Sonne an vielen Stellen der Erde verfügbar. Diese Dezentralität kann Vorteile für abgelegene Regionen und Personen haben, die aktuell noch gar nicht oder nur im geringen Maße Zugang zu Elektrizität haben. Eines der globalen Nachhaltigkeitsziele, SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“, setzt dort an. Mithilfe von Local Grids/Minigrids und dezentralisierter Solarenergie wurden bereits Fortschritte in die Richtung gemacht, Zugang zu Strom im Sinne eines Menschenrechts zu ermöglichen, z. B. finanziert über Mikrokredite.

Ein wichtiges Element des Narrativs der strikten Defossilisierung ist, dass für die Anwendungsbereiche der Wirtschaft, die aktuell nicht mit Strom funktionieren, elektrische Lösungen gefunden werden müssen, damit diese dann mit dem grünen Strom angetrieben werden können. Das betrifft z. B. den Verkehrssektor mit seinen Verbrennungsmotoren in Pkw, Lkw aber auch in Flugzeugen und Schiffen. Durch den Ausbau der Kapazität von Sonnen- und Windenergie sollen diese Wirtschaftssektoren in immer größerem Umfang mit der notwendigen Energie versorgt werden.

Im Verkehrssektor sollen Elektroautos Schritt für Schritt die Autos mit Verbrennungsmotoren ersetzen. Außerdem sollen Lkw elektrifiziert werden. Es wird sogar an elektrischen Flugzeugen geforscht. In der Industrie soll z. B. mehr Stahl in elektrischen Öfen produziert werden. Die Hochofenroute über Kohle und Koks würde dadurch ersetzt werden.

Problematisch ist jedoch, dass an unterschiedlichen Stellen die Technologie (noch) nicht in der Form vorhanden ist, um die wichtigen Wirtschaftssegmente in großem Stil umzubauen. Beispielsweise wird es mit der Elektrifizierung schwieriger, je mehr Masse transportiert werden muss und je weiter die Strecken sind, über die ein Transport von Personen oder Gütern stattfinden soll. Das ist vor allem eine Hürde, die im Bereich der Lkw, der Flugzeuge und der Schiffe wohl nicht genommen werden kann. Im Bereich der Industrie stellen fossile Energieträger nicht nur Energie bereit, sondern ermöglichen am Beispiel der Stahlherstellung durch ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften, dass Sauerstoff und andere Störstoffe aus dem Roheisen herausgelöst werden können. Eine vollständige Elektrifizierung der Stahlproduktion kann deswegen nicht gelingen.

⁹⁰ Vgl. TREC (2009).

Daher spielt im Narrativ der strikten Defossilisierung auch notwendigerweise ein Molekül eine wichtige Rolle, nämlich Wasserstoff (H_2). Wasserstoff passt in diesen Ansatz, weil man diesen aus grünem Strom über die Aufspaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff (Elektrolyse) herstellen kann. Man kann also beim Ausgangspunkt, dem grünen Strom aus Sonne und Wind bleiben, um davon dann „grünen Wasserstoff“ herzustellen.

Wasserstoff kann in Teilen die Rolle von Kohle/Koks bei der Stahlherstellung ersetzen. Das geht nicht mit derselben Produktionstechnologie, aber die notwendige Technik ist in der Entwicklung. Wasserstoff kann ebenfalls Fahrzeuge antreiben, entweder direkt über einen Wasserstoffverbrennungsmotor oder indirekt über eine Wasserstoff-Brennstoffzelle. Zu Zeiten, in denen mehr erneuerbarer Strom zur Verfügung steht, als Nachfrage und Abnehmer existieren (Leistungsspitzen), können Elektrolyseure den Betrieb aufnehmen, und aus dem Strom grünen Wasserstoff herstellen. Dieser könnte dann wieder verbrannt werden, um Strom zu produzieren, wenn die Nachfrage nach Strom größer ist, als zu diesem Zeitpunkt Wind und Sonne zur Verfügung stehen. Wasserstoff übernimmt hier also die Rolle als Energiespeicher.

Natürlich spielen Batterien im Narrativ der strikten Defossilisierung auch eine Rolle zur Speicherung von Strom im Energiesystem. Sie sollen nicht nur ausschließlich in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden. Als Kurzzeitspeicher können Batterien das Netz stabilisieren, aber auch über mehrere Stunden, relativ kurze Flauten bei der Erzeugung erneuerbaren Stroms überbrücken. Man denkt sogar darüber nach, die Batterien in Fahrzeugen für solche Aufgaben ins Stromsystem zu integrieren. Wird ein Auto nicht verwendet, soll dessen Batterie helfen, das Netz zu stabilisieren.

Da Schwankungen in einem Stromsystem mit hohem Anteil Neuer Erneuerbaren Energien regelmäßig auftauchen, müssen auch andere Anwendungen, die Strom abnehmen, in „smarter“ Weise in das übergeordnete System eingebunden werden. Waschmaschinen, Trockner und Wärmepumpen springen dann automatisch an, wenn viel Strom zur Verfügung steht. In der Konsequenz können gewisse Anwendungen nicht laufen, wenn zu wenig Strom erzeugt wird. Dieses sogenannte „Demand-Side-Management“ benutzt komplexe digitale Steuerungstechnologien, basiert auf ausgeklügelten Vorhersagen für die erwartbare Menge an Strom in der absehbaren Zukunft und erfordert die Verarbeitung vieler Datenpunkte, da erfasst werden muss, wann wo welche Strommenge produziert, transportiert, verteilt und genutzt wird. Die

Netze für den Transport und die Verteilung von Strom müssen daher großflächig ausgebaut und immer weitergehend digitalisiert werden, um die höhere Menge an Strom zu managen, die aufgrund der hohen Elektrifizierung der Endanwendungen erforderlich wird.

Die Hauptherausforderungen in diesem Narrativ stellt das Management der Volatilität des erneuerbaren Stroms dar. Dazu zählt dessen Speicherung und die Digitalisierung zur Steuerung der Abnehmer und der Netze, der Transport des Stroms sowie die technische Herausforderung der Elektrifizierung der Endanwendungen wie des Transports, der Industrie und der Gebäude. Natürlich ist u. a. die immer weitergehende Digitalisierung der Stromnetze mit hohen Kosten verbunden. Zudem stellen sich viele Fragen im Datenschutzbereich. Auch der Zugriff der Politik auf die Lebenssituation der Menschen wächst beständig. Man denke nur an die Zwangsmaßnahmen der Politik in der Pandemie, die in einer Welt einer immer weiteren Elektrifizierung und Digitalisierung immer weiter ausgebaut werden können. Final kann die Politik auf der Ebene einzelner Häuser und Fahrzeuge den Zugang zu Strom, zu Wärme etc. regulieren bzw. verbessern.

5.3 „All in“ und zwei Säulen für ein Energiesystem

Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass Energiesysteme Zeit brauchen, wenn es um Veränderung geht. „Wenn man sich die Geschichte von Energiewenden anschaut, dann dauern diese über ein Jahrhundert. Eine Wende in 25 Jahren oder weniger ist unwahrscheinlich“,⁹¹ betont Daniel Yergin, den die Neue Züricher Zeitung, wie erwähnt, als einflussreichsten Energieanalytiker der Welt vorstellt. Was wir aktuell allerdings versuchen, ist, eine Energiewende im Zeitraum von etwa 25 Jahren zu bewerkstelligen.

Daher ist es nicht sehr überraschend, dass der Umschwung von fossilen Energien auf grünen Strom, wie im vorigen Kapitel beschrieben, im Sinne einer strikten Defossilisierung mit vielen Problemen verbunden ist. Hier setzt das „all in“-Narrativ mit „zwei Säulen“ im Energiesystem an. Das erste Bein sind hier die volatilen Neuen Erneuerbaren, das andere Bein sind die zuverlässig steuerbaren, die traditionellen fossilen Energieträger bzw. Nuklearenergie. Die fossilen Energieträger werden

⁹¹ Hosp, G. (2024).

klimafreundlich eingesetzt, sie werden also „grün-fossil“. In ihrer Funktion helfen sie dabei, die Nachteile eines sehr hohen Stromanteils im Energiesystem auszugleichen. Umgekehrt könnte man sagen, dass das existierende fossile Energiesystem grün-fossil gestellt und damit klimafreundlich betrieben wird und bis zu einem technisch-ökonomisch sinnvollen Umfang durch Neue Erneuerbare Energien ergänzt wird. Dieses Narrativ verspricht die Kosten und den technischen Aufwand auf ein notwendiges Maß zu begrenzen, sodass die Energiewende wirklich umgesetzt werden kann. Im Folgenden soll ein qualitativer Blick auf die Kostenpunkte im Vergleich der beiden vorgestellten Narrative geworfen werden.

Tabelle 1 bezieht sich auf ein Land, das bereits über einen gewissen Ausbau der Neuen Erneuerbaren vorgenommen hat. Für den Aufbau der zweiten Säule, der Neuen Erneuerbaren, muss in beiden Narrativen etwas geschehen. In beiden Narrativen bringt zusätzlich die Erhöhung des Stromanteils im Gesamtenergiesystem einen Ausbau des Netzausbaus mit sich. Der Unterschied liegt im Umfang des Ausbaus.

Im Ansatz der „zwei Säulen“ wird kein kompletter Ersatz aller Energieträger durch grünen Strom angestrebt, sondern lediglich ein sinnvolles Maß. Was „sinnvoll“ ist, hängt von der technischen Umsetzbarkeit und den Kosten ab. Kosten die im Ansatz der „zwei Säulen“ nicht anfallen, sind Zusatzkosten für einen extrem starken Ausbau der Erneuerbaren und der Netze. Die großen Kostenblöcke, die ebenfalls nicht anfallen sind die für die Elektrifizierung der Endanwendungen sowie das Management der Volatilität der Neuen Erneuerbaren. Dem gegenüber stehen Kosten für den Umbau der zuverlässig steuerbaren Energien vom fossilen zum grün-fossilen Betrieb (bzw. Ausbau der Kernenergie).

Die Elektrifizierung der Endanwendungen betrifft batterieelektrische Autos, in Transportbereich sogar Lkw, inklusive der Ladeinfrastruktur, die die Tankstellen ersetzen. Das Problem an dieser Stelle ist, dass Strom und Batterien als Speicher viel weniger Energie pro Volumen bereitzustellen in der Lage sind, als Kraftstoffe auf Molekülbasis. Diesel, Benzin und Kerosin sind wegen ihren hohen Energiedichte viel kompakter. Das ist wichtig, weil ein Lkw nicht nur die Güter, sondern auch den Kraftstoff für seinen Antrieb selbst transportieren muss. Batterien sind sehr schwer im Vergleich zur bereitgestellten Energie. Ein größerer Teil der gespeicherten Energie wird also für den Transport der Batterie selbst eingesetzt, als dies beim herkömmlichen

Diesel-Tank der Fall ist. Außerdem geht es um den Wechsel der Heiz- und Kühlsysteme bei Gebäuden hin zu Wärmepumpen. Diese drei Punkte erfordern massive öffentliche Förderung und damit hohe Kosten, die beim Ansatz der „zwei Säulen“ nicht anfallen.

Die zwei größten Schwierigkeiten der Neuen Erneuerbaren Energie sind die Volatilität und das Problem der Speicherung. Eine funktionierende Wirtschaft mit großen Industrien benötigt aktuell ein gewisses Level an Grundlastenergie. Industriebetriebe benötigen rund um die Uhr Strom und ein stabiles Netz, teilweise im Sekundenbereich (z. B. Chipindustrie). Darüber hinaus gibt es aktuell Spitzen und Täler bei der Nutzung, der Nachfrage nach Energie. Je nach Region schwankt die Nachfrage nach Energie auch saisonal, weil im Winter mehr geheizt oder im Sommer mehr gekühlt wird.

Ein Energiesystem benötigt aktuell also Speicher, beziehungsweise Flexibilität in der Erzeugung, um auf Spitzen und Täler der Nachfrage reagieren zu können.

Durch die zweite Säule der Neuen Erneuerbaren benötigen beide Narrative eine Backup-Option, um flexibel zu sein, also den Strom dann zu erzeugen, wenn er benötigt wird. Das auch dann, wenn ein gewisses Maß an Demand-Side-Management bereits vorhanden ist. In der Übersicht sind das die Gaskraftwerke (allgemein auch Kohlekraftwerke), die sehr schnell an und wieder ausgeschaltet werden können.

Im „all electric“-Narrativ fallen Kosten dafür an, die Gaskraftwerke H₂-Ready zu machen, da man die Kraftwerke mittelfristig nicht mehr mit fossilem Erdgas, sondern mit grünem Wasserstoff betreiben möchte. Deswegen können nur kurzfristige Lieferverträge für Gas abgeschlossen werden, was hohe Gaspreise bedeutet. Außerdem emittieren die Kraftwerke vorläufig CO₂, weswegen man für jede Tonne CO₂ eine (zunehmend teure) Klimaabgabe bezahlen muss. Im Ansatz der „zwei Säulen“ können langfristige Gaslieferungsverträge über mehrere Jahrzehnte geschlossen werden, was die Kosten pro Kubikmeter Gas signifikant senkt. Dieses Problem hatte Bundesminister Habeck direkt am Anfang seiner Legislaturperiode, als er nach Qatar geflogen ist, um kurzfristig mehr Gas zu bekommen, um das russische Gas zu ersetzen. Auch die Klimaabgabe fällt weg, weil die Gaskraftwerke mit Carbon Capture „grün-fossil“ betrieben werden.

Tabelle 4: Kostenübersicht für Energiesysteme vom Charakter "all electric" und mit "zwei Säulen", Strom und klassische molekülbasierte Energieträger.

Kostenpunkte	„all electric“-Ansatz	Ansatz „zwei Säulen“
1) Weiterer Ausbau Neue Erneuerbare Energien, insb. auch Offshore	Starker Ausbau mit laufenden hohen Kosten; auch für kontinuierlichen Ersatz (teilweise alle 20 Jahre)	Genügend Kapazität wurde bereits aufgebaut; kein Ausbau; keine Kosten
2) Netzausbau für den erneuerbaren Strom zu den Endanwendungen	Starker Ausbau; hohe Kosten	Das vorliegende Transport- und Verteilnetz reicht aus; keine Kosten
Elektrifizierung der Endanwendungen		
3) Förderung Batterieelektrischer Autos (Pkw, Lkw)	Starke öffentliche Förderung; hohe Kosten	Keine weitere öffentliche Förderung; keine Kosten
4) Aufladestationen	Starke öffentliche Förderung; hohe Kosten	Keine weitere öffentliche Förderung; keine Kosten
5) Wärmepumpen	Starke öffentliche Förderung; hohe Kosten	Keine weitere öffentliche Förderung; keine Kosten
Management der Volatilität der Neuen Erneuerbaren durch Gaskraftwerke		
6) Gaskraftwerke	Kosten für Bau der Kraftwerke	Kosten für Bau der Kraftwerke
7) H ₂ -Ready-Option	Kosten für technische Implementierung; hohe Gas-Kosten durch Lieferverträge mit geringen Laufzeiten (wenige Jahre)	Kein H ₂ -Ready; keine Kosten
8) Carbon Capture & Storage	Kein Carbon Capture; keine Kosten	Standardmäßiger Einsatz; mäßige Kosten; geringe Kosten für Gas durch langfristige Lieferverträge (mehrere Jahrzehnte)
9) Klimaabgabe	Muss gezahlt werden; hohe Kosten	Muss nicht gezahlt werden; keine Kosten
10) Energiespeicher	Starker Ausbau von Batteriespeichern	Kein Ausbau; existierende Speicher reichen aus; keine Kosten
11) Wasserstoff	Grüner Wasserstoff durch Ausbau von Elektrolyseuren; Ausbau von Wasserstoffspeichern nach Umwandlung des Stromüberschusses in Wasserstoff; hohe Kosten	Blauer Wasserstoff aus Produktion mit Erdgas; geringe Kosten

Im Gegenzug müssen die Kosten für das Abfangen, die Verflüssigung, den Transport und die Speicherung des produzierten CO₂ bezahlt werden. Weitere Kosten werden im Ansatz der „zwei Säulen“ eingespart, weil durch die Grundlastfähigkeit der grün-fossilen Gaskraftwerke keine teuren Batteriespeicher eingesetzt werden müssen, um kurzfristige Volatilität abzufangen. Für die Überbrückung der saisonalen Schwankungen müssen keine zusätzlichen Elektrolyseure sowie keine Transportnetze und Speicher für grünen Wasserstoff gebaut werden. Die Speicher und Pipelines für Erdgas sind bereits vorhanden.

Werden im „all electric“-Ansatz Wasserstoffkraftwerke zum Abfangen der Stromspitzen betrieben und gleichzeitig Gaskraftwerke vorgehalten, weil die Kapazitäten für Wasserstoff nicht so schnell aufgebaut werden können, um Gas komplett zu ersetzen, treten hohe Betriebskosten auf. Sowohl Gaskraftwerke als auch Elektrolyseure werden kontinuierlich sehr gering ausgelastet, was ihren Betrieb enorm verteuert.

Ein wichtiges Hindernis ist jedoch der Transport der erzeugten Energie an die Stellen, wo er genutzt wird. Das liegt vor allem daran, dass diese Energie in Form von Strom vorliegt. Zwar gibt es mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ) einen Weg, Strom ohne große Verluste über große Distanzen zu transportieren. Andererseits kommt diese Technologie nicht an die Einfachheit heran, die den Transport der fossilen Energien ausmacht.

5.4 Umbau statt Abriss mit gleitenden Übergängen

Betrachtet man die beiden vorgestellten Narrative, so müssen sich Gesellschaften fragen, welchen Weg sie einschlagen möchten, um in Zukunft ein klimafreundliches Energiesystem aufzustellen. Dabei spielen Standortfaktoren eine wichtige Rolle. Begünstigt eine Region die Installation von erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne? Kann man auf Biomasse zur Energiegewinnung zugreifen? Gibt es die Möglichkeit Wasserkraft einzusetzen? Liegen geologische Speichermöglichkeiten für CO₂ vor und wie sieht die Ausstattung mit fossilen Energieträgern wie Öl, Gas und Kohle aus? Das sind vor allem naturwissenschaftlich-technische Fragen, die es zu beachten gilt.

Ein wichtiger Faktor ist außerdem, wo das Land aktuell steht. Existiert bereits ein komplexes Energiesystem, sodass es wirklich um die Frage geht, zu welchem Maß

Kraftwerke nach Abriss ersetzt werden sollen und zu welchem Maß ein Umbau bestehender Infrastruktur stattfinden soll? In vielen ärmeren Ländern wird es nicht primär um einen Abriss- bzw. Umbau gehen, sondern darum, erst einmal eine nennenswerte Energieversorgung aufzubauen;⁹² dies unter teilweise schwierigen Finanzierungsbedingungen. Dabei geht es dann stärker um das Design dieses Aufbaus. Wie hoch soll der Anteil erneuerbarer Energien sein, wie viel zuverlässig steuerbare Energien werden benötigt?

In allem Fällen geht es um die Vereinbarkeit von Umwelt- und Klimaschutz mit Wohlstandserhalt bzw. Wohlstandsaufbau. In der Konsequenz sind Kosten eine wichtige Größe, die entscheidend dazu beiträgt, ob diese Vereinbarkeit gelingt.

Tabelle 4 hat im vorigen Kapitel 5.3 quantitativ einzelne wichtige Kostenfaktoren für ein Energiesystem, das vor allem auf dem Einsatz von Strom basiert im Vergleich zu einem System, das Strom mit „klassischen“ Energieträgern kombiniert. Ausgangspunkt ist eine Gesellschaft, die bereits über ein Energiesystem verfügt, das eine nennenswerte Industrie unterhält und den Menschen einen gewissen Energiewohlstand ermöglicht. Wichtig für alle Staaten ist als Zielgröße der Anteil, den Strom an der Gesamtenergieversorgung ausmachen sollte. Jeder Staat muss sich die Frage stellen, wo unter den gegebenen Umständen und den anfallenden Kosten in seinem Umfeld das optimale Gleichgewicht liegt.

5.5 Die Wiederentdeckung von CCUS im Energiesektor

Mit dem „IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage“⁹³ wurde zum ersten Mal ein systematischer Überblick darüber gegeben, wie existierende Kohle- und Gaskraftwerke mit zusätzlicher technischer Ausstattung so betrieben werden können, dass kein bzw. nur vergleichsweise geringe Mengen CO₂ in die Atmosphäre gelangen. Werden solche Anlagen mit Carbon-Capture-Technologien nachgerüstet spricht man von sogenannten „Retrofits“ bzw. „Retrofitting“. In den darauffolgenden Jahren (etwa bis 2013) haben sich unterschiedliche Studien mit den existierenden technischen Möglichkeiten zur Umrüstung, den anfallenden Kosten sowie möglichen Anwendungen auf die existierenden Kraftwerke beschäftigt.

⁹² Vgl. dazu Kapitel 2.1

⁹³ IPCC (2005).

Für ein knappes Jahrzehnt hat das Thema allerdings an Relevanz verloren, auch wenn die Bedeutung der Kohle- und Gaskraftwerke in der Zwischenzeit eher zugenommen hat. Das erkennt man daran, dass es zwischen 2013 und 2024 kaum umfassende Studien dazu gibt, abgesehen von einigen sehr technischen Reports. Erst im letzten Jahr (2023) nimmt das Thema CCUS wieder an Fahrt auf, weil führende Organisationen merken, dass es ohne diese Technologie wohl nicht gehen wird, das Energiesystem und die Industrie klimafreundlich umzubauen.

Allerdings existieren damals wie heute viele junge Kraftwerke. Seit 2005 hat der Zubau von Kohlekraftwerken nicht etwa stagniert oder abgenommen. Etwa ein Drittel der weltweit existierenden Kohle- und Gaskraftwerke wurden erst im letzten Jahrzehnt gebaut.⁹⁴ Vergleiche hierzu auch die Ausführungen zur Bedeutung der Kohle- und Gaskraftwerke in Kapitel 4.1. Deswegen haben die grundsätzlichen Aussagen der damaligen Analysen weiterhin Bestand.

Ein wesentlicher Grund dafür, dass sich die Autoren des vorliegenden Berichts mit CCUS an Kohle- und Gaskraftwerken beschäftigten – auch bevor das Thema wieder an Relevanz gewonnen hat – ist, dass große Mengen an Kraftwerkskapazität im laufenden Finanzierungszyklus abgeschaltet werden müssten, wenn man innerhalb eines 1,5 °C- bzw. 2 °C-Pfades für die globale Erderwärmung bleiben will, wenn CCUS nicht zum Einsatz kommt. Je nach Szenario liegt der Vermögensverlust durch ein vorzeitiges Abschalten von Kohlekraftwerken zwischen 150 Milliarden und 1,4 Billionen US-Dollar.^{95,96} Nicht überraschend ist dann die Annahme, dass diejenigen Staaten, die diese Verluste zu tragen hätten, sich gegen harte Klimaschutzmaßnahmen wehren werden.⁹⁷

Wie Abbildung 17 zeigt, sind die betroffenen Staaten vorrangig China und Indien (Grün und Hellgrün), wobei in der Grafik auch schon der seit Kurzem beobachtete Zubau anderer Staaten in Südostasien (Blau) und weiterer aufstrebender Staaten (Hellblau) erkennbar ist. In diesem Jahrhundert würden diese Kraftwerke unter normalen Bedingungen hunderte Gigatonnen (Gt) CO₂-Emissionen verursachen. Heute liegt der jährliche Ausstoß energiebedingter Emissionen bei etwa 40 Gt. Dazu kommt die

⁹⁴ Vgl. IEA (2021b).

⁹⁵ Vgl. Johnson, N. et al. (2015).

⁹⁶ Vgl. Edwards, M. R. et al. (2022).

⁹⁷ Vgl. Von Dulong, A. (2023).

Klimawirkung weiterer Treibhausgase wie Methan und Lachgas, umgerechnet dann etwa 54 Gt. Umrüstung mit CCUS kann diese Emissionen verhindern.

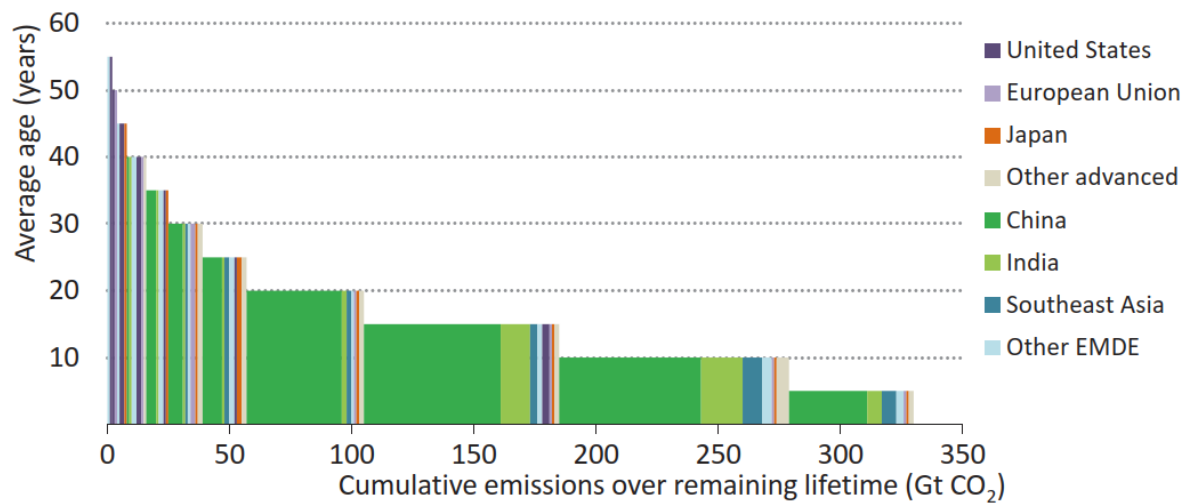


Abbildung 17: Kumulierte Emissionen existierender Kohlekraftwerke auf Basis des aktuellen Alters nach Region, 2022-2100. Abbildung aus: IEAGHG (2023)⁹⁸

Vermeidung von Emissionen, Vermögensverluste und erwarteter Widerstand gegen Klimaschutzmaßnahmen sind allerdings nicht die einzigen Gründe, warum CCUS an Kohle- und Gaskraftwerken wieder interessanter wird. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben wird, ist es technisch und ökonomisch sinnvoll, wenn ein Energiesystem auf zwei Säulen steht und alle verfügbaren Technologien genutzt werden („all in“). Mit Carbon Capture-Anlagen nachgerüstete Kohle- und Gaskraftwerke können diese zweite Säule neben den Neuen Erneuerbaren übernehmen. Natürlich fallen hier Kosten für die Umrüstung an, jedoch werden die Gesamtkosten für das Energiesystem gesenkt, weil weniger Leitungen für den Stromtransport und weniger Speicher für das Abfedern der Volatilität notwendig sind.

Ein CO₂-Netz müsste sowieso gebaut werden, um die Industrieprozesse klimaneutral zu stellen, die nicht einfach oder gar nicht elektrifizierbar sind, wie z. B. die Beton- und Zementindustrie, die Eisen- und Stahlproduktion sowie die chemische Industrie. Durch geeignete Clusterbildung lassen sich Skaleneffekte in Bezug auf die Kosten erzielen, denn größere CO₂-Pipelines lassen die Kosten pro Tonne transportiertes CO₂ sinken.

⁹⁸ Vgl. IEAGHG (2023), S. 200.

5.6 Synthetische Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren nutzen

Synthetische Kraftstoffe als Fortsetzung heutiger Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren, sind aus Sicht der Autoren ein vielversprechender, wenn nicht sogar unumgänglicher Lösungsansatz für einen klimafreundlichen Betrieb des Verkehrssektors. Ein wesentlicher Punkt ist, dass die gesamte weltweite Bestandsflotte von heute mehr als 1,3 Milliarden Automobilen mit Verbrennungsmotoren – darunter 300 Millionen Lkw – durch Beimischung von synthetischen Kraftstoffen sukzessive in Richtung Klimaneutralität geführt werden könnte. Dabei können vorhandene Infrastruktur sowie vorhandene Fahrzeuge weiter genutzt werden („Umbau statt Abriss“).

In der Diskussion um synthetische Kraftstoffe ist man sich weitgehend einig, dass die Verfügbarkeit dieser Energieträger und deren Vorprodukte wie Wasserstoff in der Anfangsphase des Hochlaufs begrenzt sind. Die langsam anwachsenden Mengen sollten daher den Anwendungen vorbehalten bleiben, die am schlechtesten auf andere Formen der Energie, insbesondere Strom, umzustellen sind. Dazu zählen die Flugindustrie und die Schifffahrt, sowie Teile der Industrie, z. B. die Stahlherstellung. Danach kommt direkt der Transport auf dem Landweg und hier geht es in absteigender Reihenfolge zunächst um die schwersten Lkw.

In der Diskussion ist auch größtenteils unumstritten, dass die Batterieelektrik im Transportsektor insbesondere für leichte Fahrzeuge mit geringen Reichweiten eine Rolle spielen wird. Was heute niemand mit Sicherheit sagen kann, ist, wo die Grenze liegt, an der man besser synthetische Kraftstoffe bzw. batteriegetriebene Fahrzeuge verwendet. Es ist ebenso richtig, dass global der Ausbau der Neuen Erneuerbaren weiter voranschreiten wird. Erneuerbare Energie ist eine wichtige Säule für ein klimaneutrales Energiesystem. Dabei steigen die Gesamtsystemkosten von Wind- und Solarenergie mit zunehmendem Anteil dieser fluktuierenden Erzeugungstechnologien signifikant, wie bereits in anderen Kapiteln dargestellt wurde. Daher wird sich die Ausbaugeschwindigkeit aufgrund steigender Systemkosten wohl verlangsamen, was dazu führt, dass fossile steuerbare Energieträger eine signifikante Rolle behalten („Zwei-Säulen“-Ansatz). Heute ist der Anteil von Wind- (3,1 %) und Sonnenenergie (1,9 %) am Gesamtprimärenergieverbrauch global recht gering. Eine enorme

Steigerung ist notwendig, wird jedoch zu einem „running target“, weil gleichzeitig der Gesamtenergiebedarf steigt. Daher ist es unumgänglich, sich mit Carbon Capture and fossilen Punktquellen zu beschäftigen und das CO₂ sinnvoll zu nutzen.

Für eine optimale technologische Lösung spielen weitere Rahmenbedingungen eine Rolle. Dazu zählen die allgemeine Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und Wasserstoff aber auch die bereits existierende Infrastruktur sowie die zurückzulegende Strecke und deren Topologie über flache Ebenen bzw. über bergige Regionen.

Bereits heute sind die Wertschöpfungsketten für Fahrzeuge, aber auch für die entsprechenden Treibstoffe, global. Im Sinne der Argumentation voriger Kapitel dieser Studie wäre ein Umbau der existierenden globalen Wertschöpfungsnetzwerke im Sinne des globalen Klimaschutzes angeraten. Dabei würde auf dem Status quo auf globaler Ebene aufgesetzt. Bei der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe mit Wasserstoff als Ausgangsstoff, der dann mit Kohlenstoff verbunden wird, lassen sich Potenziale aus der Kopplung unterschiedlicher Sektoren heben, da der notwendige Kohlenstoff in Form von abgefangenem CO₂ aus Punktquellen bereitgestellt werden könnte. Dazu zählen z. B. Kohle- aber auch Gaskraftwerke sowie Anlagen der Zementproduktion.

An diesem Beispiel lässt sich gut erkennen, dass Klimaziele im Sinne von Reduktions-Verpflichtungen innerhalb einzelner Wirtschaftszweige (Sektorziele) solche Sektorkopplungen erschweren. Aktuell wird beispielsweise in Deutschland der Verkehrssektor separat von der Industrie betrachtet, beide haben unterschiedliche Reduktionsvorgaben und dadurch werden Sektorkopplungen erschwert, weil sich die Vermeidungskosten für Emissionen nicht wirklich vergleichen lassen. Dies führt zu ökonomischen Ineffizienzen und teilweise ineffektiver Verteilung von finanziellen Ressourcen, sprich: es wird teurer. Die deutsche Bundesregierung hat die Sektorziele in ihrer Novellierung des Klimaschutzgesetzes im Mai 2024 entfernt, was wegen der vorangegangenen Argumentation zu begrüßen ist.⁹⁹

Die Art des benutzten Kohlenstoffs für die Produktion synthetischer Kraftstoffe hat einen Einfluss darauf, wie die Klimaneutralität der Kraftstoffe gewährleistet wird. Wird das CO₂ bspw. mithilfe der Direct-Air-Capture-Technologie abgefangen, dann ist

⁹⁹ Vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2024).

Klimaneutralität gegeben. Handelt es sich um CO₂ biogenen Ursprungs (z. B. über die Vergasung/Verbrennung von Biomasse), gilt dasselbe, weil in beiden Fällen das CO₂ direkt, bzw. bei Biomasse indirekt über die verwendeten Pflanzen, aus der Atmosphäre entnommen wurde.

In allen anderen Fällen, wie z. B. bei Carbon Capture, wird vorgeschlagen, die Kraftstoffe dadurch klimaneutral zu stellen, dass – vor der tatsächlichen Bereitstellung auf dem Markt – über CO₂-Removals die späteren CO₂-Emissionen auf Dauer der Atmosphäre entzogen werden. Mit CO₂ aus Kohlenkraftwerken (allgemeine Punktquellen) wird über synthetische Kraftstoffe 50 % des CO₂ recycelt, also eingespart. Die übrigen 50 % können über Removals im Süden über Nature-based Solutions abgedeckt werden. Das ist kein Freikauf, sondern im Gegenteil unbedingt nötig, denn es muss (Klima-) Geld in den Süden.

Solche Removals sind bspw. möglich, indem Altholz bzw. Holzabfälle pyrolysiert werden. Es entsteht Pflanzenkohle. Bei großen Produktionsmengen in industriellen Anlagen wird dabei sowohl Wärme und Strom erzeugt, aber im Wesentlichen auch Kohlenstoff/Pflanzenkohle, der/die z. B. zur Verbesserung des Bodens eingesetzt werden kann. Er ist dann für hunderte Jahre sicher deponiert, weil sich die Pflanzenkohle kaum zersetzt und trägt gleichzeitig zur Verbesserung des Ernährungspotential für die Menschheit bei. Weil der Kohlenstoff sicher im Boden verstaut und daher aus der Atmosphäre entfernt wurde, ist er ein Removal.

Es gibt weltweit zunehmend Bewegungen in Richtung synthetischer Kraftstoffe. Je nach vorhandenen Rahmenbedingungen können diese auch eine Lösung für die weltweiten Pkw mit Verbrennungsmotoren bieten. Es ist klar, dass eine Art von Batterieelektrik für den weltweiten Bestand zwar einen Beitrag leisten kann, aber keine generelle Lösung ist – dies angesichts der Verhältnisse in vielen sich entwickelnden Ländern, des massiven Zuwachses der Bevölkerung, der weiteren Verstädterung, des Baus von Riesenstädten usw. Ausnahmen sind heute schon Kleinfahrzeuge, sog. Tuk-Tuks, die in den Großstädten, vor allem der sich entwickelnden Welt, als Low-cost-Taxis eine große Rolle spielen. Sie tragen bisher zur hohen Luftverschmutzung der Städte bei und sind wegen ihres geringen Gewichts leicht zu elektrifizieren. Das ist aber nur ein Segment des Verkehrs in den Städten.

Die Realitäten vor Ort in den Entwicklungs- und Schwellenländern sind nicht schlagartig zu ändern. Aufgrund der globalen Dynamik in beiden Bereichen, sowohl

bei den synthetischen Kraftstoffen als auch bei den Batterieantrieben sollte für Rahmenbedingungen in Europa argumentiert werden, die den Einsatz beider Technologien ermöglichen. Eine Abschottung gegen die eine oder andere Antriebsform gefährdet die Wettbewerbsfähigkeit unserer Wirtschaft, weil diese u. U. von einzelnen Technologiebereichen ausgeschlossen wird.

Dazu kommt, dass synthetische Kraftstoffe in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern geringe Kosten bei der Herstellung verursachen. Durch Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe mittels Elektrolyse zur Wasserstoffgewinnung und nachgeschalteter Fischer-Tropsch-Synthese lassen sich in sonnen- und windreichen Ländern Gestehungskosten von 1,20 Euro pro Liter und darunter erzielen.¹⁰⁰

Vielversprechend ist zukünftig der Strang der synthetischen Kraftstoffe, der auf Methanol aufbaut. Methanol kann aus Wasserstoff und CO₂ hergestellt werden und ist somit selbst ein synthetischer Kraftstoff. Auf diesen setzt auch Porsche mit seinem Projekt „Haru Oni“ in Südchile. Obwohl das zur Herstellung notwendige CO₂ in Südchile durch Direct-Air-Capture aus der Atmosphäre genommen wird, hat Porsche aktuell Probleme dabei, dies auch als klimaneutral in der EU anerkennen zu lassen – ein reines Governance-Problem, dem jegliche naturwissenschaftliche Basis fehlt. Dem Klima ist es sprichwörtlich egal, ob das CO₂ der Atmosphäre in Chile oder in Europa entnommen wurde. Bei Methanol stellt sich die Frage, ob man es weiterverarbeitet, z. B. zu Methanol-Benzin oder -Diesel, oder ob man es direkt in einem Methanolmotor verbrennt. So existierten im Jahr 2019 bspw. rund 20.000 reine Methanolfahrzeuge in China und es wird erwartet, dass die Zahl signifikant steigen wird.

Die Methanol-Derivate Methanol-Diesel und -Benzin sind mit heutigem Benzin bzw. Diesel chemisch praktisch identisch und können daher problemlos jedem Benzin-/Diesel-Kraftstoff in jedem Verhältnis beigemischt werden. In China wird selbst reines Methanol mit konventionellem Benzin gemischt und verwendet, ähnlich wie man in Deutschland Benzin mit 10 %-igem Ethanolanteil kaufen kann (E10). Unterschiedliche chinesische Provinzen bieten Mischverhältnisse mit 10 % Methanol (M10), über 85 % Methanol (M85) bis hin zum Einsatz von 100 % methanolbasiertem Treibstoff an (M100). Wie erwähnt, kann man auch daran arbeiten, neben Pkw auch Lkw direkt mit

¹⁰⁰ Vgl. Frontier Economics (2020).

Methanol zu betreiben. Dazu muss eine Zündkerze in den Motor eingesetzt werden, um Methanol direkt zu verbrennen.

Ein Vorteil beim Einsatz von synthetischen Kraftstoffen ist, dass der Minderungseffekt bei den Emissionen sofort einsetzt, sodass sich die Pkw/Lkw in Richtung Klimaneutralität bewegen, eine existierende Infrastruktur genutzt werden kann und die Versorgungssicherheit gegeben ist. Stehen für einen begrenzten Zeitraum weniger synthetische Kraftstoffe zur Verfügung, was bei deren Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern nicht auszuschließen ist, wird ihr Anteil im Kraftstoff ohne jeden Einfluss auf die Funktion des Verkehrssektors vorübergehend reduziert.

Wird das erforderliche CO₂ nicht aus der Luft, sondern von Punktquellen, wie beispielsweise Carbon-Capture-Anlagen an fossilen Kraftwerken gewonnen, lassen sich die Kosten weiter senken. Somit liegen die Kosten zwar immer noch etwas über denen der Kraftstoffproduktion aus Rohöl aber deutlich unter den Kosten der Elektromobilität, sofern die Kosten des hiermit verbundenen Gesamtsystems berücksichtigt werden.¹⁰¹

Hieraus wird ersichtlich, dass synthetische Kraftstoffe für Schwellenländer eine interessante Perspektive eröffnen. In vielen Ländern existieren neue fossile Kraftwerke, die zudem häufig mit Gas, Öl oder Kohle aus inländischer Produktion versorgt werden. Eine Abschaltung fällt unter diesen Bedingungen besonders schwer. CCU mit nachgelagertem Einsatz des hochreinen CO₂ reduziert die Klimawirkung der Kraftwerke und des Verkehrs durch Doppelnutzung des mit dem fossilen Energieträger in Umlauf gebrachten CO₂.

Viele Entwicklungs- und Schwellenländer besitzen im Vergleich zu Deutschland drei- bis viermal so große Volllaststunden von Windkraft- und PV-Anlagen, was die Produktionskosten pro Kilowattstunde Strom erheblich senkt. Damit sinken auch die Kosten für den Wasserstoff, der die Grundlage für die genannten synthetischen Kraftstoffe bildet. Fossile Rohstoffe exportierende Länder benötigen dringend alternative Einnahmequellen, sobald die weltweite Nachfrage nach diesen Rohstoffen nachlässt. Produkte, die die Alleinstellungsmerkmale des Erzeugerlandes gegenüber dem Westen nutzen, vergleichsweise einfach herzustellen sind und zudem eine höhere Wertschöpfungsstufe besitzen, sind ideale Exportgüter der Zukunft. Konkret

¹⁰¹ Vgl. FVV (2018).

können dies erneuerbarer Wasserstoff, Methan, Methanol, Ammoniak, Benzin, Kerosin oder Diesel sein.

6 Systemische Überlegungen

6.1 Kohle- und Gaskraftwerke klimafreundlich mit CCUS betreiben

Da die Umrüstung von konventionellen Kohle- und Gaskraftwerken mit Carbon-Capture-Technologie eine Investition darstellt und aktuell betriebene Kraftwerke in den meisten Fällen nicht bereits „Capture-ready“ konzipiert wurden, stellt sich die Frage, ob der Abriss eines alten Kohlekraftwerks und der Neubau eines effizienteren Gaskraftwerks mit Carbon Capture (CC) nicht die günstigere Alternative zu einer Umrüstung mit Carbon Capture ist. Die wesentlichen Überlegungen dabei sind, dass Gas bei der Erzeugung gleicher Energiemenge weniger CO₂ emittiert und das Carbon-Capture-System insgesamt günstiger ist, wenn es bereits von Anfang an bei der Konzeptionierung der Anlage mitberücksichtigt wird. Außerdem sinkt die Effizienz des Kraftwerks nach der Umrüstung, weil die CC-Anlage ebenfalls Energie benötigt.

Pauschal lässt sich diese Frage aber nicht beantworten, weil es unterschiedliche technische Möglichkeiten einer CC-Umrüstung gibt und ortsspezifische Bedingungen mitberücksichtigt werden müssen, wie z. B. der zusätzliche verfügbare Platz für die CC-Anlage.

Generell gibt es drei technische Varianten, um das CO₂ bei der Verbrennung von Kohle bzw. Gas abzufangen: (1) entweder vor der eigentlichen Verbrennung (pre-combustion), (2) während der Verbrennung (Oxyfuel) oder (3) nach der Verbrennung (post-combustion). Im ersten Fall wird die Kohle vergast, wobei im Wesentlichen CO₂, Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) entstehen. In einem weiteren Schritt wird das CO mithilfe von Wasser (H₂O) in einer Wassergas-Shift-Reaktion zu CO₂ und H₂ umgewandelt. Nun wird das CO₂ abgeschieden. Die eigentliche Energieerzeugung findet durch die Verbrennung von H₂ statt. Beim zweiten Weg, dem Oxyfuel-Verfahren, wird die Kohle in einer Umgebung mit annähernd 100 % Sauerstoff verbrannt, wobei ein sehr reiner CO₂-Strom entsteht. Im letzten und am häufigsten eingesetzten Verfahren wird das Abgas nach der Kohleverbrennung mit bestimmten Lösungsmitteln auf Basis von Aminen behandelt und das CO₂ „herausgewaschen“ (sog. Aminwäschen). Da die CO₂-Abscheidung erst am Ende des üblichen Kohleverbrennungsprozesses stattfindet, spricht man auch von einer „end-of-pipe“-Lösung. Die CC-Anlage wird einfach ans Ende der Prozesskette angegliedert.

Generell sind die Kosten der drei Verfahren vergleichbar,¹⁰² weswegen dieser Bericht sich an den vorhandenen Studien orientiert und vorrangig die Möglichkeiten eines post-combustion-Capture – end of pipe – beleuchtet. Auch hier gibt es unterschiedliche technische Optionen, die sich vorrangig darauf beziehen, ob die ursprünglich durch das Kraftwerk erzeugte Menge an Energie und Wärme bestehen bleiben soll oder nicht. Im einfachsten Fall würde ein Teil des entstehenden Dampfes nicht zur Stromgewinnung, sondern zum Betrieb der CC-Anlage eingesetzt werden, weswegen die Stromerzeugung und damit die Effizienz der Anlage sinkt. Will man das vermeiden, müssten zusätzlich Kapazitäten an Kohle- oder Gaskraftwerken ergänzt werden, um die Versorgung der CC-Anlage mit Dampf zu gewährleisten.

Die **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Abbildung 22 zeigen die Netto-Stromerzeugung, die Effizienzen und die Investitionskosten für neue Kohle- bzw. Gaskraftwerke im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Außerdem werden die Levelized Cost of Electricity (Stromgestehungskosten) für Kohle- und Gaskraftwerke mit dem jeweiligen Kostenpunkt für die Vermeidung von CO₂ dargestellt, in Abbildung 21 für ein Kohlekraftwerk und in Abbildung 22 für ein Gaskraftwerk.

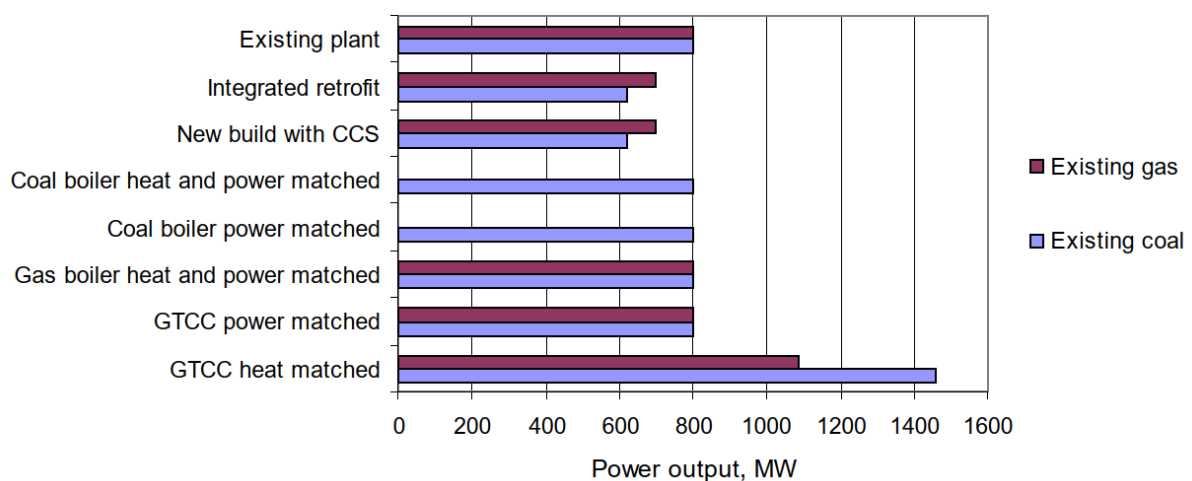


Abbildung 18: Netto-Stromerzeugung von neuen Anlagen im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen.

Abbildung aus: IEAGHG (2011)¹⁰³

¹⁰² Vgl. IEAGHG (2011).

¹⁰³ Vgl. IEAGHG (2011), S. v.

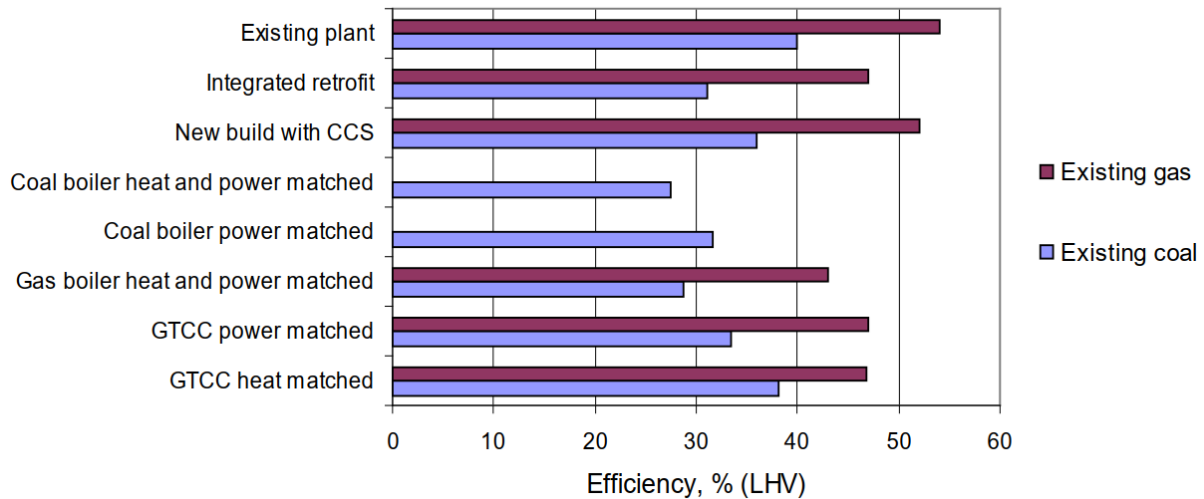


Abbildung 19: Effizienzen von neuen Anlagen im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011).¹⁰⁴

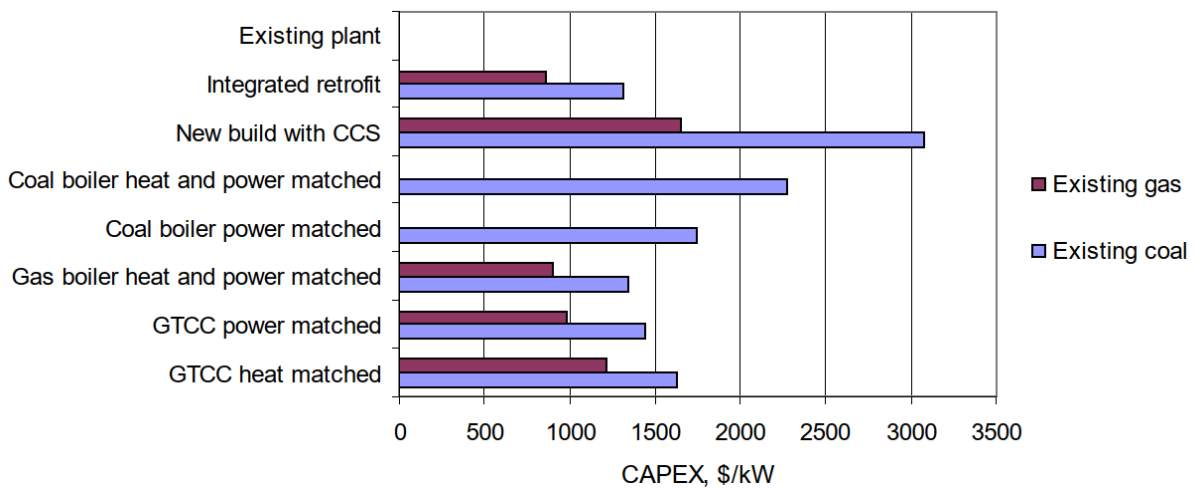


Abbildung 20: Investitionskosten von neuen Anlagen im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011).¹⁰⁵

Die Schwächen der Größe „Stromgestehungskosten“ wurden bereits in Kapitel 4.2 erläutert. Diese beziehen nicht die Gesamtkosten weiterer Systemkomponenten mit ein, die jedoch notwendig sind, damit eine Anlage, die Strom produziert, auch vernünftig betrieben werden kann. Die „Levelized Full System Costs of Electricity“ (LFSCOPE) schließen hingegen notwendige Speicher und Verteilsysteme mit ein, deren Kosten bei Neuen Erneuerbaren Energiequellen merklich höher sind als bei Grundlastkraftwerken. Da im Fall der Studie, aus der die obigen Abbildungen stammen, jedoch jeweils nur Grundlastkraftwerke miteinander verglichen werden, sind

¹⁰⁴ Vgl. IEAGHG (2011), S. vi.

¹⁰⁵ Vgl. IEAGHG (2011), S. vi.

die Stromgestehungskosten eine gute Messgröße für die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Anlagen.

Generell sieht man, wie bereits erläutert, dass die Effizienzen und damit die Stromerzeugungsmengen für umgerüstete Anlagen geringer sind als bei existierenden Anlagen und bei Neubauten. Allerdings folgern die Autoren der zitierten Studie, dass die geringeren Investitionskosten für die Umrüstung im Vergleich zum Neubau sowie die geringeren Stromgestehungskosten dazu führen, dass sich die Nachteile bei der Effizienz und anderen Kosten durch die CC-Technologie ausgleichen. Insgesamt scheint der „Integrated Retrofit“ im Vergleich mit den anderen Retrofit-Möglichkeiten die bevorzugte Option unter den „post-combustion retrofits“ zu sein, weil die Kosten

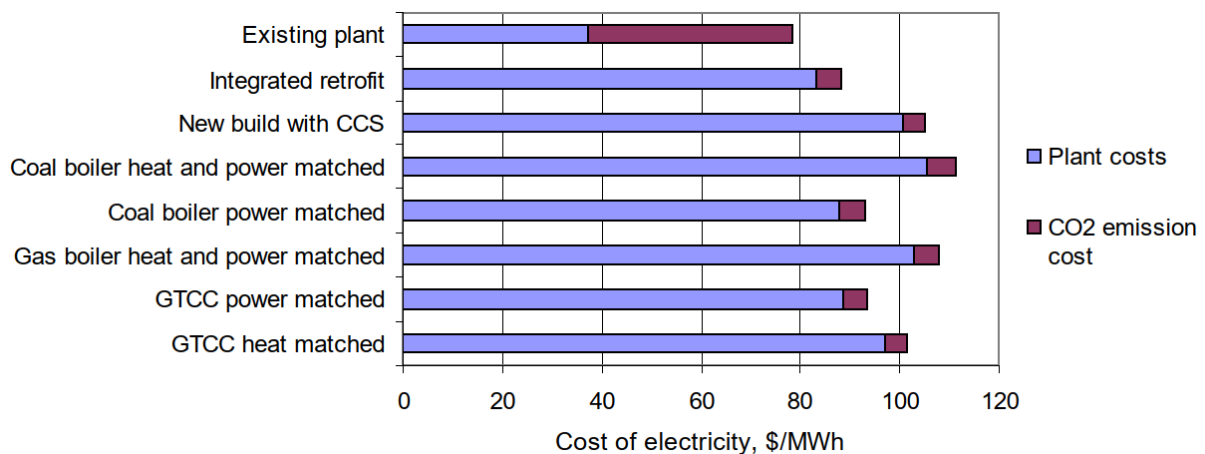


Abbildung 21: Levelized Cost of Electricity von neuen Kohlekraftwerken im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011)¹⁰⁶

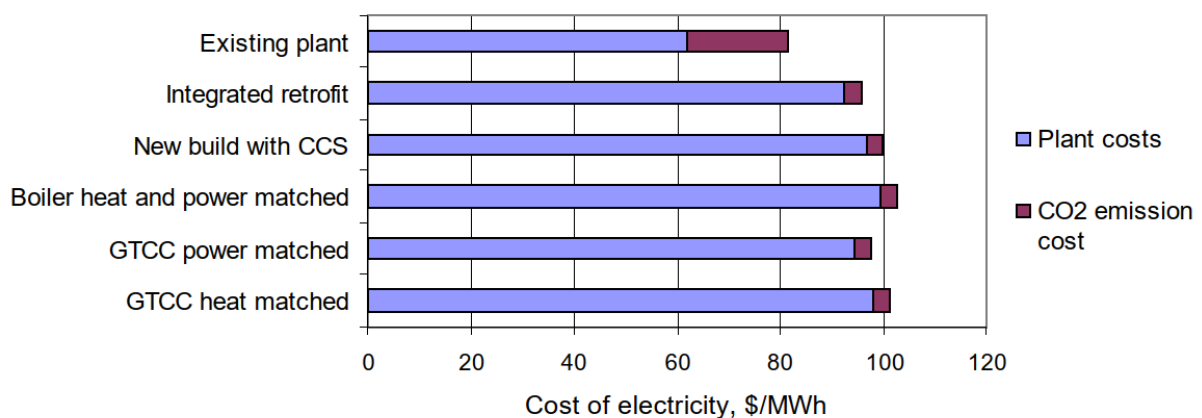


Abbildung 22: Levelized Cost of Electricity von neuen Gaskraftwerken im Vergleich zu mit CC-Technologie umgerüsteten Anlagen. Abbildung aus: IEAGHG (2011)¹⁰⁷

¹⁰⁶ Vgl. IEAGHG (2011), S. vi.

¹⁰⁷ Vgl. IEAGHG (2011), S. vii.

geringer sind. Bei dieser integrierten Umrüstung wird der für die Capture-Anlage notwendige Dampf direkt aus dem Kohle- bzw. Gaskraftwerk entnommen. Keine zusätzlichen Kraftwerkskapazitäten für die Dampferzeugung werden gebaut.

Zur Zeit der Studie waren die Kosten für Kraftwerke über mehrere Jahre gestiegen und unterlagen großer Unsicherheit. Eine solche Entwicklung heutzutage würde ebenfalls für eine Umrüstung statt für einen Neubau sprechen. Wenn sich die Kosten für die CC-Anlage stark erhöhen sollten, könnten ein Neubau sinnvoller sein.

Generell zeigt Abbildung 23 (a), dass die ursprüngliche Effizienz eines Kraftwerks fast keine Auswirkung auf die CO₂-Vermeidungskosten durch eine Umrüstung hat. Die x-Achse unten zeigt die Effizienz von 30-45 %, doch die Retrofit-Linien (Grün, Violett, Blau) bleiben im Wesentlichen konstant. Für Neubauten sieht das jedoch anders aus (rote Kurve). Diese haben niedrigere Vermeidungskosten verglichen mit Kraftwerken, die vor der Umrüstung eine Effizienz von weniger als 35 % haben. Für solche Fälle lohnt sich also der Neubau in jedem Fall, sollten spezifische lokale Bedingungen keine besonderen Herausforderungen darstellen. Ein ähnliches Bild zeigen die Stromgestehungskosten in Abbildung 23 (b). Für einen Neubau mit CCS liegen diese bei 100 \$/MWh, wie der rote Punkt zeigt. Neubauten hätten hier immer die Effizienz von 45 %. Für Effizienzen ab 35 % aufwärts liegen die dunkelblaue Kurve für die integrierte Umrüstung und die violette Kurve für eine andere Umrüstungsvariante unter 100 \$/MWh, sie haben also geringere Stromgestehungskosten.

Je nach eingesetzter CC-Technologie können unterschiedlich hohe Anteile des CO₂ aus dem entsprechenden Abgas des Kraftwerks entnommen bzw. „herausgewaschen“ werden. Der Anteil kann von 50 % bis annähernd 100 % der im Abgas vorhandenen CO₂-Menge betragen.

Nun ist es möglich, ein Kohlekraftwerk nicht ausschließlich mit Kohle zu betreiben, sondern andere Brennstoffe, z. B. auf Basis von Biomasse, mitzuverbrennen, sogenanntes „co-firing“.¹⁰⁸ CO₂, das bei der Verbrennung von Biomasse entsteht, war vorher in der Atmosphäre und wurde von den Pflanzen gebunden. Bei deren Verbrennung entsteht also kein zusätzlicher CO₂-Beitrag, sondern es wird lediglich das emittiert, was vorher bereits in der Atmosphäre war. Das ist der Grund, warum beispielsweise Holzpellets in der Heizung als klimaneutral bezeichnet werden.

¹⁰⁸ Vgl. Wang, R. et al. (2020).

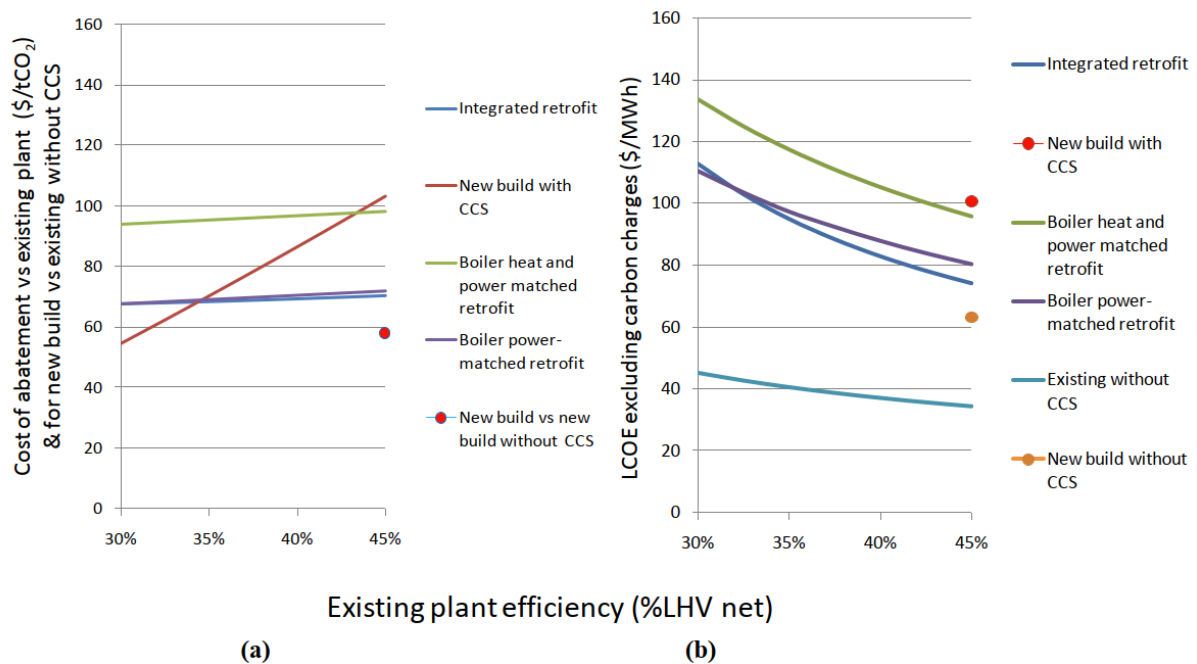


Abbildung 23: Auswirkung der Effizienz des Kraftwerks auf (a) die CO₂-Vermeidungskosten und (b) die Stromgestehungskosten (Levelized Costs of Electricity, LCOE) ohne Aufschlag für CO₂-Vermeidungskosten für umgerüstete Kohlekraftwerke und neue Kohlekraftwerke mit CCS. Abbildung aus: IEAGHG (2011)¹⁰⁹

Denselben Effekt kann man nutzen, wenn es um den klimafreundlichen Betrieb von Kohlekraftwerken geht. Fängt man z. B. 90 % der CO₂-Emissionen über Carbon Capture ab, werden 10 % in die Atmosphäre entlassen. Wenn aber der Ausgangsbrennstoff des Kraftwerks zu 10 % aus Biomasse besteht (bezogen auf den Kohlenstoffgehalt) so sind die emittierten 10 % lediglich die aus der Biomasse und das Kraftwerk würde klimaneutral betrieben.

Da Biomasse allerdings meistens nur begrenzt vorhanden ist, ein eigens für die Verbrennung geplanter Anbau von Pflanzen mit Fläche für die Landwirtschaft konkurriert („Teller oder Tank“ bzw. hier: „Teller oder Kraftwerk“) und Biomasse z. B. auch für die dringend notwendige Wiederaufbereitung der Bodenqualität z. B. durch Kompostierung oder Pflanzenkohle benötigt wird, ist auch die Menge der Biomasse für die zusätzliche Verbrennung in Kohlekraftwerken begrenzt verfügbar.

Die Frage nach dem sinnhaften Einsatz von „co-firing“ ist daher situationsabhängig zu beantworten, stellt aber eine mögliche Option für die Umrüstung existierender Kohlekraftwerke da.

¹⁰⁹ Vgl. IEAGHG (2011), S. viii.

6.2 Einblick China: Umrüstung der bestehenden Kohlekraftwerke

Mit 1.137 Gigawatt betreibt China aktuell rund die Hälfte der weltweiten Kapazität an Kohlekraftwerken. Entsprechend stammen aus diesem Bereich etwa die Hälfte aller Emissionen aus Kohlekraftwerken weltweit, also 5 Gigatonnen CO₂ pro Jahr. Da dieser Kraftwerkspark im Durchschnitt etwa 15 Jahre alt ist und solche Kraftwerke üblicherweise eine Lebensdauer von rund 40 Jahren haben, ist das Potential für Umrüstungen in China enorm. Es ist auch nicht anzunehmen, dass China große Mengen an Kraftwerken im Sinne globaler Klimaschutzszenarien einfach abschalten wird, weil damit enorme Vermögen verloren gehen würden, die Kraftwerke würden sogenannte „stranded assets“.

In den vergangenen Jahren haben sich daher unterschiedliche Studien damit beschäftigt, welche Kraftwerke sinnvollerweise umgerüstet werden könnten. Technische Aspekte, aber wie erwähnt auch wirtschaftliche und regionale sowie ganz spezifische Eigenschaften der existierenden Kraftwerke, spielen dabei eine Rolle, bis hin zu der Frage, ob der zusätzliche Platz für eine CC-Anlage vor Ort verfügbar ist. Da Jahr für Jahr neue Kraftwerke (bisher ohne CC) in China hinzukommen, steigt die Zahl der Kraftwerke kontinuierlich, die für eine Umrüstung geeignet sind. Im Jahr 2016 lag die Einschätzung der Internationalen Energieagentur für das Umrüstungspotential bei rund 310 Gigawatt.¹¹⁰ Eine neuere umfassendere Studie chinesischer Autoren aus dem Jahr 2022 beziffert dieses auf etwa 250-565 Gigawatt.¹¹¹ Es geht also um ein Viertel bis die Hälfte der Kraftwerke.

Abbildung 24 zeigt auf Grundlage der techno-ökonomischen Analyse der letztgenannten Studie, dass insbesondere im Norden und Osten Chinas ein großes Potential existiert. Die braunen senkrechten Balken zeigen für jede Provinz die entsprechend umzurüstende Kraftwerkskapazität. Die grau hinterlegten Flächen zeigen mögliche Speicherstätten und die farbigen Dreiecke geben den kalkulierten Preis pro Tonne gespeichertes CO₂ der jeweiligen Lagerstätte an. Die Preisspanne pro Tonne liegt zwischen weniger als 45 US-Dollar (Dunkelgrün) und mehr als 90 US-Dollar (Rot) pro Tonne. Im Norden und Osten Chinas finden sich weit überwiegend

¹¹⁰ Vgl. IEA (2016).

¹¹¹ Vgl. Yang, L. (2022).

dunkelgrüne und hellgrüne Dreiecke, also Kosten von weniger als 60 US-Dollar pro Tonne. Das liegt daran, dass CO₂ in Kavernen auf dem Festland gespeichert werden kann (onshore). Im Süden Chinas sind die nächstverfügbaren Speicherkapazitäten vor der Küste gelegen (offshore), was den Preis auf 60-90 US-Dollar erhöht. Dennoch liegen diese Werte in der Größenordnung dessen, was beispielsweise in Europa als CO₂-Preis anvisiert wird.

Die niedrigsten Preise werden hier dadurch erzielt, dass mit dem Verpressen von CO₂ andere wirtschaftliche Aktivitäten einhergehen, nämlich die Förderung von Grundwasser und Öl.

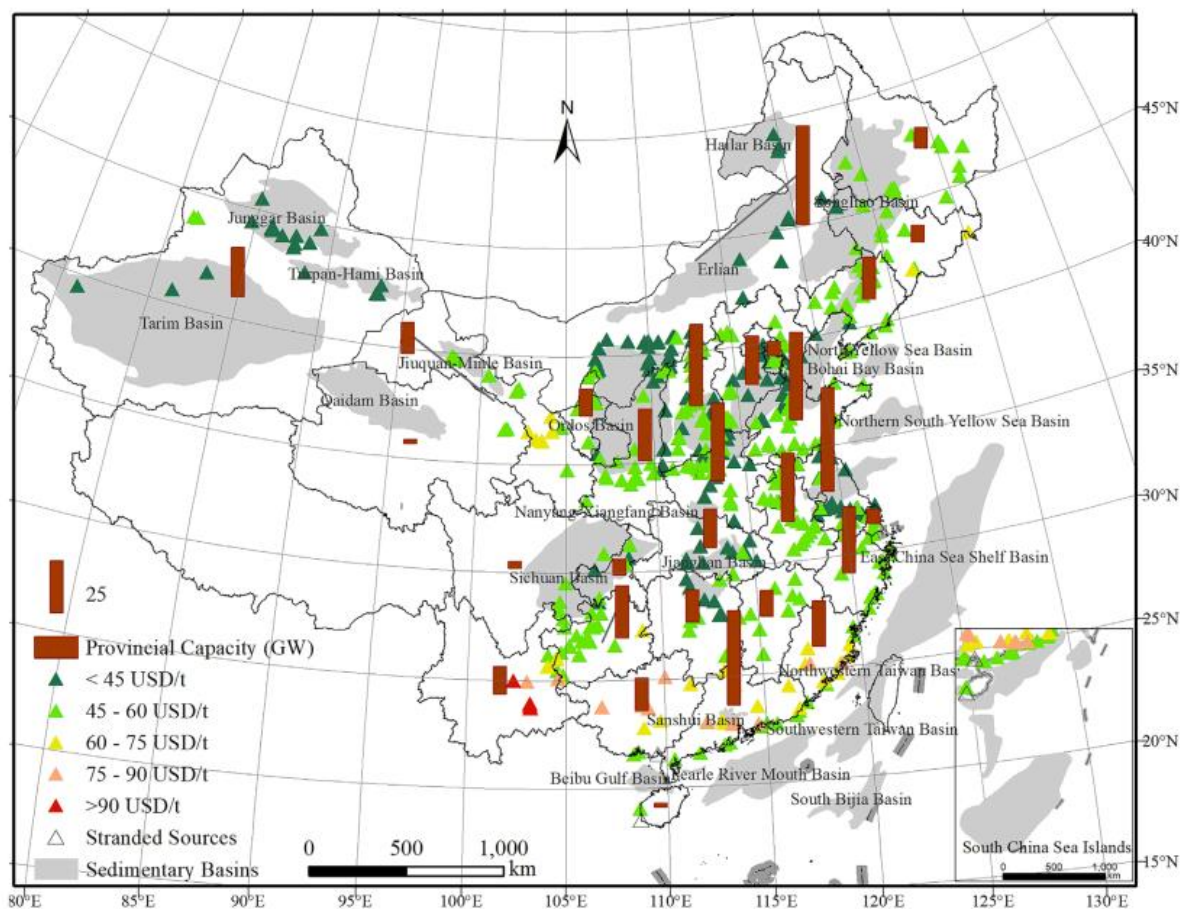


Abbildung 24: Techno-ökonomische Analyse des CCUS-Umrüstungspotentials und Speichermöglichkeiten chinesischer Kohlekraftwerke. Abbildung aus: Yang, L. (2022)¹¹²

Bei der Förderung dieser Rohstoffe nimmt irgendwann der Druck innerhalb der Kavernen ab. Bringt man CO₂ in diese Kavernen ein, steigt der Druck und man kann unter besseren Bedingungen weiterfördern. Entsprechend heißen die Technologien

¹¹² Yang, L. (2022), S. 5.

Enhanced Water Recovery, EWR, bzw. Enhanced Oil Recovery, EOR. EOR ist ein Verfahren, das in den USA bereits seit Jahrzehnten betrieben wird. Deswegen ist CCUS in gewisser Weise keine neue Technologie, sondern im Gegenteil, eine lange erprobte Verfahrensweise. Dort existieren in der Folge alle notwendigen Infrastrukturkomponenten: die Abfang-Einrichtungen, die Aufbereitung, Pipelines für den Transport und letztlich die Verpressung. Zwar werden hier teilweise nur 60 % des emittierten CO₂ abgefangen, weil dies das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis in der reinen EOR-Anwendung bringt. Aber dies ist immerhin mehr als die Hälfte, was einen großen Schritt in die richtige Richtung bedeutet. Würden weltweit 60 % aller Emissionen an Kohlekraftwerken abgefangen, wären das rund 6 Gigatonnen CO₂, knapp mehr als doppelt so viel, wie die gesamten europäischen Emissionen.

Wie die anderen Entwicklungs- und Schwellenländer wird auch China noch auf lange Zeit fossile Energieträger verwenden. Daher scheint es doch sinnvoll zu sein, lieber mit EOR bereits existierende Ölfelder weiter zu nutzen, statt kostspielige Explorationen neuer Ölfelder vorzunehmen, inklusive der Risiken, die bei solchen Aktivitäten anfallen. Das eingesparte Geld könnte man lieber in andere Komponenten der Wende in Richtung Wohlstand und Klimaneutralität einsetzen.

Ein weiterer interessanter Punkt ist der angestrebte Hochlauf der Technologie auf die beschriebenen 250-565 GW an Kohlekraftwerken, die es bis 2050 umzurüsten gilt. Dies ist eine Optimierungsfrage zwischen dem breitflächigen Einsatz existierender CC-Technologien, hier: erste Generation genannt, und einer weiter entwickelten Technologie der zweiten Generation. Je länger man mit der Umrüstung der Kohlekraftwerke auf CC-Technologie wartet, desto kürzer ist der Zeitraum für die Abschreibung, weil die Kraftwerke eine ungefähre Lebensdauer von 40 Jahren haben. Eine schnelle Umrüstung lohnt sich also ökonomisch. Andererseits möchte man möglichst viele Kraftwerke mit dem besten Stand der CC-Technik umrüsten, was bedeutet, dass es sich u. U. lohnt, noch ein paar Jahre zu warten, bis die zweite Generation in Breite verfügbar und entsprechend günstiger geworden ist.

Abbildung 25 zeigt, dass das günstigste Zeitfenster für die breitflächige Umrüstung zwischen 2030 und 2035 liegt. Im Jahr 2030 schneiden sich die Kostenkurven pro Tonne CO₂ für die Technologien der ersten und zweiten Generation. Die Abfangkosten für die erste Generation bleiben ab diesem Zeitpunkt relativ konstant bei rund 200 CNY

bis 2050, während die zweite Generation laut Erwartungen der Studienautoren weiter sinken auf etwa 50 CNY. 200 CNY entsprechen etwa 30 Euro pro Tonne CO₂ für die erste Generation. Eine Kostensenkung für die zweite Generation wie in der Abbildung dargestellt, würde auf Kosten von unter 30 Euro ab 2030 auf 15 Euro 2032 und auf unter 10 Euro ab 2035 bedeuten.

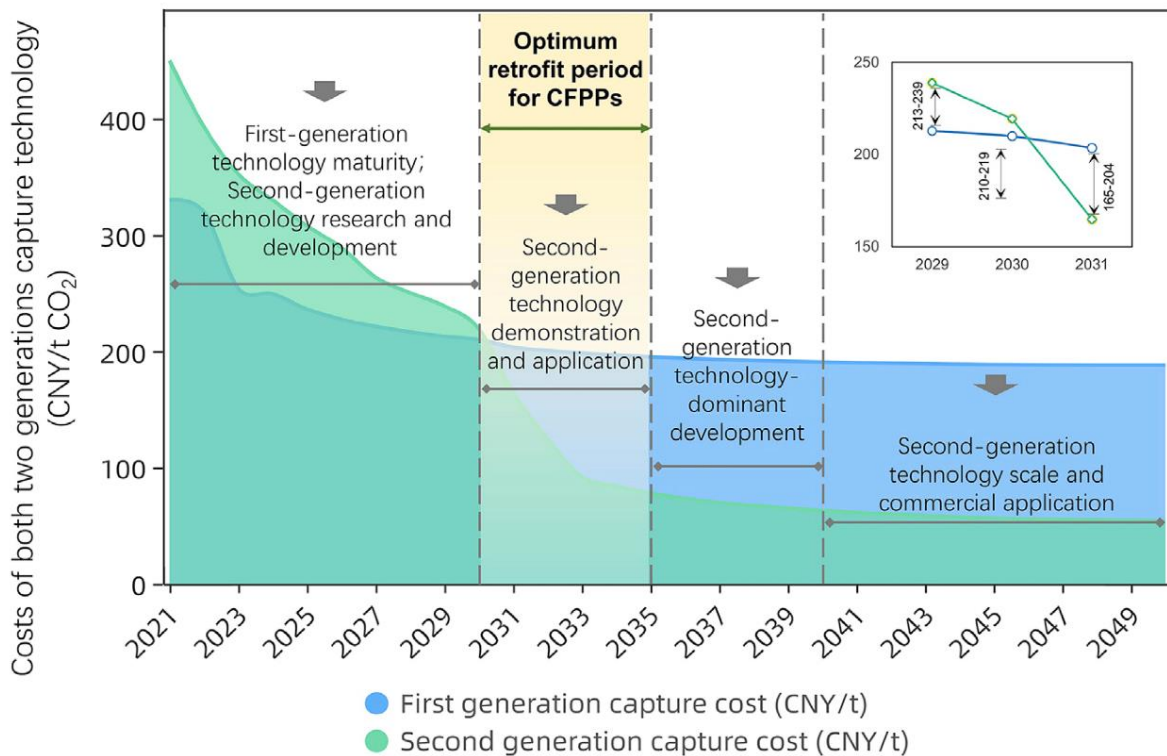


Abbildung 25: Trend über mögliche Kostenentwicklungen pro Tonne abgefangenes CO₂ für CC-Technologien erster und zweiter Generation. Abbildung aus: Yang, L. (2022)¹¹³

Diese Zahlen sind aus Sicht der Experten von Global Energy Solutions und FAW/n sehr optimistisch einzuschätzen. In der Studie wird nicht klar dargestellt, welche Verbesserungen von der ersten in die zweite Generation stattfinden sollen. Worüber teilweise berichtet wird, sind Kosteneinsparungen, die dadurch auftreten, dass man eine Routine in der Umsetzung solcher Großprojekte bekommt, sodass beispielsweise die Projektentwicklungskosten sinken. Was dagegen spricht, ist, dass die technischen Komponenten im Wesentlichen bereits weit entwickelt sind und die Umrüstung eines Kohlekraftwerks in großem Umfang von den lokalen Bedingungen bestimmt werden.

¹¹³ Yang, L. (2022), S. 5.

Andererseits ist es aus Ingenieursperspektive schwierig eine Prognose über die Möglichkeiten technischer Entwicklungen über einen Horizont jenseits von 10-15 Jahren hinaus abzugeben.

Eine andere Studie aus China führt an, dass zusätzlich zu Kostensenkungen durch „learning by doing“, also das Sammeln von Erfahrungswerten, Effekte durch die vermehrte Forschung und Entwicklung und eine Optimierung der Prozesse erwartet werden.¹¹⁴ Die Studienautoren führen auch Kostenabschätzungen pro Tonne nicht emittiertes CO₂ in Abhängigkeit von der Gesamtmenge an vermiedenen CO₂-Emissionen durch. Abbildung 26 zeigt das Ergebnis für unterschiedliche Abfangraten und variierende Abstände zu möglichen Lagerstätten. Dies ist auf Basis eines Algorithmus möglich, der in einem bestimmten Umkreis, hier: 250 km oder 800 km, mit definierter Abfangrate, hier: 50 % oder 85 %, die günstigste Speicherstätte und die resultierenden Gesamtkosten berechnet. Abfangen, Transport und Speicherung sind in der Darstellung mitberücksichtigt. Die Kosten im negativen Bereich zu Beginn der Kurven zeigen den Business-Case für EOR und EWR, wo man heute sogar bereits Geld mit dem Einsatz der Technologie verdient. Überraschenderweise zeigt die Grafik, dass es nicht unbedingt sinnvoller ist, Abfangraten von nur 50 % anzustreben, denn die blaue und orange Kurve steigen schneller an, was höhere Kosten bedeutet. Offenbar lohnt es sich mit einer Umrüstung eher eine 85 %-ige Abfangquote anzustreben, da sich die Investitionen pro Tonne CO₂ dann vergünstigen.

Die Studienautoren vergleichen ihre Berechnungen ebenfalls mit anderen Technologien für klimafreundliche Energieerzeugung wie der Windenergie und finden, dass 22-58 % der umzurüstenden Kohlekraftwerke sogar konkurrenzfähig zu Onshore-Windenergie sind.

In der Summe lässt sich festhalten, dass insbesondere wegen des geringen Alters der chinesischen Kohlekraftwerke ein enormes Potential besteht, diese mit CCUS-Technologien umzurüsten. Daher sollten diese im selben Maß in die Förderprogramme für klimafreundliche Technologien der Regierungen, nicht nur in China, eingebaut werden. Dadurch würde Technologieoffenheit dazu beitragen, die effizientesten Wege für ein solches zukünftiges Energiesystem zu erschließen.

¹¹⁴ Vgl. Wei, N. (2021).

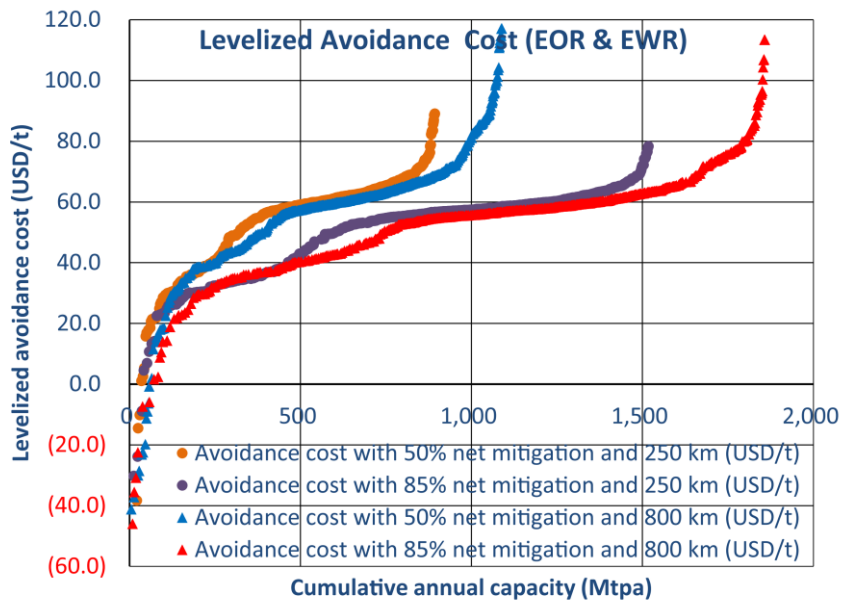


Abbildung 26: CO₂-Vermeidungskosten abhängig von der kumulierten jährlichen CO₂-Vermeidungsmenge. Abbildung aus: Wei, N. (2021)¹¹⁵

Bezüglich solcher Case-Studies existiert jedoch noch ein großer Forschungsbedarf, da im vorliegenden Beispiel Chinas die Einbettung einer Umrüstung der Kohlekraftwerke nicht im Rahmen internationaler Kooperation, beispielsweise unter Artikel 6 des Paris-Abkommens, betrachtet wird. Hinzu kommt Chinas besondere Rolle, da es unter dem Paris-Abkommen weiterhin als Entwicklungsland eingestuft wird, das finanzielle Unterstützung für seine Klimaschutzmaßnahmen fordert. Andererseits spricht Chinas wirtschaftliche Entwicklung und sein Einfluss in der Welt immer weniger dafür, dass diese Einstufung weiterhin sinnvoll ist. Kann ein Entwicklungsland für rund ein Drittel der weltweiten Treibhausgas-Emissionen verantwortlich sein und wie kürzlich erfolgreich auf der Rückseite des Mondes landen und Gesteinsproben zur Erde schicken? Hinzu kommen geopolitische Konflikte. In Bezug auf Governance-Fragen der internationalen Klimapolitik weiß die Welt aktuell nicht, wie sie damit umgehen soll. Diese Themen werden ein wichtiger Diskussionspunkt auf der anstehenden Klimakonferenz COP29 in Baku, Azerbaijan, sein.

¹¹⁵ Wei, N. (2021), S. 13168.

6.3 Vergleich der Kosten unterschiedlicher Antriebssysteme

Bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe wird biogenes oder fossiles CO₂ eingesetzt. Auch wenn die fossilen CO₂-Quellen in Bezug auf die Menge dominieren, ist die Menge der aus Altfetten und biogenem CO₂ der zweiten Generation herstellbaren synthetischen Kraftstoffen zumeist eine sinnvolle mengenmäßige Ergänzung. Zudem führen konkurrierende Technologien stets zu Wettbewerb, sinkenden Kosten und stabileren Gesamtsystemen als technologische Monokulturen. Daher werden im Folgenden sowohl die Pfade synthetische Kraftstoffe auf Basis von CO₂ aus der (Ab)Luft sowie auf Basis biogener Quellen betrachtet.

CO₂ aus der (Ab-) Luft

In Entwicklungs- und Schwellenländern werden noch über einen langen Zeitraum CO₂-Punktquellen in großer Zahl existieren. Diese Punktquellen müssen zum Schutz des Klimas zügig mit CC-Anlagen ausgestattet werden. CC ist eine erprobte und ausgereifte Technologie, die hochreines CO₂ als Ausgangsprodukt liefert.

Ferner ist in einem auf fluktuierender Stromerzeugung basierenden Energieversorgungssystem zuverlässiger Grundlaststrom grundsätzlich knapp und besonders teuer. Benötigt der Verkehrssektor keine zuverlässige Stromversorgung, da seine Energie zwar zum Teil aus fluktuierendem Wind- und Sonnenstrom stammt, diese aber anschließend in Form von Kraftstoff ausgesprochen preiswert, in großen Mengen und langfristig gespeichert werden kann, dämpft dies die Gesamtsystemkosten eines Energieversorgungssystems. Dies gilt in besonderem Maße, wenn fluktuierende Erneuerbare in nennenswertem Umfang integriert sind.

Ein Verkehrssektor, der synthetische Kraftstoffe einsetzt, stellt somit die notwendige Speicherkapazität bereit und macht den Einsatz von fluktuierenden Erneuerbaren aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten erst interessant bzw. vergrößert den Umfang in dem fluktuierende erneuerbare eingesetzt werden können (synthetische Kraftstoffe können daher u. U. als „Enabling Technology“ bezeichnet werden).

Verfahrensbeschreibung und Mengenpotenzial

Abbildung 27 zeigt ausgewählte Prozesse zur Herstellung sogenannter Powerfuels. Powerfuels sind synthetische Kraftstoffe nicht fossilen Ursprungs, auf Basis von Strom (Power) die für Verbrennungsprozesse genutzt werden können. Abgesehen von reinem Wasserstoff entstehen diese durch Reaktion von mittels Elektrolyse gewonnenen Wasserstoffs und CO_2 oder Stickstoff (N_2). Unterschiedliche Ausgangsprodukte erfordern abweichende Prozesse. In Bezug auf ihre chemische Struktur einfache Ausgangsstoffe sind Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3).

Das für die Elektrolyse benötigte Wasser muss hochrein sein. Werden derartige Anlagen in Küstennähe installiert, bietet sich die Verwendung von Meerwasser und eine nachfolgende Entsalzung und Reinigung mittels Osmose an.

Prozesse (Auswahl)

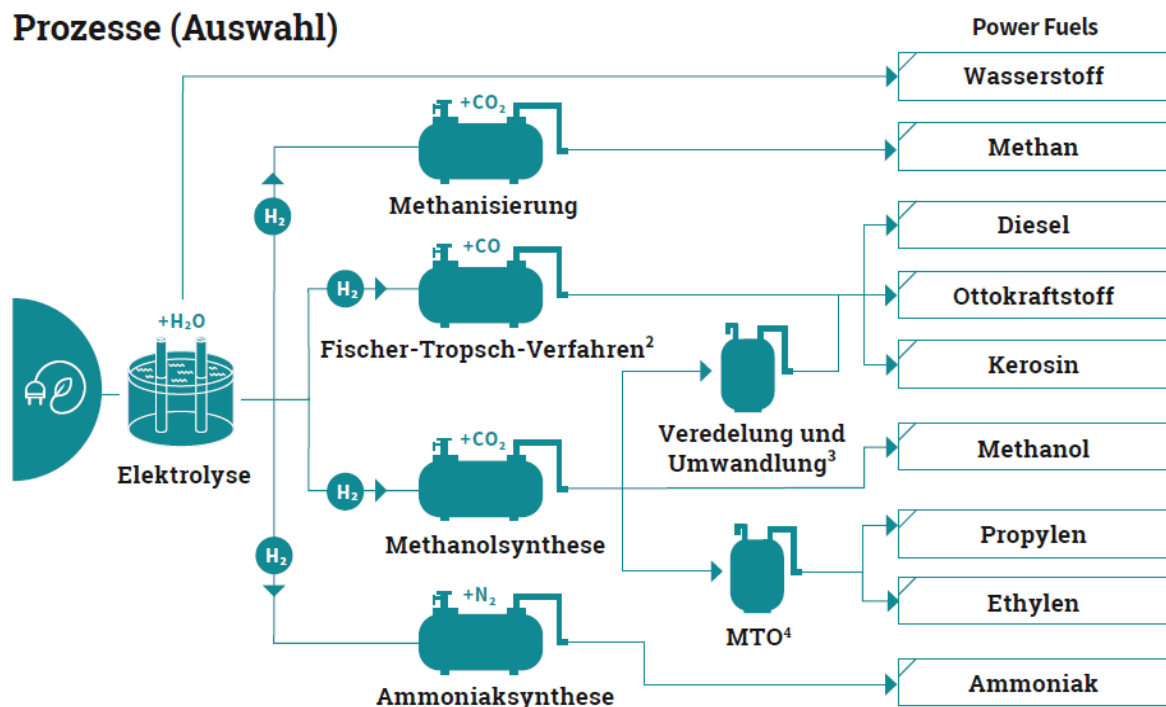


Abbildung 27: Ausgewählte Prozesse zur Herstellung von Powerfuels. Abbildung aus dena (2018a)¹¹⁶

Die Studie „The potential of electricity based fuels (e-fuels) for low emission transport in the EU“¹¹⁷ liefert Anhaltspunkte zur Beantwortung der Frage nach dem Mengenpotenzial. So geht die Studie von industriellen, d. h. konzentrierten CO_2 -Quellen mit einem Volumen von 79 Millionen Tonnen pro Jahr in der EU28 aus. Hieraus errechnet sich ein Potenzial an synthetischen Kraftstoffen von 286 TWh pro

¹¹⁶ Vgl. dena (2018a).

¹¹⁷ dena (2017).

Jahr oder alternativ ein Potenzial von 399 TWh pro Jahr an synthetischem Methan. Dies entspricht im Fall der EU28 7 % bzw. 10 % des Bedarfs des im Transportsektor der EU eingesetzten Diesel, Benzin und Kerosin.

Welches Potenzial lässt sich hieraus für eine aufstrebende Ökonomie wie z. B. Indien ableiten? Indiens Bevölkerung ist 3,4-mal so groß wie die der EU28. Die CO₂-Emissionen von Indien betragen 1.859 Millionen Tonne pro Jahr. Unter der konservativen Annahme, dass hiervon 25 % zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen genutzt werden, wäre das Potenzial nahezu sechsmal so groß wie in der EU ($1.859/4/79 = 5,88$). Pro Bürger stünde 70 % mehr klimaneutraler Kraftstoff zur Verfügung als in der EU ($5,88/3,4 = 1,73$). Diese Größenordnung ist ohne Frage von Bedeutung.

Gesamtsystemkostenvergleich von BEV mit denen von Verbrennungsmotoren bei Einsatz von synthetischen Kraftstoffen

Die Studie „Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IV“,¹¹⁸ erstellt von frontier economics, dem ifeu-Institut Heidelberg und mehreren Automobilunternehmen unter Leitung der FVV, liefert einen sehr umfassenden quantitativen und qualitativen Vergleich der Mobilitätskosten (einschließlich der Kosten für die Energie-/Kraftstoffproduktions- und -verteilungsanlagen sowie der Fahrzeugkosten), des Primärenergiebedarfs (einschließlich der Verluste entlang der gesamten Energie-/Kraftstoffversorgungskette), der Umweltauswirkungen (insbesondere Treibhausgase) und der kritischen Rohstoffe (z. B. Lithium).

Hierzu werden sieben potenzielle Technologiepfade auf der Grundlage von 100 %-Szenarien bis 2050, die alle ausschließlich mit erneuerbarer Wind- und Sonnenenergie betrieben werden, für die EU definiert.

- Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV)
- Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV), die mit Wasserstoff versorgt werden
- Verbrennungsmotoren (Internal Combustion Engine, ICE), die mit synthetischen Kraftstoffen wie folgt betrieben werden:
 - Fischer-Tropsch-Benzin/Diesel-Gemisch (FT-Kraftstoff)

¹¹⁸ FVV (2021).

- Synthetisches Methan (Methan)
- Synthetischer Dimethylether (DME)
- Synthetisches Methanol (MeOH)
- H₂-Verbrennungsmotor (H₂ Combustion, H₂ Comb).

Die modellierte Energieversorgung ist CO₂-neutral und wird ausschließlich durch Wind- und Solarenergie bereitgestellt. Die erneuerbare Energie wird dann in sieben verschiedenen Energiepfaden genutzt:

- 1 Pfad: Direkte Nutzung in batterieelektrischen Fahrzeugen und aus dem Überleitungsnetz gespeisten Langstrecken-Lkw (BEV)
- 2 Pfade: Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse, der dann in Fahrzeugen verwendet wird, die entweder mit einer Brennstoffzelle (FCEV) oder mit einem für die Verbrennung von Wasserstoff optimierten Verbrennungsmotor (H₂ Comb) ausgestattet sind.
- 4 Pfade: Herstellung sogenannter Power-to-X-Kraftstoffe (PtX) durch erneute Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse, Abtrennung von CO₂ direkt aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) und schließlich die Synthese von Methan (CH₄), Methanol (MeOH), Dimethylether (DME) oder Fischer-Tropsch-Kraftstoffen (FT-Benzin/Diesel).

Zusätzlich werden drei technologische Reifenniveaus bzw. Ausstattungsvarianten bei den Fahrzeugen unterschieden:

- Status quo: Wie der Name schon sagt, bleiben alle Fahrzeugwirkungsgrade in den Status-quo-Szenarien unverändert. Dies gilt für Technologien, die bereits in der Massenproduktion eingesetzt werden, wie z. B. (nicht-hybridisierte) Diesel-/Benzin-Verbrennungsmotoren und batteriebetriebene Elektrofahrzeuge auf dem Niveau, auf dem sie derzeit beobachtet werden. Für Kraftstoffe, die derzeit in einer Nische produziert werden, werden die Wirkungsgrade auf die Werte hochskaliert, die derzeit erreichbar wären, wenn die entsprechenden Fahrzeuge in großen Stückzahlen mit optimierten Einzelkraftstoffproduktionsmengen hergestellt würden.
- Ausgewogen: In diesem Szenario werden technologische Maßnahmen umgesetzt, bei denen eine positive Kosten-Nutzen-Bilanz zu erwarten ist. Dies gilt insbesondere für alle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die vollständig hybridisiert sind (d. h. mit einer Batterie ausgestattet sind). Bei Batterie- und

Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ändert sich die zugrunde liegende Technologie.

- All-In: Beim diesem Technologie-Szenario werden schließlich alle verfügbaren Maßnahmen zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs in das Fahrzeug integriert. Zusätzlich zur Hybridisierung werden die Verbrennungsmotoren optimiert, um die Effizienz des Antriebsstrangs zu maximieren (z. B. voll variabler Ventiltrieb, VCR, Magerbetrieb usw.). Alle Fahrzeuge werden in Leichtbautechnik gebaut (insbesondere wird Stahl im Fahrgestell und in der Karosserie nach Möglichkeit durch Aluminium ersetzt) und mit Wärmepumpen anstelle der in den vorherigen Szenarien in allen Fahrzeugen verwendeten PTC-Heizungen ausgestattet. Die Batterien werden weiterentwickelt und alle BEV-Fahrzeuge werden mit einer vollständig festen NMC-Batterie mit erhöhter Energiedichte ausgestattet.

Zusätzlich werden in der Analyse zwei Orte der Energiebeschaffung (Europa und weltweit) bewertet. Daraus ergeben sich insgesamt 42 verschiedene bewertete Szenarien.

Der Gesamtenergiebedarf im Mobilitätssektor (auf Well-to-Wheel-Basis, WtW, unter Berücksichtigung der Verluste entlang der Energie-/Kraftstoffversorgungskette) bestimmt die Anforderungen an die anfänglichen Erzeugungskapazitäten (PV- und Windkraftanlagen) sowie die Anforderungen an die Infrastruktur im weiteren Verlauf der Versorgungsketten. Relative Vergleiche des WtW-Energiebedarfs über die verschiedenen Energie-/Antriebspfade hinweg sind daher ein wertvoller Hinweis für weitere Bewertungen. Abbildung 28 fasst die Ergebnisse für die 42 verschiedenen Kraftstoff-/Antriebswege zusammen: BEV erfordern aufgrund ihres geringen Tank-to-Weel (TtW)-Bedarfs bei weitem den geringsten WtW-Energiebedarf (ausgehend von 2.000 TWh, was etwa 68 % des Strombedarfs der EU27+UK im Jahr 2019 entspricht). Der höchste WtW-Bedarf wird für synthetische Kraftstoffe benötigt (bis zu 10.000 TWh), was auf einen höheren TtW-Bedarf und hohe Verluste entlang der Energie-/Kraftstofflieferkette zurückzuführen ist. Diese werden insbesondere durch die Synthese und die Elektrolyse verursacht.

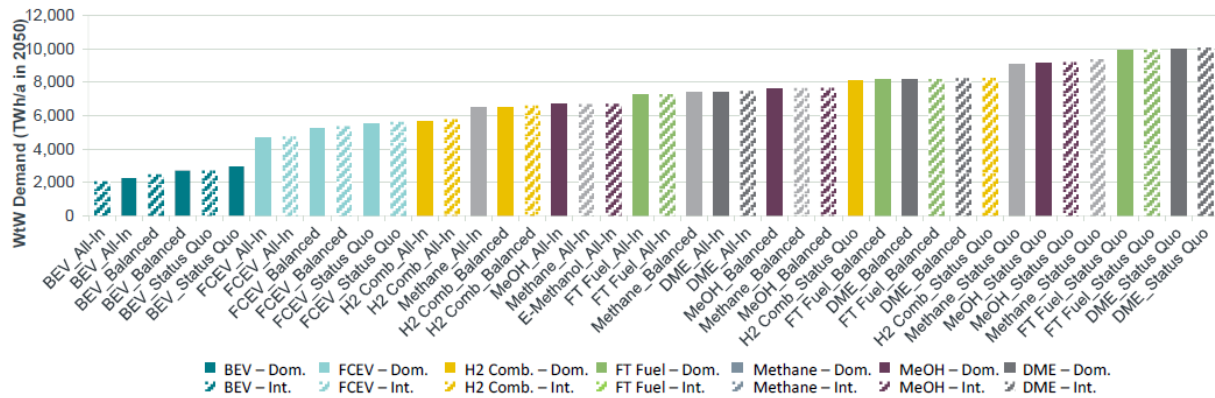


Figure 3: WtW Demand in TWh/a in 2050 for 42 scenarios [Source: Frontier Economics].

Abbildung 28: Well-to-Weel (WtW)-Nachfrage in TWh pro Jahr im Jahr 2050 für 42 Szenarien. Abbildung aus FVV (2021)¹¹⁹

Der Faktor der erforderlichen installierten Stromerzeugungskapazität für "FT-ICE/BEV" liegt bei inländischer Energiebeschaffung im Bereich von 3. Wenn FT-Kraftstoff international produziert wird, reduziert sich der Faktor auf etwa 2. Die Elektrolyse ist ein Schlüsselement für einen kohlenstoffneutralen Mobilitätssektor, unabhängig vom gewählten Energiepfad.

Ein weltweiter Hochlauf der Elektromobilität kann durch dauerhafte und temporäre Engpässe bei Lithium oder Kobalt beeinträchtigt werden. Mit den in den Szenarien angenommenen spezifischen Batteriekonfigurationen (Li-NMC-Batterietechnologie, wie sie in Europa Stand der Technik ist) liegt der hochgerechnete weltweite Materialbedarf am oberen Ende, was eine 100 %-ige weltweite Elektromobilität verhindert. Ein zukünftiger Mix aus verschiedenen Batterietechnologien mit geringerem Lithium- und Kobaltgehalt könnte den Rohstoffbedarf reduzieren.

So übersteigt die Nachfrage allein aus dem europäischen Mobilitätssektor in allen BEV-Szenarien die derzeitige weltweite Produktion, insbesondere im All-In-Szenario mit 977 % der derzeitigen Lithiumproduktion. Die Einbeziehung eines weltweiten Anstiegs der Elektromobilität und des wirtschaftlichen Aufholens der übrigen Welt bis 2050 (siehe Erläuterungen in 11.2.2.2) bedeutet selbst für das 100 %-ige Elektro-szenario mit dem geringsten Lithiumbedarf (BEV Balanced) eine mehr als 36-fache Steigerung des jährlichen globalen Lithiumangebots (primär und sekundär), um den Lithiumbedarf 2050 aus der weltweiten Mobilität zu decken.

¹¹⁹ Vgl. FVV (2021).

Die gesamten inkrementellen Kosten der verschiedenen Kraftstoff-/Antriebssysteme werden für 2020 in Euro und als Nettogegenwartswert (NPV) angegeben, siehe Abbildung 29. Die gesamten inkrementellen Kosten für die Defossilisierung des gesamten europäischen (EU27+UK) Straßenverkehrssektors bis 2050 liegen zwischen 2.600 und 5.300 Milliarden Euro, was 17-34 % des jährlichen europäischen (EU27+UK) BIP im Jahr 2020 entspricht (15.600 Milliarden Euro im Jahr 2020).

Die höchsten inkrementellen Gesamtsystemkosten (in NPV) für den gesamten Straßenverkehr finden sich in den BEV-Szenarien (4.500-5.300 Milliarden Euro), gefolgt von FCEV (3.900-4.500 Milliarden Euro), wobei die Kosten für Pkw die Gesamtkosten dominieren. Die Kosten für BEV-Fahrzeuge werden durch die Batteriekosten bestimmt, die sich aus den angenommenen Reichweiten (z. B. 300-500 km für Pkw und Lkw) und den daraus resultierenden Batteriegrößen sowie den angenommenen spezifischen Batteriekosten (160 €/kWh für 2020, 120 €/kWh für 2030, 80 €/kWh für 2050) ergeben.

Die BEV-Fahrzeugkosten werden so modelliert, dass sie im Laufe der Zeit mit den angenommenen Fortschritten bei der Entwicklung der Batterietechnologie sinken. Die inkrementellen Fahrzeugkosten dominieren die Gesamtkosten für die BEV- und FCEV-Pfade und tragen zu 50 % der Gesamtkosten bei. Die niedrigsten inkrementellen Gesamtkosten für den Straßenverkehr werden für synthetische Kraftstoffe ermittelt, insbesondere aufgrund der geringeren inkrementellen Fahrzeugkosten.

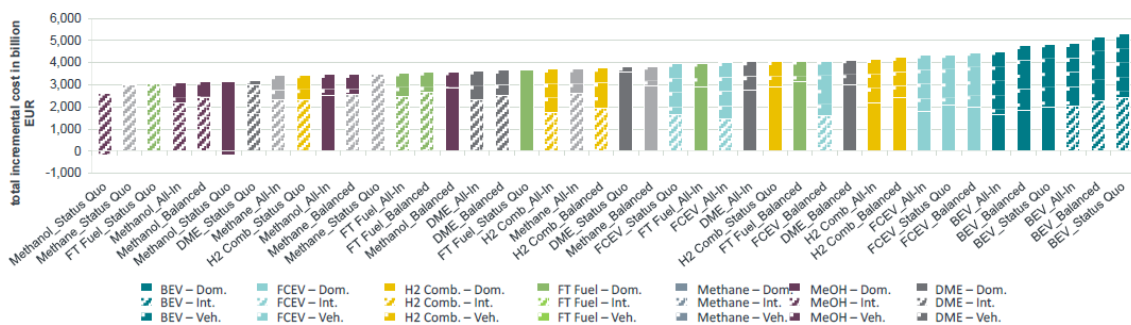


Figure 7: Total incremental costs – energy/fuel supply chain and vehicles – until 2050 in billion € [Source: Frontier Economics].

Abbildung 29: Gesamte inkrementelle Kosten der Energie-/Kraftstofflieferkette und Fahrzeuge bis 2050 in Milliarden Euro. Abbildung aus FVV (2021)¹²⁰

¹²⁰ Vgl. FVV (2021).

Die Energieerzeugungskosten sind der Hauptfaktor für die Kosten der Energie-/Kraftstofflieferkette. Die Gesamtkosten der Energie-/Brennstoffversorgungskette sind im internationalen Szenario für die meisten Brennstoffe niedriger als im nationalen Szenario, was auf einen Rückgang der Gesamterzeugungskosten zurückzuführen ist. Es wird nicht nur davon ausgegangen, dass die Kosten pro Erzeugungseinheit außerhalb Europas niedriger sind als innerhalb Europas, sondern es werden auch insgesamt weniger Erzeugungskapazitäten benötigt, da die Bedingungen für die Wind- und/oder Solarstromerzeugung besser sind. Lediglich das internationale BEV-Szenario wird aufgrund teurer Importstromleitungen voraussichtlich teurer sein als das inländische Szenario.

Die niedrigsten inkrementellen Gesamtkosten für den gesamten Straßenverkehr werden für "E-Fuel-ICE Pfade mit internationaler Energiebeschaffung" mit fortgesetzter 2020er Fahrzeugtechnologie ("Status-quo"-Pfad: ohne Hybridisierung oder Leichtbaumaßnahmen) gefunden, beginnend mit Methanol-ICE (2.600 Milliarden Euro) über FT-Benzin/Diesel-ICE (3.000 Milliarden Euro) bis hin zu H2 Comb (3.500 Milliarden Euro).

Die Steigerung der Fahrzeugeffizienz führt nicht immer zu einer Steigerung der Gesamteffizienz. Bei FCEV und allen Verbrennungsmotoren können z. B. Leichtbaumaßnahmen die kumulativen THG-Emissionen erhöhen, wenn die zusätzlichen THG-Emissionen aus der Fahrzeugproduktion die THG-Einsparungen durch Effizienzsteigerungen überwiegen. Darüber hinaus werden die niedrigsten inkrementellen Gesamtkosten mit ICE nach dem Stand der Technik (keine Hybridisierung, keine Leichtbaumaßnahmen usw.) erreicht, die mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden, da die Gesamtkosten der nachhaltigen Energie-/Kraftstoffversorgung niedriger sind als die Fahrzeugbetriebskosten für Effizienzmaßnahmen. Daher erfordert jede effiziente Politik zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen einen Ansatz zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus. Wenn sektorale Ziele festgelegt werden, müssen sie gut auf den Lebenszyklusansatz abgestimmt sein.

Da die kumulativen THG-Emissionen 2021-2050 aller Pfade von den Emissionen des Fahrzeugbetriebs mit fossilen Kraftstoffen (verbleibende Fahrzeugflotte) dominiert werden, ist ein schneller Abbau der Nutzung fossiler Kraftstoffe am wichtigsten, um die

Klimaziele zu erreichen. Die Geschwindigkeit, mit der vollständige nachhaltige Verkehrspfade eingeführt werden, und damit die schnellste Verringerung des Einsatzes fossiler Brennstoffe, ist der entscheidende Faktor für die kumulative Minimierung der Treibhausgasemissionen. Je schneller kohlenstoffneutrale Energie den bestehenden Markt durchdringen kann, desto geringer sind die kumulativen Treibhausgas-Emissionen.

Defossilisierte Drop-in-Kraftstoffe (kohlenstofffrei auf WtW-Basis) sind eine Möglichkeit, die THG-Emissionen bestehender verbrennungsmotorisch angetriebener Fahrzeuge zu eliminieren, und könnten daher eine Option für eine schnellere Einführung einer THG-neutralen Energieversorgung im Straßenverkehr sein.

Abbildung 30 fasst die Ergebnisse einer Metastudie zu den CO₂-Emissionen von Verbrennungsmotoren für PowerFuels, BEVs betrieben mit Ökostrom und FCEVs betrieben mit Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen über die gesamte Fahrzeuglebensdauer zusammen.

Die Metastudie „Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalyse im Mobilitätssektor“¹²¹ basiert auf 50 Einzelstudien zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe. Die transparenten Balken im Hintergrund der Abbildung veranschaulichen die mittleren Emissionen für die jeweilige Lebenszyklusphase. Die undurchsichtigen Balken zeigen an, wie die Ergebnisse in den Studien über die einzelnen Lebenszyklusphasen verteilt sind. Die Werte basieren auf den mittleren 50 % aller Studienergebnisse für die jeweilige Lebenszyklusphase. Die Bandbreite dieser Ergebnisse ist bereits sehr groß, nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Annahmen und Szenarien in den verschiedenen Studien. Die dünnen grauen Striche, die aus den Balken herausragen, erweitern den Bereich über die gesamte Bandbreite und stellen die maximalen und minimalen Ergebnisse für die jeweilige Lebenszyklusphase dar.

Trotz der umfangreichen Datenbasis ist zu bemerken, dass in keiner der untersuchten Studien alle fünf Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden, die für eine aussagekräftige Analyse von Relevanz sind (d. h. Fahrzeugherstellung, Herstellung der Antriebsenergie, Energieinfrastruktur (Ausbau), Fahrzeugnutzung und End-of-Life). Besonders hervorzuheben ist die Tatsache, dass die Infrastruktur zur Energiebereitstellung in der Lebenszyklusanalyse für Fahrzeuge nicht berücksichtigt

¹²¹ FVV (2020).

wird. Abhängig von der jeweiligen Studie weisen verschiedene Antriebstechnologien niedrige Emissionen über den Lebenszyklus auf, aber es gibt keine Technologie, die sich klar gegenüber den anderen durchsetzt. Somit existieren keine grundsätzlichen Bedenken die Gesamtemissionen betreffend beim Betrieb von Verbrennungsmotoren mit synthetischen Kraftstoffen.

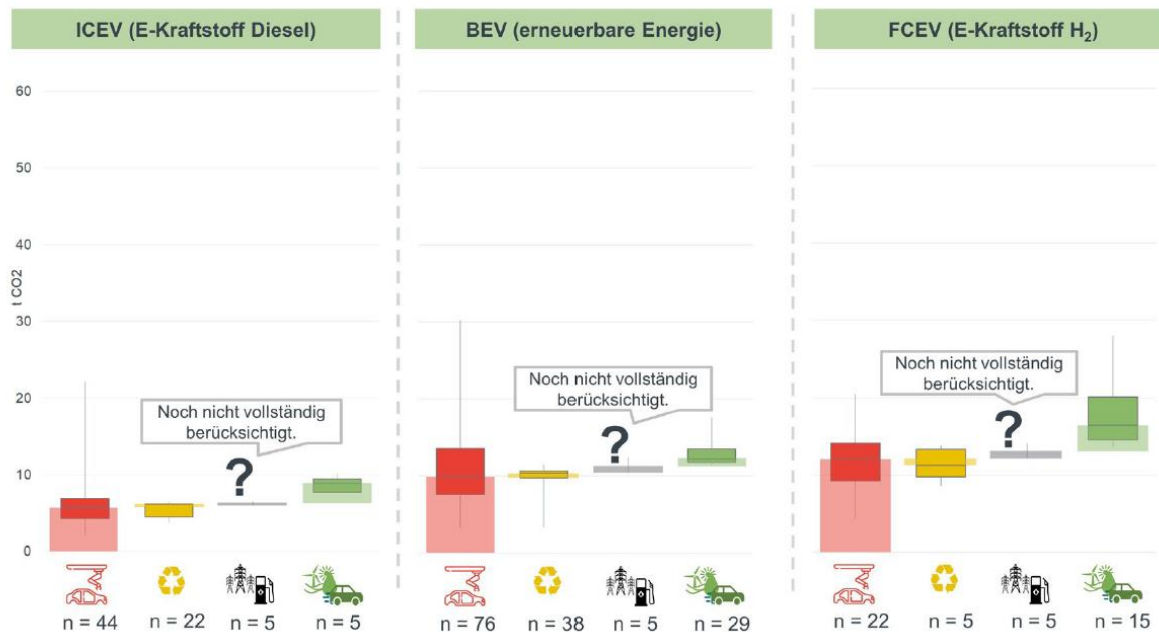


Abbildung 14: Auf Grundlage einer Lebenszyklusanalyse weisen verschiedene Antriebskonzepte ähnliche Gesamtemissionen auf
Anmerkung: Um eine grobe Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Studienergebnisse auf eine maximale Laufleistung von 150.000 km skaliert.

Abbildung 30: Vergleich der Gesamtemissionen verschiedener Antriebskonzepte auf Grundlage einer Lebenszyklusanalyse. Abbildung aus FVV (2020)¹²²

Kosteneinfluss von DAC versus CCS für die CO₂-Bereitstellung

In der Literatur werden mögliche Zielkosten in der Größenordnung von 1 Euro pro Liter Dieseläquivalent bei Importen aus Regionen mit sehr guten Solar- und Windkraftbedingungen genannt. Die angegebenen Zielkosten beinhalten die CO₂-Extraktion aus der Umgebungsluft.¹²³

Da hier CO₂ nicht aus der Luft mittels DAC sondern mittels CC aus dem Rauchgas von Kohlekraftwerken gewonnen werden soll, wird nachfolgend der Kosteneinfluss dieses

¹²² Vgl. FVV (2020).

¹²³ dena (2017).

Prozessunterschiedes abgeschätzt. Unter den Annahmen, dass die Kosten für Extraktion von CO₂ mittels CC einschließlich der Kosten für den Wirkungsgradverlust des Kraftwerks bei 70 Euro pro Tonne CO₂ liegen und die Kosten für DAC perspektivisch mindestens 200 Euro pro CO₂ betragen, ist davon auszugehen, dass der CC-Pfad zu 0,35 Euro pro Liter synthetischer Diesel niedrigeren Herstellkosten als der DAC-Pfad führt. Tatsächlich dürfte der Unterschied größer sein, da mehr als 2,65 kg CO₂ pro Liter synthetischer Diesel benötigt werden und 200 Euro pro Tonne CO₂ bei DAC an der untersten Grenze liegen. Die Zielkosten für synthetischen Diesel könnten somit bei Herstellung in sonnen- und windreichen Ländern ein Niveau von 0,60 Euro pro Liter erreichen. Dies ist immer noch mehr als die Kosten für fossilen Diesel heute aber deutlich weniger als der Preis von fossilem Diesel an den Zapfsäulen vieler Länder.

6.4 LKW und Verbrenner (HVO)

Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) ist ein synthetischer Kraftstoff auf der Basis von biogenem Material, insbesondere auf Basis von natürlichen Pflanzenölen und -fetten. Mithilfe von Wasserstoff werden diese katalytisch umgesetzt, um HVO zu produzieren. Reines HVO (HVO 100) bietet gegenüber fossilem Diesel Vorteile bei den Verbrennungseigenschaften (Zündwilligkeit, Klopfestigkeit), der Kältebeständigkeit und bei den Abgaswerten (deutlich niedrigere Feinstaub- und etwas niedrigere NOx-Emissionen). HVO 100 ist ein vollwertiger Ersatz für Diesel: Es erfüllt die Diesel-Kraftstoff-Norm (EN 590) und kann problemlos in bestehenden Tankstellen-Zapfanlagen getankt werden, auch im Wechsel mit normalem Diesel. Es ist daher von Seiten vieler Fahrzeughersteller bereits für neuere Dieselmotoren (Diesel-Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie für fast alle schweren Lkw) zur Nutzung freigegeben. Abbildung 31 zeigt die Produktionskapazitäten unterschiedlicher Regionen in den Jahren 2020 und 2025. Im Vergleich zum weltweiten Dieserverbrauch von rund 800 Millionen Tonnen, ist die HVO-Menge noch relativ gering. Bis zum Jahr 2025 werden Produktionskapazitäten installiert sein, die jährlich 30 Millionen Tonnen HVO herstellen können.

In Deutschland wurden im Jahr 2021 etwa 27 Millionen Tonnen Diesel verbraucht, was in etwa der realisierbaren Menge HVO im Jahr 2025 entspricht. Für die Produktion von

HVO kommen pflanzliche Altöle und -fette infrage, die unter aktuellen Umständen ohnehin verbrannt würden. Somit steht HVO nicht in Konkurrenz zur Produktion von Lebensmitteln. Teilweise kommen auch tierische Abfälle und solche aus der Fischverarbeitung infrage. Die CO₂-Bilanz hängt im Wesentlichen davon ab, ob der eingesetzte Wasserstoff klimafreundlich ist oder nicht. Bei der Verwendung von Low-Carbon-Wasserstoff aus erneuerbarer Energie fallen 90 % weniger Emissionen an als bei konventionellem Diesel. Wird Wasserstoff aus Erdgas (ohne Carbon Capture and Storage) verwendet, ist immer noch eine Reduktion der Emissionen um rund 50 % möglich.

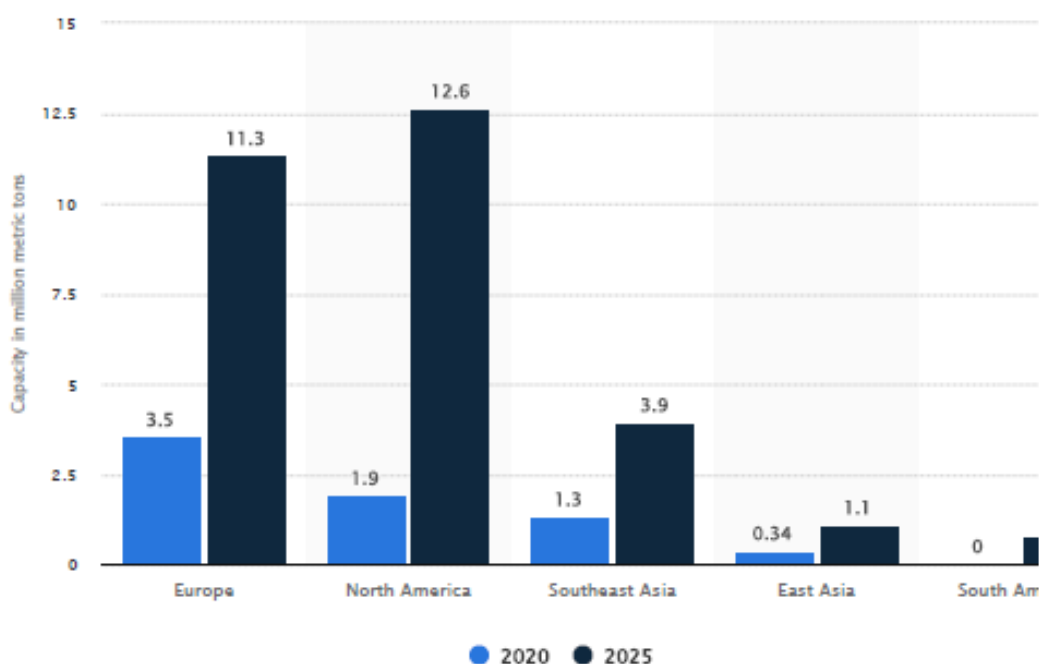


Abbildung 31: Weltweite HVO-Produktionskapazität 2020, Prognose für 2025. Abbildung aus: Statista (2021)¹²⁴

In Europa ist HVO heute schon an etwa 8.000 Tankstellen verfügbar. Eine Übersicht findet sich auf der Internetseite der Organisation eFuelsNow.¹²⁵ HVO 100 wird bereits heute an tausenden öffentlichen Tankstellen in den Nachbarländern Niederlande, Frankreich, Österreich, Italien und in Skandinavien angeboten. Dabei finden sich die höchsten Tankstellendichten für 100 %-iges HVO in den Niederlanden, Schweden und Finnland. Beimischungen von HVO von 10-50 % finden sich in den Niederlanden, Italien, Polen, Irland und Norwegen. Weiterhin gibt es größere Mengen in Österreich,

¹²⁴ Vgl. Statista (2021).

¹²⁵ Im Internet unter: <https://efuelsnow.de/tankstellen-karte>

Slowenien und Ungarn. In Deutschland konnte es aber bisher nur an einzelnen nicht-öffentlichen Tankstellen (z. B. Betriebstankstellen von Speditionen) getankt werden. Der Weg in die Praxis ist also bereits weit fortgeschritten. In Deutschland wird die HVO-Kraftstoff-Technologie insbesondere in Baden-Württemberg geduldet. Robert Bosch hat vor kurzem mit Sondergenehmigung einen größeren Feldversuch mit eigenen HVO-Tankstellen gestartet, testet den Kraftstoff in der eigenen Flotte, ist mit den bisherigen Ergebnissen zufrieden und weitet die Aktivitäten aus. Der Ansatz hat den Vorteil, dass die Fahrzeuge und ihre Motoren wie bisher genutzt werden können. Allerdings sind die Volumina nicht beliebig ausdehnbar, weil es dafür nicht genügend Reststoffe und folglich auch nicht genügend HVO-Kraftstoffe gibt, um konventionellen Diesel komplett zu ersetzen.

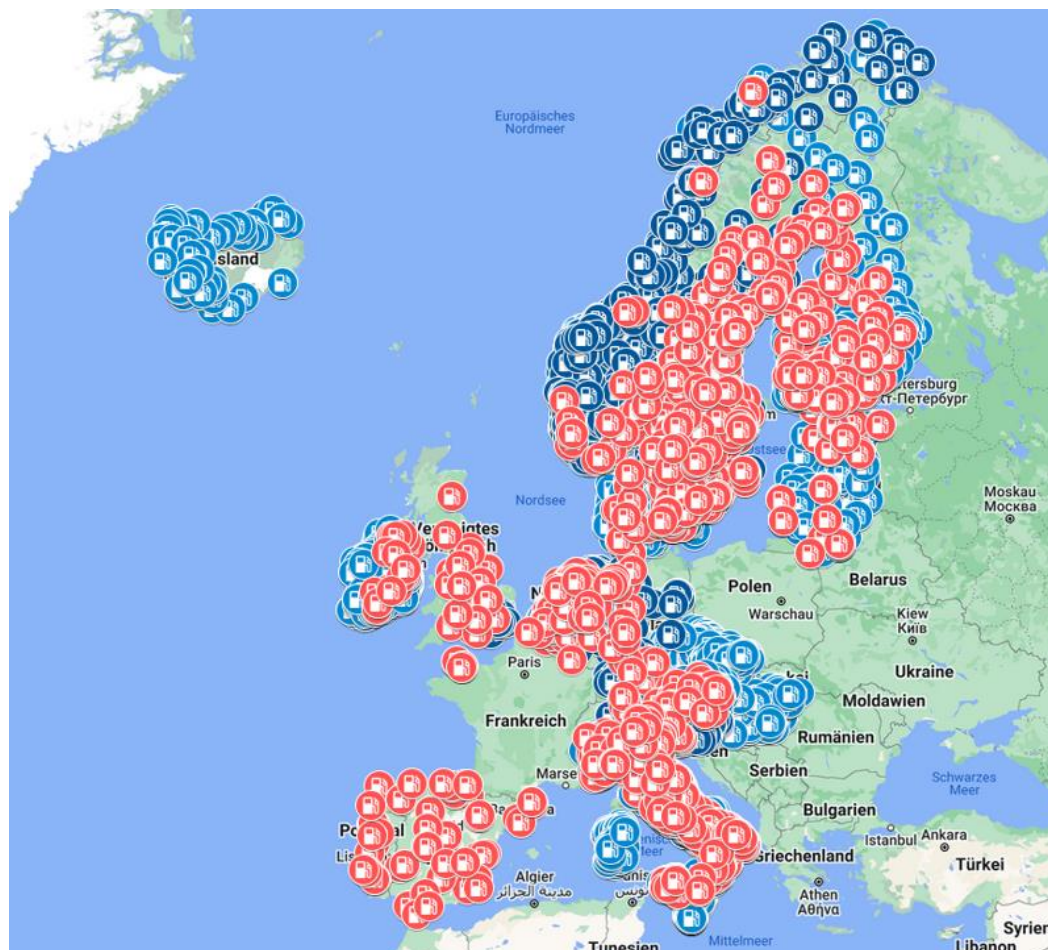


Abbildung 32: Screenshot der "Tankstellenkarte" für HVO-haltige Dieselmotorkraftstoffe in Europa. Farbige Markierungen beschreiben die unterschiedlichen HVO-Anteile der Kraftstoffe, z. B. HVO 100 (rot, vollsynthetisch), HVO-Beimischungen 1 (dunkelblau, 20-50 % HVO-Anteil), HVO-Beimischungen 2 (hellblau, weniger als 15 % HVO-Anteil)¹²⁶

¹²⁶ Vgl. die Ausführungen von eFuelsNow im Internet unter: <https://efuelsnow.de/tankstellen-karte>

Weltweit wurden im Jahr 2021 etwa 213 Millionen Tonnen Pflanzenöle produziert. Der Großteil davon wurde thermisch verwendet oder zu konventionellem Biodiesel verarbeitet. Da der weltweite Markt für Altöle und -fette wenig transparent ist, ist die Spannweite für das mögliche Potenzial von HVO relativ groß: Eventuell könnten jährlich 50-80 Millionen Tonnen hergestellt werden, was dann 6-10 % des derzeitigen Dieserverbrauchs entspräche. Auch in der Flugindustrie könnten die genannten Altöle und -fette eingesetzt werden, nachdem man sie in einem ähnlichen Prozess in Kerosin umgewandelt hat.

Abbildung 33 zeigt auf, dass der Einsatz von HVO nicht nur Vorteile in Hinblick auf Treibhausgas-Emissionen hat, sondern dass auch Emissionen reduziert werden können, die eher die Gesundheit der Menschen in direktem Sinne beeinträchtigen, wie z. B. Stickoxide (NOx) oder Kohlenstoffmonoxid (CO).

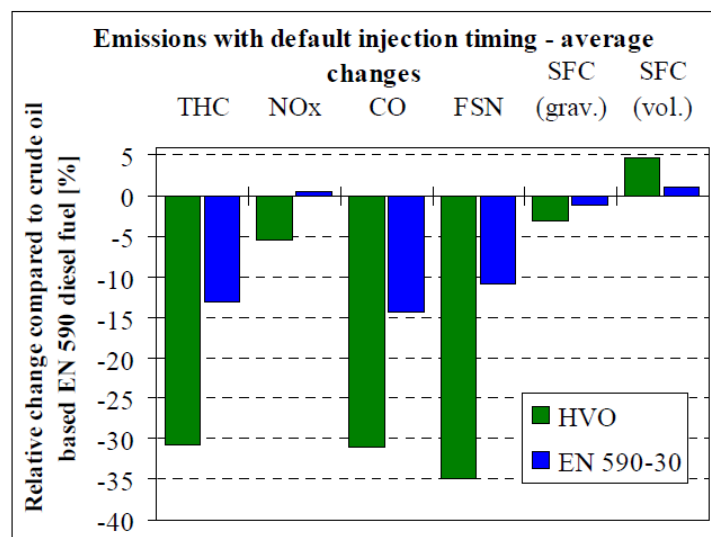
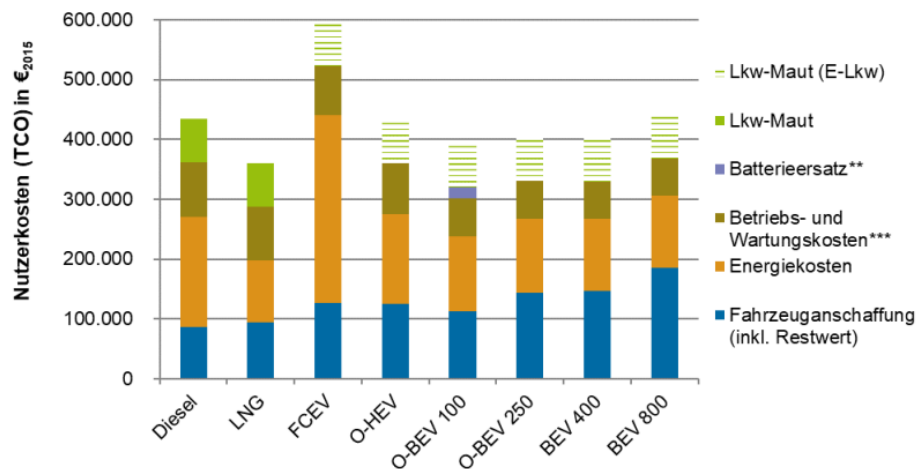


Abbildung 33: Abgasqualität von HVO und von einem HVO/Diesel 30/70-Gemisch im Vergleich zu 100% Diesel.
Abbildung aus: Aatola, H. et al. (2008)¹²⁷

Sofern sich eine Anzahl von Spediteuren für das Beibehalten der bisherigen Verbrennungsmotoren entscheidet, kann für eine Gruppe von ihnen der Wechsel auf HVO-Kraftstoffe eine einfache Möglichkeit sein, sich in Richtung Klimaneutralität zu bewegen. U. U. kann man so auch einfach Zeit gewinnen. Einige Fahrzeuge dieses Typs kann man auch einfach dazu nutzen, um Erfahrungen zu sammeln.

¹²⁷ Vgl. Aatola, H. et al. (2008), S. 7.

Abbildung 34 zeigt die Kosten unterschiedlicher Antriebssysteme in einer Modellierung im Jahr 2025 als Total Cost of Ownership (TCO), um einen groben Überblick über die Marktsituation zu bekommen.



* Kosten exkl. MwSt., 5 Jahre Nutzungsdauer, 120.000 km p.a. O-Lkw mit 50 % Fahranteil unter Oberleitung
 FCEV: Brennstoffzellen-Lkw, O-HEV: Oberleitungsgebundener Hybrid-Lkw mit Verbrennungsmotor, O-BEV 100: Oberleitungsgebundener batterieelektrischer Lkw mit 100 km elektrischer Reichweite; BEV 400/800: Batterieelektrischer Lkw mit 400/800 km Reichweite
 ** Austausch der Batterie nach Erreichen der maximalen Zyklenzahl
 *** Wartung, Reparatur, Schmierstoffe, AdBlue
 Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut (Kühnel et al. 2018)

Abbildung 34: Kosten von Sattelzugmaschinen abhängig von der Antriebsart. Abbildung aus: Ökoinstitut et al. (2020)¹²⁸

6.5 Case-Study: Indien

Insbesondere Kapitel 2 hat gezeigt, welche große Bedeutung die fossilen Energieträger, allen voran Kohle, für zahlreiche Entwicklungs- und Schwellenländer noch lange haben werden und dass u. a. aus Kostengründen nicht von einer zeitnahen Elektrifizierung des Verkehrs auszugehen ist. Eine Defossilisierungsstrategie nach den Vorstellungen der EU ist für diese Länder nicht finanzierbar.

Daher ist es von elementarer Bedeutung, dass zum einen die Klimaschutzmaßnahmen mit geringen Vermeidungskosten in den Fokus rücken und zum anderen länderspezifische Lösungen gefunden und von den westlichen Staaten mitfinanziert werden. Ideologische Maximalforderungen werden mit zunehmendem Unverständnis der betroffenen Staaten abgelehnt.

¹²⁸ Vgl. Öko-Institut e.V. et al. (2020), S. 18.

Indien ist mit deutlichem Abstand nach China der zweitgrößte weltweite CO₂-Emittent aus Kohlekraftwerken. Zudem liegen über Indiens CO₂-Emissionen vergleichsweise umfangreiche Informationen vor. Zwei Gründe weshalb nachfolgend für Indien exemplarisch grob eine mögliche Roadmap zur Klimaneutralität skizziert werden soll. Nach unserer Einschätzung bietet es sich an, mit zusätzlichen und zeitlich höher aufgelösten Daten ausgewählte typische Entwicklungs- und Schwellenländer zu betrachten. So ließen sich bislang uns nicht bekannte länderspezifische kostenoptimale Defossilisierungspfade mit belastbaren Kostenabschätzungen ermitteln.

Indien ist mit einer Bevölkerung von 1,4 Milliarden Menschen die Heimat von einem Fünftel der Weltbevölkerung. Indiens Energieverbrauch weist eine steigende Tendenz auf. Im Jahr 2022 lag der Pro-Kopf-Verbrauch bei niedrigen 7.143 kWh. Im Vergleich liegen der Verbrauch in Deutschland bei 41.000 kWh, in den USA bei 79.000 kWh und im Oman bei 91.000 kWh¹²⁹ und die pro Kopf Emissionen bei 2 Tonnen CO₂ im Vergleich zu etwa 8 tCO₂ pro Jahr für Europa.

Abbildung 35 zeigt, dass die westliche und nordwestliche Region Indiens die höchsten Energie-Erzeugungskapazitäten besitzt, wohingegen die östliche und nordöstliche Region trotz ihrer großen Kohlevorkommen, aufgrund rückständiger industrieller Entwicklung, unterversorgt sind. Da die Grafiken die installierte Leistung zeigen, die Stromerzeugung von Wind und Sonne wegen geringer Vollaststunden etwa einem Viertel, der von Grundlastkraftwerken entspricht, dürfte der Anteil des von Windkraft- und Solaranlagen bereitgestellten Energieanteils heute bei nur ca. 8 % liegen. Der Weg zur Klimaneutralität ist weit.

Im Jahre 2070 beabsichtigt Indien Klimaneutral zu sein. Bis 2032 werden die Energiegewinnung aus Kohle weiter massiv steigen und mit ihr die Gesamtemissionen aller Sektoren um 64 %. Da die Energieerzeugung nur um 41 % steigen soll, wurden offensichtlich überproportionale Emissionssteigerungen in anderen Sektoren unterstellt. Im Gegensatz zur Steigerung der Energieerzeugung um 41 % soll die installierte Leistung um 110 % zunehmen. Hintergrund ist der wachsende Anteil

¹²⁹ Vgl. Ritchie, H. et al. (2023).

fluktuierender Erneuerbare, deren Vollaststunden bei ca. einem Viertel derer der Grundlastfähigen Kraftwerke liegen.

Die Autoren besitzen Erfahrung in der Ermittlung kostenoptimaler Erzeugungsstrukturen klimaneutraler Energieversorgungssysteme auf Basis von Simulationsrechnung. Hierbei werden zeitlich hochaufgelöste Daten fluktuierender Energieträger wie Wind und Sonne verwendet, um die erforderliche zeitliche Einsatzplanung und Größe von klimaneutralen Grundlastkraftwerken, sog. „Gaspeakern“, Elektrolyseuren, Speichern und Netzen bei gegebenem zeitlichen Lastverlauf zu bestimmen.

Ergänzend kann bei Bedarf der Stromfluss zwischen benachbarten Ländern über sogenannte Koppelstellen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse besitzen hohe Plausibilität und decken sich weitgehend mit fremden Untersuchungen. Abbildung 36 zeigt schematisch die Berechnungslogik.

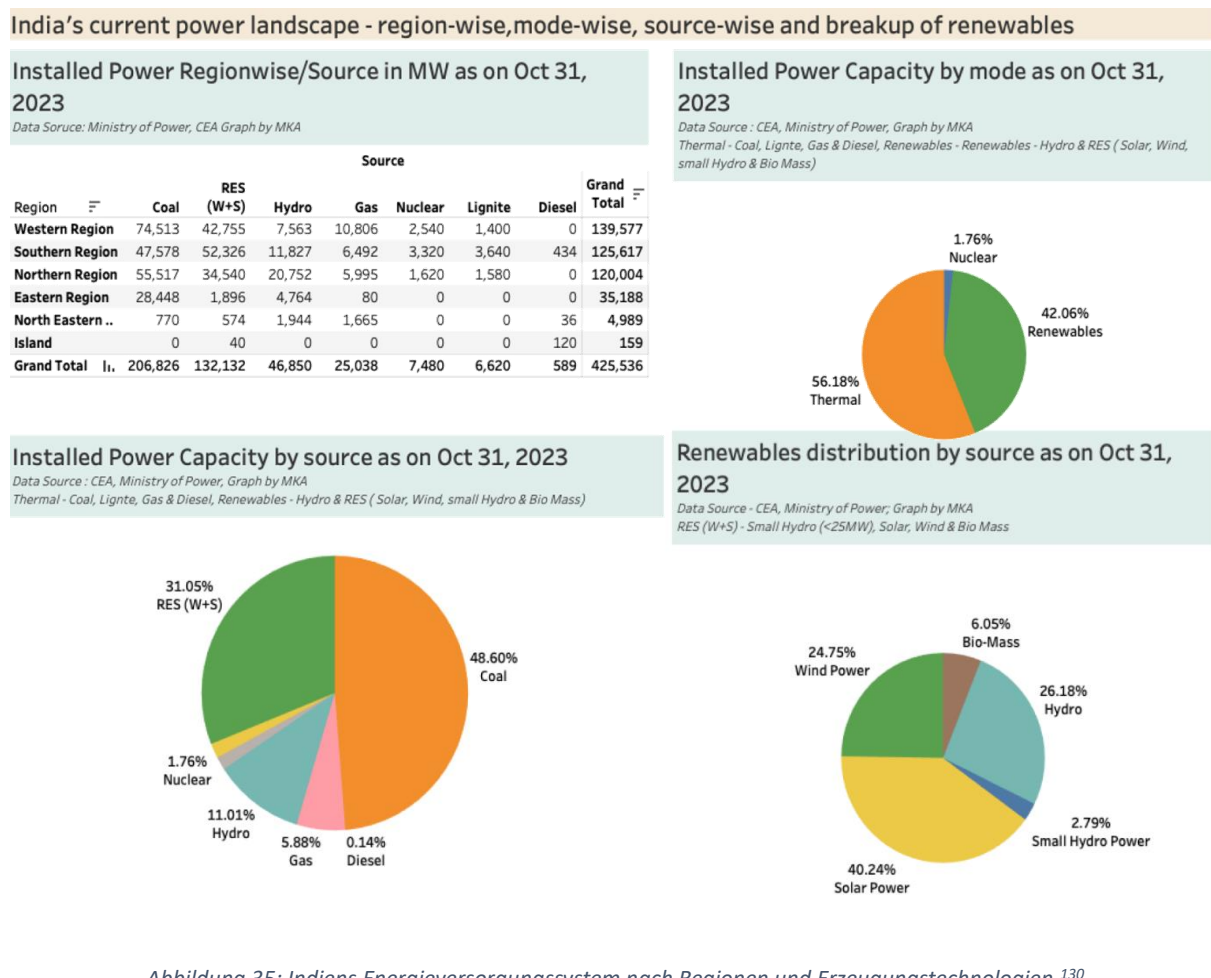


Abbildung 35: Indiens Energieversorgungssystem nach Regionen und Erzeugungstechnologien.¹³⁰

¹³⁰ CEA (2023).

Tabelle 5: Indiens geplanter Weg zu Net Zero.¹³¹

		2023	2026	2031	2050
Spitzenlast	GW			366	
Energieerzeugung	TWh	1.750		2.473	
davon Kohle	TWh	1.080		1.307	
davon Kohle		61,7%		52,9%	
davon Thermisch		75,7%		51,0%	
davon Nuklear		2,6%		4,7%	
davon Wasser		11,0%		9,5%	
davon Wind und Sonne		10,1%		-	
davon Sonne		-		25,0%	
davon Wind		-		10,0%	
davon Biomasse		0,1%			
davon Import		0,5%			
		100%		100%	
installierte Kapazität	GW	425		900	
davon Kohle	GW		0	259	
davon Solar	GW	72	1.400	365	800
davon Wind	GW	44	650	135	270
davon Wasser	GW	46		89	
davon Nuklear	GW		140	20	
davon andere Erneuerbare	GW			48	
Emissionen alle Sektoren	GtCO ₂	2,8	NZE	4,6	

¹³¹ CEA (2023).

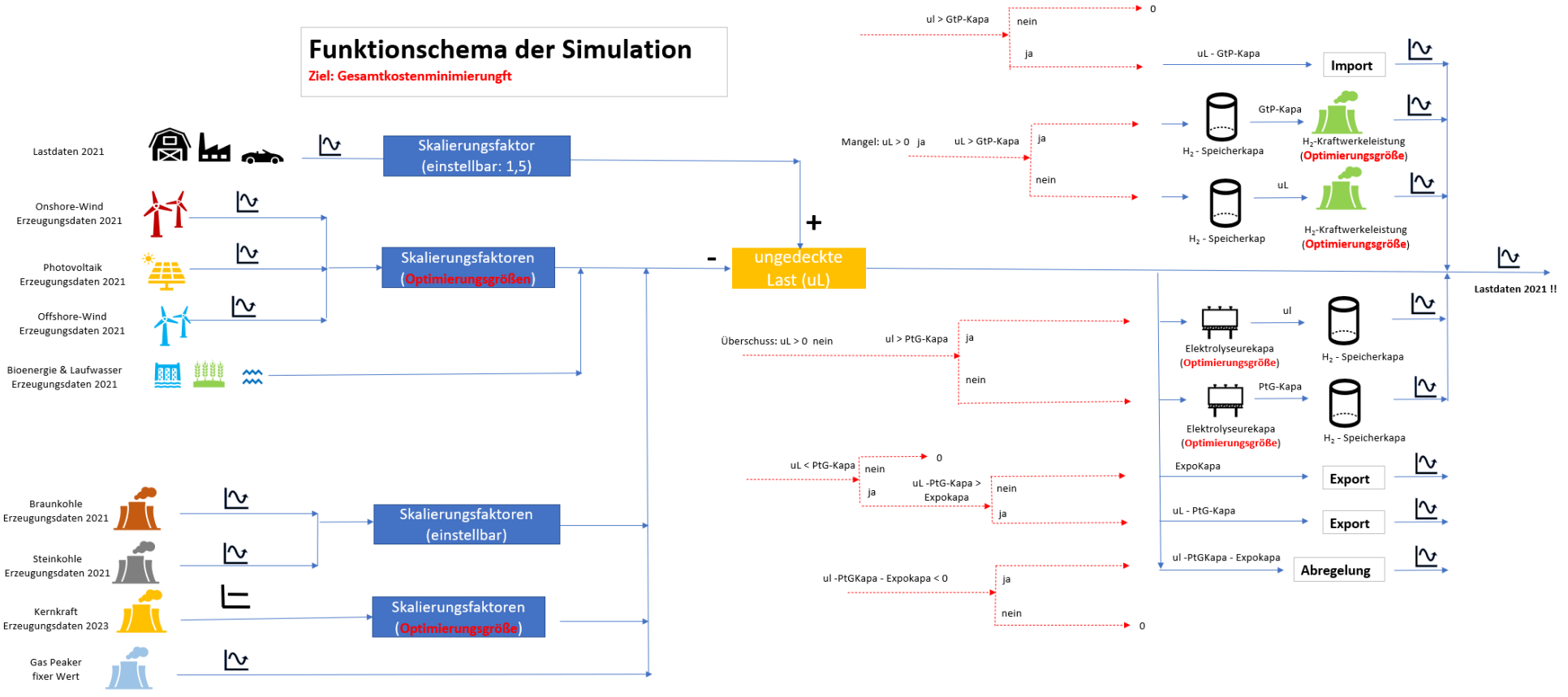


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Energiesystem-Simulation von Global Energy Solutions.

Folgende recht allgemeingültige Aussagen lassen sich aus den Erfahrungen mit dem Simulationsmodell ableiten:

- Fluktuierende, d. h. zeitlich nicht planbare erneuerbare Energiequellen, besitzen in einem Land mit der Größe Deutschlands ab einem Erzeugungsanteil von ca. 30 % eine erhebliche Gleichzeitigkeit, da die Anlagen in allen ertragreichen Regionen vertreten sind. Bei einem weiteren Ausbau wird der zeitliche Verlauf nur noch unwesentlich geglättet. Die „Erzeugungsspitzen“ wachsen und die „Erzeugungstäler“ bleiben weitgehend bestehen. Studien zeigen, dass die Gleichzeitigkeit auch in Europa erheblich ist, da sich dominierende Großwetterlagen deutlich über die Landesgrenzen hinweg ausdehnen. Ein Zubau von Windkraft und Solaranlagen reduziert den Ausgleichsbedarf durch flexible Kraftwerke oder Speicher daher nicht wesentlich, vorausgesetzt, die Energie wird nicht mittels Hochspannungsgleichstromübertragungstechnik (HGÜ) über viele tausend Kilometer aus anderen Wetterzonen transportiert. Aber auch dann bleibt die Wirkung des Tagesganges auf die Photovoltaik und der Jahreszeiten auf die Windkraft bestehen.
- Mit zunehmendem Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien nimmt der Bedarf an steuerbaren Kapazitäten überproportional zu.
- Da die Spitzenleistungen der fluktuierenden erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen um ein Vielfaches über der Spitzenlast liegen, für die ein klassisches Netz ausgelegt ist, erfordern fluktuierende Erneuerbare erheblich höhere Netzkapazitäten, sofern der Überschussstrom nicht vollständig abgeregelt werden soll. Insbesondere die Photovoltaik besitzt eine erhebliche Volatilität.
- Die beiden letztgenannten Punkte bedingen, dass die Integrationskosten (LFSCO_E) von Windkraft- und Solaranlagen überproportional mit ihrem Anteil an der Stromerzeugung steigen, da in zunehmendem Maße flexible Kraftwerke, kurz und Langzeitspeicher sowie Netzwerke für alle Spannungsebenen benötigt werden.
- Dies führt dazu, dass der kostenoptimale Anteil an Windkraft- und PV-Anlagen in einem klimaneutralen Energieversorgungssystem deutlich unter 100 % liegt. Je niedriger die Kosten der Stromerzeugung mittels steuerbarer Kraftwerke, je niedriger die Vollaststunden der fluktuierenden Erneuerbaren und je ungleichmäßiger ihr zeitlicher Verlauf, desto niedriger ist ihr kostenoptimaler Anteil.

- So liegt in Zentraleuropa bei Einsatz von Kernenergie (Erzeugungsvollkosten 60 Euro/MWh laut IEA) der kostenoptimale Anteil fluktuierender Erneuerbarer bei unter 50 %. Dies erklärt sich durch die geringen Stromkosten der Kernenergie und die bei diesem Anteil noch mittels weniger flexibler Gaskraftwerke und kleiner Speicher kompensierender Angebotsschwankungen der fluktuierenden Erneuerbaren (Strategie Frankreich).

Die Ermittlung der kostenoptimalen Kraftwerksstruktur erfordert zeitlich hochaufgelöste Daten von der Last und der Erzeugung. Da diese für Indien aktuell nicht vorliegen, wird nachfolgend eine Abschätzung vorgenommen, die Indiens Herausforderungen auf dem Weg zur Net Zero verdeutlichen.

Indien will 2070 klimaneutral sein. Im Zeitraum um 2050 müssen wesentliche Schritte auf dem Weg zu diesem Ziel gegangen sein. Die Abschätzung baut auf den oben dargestellten Aussagen auf.

Tabelle 6 zeigt die Emission Indiens im Jahr 2022 sowie daraus abgeleitete Kennzahlen. Zu Vergleichszwecken sind die entsprechenden Werte und Kennzahlen Deutschlands aufgeführt. Unter der Annahme, dass Indien bis 2050 einerseits seinen Energieverbrauch pro Kopf deutlich steigern wird – hier wurde ein Faktor von etwa drei angesetzt – und gleichzeitig seine CO₂-Emissionsintensität, gemessen in Emission pro USD BIP durch Effizienzsteigerung reduziert – es wurde eine Effizienzsteigerung von 30 % auf das deutsche Niveau angenommen – und hierbei die Gesamtemissionen pro Kopf nicht steigen dürfen, ergeben sich die grau dargestellten Werte. Ferner wurde angenommen, dass die indische Bevölkerung kurzfristig weiterhin wächst und mittelfristig, vergleichbar mit China, wieder auf das heutige Niveau sinkt.

Diese Annahmen erlauben eine Steigerung des BIP um den Faktor 4,3 und des Primärenergieverbrauchs um den Faktor 2,9, was im Vergleich zur vergangenen Entwicklung Chinas ein geringer Wert ist.

Unter der Annahme eines deutlichen Ausbaus klimaneutraler Energiequellen, insbesondere von Windkraft und PV, lässt sich der Primärenergieverbrauch der thermischen Kraftwerke von 75 % auf 20 % senken und dies bei absolut unveränderten Gesamtemissionen, da die Emissionen pro Kopf trotz Wirtschaftswachstums unverändert mit nur 2 Tonnen CO₂ pro Kopf und Jahr angenommen wurden. Auch dies ist eine optimistische Annahme. Der Wert für Deutschland liegt

wegen seines hohen fossilen Erzeugungsanteils ohne CCS bei 8 tCO₂ pro Kopf und Jahr. Wird zusätzlich ein Großteil der fossilen Emissionen mittels CCS abgefangen und Kraftstoffe für den Verkehrssektor, sowie synthetisches Methan für Industrie

Tabelle 6: CO₂-Emissionen Indiens und Deutschlands im Vergleich als Projektion bis 2050. Eigene Darstellung.

	Einheit	Indien	Deutschland	Indien	Indien
		2022	2022	2031	2050
Bevölkerung	Mrd	1,42	0,08		1,4
GDP	Mrd USD	3.350	4.090		4.359
Primärenergieverbrauch	TWh	10.123	3.401		9.400
davon Thermisch		75,7%		51,0%	20,0%
davon Nuclear		2,6%		4,7%	10,0%
davon Hydro		11,0%		9,5%	15,0%
davon Wind und Sonne		10,1%		-	-
davon Sonne		-		25,0%	35,0%
davon Wind		-		10,0%	20,0%
davon Biomasse		0,1%			
davon Import		0,5%			
		100%		100%	100%
CO ₂ -Emissionen	MtCO ₂ /a	2.864	665		2.800
davon Kohlekraftwerke	MtCO ₂ /a	1.859			
davon Öl	MtCO ₂ /a	685			
davon Gas	MtCO ₂ /a	124			
davon Zement	MtCO ₂ /a	164			385
		2.832			
davon Thermisch					1.841
Öl davon Transport	MtCO ₂ /a	270	147		574
					2.800
CO ₂ -Emission Transport pro GDP	kgCO ₂ /USD	0,0806	0,0360		0,04
Energieverbrauch pro Kopf	kWh/a/Pers	7.143	40.977		21.000
CO ₂ -Emissionen pro Kopf	tCO ₂ /a/ Pers	2,0	8,0		2,0
CO ₂ -Emissions pro GDP	kgCO ₂ /USD	0,28	0,195		0,195
USD GDP pro Jahr und Kopf	USD/a und Pers	2.359	49.100		10.256
	rot	eigene Annahmen			
	grau	berechnete auf Basis der Annahmen			

und den Gebäudesektor hiermit produziert, erscheint Net Zero wie von Indien geplant im Jahr 2070 nicht ausgeschlossen. Andererseits wird bereits durch diese einfache Abschätzung offensichtlich, welche gigantische Herausforderung es darstellt, Net Zero bei erheblichem Wachstum, erfahrungsgemäß erst einmal nicht steigender CO₂-Effizienz und einem Wohlstandsniveau weit unter dem von Industrienationen umzusetzen.

Es leuchtet ein, dass auf diesem Weg nur Maßnahmen mit den geringsten Vermeidungskosten zur Anwendung kommen dürfen, weshalb sich ein Abriss vergleichsweise junger fossiler Kraftwerke verbietet. Zwar macht Indien seit einigen Jahren erste Erfahrungen mit CCS-Anlagen¹³² und CO₂-Vermeidungskosten dieser Anlagen werden mit 30 US-Dollar pro Tonne CO₂ angegeben. Sie liegen damit deutlich unter denen der Elektromobilität oder der Gesamtsystemkosten von Windkraftanlagen und PV inklusive Netzausbau und Speicher. Jedoch finden sich in Indien noch keine so ausgeprägten Aktivitäten im Umgang mit der CC-Technologie wie in anderen Staaten, z. B. den USA oder Canada.

In der Folge wird eine Potentialabschätzung für den Einsatz von CCU für Indien vorgenommen. Indien deckt seinen Energiebedarf zu nahezu 80 % aus fossilen Energiequellen. Kohle ist der mit weitem Abstand dominierende Energieträger. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese Dominanz noch über einige Jahrzehnte bestehen bleibt. CCU wird daher wegen geringer Vermeidungskosten im Kampf gegen den fortschreitenden Klimawandel eine besondere Bedeutung erlangen. Im IEA- Sustainable Development Scenario, in dem die globalen CO₂-Emissionen aus dem Energiesektor bis 2070 netto auf Null sinken, macht CCUS fast 15 % der kumulativen Emissionsreduzierung aus. Der Beitrag von CCUS wächst mit der Zeit und erstreckt sich auf fast alle Teile des globalen Energiesystems, siehe Abbildung 37: Weltweit abgefangenes CO₂ im Sustainable Development Scenario der Internationalen Energieagentur, IEA..

Eine Abschätzung der Kosten von CCS für ein ganzes Land wie Indien ist schwierig, da es zum einen zahlreiche Verfahrensvarianten gibt und die Investitionskosten stark schwanken können. Abgeschiedenes CO₂ lässt sich vielfältig nutzen. Zu den neuen

¹³² Vgl. Finanzen100 (2017), Zukowski (2017).

Wegen der CO₂-Nutzung gehören Kraftstoffe (Verwendung von CO₂-Kohlenstoff zur Umwandlung von Wasserstoff in einen synthetischen Kohlenwasserstoff-Kraftstoff),

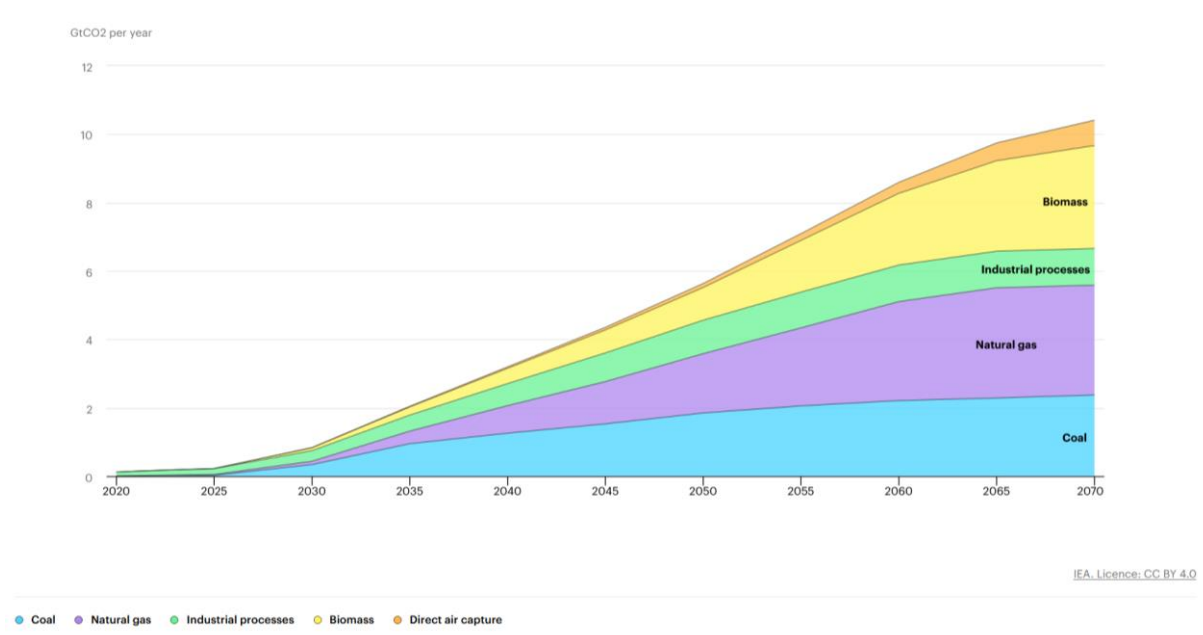


Abbildung 37: Weltweit abgefangenes CO₂ im Sustainable Development Scenario der Internationalen Energieagentur, IEA.¹³³

Chemikalien (Verwendung von CO₂-Kohlenstoff als Alternative zu fossilen Brennstoffen bei der Herstellung einiger Chemikalien) und Baumaterialien (Verwendung von CO₂ bei der Herstellung von Baumaterialien als Ersatz für Wasser in Beton oder als Rohstoff für dessen Bestandteile). Nachfolgend werden die potentiell verfügbaren Mengen an synthetischen Kraftstoffen und deren Kosten abgeschätzt, siehe dazu Tabelle 7.

Unter der Annahme, dass im Jahr 2050 die Emissionen Indiens auf 2.800 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr gesunken sind und hiervon nur 20 % genutzt werden, um synthetische Kraftstoffe zu erzeugen, ergibt sich ein Potenzial von 193 Millionen Tonnen Diesel pro Jahr. Deutschland verbraucht 52 Millionen Tonnen Kraftstoffe (Diesel plus Benzin) für den Straßenverkehr pro Jahr. Setzt man zur Orientierung den deutschen Verbrauch auch für Indien an, ließe sich 21 % des Bedarfs Indiens decken. Werden hingegen nicht nur 20% der Emissionen, sondern 50% genutzt ließen sich 53% des Bedarfs an Diesel und Benzin decken. Diese überschlägige Betrachtung zeigt, dass CCU einen signifikanten Beitrag für die Kraftstoffbereitstellung und CO₂-

¹³³ IEA (2021a).

Minderung leisten kann. Die für eine 21% synthetische Kraftstoffversorgung benötigte Strommenge liegt bei ca. 4.000 TWh pro Jahr etwa 14 % des Energiebedarfs Indiens in 2050.

Die der Literatur zu entnehmenden Kosten für die Kosten von hochreinem CO₂ aus Punktquellen liegen je nach Verfahren in einem Bereich von 30 bis 80 Euro pro Tonne. In diesem Beispiel wurden Kosten für CO₂ mit 45 Euro pro Tonne angesetzt. Basis ist die Case Study einer Nachrüstung einer CO₂-Abscheidungsanlage am kanadischen 300 MW Kohlekraftwerk Shand in Saskatchewan. Die Anlage wurde auf 2 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr ausgelegt und die Amortisationszeit mit 30 Jahren angesetzt. Die Abscheidungsrate liegt bei bis zu 97 % und der Wirkungsgradverlust durch CC des Kraftwerks bei 10 %, d.h. der Wirkungsgrad sinkt von 43 % auf 39 %.

Tabelle 7: Abschätzung der in Indien mittels Fischer Tropsch Synthese produzierbaren synthetischen Kraftstoffe.

	2022	Einheit		2050	Einheit
CO₂-Emissionen	2.864	MtCO ₂ /a		2.800	
davon Kohlekraftwerke	1.859	MtCO ₂ /a		-	
davon Öl	685	MtCO ₂ /a		-	
davon Gas	124	MtCO ₂ /a		-	
davon Zement	164	MtCO ₂ /a		385	
	2.832				
			abgefangen	Rest 2050	
Abgefangene CO₂-Emissionen	2.864	MtCO ₂ /a		578	
davon Kohlekraftwerke	1.859	MtCO ₂ /a	25 %	465	
davon Öl	685	MtCO ₂ /a	0 %	-	
davon Gas	124	MtCO ₂ /a	25 %	31	
davon Zement	164	MtCO ₂ /a	50 %	82	
	2.832				
CCU: Diesel					
Input: CO ₂	578	MtCO ₂ /a			
Input: Strom Elektrolyse		MWhStrom/ tDiesel	21	4.044	TWhStrom/a
Input: Strom Meerwasserentsalzung					
Output: Diesel		tCO ₂ /tDiesel	3	193	MtDiesel/a
rot	eigene Annahmen				
grau	berechnete auf Basis der Annahmen				

Für zukünftige Entwicklungen wird ein Gesamtwirkungsgrad von ca. 80 % im industriellen Maßstab erwartet. Damit sinken die Investitions- und Betriebskosten für Power-to-X-Produkte wie synthetische Kraftstoffe deutlich.¹³⁴

Typische Betriebstemperaturen von SOEC-Elektrolyseuren (solide oxide electrolyzer SOEC) liegen bei 700-1000 °C. SOEC-Elektrolyseure besitzen aufgrund ihrer hohen Betriebstemperatur eine verbesserte Kinetik, d. h. einen höheren Wirkungsgrad, und können als sogenannte Co-Elektrolyse-Einheit betrieben werden. Bei der Co-Elektrolyse wird nicht nur Wasser, sondern auch CO₂ abgebaut. Dieses Elektrolyseverfahren ist besonders für Power-to-Liquid (PtL)- und Power-to-Fuel (PtF)-Prozesse interessant, da es die Erzeugung von Synthesegas aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid in einem einzigen Prozessschritt ermöglicht. Abbildung 38 zeigt das Verfahren.

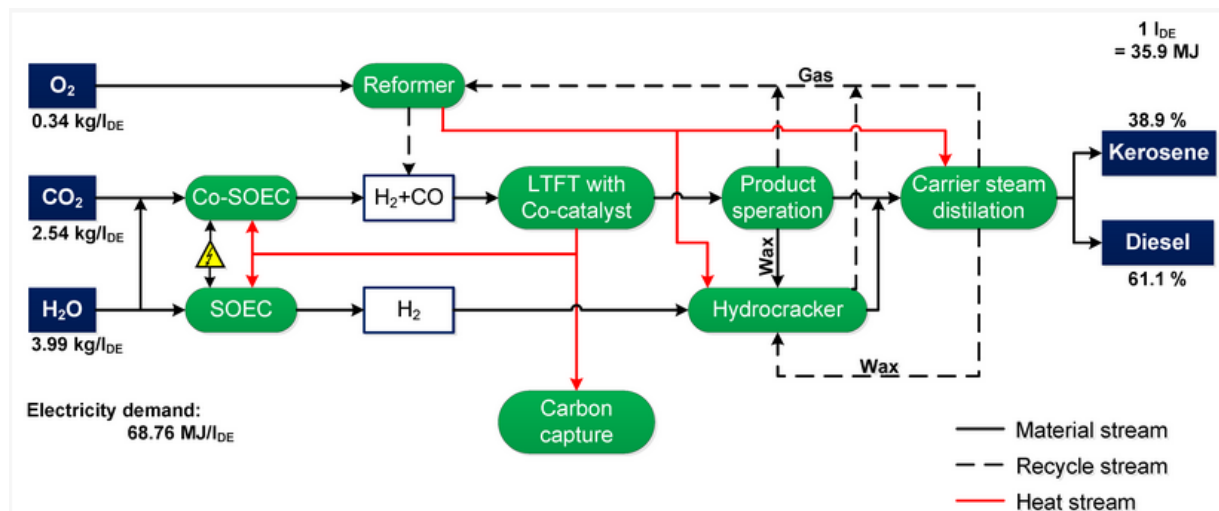


Abbildung 38: Co-Elektrolyse zur Herstellung von synthetischem Kerosin und Diesel. Abbildung aus: Peters et al. (2022)¹³⁵

Peters et al. (2022) haben eine techno- ökonomische Analyse für eine Anlage mit einem CO₂-Massenstrom von 100 Tonnen CO₂ pro Stunde für den Standort Deutschland vorgenommen. Dies entspricht den Emissionen eines 300 MW Steinkohlekraftwerkblocks. Setzt man in die veröffentlichte Kostenberechnung einen CO₂-Preis von 45 Euro pro Tonne CO₂ und einen Strompreis von 22 Euro pro MW ein, erhält man für das abgebildete Verfahren Kosten für Diesel in der Größenordnung von 1,20 Euro pro Liter. Bei Berücksichtigung der in der Regel niedrigeren Investitions- und

¹³⁴ Vgl. BMBF (2019).

¹³⁵ Vgl. Peters et al. (2022).

Lohnkosten in Indien sowie von Skaleneffekten bei Einsatz des Konzeptes für deutlich größere Kraftwerke sind Kosten je Liter Diesel um einen Euro zu erwarten.

Unterstellt man darüber hinaus, dass im Jahr 2050 in Indien ein CO₂-Preis existiert, reduzieren sich die aktuell angenommenen CO₂-Abscheidekosten von 45 Euro pro Tonne erheblich und können im günstigen Fall sogar zu einem Ertrag werden. Da die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die CO₂-Kosten den größten Einfluss auf den Dieselpreis besitzen, würde ein CO₂-Preis den Preis pro Liter synthetischen Diesels nochmals spürbar senken.

6.6 Nature-based Solutions nutzen und finanzieren

Bei allen technischen Optionen Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren und zu vermeiden, gerät häufig die Natur aus dem Blickfeld. Dabei ist sie die Grundlage allen Lebens auf der Erde. Aus diesem Blickwinkel ist das Narrativ häufig, dass die Natur geschützt und das, was von ihr noch übrig ist, erhalten oder sogar wiederhergestellt, restauriert werden soll. Wichtig ist jedoch, dass Klimaschutz und Naturschutz nicht zwei voneinander getrennte Bereiche sind. Wir müssen die Natur nicht vor dem Klimawandel beschützen. Genauso wenig ist Naturschutz etwas, das sich nur reiche Länder als Teil ihres Wohlstands leisten können. Natur- und Klimaschutz sind zwei Seiten derselben Medaille. Die Natur ist ein Schlüsselement für erfolgreichen Klimaschutz und die technische Komponente kann geschickt mit der biologischen Komponente verknüpft werden.

Des Weiteren sind die verschiedenen Ökosysteme, die Vielfalt der Arten und die genetische Vielfalt¹³⁶ innerhalb der einzelnen Spezies die Grundlage dafür, dass sich das Leben der Welt – ob Pflanzen oder Tiere – an sich verändernde Umweltbedingungen, wie sie durch den Klimawandel entstehen, anpassen kann. Funktionierende Ökosysteme wie die Ozeane und die Böden sind die Grundlage unserer Lebensmittel. Ohne sie kann sich die menschliche Zivilisation nicht ernähren. Über die Ozeane, die Böden und die Pflanzen entzieht die Natur der Atmosphäre schon heute bis zu 20 Milliarden Tonnen CO₂.¹³⁷ Ein wichtiger Baustein ist es, die Fähigkeit der Natur zur Absorption von CO₂ weiter auszubauen und vorhandene

¹³⁶ Alle drei zusammen werden unter dem Oberbegriff „Biodiversität“ zusammengefasst.

¹³⁷ Vgl. Friedlingstein et al. (2022), FAO (2022a, 2022b).

Ökosysteme zu stärken. Wie im Abschlussbericht des Projekts „Global Energy Perspectives“ beschrieben, streben wir eine zusätzliche jährliche Menge von bis zu 10 Milliarden Tonnen CO₂ an, die verschiedene Ökosysteme aus der Atmosphäre ziehen können. Synthetische Kraftstoffe sollen in unserem Ansatz ein wesentliches Element sein, um die Finanzierung von Nature-based Solutions zu ermöglichen. Fängt man das CO₂ an einer Punktquelle, z. B. einem Kohlekraftwerk, ab und nutzt das CO₂ zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe, ist das Kohlekraftwerk klimaneutral. Bei der Verbrennung im Motor entsteht jedoch CO₂. Allerdings emittiert das Fahrzeug dabei keinen neuen Kohlenstoff, der in Form von Öl aus den fossilen Reserven der Erde entnommen wurde, sondern den Kohlenstoff, der in der Kohle gebunden war. Insgesamt ist also in etwa nur die Hälfte des Kohlenstoffs in der Atmosphäre, weil man das Atom zweimal energetisch verwendet.

Um auch den letzten Prozess, die Verbrennung des Kraftstoffs, netto klimaneutral zu stellen, können im entsprechenden Umfang natürliche CO₂-Senken (wieder) aktiviert werden. Der Kohlenstoff aus dem Verbrennungsmotor wird durch die Natur wieder aufgenommen. Mit jedem Liter synthetischen Kraftstoffs könnte also der Aufbau des entsprechenden Anteils der Natur finanziert werden, wenn die Kosten dafür eingepreist würden. Dann wäre das Kohlekraftwerk und das Fahrzeug klimaneutral. Je nachdem, wie die Regulierungen dazu ausgestaltet werden, könnten die Kosten sogar auf die Wertschöpfungskette der synthetischen Kraftstoffe verteilt werden. Der Tankstellenbetreiber, der Anbieter des Transports sowie der Hersteller der Kraftstoffe könnte einen Anteil übernehmen.

Die wichtigsten Bausteine der Nature-based Solutions sind aus unserer Sicht der konsequente Schutz der bestehenden Regenwälder. Das sind in etwa 1 Milliarde Hektar. Hier liegen die Ökosysteme mit der höchsten Biodiversität. Der Schutz der Regenwälder inklusive der anderen tropischen Wälder würde die jährlichen Emissionen um rund 4 Milliarden Tonnen CO₂ verringern. Das sind etwa 10 % der jährlichen globalen Emissionen.¹³⁸ Außerdem besteht Potential für weltweit 1 Milliarde Hektar Aufforstung und 1 Milliarde Hektar Wiederinstandsetzung degradiertes Böden. Aktuell verlieren wir etwa 100 Millionen Hektar guter Böden jedes Jahr.¹³⁹

¹³⁸ Vgl. FAO (2022a).

¹³⁹ UNCCD (2023).

Wälder und Böden können je nach Region unterschiedliche große Mengen an CO₂ pro Hektar und Jahr aufnehmen. Tendenziell kann ein Boden in der Anfangsphase bei richtiger Bewirtschaftung viel CO₂ aufnehmen, bis sich langsam eine Sättigung einstellt. Bei Wäldern ist es umgekehrt. Auch hier tritt irgendwann eine Sättigung ein, doch in der Anfangsphase ist die Menge an absorbiertem CO₂ noch gering und steigert sich, wenn die Bäume größer werden.

Bei der Restaurierung von Böden, insbesondere in trockenen Gebieten, spielt der Einsatz von Pflanzenkohle, auch Biokohle oder Biochar genannt, eine große Rolle. Jegliche Biomasse kann über die Verbrennung mit wenig Sauerstoff, die Pyrolyse, in Pflanzenkohle überführt werden. Diese hat eine hohe Oberfläche, viele Poren und bildet damit die optimale Umgebung für Mikroorganismen und Pilze, aber auch für Nährstoffe und Wasser, um im Boden mehr Humus aufzubauen. Außerdem ist Pflanzenkohle stabil, sie zersetzt sich über Jahrhunderte nur im Prozentbereich und das CO₂, das von Pflanzen aufgenommen und nun in Form von Kohlenstoff in der Kohle gebunden ist, bleibt für hunderte Jahre im Boden. Pflanzenkohle ist also ein guter Baustein, um Böden wieder instand zu setzen und CO₂ effektiv zu binden.

Mehr Informationen zu den Nature-based Solutions finden sich wie erwähnt im Abschlussbericht des Projekts „Global Energy Perspectives“.

Nature-based Solutions sind außerdem eng mit den NDCs der Staaten verbunden, insbesondere mit den konditionierten NDCs der Entwicklungs- und Schwellenländer. Hier existieren sehr große Flächen für die Restaurierung und die lokale Bevölkerung profitiert besonders, weil ein großer Teil der Arbeitsplätze immer noch in der Landwirtschaft liegt.

Wie ein Mechanismus aussehen kann, der die Finanzierung von Nature-based Solutions über die Kopplung mit synthetischen Kraftstoffen ermöglicht, ist ein Feld, in dem mehr Forschung notwendig ist. Das Autorenteam sieht in der Kopplung dieser beiden Elemente, auch unter Artikel 6 des Paris-Abkommens, für internationale Klimafinanzierung, ein großes Potential, dass Klima- und Naturschutz gemeinsam adressiert werden.

Anhang

A.1 Expertenbefragung in Australien



Expertenbefragung zum Thema
Akzeptanz von Carbon Capture and Storage
(CCS)-Technologien für blauen Wasserstoff in
Australien im Vergleich zu grünem Wasserstoff

März 2024

Lehrstuhl Umwelt-/Ressourcenökonomik und Nachhaltigkeit
(Prof. Dr. Andreas Löschel)

Durchgeführt im Rahmen des FAW/n-Projekts „Klimaneutrale Kohle- und Gaskraftwerke –
Das Energiesystem wirtschaftliche umbauen“ mit der Vector Stiftung (Stuttgart)

Forschungsinstitut für anwendungsorientierte
Wissensverarbeitung/n (FAW/n),
Lise-Meitner-Straße 9, 89081 Ulm

Vector Stiftung
Ingersheimer Str. 24
70499 Stuttgart

1 Hintergrund

Die Rolle von Carbon Capture and Storage (CCS)-Technologien in der Energiewende ist umstritten. Ein möglicher Einsatzbereich für CCS ist blauer Wasserstoff, der durch Dampfreformierung von Erdgas mit Abscheidung und Speicherung des Kohlenstoffdioxids produziert wird. Blauer Wasserstoff und grüner Wasserstoff, der mit erneuerbarer Energie via Elektrolyse hergestellt wird, können einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von klimaschädlichen Emissionen in industriellen und angrenzenden Wirtschaftsbereichen leisten. Im Jahr 2022 machte emissionsarmer Wasserstoff jedoch weniger als ein Prozent der globalen Wasserstoffproduktion aus (IEA 2023).

Der Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft ist noch mit zahlreichen Herausforderungen verbunden. Zeitgleich sind Anpassungen auf Seiten des Angebots, der Nachfrage und der Infrastruktur von Nöten (sogenanntes dreiseitiges Henne-Ei-Problem) und stellen eine große Koordinationsaufgabe dar. Hinzu kommen Unsicherheiten über zukünftige Kosten, Preise und Marktgrößen, die sich in verschiedenen Abschätzungen über die Rolle von Wasserstoff und CCS im Wandel zu einer klimaneutralen Wirtschaft widerspiegeln (Hanley et al. 2018). Während grundsätzlich Konsens darüber besteht, dass staatliche Unterstützung im Wasserstoffhochlauf notwendig ist, halten Diskussionen über den optimalen Mix an Politikmaßnahmen und das gebotene Ausmaß staatlicher Eingriffe an.

Zudem wird blauer Wasserstoff besonders kontrovers diskutiert. Einerseits könnte er kurz- bis mittelfristig zu niedrigeren Kosten als grüner Wasserstoff produziert werden (Brändle et al. 2021; Joy et al. 2021; Ueckerdt et al. 2024). Auf der anderen Seite gibt es Zweifel, dass blauer Wasserstoff effektiv Emissionen reduziert, falls die CO₂-Abspaltungsraten begrenzt sind und es zu Methanleckagen bei der Förderung und dem Transport des Erdgases kommt (Longden et al. 2022; Ueckerdt et al. 2024; van Renssen 2020). Weitere Unsicherheiten betreffen den großskaligen Einsatz von CCS, sowie öffentliche Akzeptanz für CCS-Technologien (Ashworth et al. 2019; van Renssen 2020).

Die Expertenbefragung ist eine bewährte Methode, um im Kontext neuerer Technologien Erkenntnisse zu Bereichen großer Unsicherheit zu gewinnen (Morgan 2014; Verdolini et al. 2018). Um Perspektiven verschiedener Stakeholder auf die genannten Unsicherheitsbereiche zu sammeln und zu vergleichen, führte die RUB in Kooperation mit der Australian National University (ANU) daher im Zeitraum März bis

Juli 2023 strukturierte Interviews mit hochrangigen australischen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Regierung und Verwaltung, Industrie und anderen Wirtschaftsbereichen durch. Australien ist durch seine reichen (erneuerbaren wie fossilen) Energieressourcen und aktuelle politische Ambitionen zum Wasserstoffhochlauf ein besonders relevanter Studienfall. Die Befragung umfasste u.a. Erwartungen über künftige Produktionstechnologien und -kosten von Wasserstoff mit einem Fokus auf der Rolle von CCS in der Wasserstoffwirtschaft. Zudem wurden Wahrnehmungen über die wichtigsten Hürden und Politikinstrumente beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft erhoben. Dabei differenziert die Betrachtung zwischen der kurzen (2030) und mittleren bis langen Frist (2050).

2 Vorgehen der Studie

2.1 Rekrutierung der Experten

Um Experten systematisch zu identifizieren, wurden mehrere Schritte vollzogen. Erstens haben wir alle Institutionen, die an gestarteten und geplanten Wasserstoffprojekten in Australien beteiligt sind, auf Grundlage der HyResource-Datenbank der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO 2023) zusammengestellt. Zweitens wurden weitere relevante Unternehmen und Institutionen aus der Literatur (Kar et al. 2023) und einem Wasserstoff-Stakeholder-Katalog (HySupply 2022) entnommen. Darüber hinaus wurden bestehende Klassifikationen von Wasserstoff-Stakeholdern aus wissenschaftlichen Publikationen und anderen Berichten gesichtet (acatech 2022; Beasy et al. 2023; Murray et al. 2008; Schlund et al. 2022; Seymour et al. 2008). Diese Stakeholder-Klassifikationen variieren in ihrem Umfang erheblich, wobei die Anzahl der Kategorien von zwei bis 49 reicht. Um eine Klassifikation zu verwenden, die sowohl umfassend als auch sparsam ist, haben wir sieben breite Stakeholder-Kategorien aufgenommen. Genauer gesagt visierten wir Teilnehmende an, die Experten aus einem Bereich zu Wasserstoff sind, einschließlich Industrie, Beratung oder anderen (nicht-industriellen) Unternehmen, Wissenschaft, Regierung und Verwaltung sowie Nichtregierungsorganisationen.

Drittens haben wir im Februar 2023 Teilnehmer der Australian Hydrogen Research Conference zu unserer Studie eingeladen (Thiel 2023). Viertens wurde das vorgeschaltete Stakeholder-Mapping durch ein Schneeballverfahren ergänzt. Das

bedeutet, dass die Teilnehmenden am Ende jedes Interviews gebeten wurden, weitere passende Experten für die Studie zu benennen. Schließlich führten wir eine ergänzende Rekrutierungswelle durch, um Experten aus Regierung und Verwaltung zu gewinnen, da diese in den vorherigen Schritten leicht unterrepräsentiert waren. Die Experten wurden in der Regel per E-Mail zur Teilnahme eingeladen. Wenn keine E-Mail-Adresse auffindbar war, wurden sie über die Social-Media-Plattform LinkedIn kontaktiert. Konferenzteilnehmende wurden über eine mündliche Präsentation und gedruckte Flyer angesprochen. Nachdem sich die Teilnehmenden für die Studie angemeldet und von uns als Experten verifiziert worden waren, wurden Termine für die Interviews über eine Online-Buchungsseite vereinbart. Als Anreiz zur Teilnahme wurden Vorabkopien unserer Forschungsergebnisse angeboten. Insgesamt versandten wir 242 Einladungen zur Teilnahme an der Studie. Sechszwanzig davon wurden an Personen gerichtet, die von anderen Studienteilnehmern nominiert wurden und die von uns zuvor nicht als Experten identifiziert wurden. Zweiundsechzig Experten meldeten sich für die Studie an, was eine anfängliche Antwortrate von 26% ergibt. Ein Teil der angemeldeten Teilnehmer antwortete entweder nicht auf Nachrichten zur Terminvereinbarung für ein Interview, musste aus zeitlichen oder privaten Gründen von der Teilnahme zurücktreten, oder erschien nicht zum vereinbarten Interviewtermin und reagierte nicht auf E-Mails zur Neufestlegung des Termins. Unsere endgültige Stichprobe (Details s. Abschnitt 3) besteht aus 47 Experten in 46 Interviews, was einer endgültigen Antwortrate von 19% entspricht.

2.2 Datenerhebung

Die Datenerhebung bestand aus zwei Phasen: einer Registrierungsphase, in der Experten ein Online-Formular ausfüllten, und dem Interview. Dazwischen wurde verifiziert, dass die Teilnehmenden über relevante Expertise gemäß vordefinierter Kriterien verfügen. Dieser Ansatz ermöglichte es uns, persönliche Informationen von den Umfrageantworten zu trennen und somit die Vertraulichkeit zu gewährleisten. Dieses Vorgehen wurde von der Expertenstudie von Hughes und Longden (2024) inspiriert. Die Kriterien für die Aufnahme einer Person in die Befragung umfassten die direkte Beteiligung an Wasserstoffprojekten, die Autorenschaft einer wissenschaftlichen Publikation oder eines Berichts zum Thema Wasserstoff sowie für ein Unternehmen, eine Organisation oder eine Regierungseinrichtung zu arbeiten, die

für mindestens einen Schritt in der Wasserstoff-Wertschöpfungskette oder für verwandte Forschungs- und Politikbereiche relevant ist. Die Kriterien wurden über Datenbanken zu wissenschaftlichen Publikationen und Berichten sowie über Websites, einschließlich Regierungs- und Organisationswebsites oder öffentlich zugängliche LinkedIn-Profile, überprüft.

Nachdem verifiziert worden war, dass die registrierten Personen über relevante Expertise verfügen, erhielten sie eine E-Mail zur Terminvereinbarung für das Interview. Alle Interviews wurden über die Videokonferenzsoftware „Zoom“ durchgeführt. Das Online-Format senkte die Teilnahmebarrieren und ermöglichte es uns, Expertinnen und Experten aus verschiedenen Regionen in Australien einzubeziehen. Wir entschieden uns für Interviews anstelle einer eigenständig durchführbaren Online-Umfrage, um eine aufmerksame Beteiligung zu gewährleisten und Nichtantworten sowie Abbrüche der Befragung zu reduzieren. Darüber hinaus konnten die Interviewer die Kommentare oder Begründungen der Experten erfassen und sicherstellen, dass die Befragten ein einheitliches Verständnis der Fragen und Antwortmöglichkeiten hatten. Die Teilnehmenden sahen die Fragen und dokumentierten Antworten auf ihrem Computerbildschirm, sodass sie bei Bedarf Ergänzungen oder Korrekturen vornehmen konnten.

Die Interviews wurden zwischen März und Juli 2023 durchgeführt und auf vier Interviewer aufgeteilt. Um Konsistenz im Interviewprozess zu gewährleisten, wurden Testdurchläufe im Forschungsteam durchgeführt. Darüber hinaus stellten wir allen Interviewern im Voraus Informationsmaterial über Wasserstoff zur Verfügung und versahen den Fragebogen mit detaillierten Anweisungen für die Interviewer. Hinzukommend führten wir drei Pilotinterviews mit wissenschaftlichen Mitarbeitern der ANU und RUB im Februar und März 2023 durch.

3 Stichprobe

Die Studie umfasst 46 Interviews mit 47 Experten aus 33 Organisationen. Die Interviewpartner bekleiden leitende Positionen im Management, hochrangige wissenschaftliche oder relevante politikbezogene Positionen, zum Beispiel Geschäftsführer (CEOs), Technische Leiter (CTOs) oder Hochschulprofessoren. Wie in Tabelle 1 dargestellt, führten wir 21 Interviews mit Expertinnen und Experten aus der Industrie (46%), 10 aus der Wissenschaft (22%), neun aus Regierung und

Verwaltung (20%) und sechs aus Beratungsunternehmen oder anderen Unternehmen (6%) durch. Die Dauer der beruflichen Beschäftigung mit Wasserstoff variiert zwischen den Experten, wobei 20% unserer Stichprobe seit 16 Jahren oder länger an Wasserstoffprojekten arbeiten. Siebzig Prozent der Experten gaben an, dass ihre Arbeit nicht mit einer bestimmten Region in Australien verbunden ist, sondern sich ihre Expertise auf die nationale Ebene (45%) oder einen breiteren Fokus, der auch Kontexte außerhalb Australiens einschließt (24%), bezieht.

Tabelle 1: Hintergrund der Experten

	Anzahl	Anteil (in %)
Stakeholderkategorie		
Industrie	21	46
Wissenschaft	10	22
Regierung und Verwaltung	9	20
Beratung/ Andere Unternehmen	6	13
Berufliche Erfahrung mit Wasserstoff		
1-5 Jahre	24	52
6-10 Jahre	8	17
11-15 Jahre	5	11
16 Jahre oder länger	9	20
Regionaler Fokus der Arbeit¹⁴⁰		
National ohne regionalen Fokus	21	46
Keiner/ Außerhalb von Australien	11	24
Victoria	10	22
New South Wales	7	15
Western Australia	7	15
Tasmania	6	13
Queensland	5	11
South Australia	5	11
Australian Capital Territory	3	7

4 Ergebnisse

4.1 Produktionstechnologie

Zu Beginn wurden die Erwartungen jedes Experten hinsichtlich des am stärksten und zweitstärksten dominierenden Produktionsverfahrens für Wasserstoff in Australien (bezogen auf die Produktionsmenge) im Jahr 2030 und 2050 jeweils abgefragt.

¹⁴⁰ Mehrfachnennung möglich

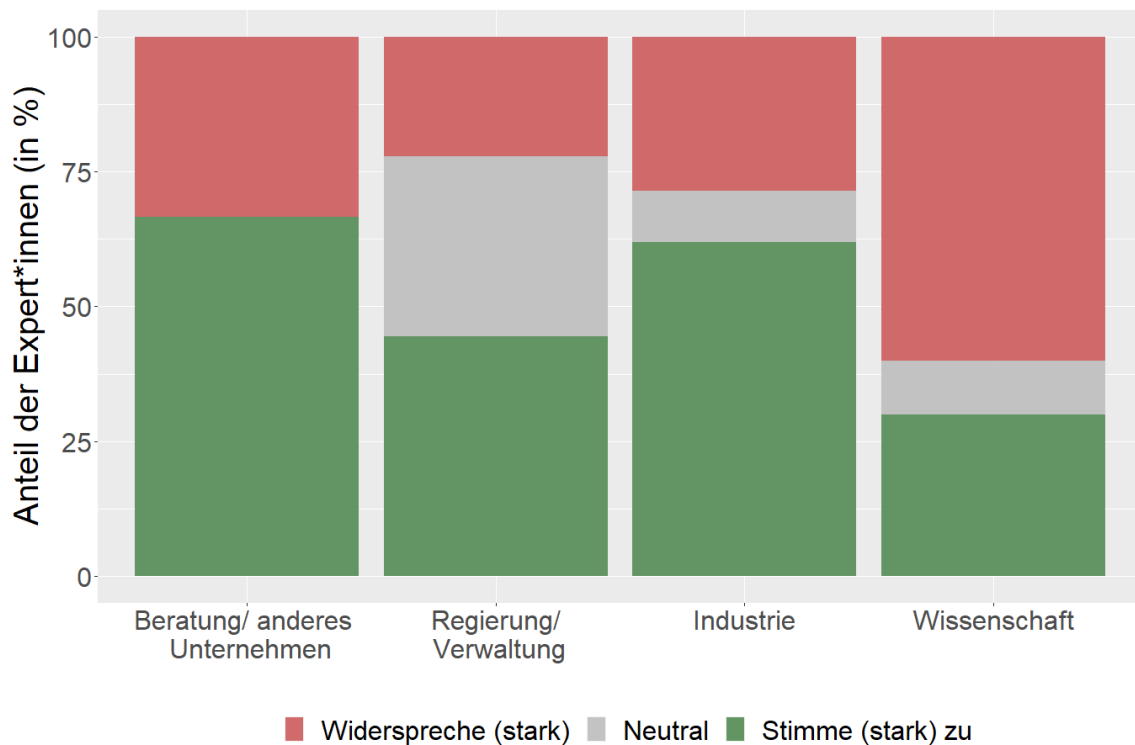
Gemäß 42% (n=19) bzw. 27% (n=12) der Befragten werden Erdgasreformierung ohne CO₂-Abscheidung und -speicherung (CCS) sowie Wasserelektrolyse basierend auf Strom aus fossilen und erneuerbaren Quellen in 2030 die dominierenden Produktionsverfahren in Australien darstellen. Die Mehrheit der Experten erwartet bis 2050 eine deutliche Verschiebung hin zur Wasserstoffproduktion mit ausschließlich erneuerbarem Strom betriebener Wasserelektrolyse (78%, n=36). Erdgasreformierung mit CCS wird von 41% (n=19) der Experten als das zweitdominierende Produktionsverfahren erwartet.

Darüber hinaus behandelten die Interviews explizit die wahrgenommene Rolle von CCS in der Wasserstoffwirtschaft. Die Zustimmung bzw. der Widerspruch zu der Aussage, dass blauer Wasserstoff eine wichtige Rolle im Wandel zu einer emissionsfreien Wirtschaft in Australien spielt, variiert zwischen den Expertinnen und Experten und Stakeholdergruppen (siehe Abb. 1). Personen aus der Wissenschaft äußern sich am skeptischsten zu blauem Wasserstoff. Im Vergleich mit allen anderen Gruppen ist ihre Zustimmung zu der oben genannten Aussage signifikant geringer. Im Gegensatz dazu tendieren Teilnehmende aus der Industrie und anderen Wirtschaftsbereichen dazu, Wasserstoff auf Basis von Erdgas eine wichtige Übergangsrolle zuzuschreiben. Der Standpunkt aus Regierung und Verwaltung liegt dazwischen. Statistisch signifikante Differenzen hinsichtlich anderer Merkmale wie z. B. der sektorspezifischen Expertise (im Sinne der Dauer der beruflichen Beschäftigung mit Wasserstoff), lassen sich auf Basis der erhobenen Daten hingegen nicht feststellen.

Aus den angeführten Argumenten für und gegen Wasserstoffproduktion mit CCS lassen sich zwei zentrale Positionen ableiten. Befürworterinnen und Befürworter von blauem Wasserstoff in unserer Stichprobe betonen, dass dieser in der Übergangsphase zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft benötigt wird.

Beispielsweise würde die Produktionsroute mit CCS sicherstellen, dass ausreichende Mengen an Wasserstoff produziert werden können. Dem gegenüber steht eine kritischere Haltung gegenüber CCS-Technologien. Im Zuge dieser Haltung werden etwa technische sowie wirtschaftliche Risiken und Unsicherheiten genannt. Bezüglich dieser Position wird hervorgehoben, dass CCS noch nicht im großen Maßstab erprobt ist.

Abb. 1 Wahrgenommene Bedeutung der Wasserstoffproduktion mit CCS in Australien



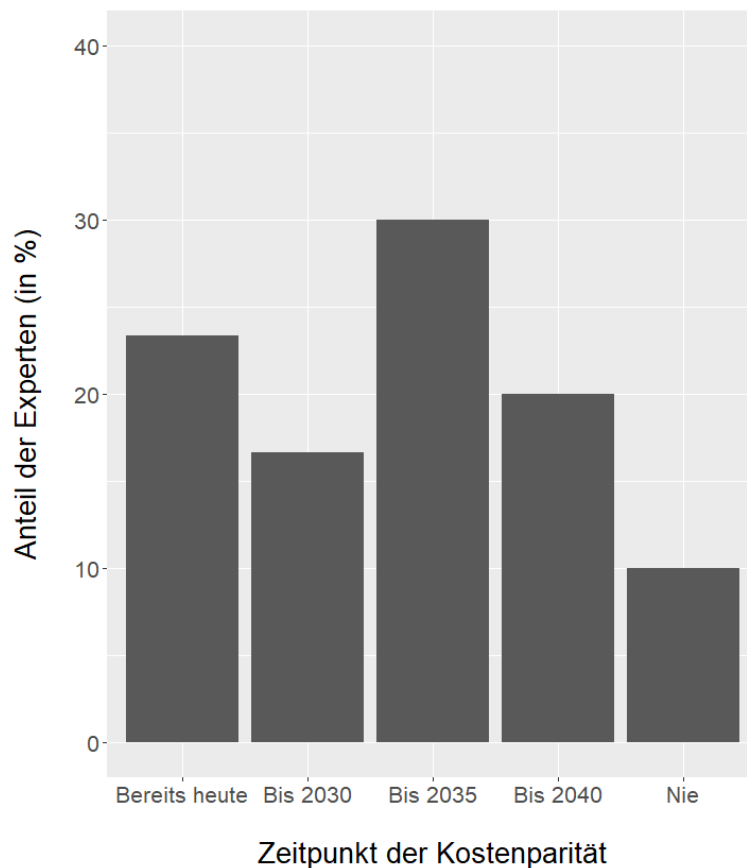
Anmerkungen Abb.1: Zustimmung oder Widerspruch zu der Aussage „Wasserstoff, der mit Erdgas und CCS produziert wird, spielt eine wichtige Rolle im Wandel zu einer emissionsfreien Wirtschaft in Australien“. Die Antwortoptionen „Stimme stark zu“ und „Stimme zu“ sowie „Widerspreche stark“ und „Widerspreche“ wurden zur vereinfachten Darstellung zusammengefasst.

Stattdessen wurde für einen vollständigen Fokus auf den Ausbau und Einsatz erneuerbarer Energien plädiert. Auch möglicher sozialer Widerstand wird als Argument gegen den Einsatz von CCS angeführt.

4.2 Kosten

Die einleitend erwähnten ökonomischen Unsicherheiten spiegeln sich auch in verschiedenen Erwartungen hinsichtlich der Frage wider, wann grüner und blauer Wasserstoff Kostengleichheit erreichen werden. Wie in Abb. 2 dargestellt, reichen die Antworten von „bereits heute“ bis „nie“, wobei die meisten Befragten erwarten, dass die Kosten für grünen Wasserstoff vor oder im Jahr 2035 mit denen von blauem Wasserstoff gleichziehen (n=21, 70%).

Abb. 2 Kostenparität grüner und blauer Wasserstoff



Anmerkungen Abb.2: Die Abb. zeigt Antworten auf die Frage "Wann erwarten Sie, dass erneuerbarer Wasserstoff Kostenparität mit Wasserstoff aus Erdgas mit CCS erreicht?". Dreißig Experten haben auf diese Frage geantwortet. Die Kategorie "Bis 2030" fasst die Antworten 2026, 2027, 2029 und 2030 zusammen. In der Kategorie "Bis 2035" sind die Antworten 2033, 2034 und 2035 zusammengefasst. Die Kategorie „Bis 2040“ fasst die Antworten 2038, 2040 zusammen.

Experten aus verschiedenen Interessensgruppen betonen, dass es schwer oder unmöglich sei, die Kosten von blauem oder grünem Wasserstoff vorherzusagen (n=4). Einige Befragte führen aus, dass die Kostenparität stark von der Entwicklung der Erdgaspreise (n=5) und von politischen Maßnahmen wie einer CO₂-Bepreisung (n=2) abhängt. Zwei Befragte verweisen zudem erneut auf die Unsicherheiten hinsichtlich der Durchführbarkeit von CCS-Projekten.

4.3 Hürden und Politikmaßnahmen

Basierend auf einer Literaturrecherche haben wir eine Liste potenzieller Hindernisse für die australische Wasserstoffwirtschaft sowie unterstützender Maßnahmen zur

Überwindung dieser Barrieren identifiziert. Im Zuge der Erhebung baten wir die Expertinnen und Experten, diese Hürden und Instrumente auf einer fünfstufigen Likert-Skala (1- Sehr unwichtig, 2- Unwichtig, 3- Neutral, 4- Wichtig, 5- Sehr wichtig) zu bewerten. Zudem konnten die Teilnehmenden Hindernisse oder Maßnahmen ergänzen. Über alle Befragten hinweg werden lange Genehmigungsverfahren (51%), Unsicherheit über zukünftige Nachfrage (50%) und die Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien (48%) am häufigsten als jeweils sehr wichtige Hürde bewertet. Als die drei wichtigsten Instrumente stellen sich in der Gesamtstichprobe eine konsistente und harmonisierte Zertifizierung (56%), Reform von Regularien und Gesetzen (49%) sowie Rahmenwerke für die wirksame Einbeziehung indigener Völker (47%) heraus.

Vereinzelt lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Einstellung zur Wasserstoffproduktion mit CCS und wahrgenommenen Herausforderungen im Wasserstoffhochlauf beobachten. So bewerten Befürworterinnen und Befürworter von blauem Wasserstoff unzureichende Demonstrationsprojekte, einen Mangel an staatlicher Unterstützung und monetärer Förderung sowie Nachfrageunsicherheit tendenziell als wichtigere Hürden als die übrigen Befragten der Stichprobe.

5 Diskussion und Ausblick

Zusammenfassend zeigt die Expertenbefragung statistisch signifikante Unterschiede in den Perspektiven verschiedener Stakeholdergruppen auf. Hinsichtlich der Rolle von CCS in der Transformation lassen sich zwei Kernpositionen feststellen. Carbon Capture and Storage wird entweder als wichtige Brückentechnologie im Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft gesehen oder es überwiegen Bedenken hinsichtlich wirtschaftlicher, technischer und sozialer Risiken und Unsicherheiten. Die Befragung unterstreicht in der Literatur diskutierte Unsicherheiten über alle Bereiche der Wasserstoff- und CCS-Wertschöpfungskette sowie über alle Stakeholdergruppen hinweg. Dies spiegelt sich unter anderem in großer Heterogenität bei der Abschätzung darüber wider, wann grüner und blauer Wasserstoff Kostengleichheit erlangen werden. Bezüglich der Erwartung über den dominanten Produktionsprozess von Wasserstoff, lässt sich eine Entwicklung von der konventionellen Herstellung auf Basis von Erdgas ohne CCS in 2030 hin zur Produktion via Elektrolyse mit ausschließlich erneuerbarem Strom in 2050 beobachten. Dabei scheint Technologie zur Kohlenstoffabscheidung

und -speicherung in der mittleren Frist als Ergänzung zu rein erneuerbarem Wasserstoff wahrgenommen zu werden: etwa zwei Fünftel der Befragten erwarten, dass Erdgasreformierung mit CCS (blauer Wasserstoff) der zweitwichtigste Produktionsprozess bis 2050 sein wird.

Trotz der sorgfältigen Auswahl der Experten gilt es bei der Betrachtung der Ergebnisse zu beachten, dass die Angaben der Teilnehmenden etwa durch Phänomene wie Selbstüberschätzung in Bezug auf die eigenen Kenntnisse und Eigeninteressen der jeweiligen Stakeholdergruppe verzerrt sein können. Die Perspektive von NGOs und anderen Akteuren der Zivilgesellschaft ist nicht Bestandteil dieser Studie und in künftigen Arbeiten zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Befragung werden für die Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift weiter aufbereitet.

Literatur zu A.1

acatech, DECHEMA (Hg.) (2022): Auf dem Weg in die deutsche Wasserstoffwirtschaft: Resultate der Stakeholder*innen -Befragung. Berlin.

Ashworth, Peta; Sun, Yan; Ferguson, Michele; Witt, Katherine; She, Shengxiang (2019): Comparing how the public perceive CCS across Australia and China. In: International Journal of Greenhouse Gas Control 86, S. 125-133.

Beasy, Kim; Lodewyckx, Stefan; Mattila, Pauliina (2023): Industry perceptions and community perspectives on advancing a hydrogen economy in Australia. In: International Journal of Hydrogen Energy 48 (23), S. 8386-8397.

Brändle, Gregor; Schönfisch, Max; Schulte, Simon (2021): Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen. In: Applied Energy 302, S. 117481.

CSIRO (2023): HyResource. Hydrogen Map. Hg. v. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Online verfügbar unter <https://www.csiro.au/hydrogen-map>, zuletzt aktualisiert am 01.02.2023.

Hanley, E. S., Deane, J. P., & Gallachóir, B. Ó. P. (2018). The role of hydrogen in low carbon energy futures – A review of existing perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 3027–3045.

Hughes, Llewelyn; Longden, Thomas (2024): Offshore wind power in the Asia-Pacific: Expert elicitation on costs and policies. In: Energy Policy 184, S. 113842.

HySupply (2022): HySupply Stakeholder-Catalogue for a German-Australian Hydrogen Supply Chain.

IEA (2023), Tracking Clean Energy Progress 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>.

Joy, Oliver; Al-Zaili, Jafar (2021): On effectiveness of current energy policy instruments to make H₂ production projects financially viable for developers: Case of the UK. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (65), S. 32735–32749.

Kar, Sanjay Kumar; Sinha, Akhoury Sudhir Kumar; Bansal, Rohit; Shabani, Bahman; Harichandan, Sidhartha (2023): Overview of hydrogen economy in Australia. In: *WIREs Energy Environ* 12 (1), e457.

Longden, Thomas; Beck, Fiona J.; Jotzo, Frank; Andrews, Richard; Prasad, Mousami (2022): 'Clean' hydrogen? - Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen. In: *Applied Energy* 306, S. 118145. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118145.

Morgan, M. Granger (2014): Use (and abuse) of expert elicitation in support of decision making for public policy. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (20), S. 7176-7184.

Murray, M. Luke; Hugo Seymour, E.; Rogut, Jan; Zechowska, Sylwia W. (2008): Stakeholder perceptions towards the transition to a hydrogen economy in Poland. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (1), S. 20-27.

Schlund, David; Schulte, Simon; Sprenger, Tobias (2022): The who's who of a hydrogen market ramp-up: A stakeholder analysis for Germany. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 154, S. 111810.

Seymour, E. Hugo; Murray, Luke; Fernandes, Rei (2008): Key Challenges to the introduction of hydrogen-European stakeholder views. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (12), S. 3015-3020.

Thiel, Zarah (2023): Expert projections on hydrogen pathways in Australia. *Proceedings of the Australian Hydrogen Research Conference 2023 (AHRC 2023) 8-10 February 2023*.

Ueckerdt, Falko; Verpoort, Philipp C.; Anantharaman, Rahul; Bauer, Christian; Beck, Fiona; Longden, Thomas; Roussanaly, Simon (2024): On the cost competitiveness of blue and green hydrogen. In: *Joule* 8 (1), S. 104-128.

van Renssen, Sonja (2020): The Hydrogen Solution? In: *Nature climate change* 10 (9), S. 799-801.

Verdolini, Elena; Anadón, Laura Díaz; Baker, Erin; Bosetti, Valentina; Aleluia Reis, Lara (2018): Future Prospects for Energy Technologies: Insights from Expert Elicitations. In: *Review of Environmental Economics and Policy* 12 (1), S. 133-153.

A.2 Bevölkerungsbefragung zu CCS-Technologien



Bevölkerungsbefragung zum Thema Gesellschaftliche Akzeptanz von Carbon Capture and Storage (CCS)-Technologien

April 2024

Lehrstuhl Umwelt-/Ressourcenökonomik und Nachhaltigkeit
(Prof. Dr. Andreas Löschel)

Projektbeteiligte: Prof. Dr. Andreas Löschel, Dr. Christoph Feldhaus, Johanna Ohlig

Durchgeführt im Rahmen des FAW/n-Projekts „Klimaneutrale Kohle- und Gaskraftwerke –
Das Energiesystem wirtschaftliche umbauen“ mit der Vector Stiftung (Stuttgart)

Forschungsinstitut für anwendungsorientierte
Wissensverarbeitung/n (FAW/n),
Lise-Meitner-Straße 9, 89081 Ulm

Vector Stiftung
Ingersheimer Str. 24
70499 Stuttgart

1. Einleitung

Die gesellschaftliche Akzeptanz von Transformationstechnologien, insbesondere mit Fokus auf Carbon Capture and Storage (CCS), stellt einen maßgeblichen Faktor für deren effektiven Einsatz und Implementierung in Deutschland dar. Angesichts der zentralen Bedeutung der Reduzierung von Treibhausgasemissionen zur Bekämpfung des Klimawandels ist eine weitreichende Sensibilisierung für innovative Technologien und alternative Transformationsansätze vonnöten.

Obwohl ein breiter Konsens über die Dringlichkeit der Klimawandelbekämpfung durch Emissionsreduktion besteht, offenbart sich in der Bevölkerung häufig ein begrenztes Bewusstsein für neuartige Technologien und alternative Transformationsmethoden. In diesem Kontext bedarf es einer intensiven Aufklärung über die Potenziale und Vorteile von Transformationstechnologien wie CCS. Angesichts dieser Herausforderungen ist es von großer Relevanz, nach technologischen und technologieoffenen Lösungsansätzen für die Bekämpfung des Klimawandels zu suchen. Eine differenzierte Betrachtung der Potenziale verschiedener Technologien zur Minderung von Treibhausgasemissionen ist unabdingbar, um fundierte Entscheidungen zu treffen, die sowohl ökologische als auch soziale und ökonomische Aspekte berücksichtigen.

Das vorliegende Diskussionspapier zielt darauf ab, technologische und technologieübergreifende Ansätze zur Bewältigung des Klimawandels zu erforschen und ihr Potenzial zur Minderung der Auswirkungen des Klimawandels zu bewerten. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf der Bewertung von Transformationstechnologien wie CCS. Ein zentraler Aspekt der Forschung besteht darin, die bisherige Unsicherheit hinsichtlich des Einsatzes solcher Technologien in Deutschland zu beleuchten. Dies umfasst eine Analyse der gesellschaftlichen Akzeptanz, und potenziellen Auswirkungen anhand einer Haushaltsbefragung. Durch eine systematische Erfassung und Bewertung dieser Aspekte streben wir an, fundierte Erkenntnisse zu generieren, die als Grundlage für strategische Planungen dienen können. Darüber hinaus zielt die Forschung darauf ab, bestehende Wissenslücken zu schließen und neue Erkenntnisse zu generieren, die zur Weiterentwicklung von Strategien zur Bekämpfung des Klimawandels beitragen.

Die Erforschung der sozialen Akzeptanz von CCS in Deutschland hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Ein früher Beitrag von Fishedick et al. analysierte die soziale Akzeptanz von CCS in Deutschland und verglich sie mit anderen

Energieerzeugungstechnologien. Die Studie identifizierte keine allgemeinen Barrieren für die Einführung von CCS, wies jedoch auf die Notwendigkeit hin, öffentliche Bedenken und Risikowahrnehmungen ernst zu nehmen (Fischedick et al. 2009).

Kraeusel et al. führte eine Online-Umfrage unter 130 Studenten in Dresden durch, um die soziale Akzeptanz von CCS genauer zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigten eine neutrale Haltung gegenüber CCS, wobei die Akzeptanz einen wichtigen Einfluss auf die Zahlungsbereitschaft für die Technologie hatte, die jedoch im Vergleich zu erneuerbaren Energien niedriger war (Kraeusel und Möst 2012).

Arning et al. ging weiter und untersuchte die Wahrnehmung und Akzeptanz von CCS im Vergleich zu Carbon Capture and Utilization (CCU) in Deutschland. Die Ergebnisse ihrer Online-Umfrage aus dem Jahr 2017 zeigten signifikante Unterschiede in der Wahrnehmung und Akzeptanz von CCS und CCU. Insbesondere wurden Risikowahrnehmungen in verschiedenen Phasen des CCS/CCU-Prozesses identifiziert, die die Akzeptanz beeinflussten (Arning et al. 2019).

L'Orange Seigo et al. analysierte den bisherigen Forschungsstand zur öffentlichen Wahrnehmung von CCS und betonte die Bedeutung der Kontextfaktoren für die Akzeptanz. Es wurde festgestellt, dass öffentliche Bedenken und spontane Reaktionen auf CCS eine gute Grundlage für Risikokommunikation bilden, jedoch weiterführende Forschung erforderlich ist, um die Akzeptanz auf Projektebene zu verstehen. Das Paper nimmt in seiner Analyse jedoch keinen konkreten Bezug auf die Technologieakzeptanz in Deutschland (L'Orange Seigo et al. 2014).

Die jüngsten Arbeiten von Merk konzentrierten sich auf die Auswirkungen des Ex- und Imports von CO₂ auf die öffentliche Wahrnehmung von CCS in Deutschland und anderen europäischen Ländern. 2022 untersuchte sie die Auswirkungen des Ex- und Imports von CO₂ auf die öffentliche Wahrnehmung von CCS in Deutschland und Norwegen. Die Ergebnisse zeigten unterschiedliche Reaktionen der Befragten je nach Herkunft des CO₂ und des Lagerorts, wobei deutsche Befragte weniger sensibel auf solche Variationen reagierten als Befragte aus anderen Ländern, wie zum Beispiel in Norwegen (Merk et al. 2022). 2023 führte sie eine vergleichende Umfrage in fünf europäischen Ländern durch, um die öffentliche Meinung zum grenzüberschreitenden CO₂-Handel für die Speicherung zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigten unterschiedliche Bewertungen von CCS zwischen den Ländern, wobei

Umweltbedenken und Kosten die Haltung der Befragten beeinflussten (Merk et al. 2023).

Die Bekämpfung des Klimawandels durch die Reduktion von Treibhausgasen bleibt insgesamt von zentraler Bedeutung und die Einführung von Technologien wie CCS könnte einen bedeutenden Beitrag dazu leisten. Allerdings zeigt sich ein geringes Wissen der Probanden bezüglich CCS, was potenziell die öffentliche Wahrnehmung und Akzeptanz beeinträchtigen könnte. Eine erhöhte CCS-bezogene Risikowahrnehmung wurde insbesondere bei Personen festgestellt, die sich stärker um den Klimawandel sorgen. Dabei spielen sowohl die Risiko- als auch die Nutzenwahrnehmung eine entscheidende Rolle zur Erklärung der Varianz in der Akzeptanz von CCS. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Bedeutung einer umfassenden Aufklärung über CCS sowie einer transparenten Kommunikation über potenzielle Risiken und Vorteile, um die Akzeptanz und Implementierung dieser Technologie voranzutreiben.

2. Fragebogen

2.1 Motivation und Forschungsfrage

Die Motivation zur durchgeführten Untersuchung ruht auf der Suche nach technologischen und technologieoffenen Antworten auf den Klimawandel. Dabei geht es insbesondere um deren Potenzial zur Abschwächung des Klimawandels und die bisherige Ungewissheit des Einsatzes der Technologie in Deutschland. Die Akzeptabilität in der Öffentlichkeit ist für den Fortschritt des Klimawandels durch neue Technologien Voraussetzung. Aspekte, die hinsichtlich der sozialen Akzeptanz untersucht werden könnten, sind zum einen Themen, die die CCS-Technologie als solche direkt betreffen, aber auch zugehörige Themen wie Technologiebewusstsein im Allgemeinen. Faktoren dafür können wahrgenommene Kosten und Nutzen, Umweltbewusstsein, wahrgenommene Eignung der Technologie zur Erreichung der gewünschten Ziele, Vertrauen in Regierung und Industrie, Wissen und Erfahrung sowie soziodemographische Faktoren sein. In diesem Kontext ist auch die Betrachtung von Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung oder Reduzierung von Kohlenstoff relevant. Ebenfalls im Zusammenhang stehen die Fragen nach Vermeidung von Unsicherheit, da diese, im Kontext mit den wahrgenommenen Risiken, die Akzeptanz einschränken sowie die Risikokompensation.

Auf Basis dieser Motivation wurde der der Umfrage zu Grunde liegende Fragebogen konzipiert. Im Fokus standen dabei die vier folgenden Forschungsfragen:

1. Von welchen Faktoren ist Akzeptanz für Transformationstechnologien wie CCS abhängig?
2. Wie beeinflusst der Kontext des Einsatzes der Technologie die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS in Deutschland?
3. Wie beeinflusst der Kontext des Einsatzes der Technologie die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS in Ländern des globalen Südens?
4. Wie unterscheidet sich die Zahlungsbereitschaft für verschiedene Formen der Senkung von CO₂-Emissionen?

Die in der ersten beschriebenen Forschungsfrage betrachteten Faktoren im Allgemeinen finden sich in zwei Abschnitten des Fragebogens wieder. Sie betrachten wie sie sich auf die gesellschaftliche Akzeptanz von Transformationstechnologien, im Besonderen CCS, auswirken können. Dazu wird zum einen die allgemeine Affinität zu und Akzeptabilität von Technologie betrachtet, zum anderen die Kenntnis zu CCS untersucht. Dazu zählt auch die Betrachtung anderer Möglichkeiten CO₂ zu speichern. Der Kontext, in dem der Einfluss der Technologien untersucht wird, wird durch ein dreiteiliges Treatment im Fragebogen repräsentiert, wie es in den beiden weiteren Forschungsfragen benannt ist. Die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS in Deutschland wird in drei verschiedenen Schritten betrachtet – die generelle Unterstützung; die Betrachtung von Risiken, Kosten und Vorteilen, die eine Implementierung von CCS in der Strategie zur Bekämpfung des Klimawandels mit sich bringen könnte und die bedingte Unterstützung für CCS abhängig von benannten Umständen. In Ländern des globalen Südens gibt es verschiedene denkbare Kombinationen, in denen die Technologie zur Speicherung von CO₂ zum Einsatz kommen könnte.

Die abschließende Forschungsfrage bezieht sich auf die Zahlungsbereitschaft für Methoden zur Senkung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre. Dabei wird zwischen drei Ansätzen unterschieden, auf die im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.

2.2 Struktur

Die Struktur des konzipierten Fragebogens lässt sich in elf Frageblöcke unterteilen. Darin enthalten sind 54 Fragen und 3 Treatments. Zur Beantwortung wurde in den meisten Fällen die Auswahl von Optionen in Form einer 5-stufigen Likert-Skala angegeben. Die folgende Beschreibung erfolgt in der Reihenfolge, in der sie auch den Teilnehmern zur Beantwortung vorgelegt wurde.

Sozioökonomischer Hintergrund

Da bei der Befragung eine repräsentative Gewichtung der deutschen Bevölkerung nach Alter, Geschlecht und Bundesland vorzunehmen war, wurden diese drei Fragen als erste gestellt. Die Antworten auf die Frage „*Wie alt sind Sie?*“ wurden im Nachgang für die Auswertung in fünf Gruppen unterteilt. In Ergänzung zur Frage nach der Lage des Wohnorts in einem bestimmten Bundesland steht die Frage nach dem Ballungsraum, in welchem die Befragten leben. In Anlehnung an den von Dechezleprêtre et al. konzipierten Fragebogen wurden neben den Fragen nach Alter, Geschlecht und Ballungsraum auch der Beschäftigungsstatus sowie der höchste Bildungsabschluss abgefragt (Dechezleprêtre, A. Fabre, A. et al. 2022). Danach folgten weitere Fragen zum sozioökonomischen Hintergrund der Probanden, um ein breites Feld an möglicher Bezugnahme in der Datenauswertung nicht im Vorfeld auszuschließen. Dies umfasste sowohl die Frage nach der Anzahl an Kindern, nach dem monatlichen Nettoeinkommen des Haushalts im Jahr 2023 unterteilt in 15 Gruppen und mit einer Erläuterung, aus welchen Positionen sich das Haushaltseinkommen zusammensetzen kann, sowie nach dem Wahlverhalten, welche Partei bei der letzten Bundestagswahl gewählt wurde.

Klimawandel

Da sich die Betrachtung der gesellschaftlichen Technologieakzeptanz zur CO₂-Speicherung aus der Frage zur Bekämpfung des Klimawandels motiviert, umfasst der Fragebogen auch acht Fragen, die die Einstellung zum Klimawandel betreffen. Beginnend mit der Ja-/Nein-Frage, ob der Klimawandel nach Meinung der Teilnehmer der Realität entspricht schließen sich 3 Fragen an, die den Grad des menschlichen Verschuldens, die Wahrnehmung des Klimawandels als globales Problem sowie den aktuellen oder künftigen negativen Einfluss auf das Leben der Teilnehmer erfragen

(Dechezleprêtre, A. Fabre, A. et al. 2022). Um neben der Existenz und den Auswirkungen des Klimawandels auch dem Punkt der Bekämpfung Rechnung zu tragen, ist auch die Bedeutung der Rolle von vier Akteuren abgefragt worden. Dabei wurde die Ebene von Individuen, Industrie, Firmen und Unternehmen, Entscheidungsträgern in der Politik auf nationaler Ebene und Akteure auf der europäischen Ebene stetig weiter gefasst.

Allgemeine Affinität zu und Akzeptabilität der Technologie

CCS ist im Vergleich zu anderen Technologien weniger bekannt. Um die aktuelle Akzeptanz einschätzen und künftig steigern zu können, ist nicht nur eine Betrachtung der Technologie selbst in diesem Kontext von Interesse, sondern auch die diesbezüglich generell Einstellung der Probanden. Die allgemeine Affinität und Akzeptabilität von Technologie wurden mit drei Fragen adressiert. So wurde bezüglich der Aussagen, dass neue Technologien zu einer höheren Lebensqualität beitragen, dass Menschen zu sehr von Technologie abhängig sind (Parasuraman und Colby 2015) und dass Umwelt-Probleme vor allem mithilfe technologischer Lösungen bekämpft werden sollten, jeweils erfragt, inwiefern die Teilnehmer den Aussagen zustimmen.

Kenntnis zu Carbon Capture and Storage

Der Abschnitt zur Kenntnis von CCS bietet einen Rahmen, um von den Teilnehmern eine Selbsteinschätzung zum Wissen bezüglich CCS zu erfragen. Zum Einstieg steht eine Frage, als wie hoch die Teilnehmer ihren Wissensstand einschätzen. Mit der Benennung der zentralen Teilelemente der Technologie „Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff“ ist in der Frage eine Kurzdefinition umfasst. Die darauf aufbauenden Fragen enthalten in angepasster Form Aussagen aus dem Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), um die Zustimmung der Probanden zu verschiedenen Einsatzformen der Kohlenstoffspeicherungstechnologie zu erheben (Lee et al. 2023). CCS ist eine Option, um Emissionen aus fossilen Energie- und Industriequellen zu verringern, sofern die Möglichkeit zur geologischen Speicherung besteht.

- *Energiesysteme mit Netto-Null-Emissionen erfordern: eine erhebliche Verringerung des Gesamtverbrauchs an fossilen Brennstoffen, eine minimale Nutzung fossiler Brennstoffe ohne Vermeidungsmaßnahmen sowie den Einsatz von CCS in den verbleibenden fossil betriebenen Systemen.*
- *Die Begrenzung der globalen Erwärmung auf 2 °C oder weniger wird eine beträchtliche Menge an fossilen Brennstoffen unverbrannt lassen und könnte erhebliche Teile der Infrastruktur für fossile Brennstoffe zu verlorenen Vermögenswerten werden lassen. Abhängig von seiner Verfügbarkeit könnte CCS eine längere Nutzung fossiler Brennstoffe ermöglichen und so das Ausmaß verlorener Vermögenswerte verringern.*
- *Emissionsintensive Industriezweige, die stark gehandelte Grundmaterialien herstellen, sind dem internationalen Wettbewerb ausgesetzt. Für eine nachhaltige Industriewende sind breit angelegte und aufeinander aufbauende nationale und subnationale Strategien erforderlich, darunter Emissionsvermeidungsoptionen wie CCS.*

Die vier aufgeführten Aussagen zielen auf unterschiedliche Ziele und Zielbestimmungen ab. In der ersten wird ganz allgemein die Emissionsverringerung aus fossilen Energie- und Industriequellen angesprochen, während in der zweiten CCS konkret als eines der Mittel genannt wird, um ein Energiesystem mit Netto-Null-Emissionen erreichen zu können. Die dritte Aussage widmet sich den verlorenen Vermögenswerten, die Teile der Infrastruktur für fossile Brennstoffe werden könnten, bliebe eine beträchtliche Menge fossiler Brennstoffe unverbrannt. Es wird also vorwiegend ein wirtschaftliches Interesse adressiert. Die letzte Aussage widmet sich der energieintensiven Industrie und der Option, dass CCS eine mögliche Emissionsvermeidungsoption für diesen Bereich darstellen könnte.

CCS steht als Möglichkeit zur Speicherung von CO₂ aber nicht isoliert dar. Vielmehr gibt es verschiedene Methoden. Die Einschätzung der Bedeutung dieser Methoden ist ebenfalls im Fragebogen umfasst. Die aufgeführten Optionen, inklusive einer jeweils kurzen Beschreibung (Perdan et al. 2017; Fuss et al. 2016) sind: Aufforstung/Wiederaufforstung, Beschleunigte Verwitterung, Bindung von Kohlenstoff im Boden, Ozeandüngung, Direct Air Capture und CCS.

Treatment

Der Fragebogen umfasst 3 Treatments. Es wurde zufällig entschieden welcher der Teilnehmer welches der Informationstreatments erhält. Dies soll die Möglichkeit geben zu untersuchen, ob die Angabe unterschiedlicher Informationen das Antwortverhalten in den folgenden Abschnitten beeinflusst, bzw. wie sich diese möglicherweise unterschiedliche Beantwortung der Fragen ausprägt. Alle enthalten die gleiche Basisinformation über CCS: Beim Abscheiden und Speichern von CO₂ werden CO₂-Emissionen abgeschieden und eingefangen (Carbon Capture), anschließend zum Speicherort transportiert und dort unter hohem Druck unterirdischen gespeichert (Storage). Darauf folgen Aussagen zu drei verschiedenen Ansätzen:

- *Schwer zu mindernde Emissionen (Lee et al. 2023): Die Begrenzung der globalen Erwärmung erfordert Netto-Null-Emissionen. Dazu sind massive Minderungen der CO₂-Emissionen aus der bestehenden Nutzung von fossilen Brennstoffen erforderlich, um das verbleibende Kohlenstoffbudget nicht zu überschreiten. CCS könnte die verbleibenden schwer zu mindernden Emissionen kompensieren.*
- *Negative Emissionen (Lee et al. 2023): Wenn die globale Erwärmung 1,5 °C überschreitet, könnte sie schrittweise wieder gesenkt werden, indem CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre entnommen werden und so negative CO₂-Emissionen entstehen. Dies würde einen Einsatz von CO₂-Entnahmetechnologien, darunter auch CCS, erfordern.*
- *Trade Off Effizienz und Moral (Lee et al. 2023; Jakob et al. 2017): CCS bietet die Möglichkeit, dass Verursacher von CO₂-Emissionen diese selbst beseitigen. Die Speicherung in Deutschland kann mehr Kosten verursachen, als eine Speicherung im Ausland.*

CCS – generelle Unterstützung

Um einen einordnenden Eindruck vom Meinungsbild der Bevölkerung zu erhalten, wurden einleitend für den gesamten Block der Fragen bezüglich CCS die Fragen gestellt, ob die Einführung von CCS in Deutschland generell unterstützt oder abgelehnt wird und wie die Darstellung in den Medien und der Politik wahrgenommen wird.

CCS – Risiken, Kosten, Vorteile

In diesem Rahmen werden Fragen gestellt, um die Einschätzung zu Risiken, möglichen Kosten und Vorteilen der Technologie zu erheben. Es war jeweils die graduelle Zustimmung zu Aussagen zum Thema Kohlenstoff Speicherung anzugeben. Bezogen auf einen Erfolg der Emissionsreduktion zielen die ersten beiden Fragen auf eine Entlastung der Umwelt und einen Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels bei. Dies sind die benannten Vorteile der Technologie.

Im Folgenden werden die Fragen bezüglich der Risiken, die die Teilnehmer bezüglich der Einführung von CCS sehen, aufgeworfen. Dabei geht es einerseits um Gefahren für Umwelt und die menschliche Gesundheit, andererseits um die Aspekte, ob das Problem zunehmender Emissionen mit Hilfe der Technologie nur herausgezögert wird, den Ausbau der erneuerbaren Energien verzögert oder ein Vorwand ist, um weiter fossile Energieträger verbrennen zu können.

Die Fragen bezüglich der wirtschaftlichen Realisierbarkeit und die Bedeutung von hohen Kosten für die einzelnen Aspekte der CCS Technologie - Abscheidung, Transport und Speicherung - adressieren den Aspekt von hohen Kosten.

Abgeschlossen wird dieser Abschnitt mit einer konkreten Frage, die die gesellschaftliche Akzeptanz der Technologie betrifft, sowie der allgemeinen Aussage, dass die Förderung und Einführung der CCS-Technologie in Deutschland mit großen Unsicherheiten verbunden ist.

CCS – Bedingte Unterstützung

Die Fragen, welche sich auf die bedingte Einführung von CCS in Deutschland beziehen, thematisieren, dass dies auf unterschiedliche Weise geschehen kann. Es wird jeweils auf den Grad der Unterstützung abgestellt. Die erste Option ist, CCS als Übergangslösung zu denken, bis der Ausbau der erneuerbaren Energien weiter fortgeschritten ist. Die weiteren Optionen beziehen sich auf die Lage der Speicherstätten. Diese unterscheidet sich zwischen Ausland, Inland und in der Nähe des Wohnorts der Teilnehmer. Die Fragen zielen darauf ab, ob ein Effekt beobachtet werden kann, dass ein Gedanke der Eigenverantwortung für das von Deutschland ausgestoßene CO₂ vorliegt und gleichzeitig, ob eine Präferenz dafür besteht, dass eine Speicherstätte nicht in der eigenen Umgebung zu finden ist.

CCS – Länder des globalen Südens

Für die Erhebung der Meinung der Probanden bezüglich des Einsatzes von CCS in Ländern des globalen Südens sind vier verschiedene Konstellationen zusammengestellt worden. Alle wurden mit der Frage danach, in welchem Maß den Aussagen zugestimmt wird, erhoben. Die erste bezieht sich darauf, dass die Abkehr von fossilen Brennstoffen in Energiesystemen mit dem Ziel des Erreichens eines Netto-Nullpunkts zum Jahr 2050 erstrebenswert ist. In den beiden darauffolgenden wird die Entwicklung von Technologien von CCS zunächst mit dem Sektor schwer vermeidbarer Emissionen kombiniert und dann mit der Nutzung von fossilen Energieträgern, um im Ausgleich Netto-Null-Emissionen zu erreichen. Das vierte Statement sagt aus, dass der Einsatz erneuerbarer Energien dem Einsatz von CCS vorzuziehen sei.

Zahlungsbereitschaft

Neben klassischen Fragen zu Wissen und Akzeptanz ist auch die Einschätzung in Form der Erhebung von Zahlungsbereitschaften ein Instrument, um die Haltung der Bevölkerung im Rahmen einer Umfrage einzuschätzen. Ohne das Inaussichtstellen einer tatsächlichen Zahlung wurde das folgende Szenario für die Teilnehmer konstruiert: *„Gehen Sie davon aus, dass Sie 100€ zur Verfügung haben. Sie haben die Möglichkeit diese in Teilen oder ganz zu spenden. Wie viel wären Sie bereit, für die Reduktion von 100kg CO₂-Emissionen zu spenden?“* Die drei, für Spenden zur Verfügung stehenden Optionen sind *Option 1 „Minderung. Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien wird weniger CO₂ ausgestoßen“; Option 2 „Natürliche Senke. CO₂ wird nach dem Ausstoß in natürlichen Senken wie Bäumen gespeichert“ und Option 3 „Technische Senke. CO₂ wird nach dem Ausstoß mit Hilfe technologischer Methoden eingefangen, transportiert und unterirdisch gespeichert“*. Für die Probanden gab es Felder zum freien Eintragen von Werten ihrer Zahlungsbereitschaft hinter den jeweiligen Optionen.

Feedback

Zum Abschluss des Fragebogens hatten die Probanden die Gelegenheit Anmerkungen zur Befragung einzutragen. Diese Option war optional und es stand ein freies Textfeld zur Verfügung.

3. Datenerhebung

Die Datenerhebung wurde in Zusammenarbeit mit dem Marktforschungsunternehmen Norstat durchgeführt. Die ursprüngliche Zielgruppe umfasste 1000 Teilnehmer aus Deutschland und wurde entsprechend den Variablen Alter, Geschlecht und Bundesland repräsentativ ausgewählt.

Die tatsächlich vorliegende Stichprobe, die in die Analyse einbezogen wird, umfasst 1046 Teilnehmer. Die Teilnahme an der Umfrage war für die Befragten weitgehend unkompliziert mit der Online-Teilnahme an der Befragung, lediglich bei der Darstellungsform auf mobilen Endgeräten hat es, gemessen an den Kommentaren im abschließenden Feld für Fragen und Antworten vereinzelt Probleme gegeben. Es waren keine besonderen Kenntnisse oder Qualifikationen erforderlich. Das Ziel war es, eine für die Bevölkerung repräsentative Gruppe an Teilnehmern zu gewinnen, um ein umfassendes Bild der Technologieakzeptanz in der Breite in Deutschland zu erhalten. Die Umfrage hatte eine zuvor geschätzte Dauer von etwa 10 Minuten. Diese Zeitspanne wurde bewusst gewählt, um sicherzustellen, dass die Teilnehmer nicht überlastet werden und sie ihre Aufmerksamkeit während der gesamten Umfrage aufrechterhalten können.

Der Erhebungszeitraum für die Daten erstreckte sich über eine Woche, vom 18. Januar 2024 bis zum 25. Januar 2024. Dieser Zeitrahmen wurde gewählt, um einerseits die gewünschte Anzahl Teilnehmer zu erreichen und gleichzeitig sicherzustellen, dass die Ergebnisse aktuell und repräsentativ für den untersuchten Zeitraum sind.

4. Datenauswertung

4.1 Sozioökonomischer Hintergrund und Einstellung zum Klimawandel

Sozioökonomischer Hintergrund

Wie in Kapitel 3 beschrieben, sind die vorliegenden Daten repräsentativ für die Bundesrepublik Deutschland nach Alter, Geschlecht und Bundesland gewichtet.

Das Mindestalter, um an der Erhebung teilnehmen zu können betrug 18 Jahre, sodass dieser Wert zugleich das Minimalalter unter den Probanden ist. Das Maximalalter beträgt 91. Das Durchschnittsalter liegt bei 48,95 Jahren und ist damit annähernd identisch mit dem Median (Median = 49). Für die weitere Betrachtung des Datensatz unter Inbezugnahme der Variable „Alter“ wurde eine Gruppierung in fünf Gruppen vorgenommen: 18-29, 30-39, 40-49, 50-59, 60+. Die zugehörigen absoluten Werte finden sich in Tabelle 8.

Tabelle 8: Stichprobe nach Altersgruppe

Altersgruppe	Anzahl der Personen
18-29	173
30-39	161
40-49	216
50-59	188
60+	299

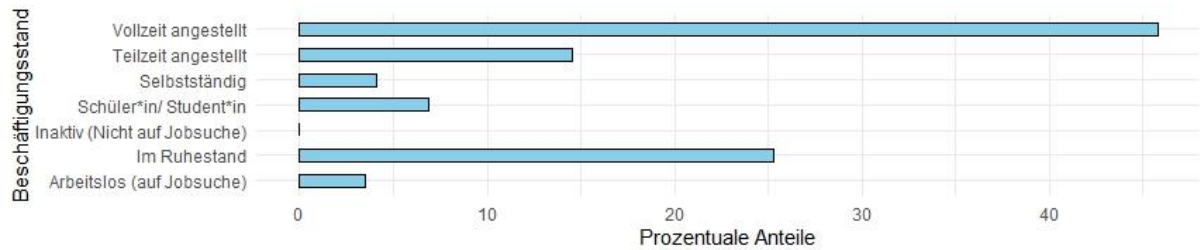
Insgesamt haben somit 1037 Probanden verwertbare Angaben zum Alter getroffen. Auf die Frage, welchem Geschlecht man sich zugehörig fühle, antworteten 495 der Probanden mit „Männlich“, 549 mit „Weiblich“ und 2 mit „Anderes“. Zudem fand im Zuge der Datenerhebung eine Gewichtung nach den 16 deutschen Bundesländern statt. Die absoluten Werte sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Stichprobe nach Bundesländern

Bundesland	Land	B B	B E	B W	BY	H B	H E	H H	M V	N I	N W	R P	S H	S L	S N	S T	T H
Anzahl	der			13	16					9	22						
Personen		31	45	2	6	6	80	25	23	4	5	57	36	9	55	32	30

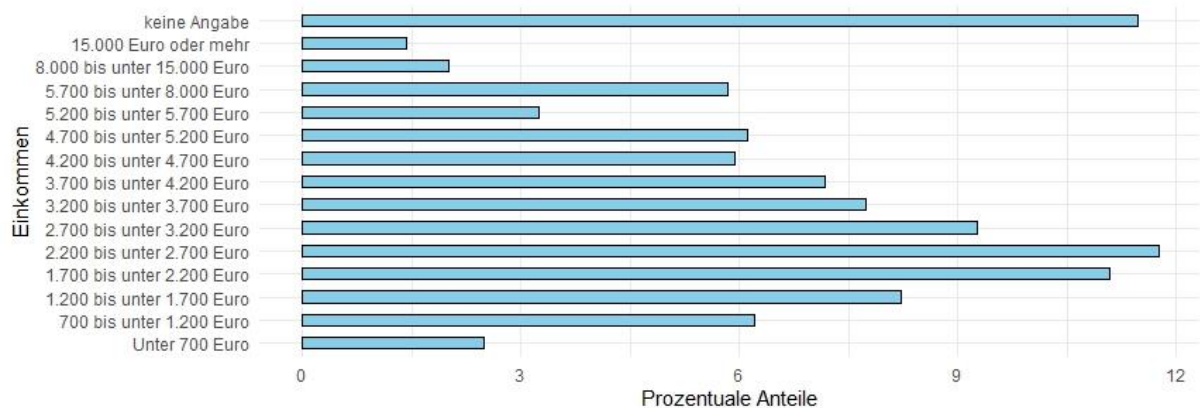
Zusätzlich zu den drei Variablen, nach denen die Stichprobe gewichtet wurde, sind weitere Variablen im Kontext des sozioökonomischen Hintergrunds erhoben worden. Diese werden im Folgenden aufgeführt und dienen im weiteren Verlauf als Bezugspunkt zur Ausdifferenzierung der Betrachtung der erhobenen Daten. Mit über 45% ist der Großteil der Befragten zum Zeitpunkt der Erhebung in Vollzeit angestellt, knapp 15% arbeiten in Teilzeit. Der Beschäftigungsstand von ca. 25% der Teilnehmern ist „Im Ruhestand“. Die vier Ausprägungen Selbstständig, Schüler/Student, Arbeitslos (auf Jobsuche) und Inaktiv (nicht auf Jobsuche) machen anteilig jeweils unter 10% aus, wobei keiner der Probanden die Option „Inaktiv (nicht auf Jobsuche) wählten (Abbildung 39).

Abbildung 39: Beschäftigungsstand in Prozent



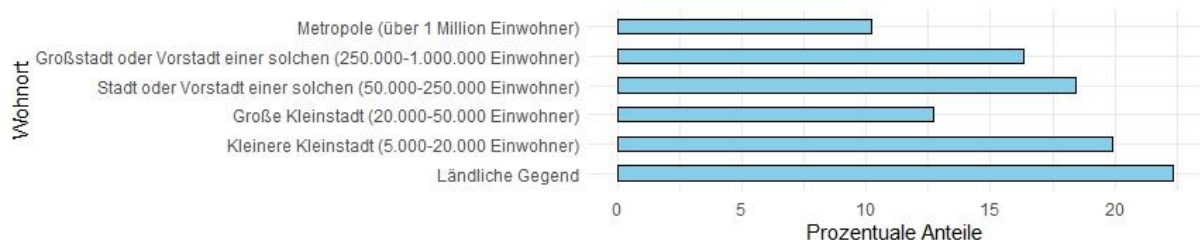
Die Erhebung des monatlichen Netto-Haushaltseinkommens erfolgte gruppiert in Schritten von 500 Euro (Abbildung 40). Die höchste Ausprägung liegt mit rund 12% bei 2.200 bis unter 2.700 Euro. Knapp die Hälfte der Teilnehmern geben an, ein monatliches Netto-Haushaltseinkommen von maximal 3.200 Euro zu haben. 11,5% machen keine Angabe. Nur rund 9% der Befragten geben an, dass das Einkommen in den drei höchsten der angegebenen Gruppen liegt.

Abbildung 40: Einkommen in Prozent



Mit 22% wohnen die meisten der Probanden in einer ländlichen Gegend. Mit fast 55% wohnen mehr als die Hälfte ländlich oder in einer Kleinstadt. Mit 10% ist die Ausprägung für in einer Metropole wohnenden Befragten am niedrigsten. Die prozentuale Verteilung ist in Abbildung 41 dargestellt.

Abbildung 41: Wohnort in Prozent



Die Erhebung des Wahlverhaltens zur letzten Bundestagswahl im Jahr 2021 entspricht nicht für alle Parteien den Ergebnissen der Bundestagswahl. Sowohl bei SPD, CDU/CSU und FDP sind die in Abbildung 42 angegebenen Prozentwerte 5%-Punkte niedriger. Den höchsten Wert hat die Variable für die Ausprägung SPD mit gerundet 20%. Ein ebenso großer Anteil der Probanden hat angegeben nicht gewählt zu haben, keine Angabe machen zu wollen oder kein Stimmrecht in der Bundesrepublik Deutschland zu haben.

Abbildung 42: Stimmverhalten Bundestagswahl in Prozent

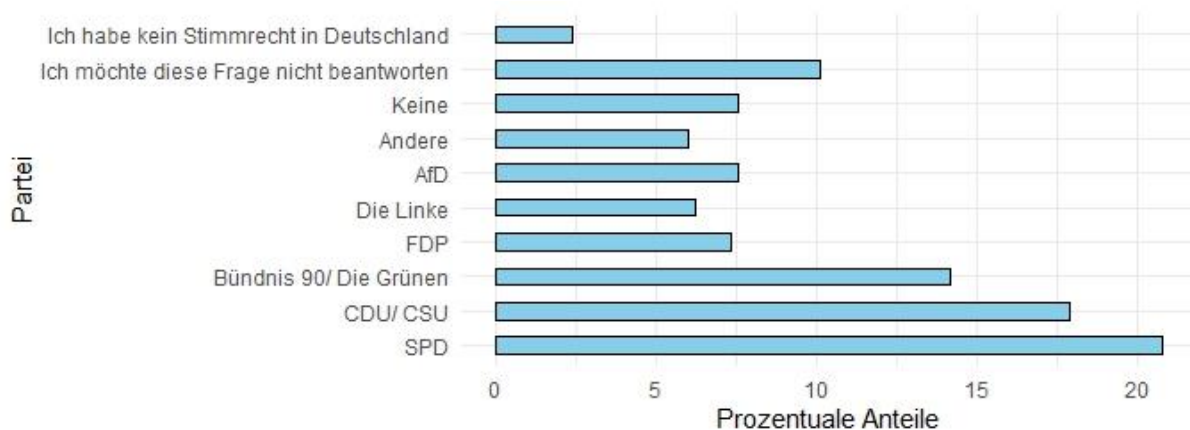


Abbildung 43 zeigt die prozentuale Verteilung des Bildungsabschlusses der Stichprobe. Mit 0,4% ist die Minimalausprägung bei „Keine abgeschlossene Schulbildung“, 39% der Probanden haben einen Beruflichen Abschluss/Ausbildung. Gut 30% haben einen Universitätsabschluss und rund 28% mit Abitur oder Untere Sekundarstufe einen schulischen Abschluss.

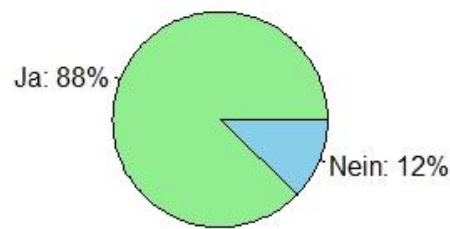
Abbildung 43: Abschluss in Prozent



Klimawandel

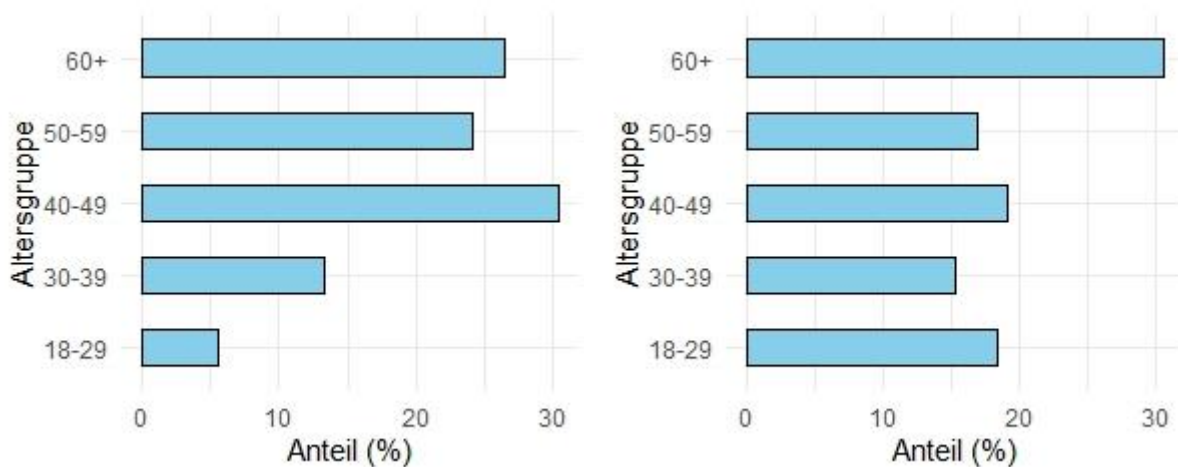
Im Folgenden werden fünf Fragen zur Realität und der Rolle bei der Bekämpfung des Klimawandels näher betrachtet. 12% der Befragten beantworten die Frage, ob der Klimawandel Realität ist mit „Nein“, 88% sagen der Klimawandel ist Realität (Abbildung 44).

Abbildung 44: Realität des Klimawandels



Bei nach Altersgruppen differenzierter Betrachtung dieser Frage wird deutlich, dass besonders in zwei Altersgruppen Unterschiede auftreten. Der Anteil der 18-29-Jährigen, die den Klimawandel nicht als Realität sehen liegt bei gut 5%, 10%-Punkte mehr sind es im Anteil bei denen, die die Frage mit „Ja“ beantworten. Umgekehrt sind es in der Altersgruppe von 40-49 Jahren mehr als 10% Punkte mehr, die die Frage nach der Realität des Klimawandels mit „Nein“ beantworten. Die Aufteilung nach Alter, die mit „Nein“ gestimmt haben ist in Abbildung 45 dargestellt, die Aufteilung mit der Antwort „Ja“ in Abbildung 46.

Abbildung 45: „Klimawandel ist nicht real“, nach Alter Abbildung 46: „Klimawandel ist real“, nach Alter



Bei Betrachtung der Auswertung der Fragen, welcher der Akteure welche Rolle bei der Bekämpfung des Klimawandels innehat (Abbildung 47) wird deutlich, dass rund doppelt so viele Teilnehmer eine große oder sehr große Rolle bei der Industrie, bei Firmen und Unternehmen sehen, im Vergleich mit Einzelpersonen. Insgesamt ist der Anteil von 25%, die denken, dass eine große oder sehr große Rolle bei der Bekämpfung des Klimawandels den Individuen zukommen deutlich geringer, als bei

den anderen drei Gruppen. Die Rollenwahrnehmung für Entscheidungsträger in der nationalen Politik und Akteure auf der europäischen Ebene fällt relativ ähnlich aus.

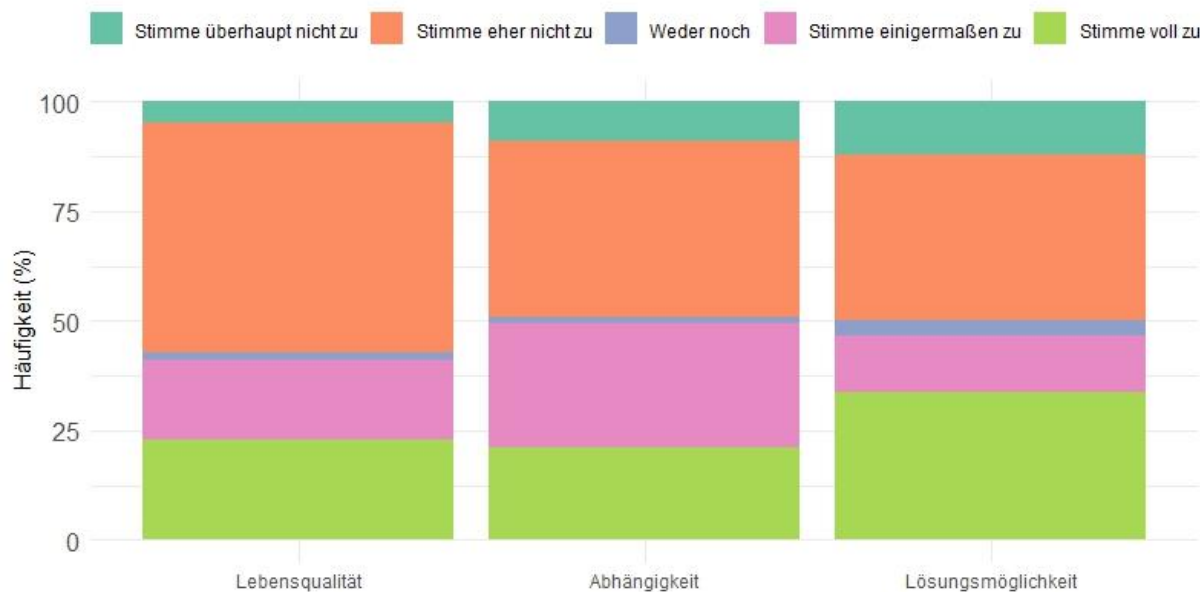
Abbildung 47: Rolle verschiedener Akteure bei der Bekämpfung des Klimawandels



4.2 Technologieaffinität und allgemeine Kenntnis zu CCS

Die neun Fragen, die im Kontext der allgemeinen Technologieaffinität und Kenntnis zu CCS gestellt wurden, dienen den Untersuchungen im Rahmen der ersten Forschungsfrage. Bei allen drei Fragen, die die allgemeine Affinität und Akzeptabilität von Technologie betreffen, ist die Ausprägung den getroffenen Aussagen eher nicht zuzustimmen, die anteilig am häufigsten getroffene Einschätzung (Abbildung 48). „Weder noch“ ist im Gegenzug die Option, die am seltensten ausgewählt wurde. Die niedrigen Werte, 1,8% bei der die Lebensqualität betreffenden Frage, 1,4% bei der nach der Abhängigkeit von technologischen Lösungen und 3,5% bei der Aussage, dass Umwelt-Probleme vor allem mithilfe technologischer Lösungen bekämpft werden sollten, lassen vermuten, dass die Bevölkerung in diesen Fragen ein ausgeprägtes Meinungsbild hat. Mit fast 34% ist die volle Zustimmung zu der Frage nach Lösungsmöglichkeiten auffällig hoch, ebenso wie die rund 52% der Teilnehmer, die eher nicht zustimmen, dass neue Technologien zu einer höheren Lebensqualität beitragen.

Abbildung 48: Affinität zu und Akzeptabilität von Technologie



Kenntnis zu Carbon Capture and Storage

Die Frage danach, wie die Probanden Ihren Wissensstand zum Thema Abscheidung und Speicherung, CCS beschreiben, war in 5-Stufen möglich. Die Ergebnisse sind in Abbildung 49 dargestellt. Erwartungsgemäß ist die Selbsteinschätzung zum Wissensstand nicht sehr hoch. Unter 10% der Befragten wählten die Optionen (sehr) hoch aus, wobei die Auswahlmöglichkeit „sehr hoch“ mit ca. 2% am seltensten ausgewählt wurde. Ein niedriger Wissensstand zu CCS ist mit gut 35% die am häufigsten vertretene Einschätzung. Insgesamt sieht aber eine deutliche Mehrheit immerhin einen moderaten bis niedrigen Wissensstand bei sich gegeben. Werden die Antworten gruppiert nach den Altersstufen betrachtet, lässt sich feststellen, dass das Bild ähnlich ist, wie in der Gesamtgruppe (Abbildung 50).

Die Betrachtung der Selbsteinschätzung nach Bildungsabschluss weist in Teilen ein anderes Bild auf. Rund 15% der Probanden ohne abgeschlossene Schulbildung geben an einen sehr hohen Kenntnisstand zu haben und liegen damit deutlich über dem Niveau der Gesamtgruppe. Die Ausprägungen in den Sektoren der akademischen Abschlüsse gestalten sich sehr ähnlich, ebenso der derer, die ein Abitur als höchsten Bildungsabschluss angeben (Abbildung 51).

Abbildung 49: Selbsteinschätzung CCS-Kenntnis

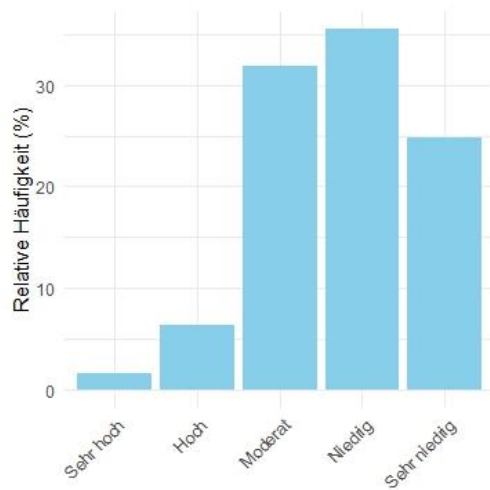


Abbildung 50: Selbsteinschätzung CCS-Kenntnis nach Alter

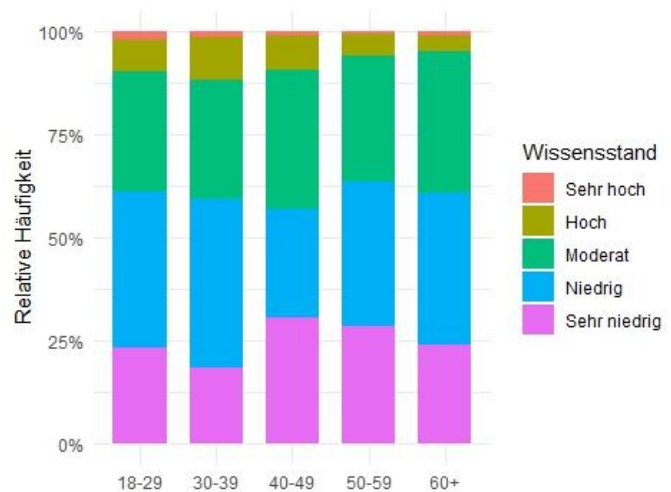
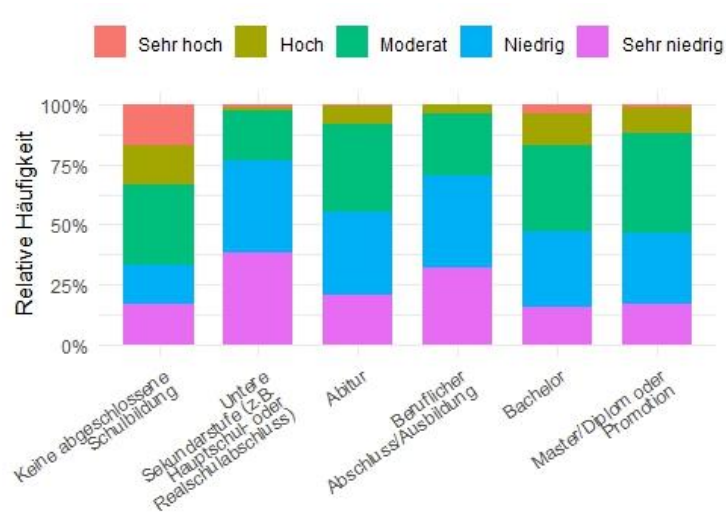


Abbildung 51: Selbsteinschätzung CCS-Kenntnis nach Abschluss



Aufbauend auf die einleitende Frage zur Selbsteinschätzung bot der Fragebogen den Teilnehmer die Möglichkeit die Rolle von CCS in verschiedenen Kontexten zu bewerten. Alle vier benannten Optionen erfahren ein verhältnismäßig hohes Maß an voller Zustimmung (Abbildung 52). Zusammengerechnet mit dem Anteil der Befragten, die angeben einigermaßen zuzustimmen, werden jeweils rund 50% erreicht. Das höchste Maß an Zustimmung gilt der Aussage, dass CCS eine Option ist, um Emissionen aus fossilen Energie- und Industriequellen zu verringern, sofern die Möglichkeit der geologischen Speicherung besteht. Dies ist zugleich die höchste Ausprägung diese Aussage betreffend. Gleichzeitig zur vollen Zustimmung von knapp 50% stimmen aber auch 37% eher nicht zu. Der Anteil derer, die eher nicht zustimmen bleibt gleich, wenn es um die Option zur Unterstützung der Erreichung von Netto-Null-

Emissionen mit Hilfe von CCS geht. Die volle Zustimmung geht leicht zurück. Die vergleichsweise größte Ausprägung für die Antwortoption „*stimme überhaupt nicht zu*“ mit rund 15% tritt bei der Frage bezüglich verlorener Vermögenswerte auf. Das Konzept CCS im Bereich der emissionsintensiven Industrie als Emissionsvermeidungsoption einzusetzen, stößt nicht nur auf die am schwächsten ausgeprägte Unterstützung, sondern der Anteil derer, die eher nicht zustimmen ist für diese Kategorie auch am höchsten (36%).

Im Vergleich der zeitlichen Dauerhaftigkeit eines möglichen Einsatzes der CCS-Technologie weist die letzte Kategorie das im Vergleich zu den beiden zuvor genannten höchste Potential auf. Die niedriger ausfallende Zustimmung könnte ein Indiz dafür sein, dass ein langfristig bis dauerhafter Einsatz der Technologie weniger gesellschaftliche Akzeptanz findet als eine zeitweise Implementierung bis zur Erreichung eines gewissen Ziels.

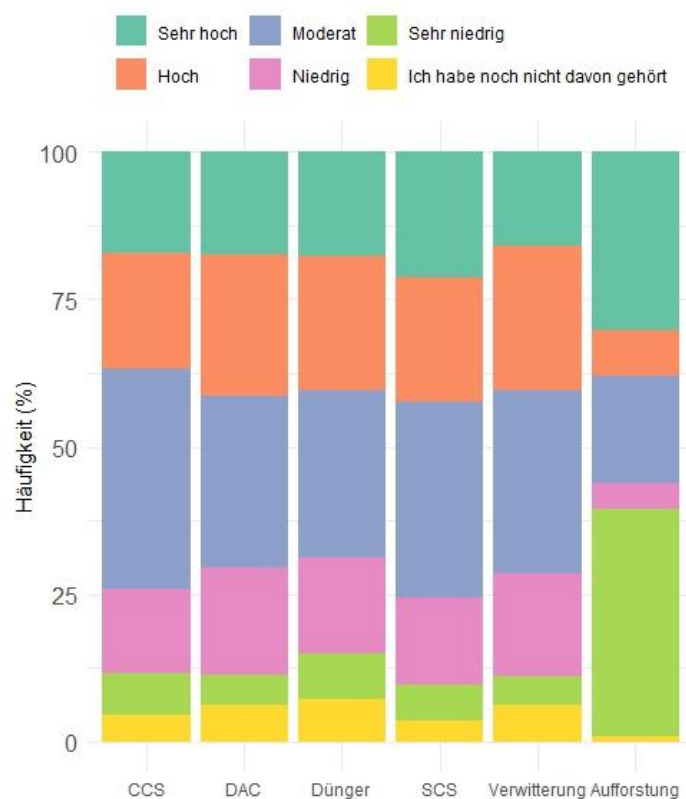
Abbildung 52: Zustimmung zu verschiedenen Optionen zum Einsatz von CCS



Neben CCS gibt es noch weitere Möglichkeiten zur Speicherung von CO₂. Hier werden fünf weitere Optionen benannt (Fuss et al. 2016; Perdan et al. 2017) und die Einschätzung der Rolle im Bezug auf den Klimaschutz abgefragt. Direct Air Capture (DAC) ist die Verwendung von Chemikalien, um CO₂ aus der Atmosphäre zu ziehen, welches dann anschließend für die feste Speicherung mineralisiert oder in geologische Lagerstätten gepumpt wird. Die Düngung des Ozeans (Dünger), bewirkt, dass

Meerespflanzen mehr CO₂ aufnehmen und nach ihrem Absterben in die Tiefsee sinken und Kohlenstoff binden können. Soil carbon sequestration (SCS), also die Bindung von Kohlenstoff im Boden ermöglicht die Verbesserung der Bindung von Kohlenstoff im Boden durch Erhöhung des Kohlenstoffzuflusses oder Zugabe verbrannter Biomasse. Durch das Zerkleinern und Verteilen von Gesteinen, die von Natur aus CO₂ aufnehmen, kann ihre Oberfläche vergrößert werden, damit sie schneller CO₂ aufnehmen, dies ist bekannt unter dem Schlagwort (beschleunigte) Verwitterung. Alle der vier beschriebenen Optionen weisen ein ähnliches Bild der Rolleneinschätzung auf wie CCS. Die höchste Ausprägung ist jeweils die, die den Möglichkeiten eine moderate Rolle zuweist und es gibt einen geringen Anteil an Teilnehmer, die angeben von der benannten Speicheroption noch nichts gehört zu haben. Rund ein Viertel geben an, dass sie den CCS, DAC, Dünger SCS und Verwitterung eine hohe bis sehr hohe Rolle zusprechen (Abbildung 53).

Abbildung 53: Rolle von Ansätzen zur CO₂-Speicherung im Klimaschutz



Deutliche Abweichungen gibt es für die Option der Aufforstung/Wiederaufforstung und Waldbewirtschaftung. Dabei geht es darum, dass Bäume gepflanzt werden, die CO₂

binden und so der Atmosphäre entziehen und es in lebender Biomasse speichern. Fast 40% der Probanden geben an, dass dieser Lösung eine sehr niedrige Rolle in der Bekämpfung des Klimawandels innehält, gleichzeitig sind es aber auch über 30%, die die Rolle als sehr hoch einschätzen (Abbildung 53).

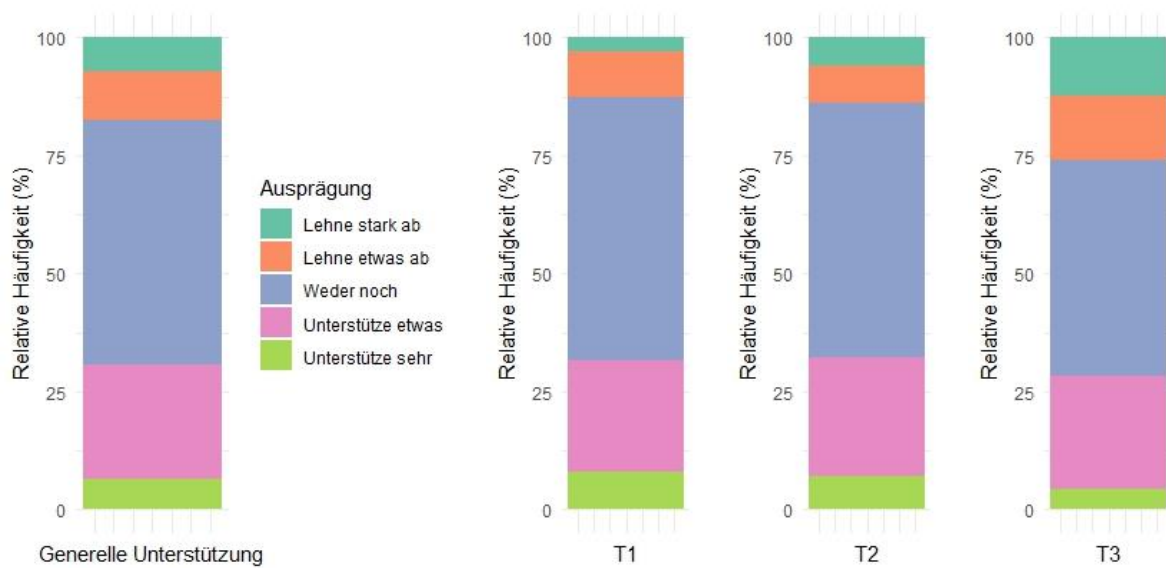
4.3 CCS in Deutschland

Die Betrachtung dessen, wie der Kontext des Einsatzes der Technologie die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS in Deutschland beeinflusst, vergleicht das Ergebnis der Gesamtgruppe mit denen, die in den drei Treatments unterschiedlichen Informationen erhalten haben. Auch für die Datenauswertung wird die im Fragebogen vorgenommene Dreiteilung in generelle Unterstützung; Risiken, Kosten und Vorteile sowie die bedingte Unterstützung vorgenommen. Die drei Treatments beziehen sich, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, auf unterschiedliche Kontexte, in denen CCS eingesetzt werden könnte: Zur Kompensation von schwer zu mindernden Emissionen (T1), zur Erreichung von negativen Emissionen (T2) und als Möglichkeit, dass Verursacher von CO₂-Emissionen diese selbst beseitigen (T3). Die dem Treatment zugehörigen Informationen wurden den Probanden zufällig angezeigt. Dabei wurde jeweils 349 Probanden Treatment 1 oder Treatment 2 angezeigt, Treatment 3 ist die Grundlage für 348 der Probanden.

Generelle Unterstützung

Abbildung 54 zeigt, wie die Probanden die Frage beantworteten, ob sie die Einführung von CCS in Deutschland unterstützen würden. Die Antwortoption „*weder noch*“ ist in allen Beobachtungsgruppen die deutlich höchste Ausprägung. Mit 56% und 54% liegt der Anteil bei Treatment 1 und 2 über der Hälfte. Rund 32% unterstützen die Einführung, unter den in Treatment 1 und 2 geschilderten Kontexten, etwas oder sehr. Die Ausprägungen für die Probanden in Treatment 3 weisen eine leicht veränderte Verteilung auf. Mit 46% stimmen auch hier die meisten für „*weder noch*“. Der Anteil derer, die die Einführung stark oder etwas ablehnen ist mit rund 26% etwa doppelt so hoch, wie bei den Probanden in den anderen beiden Treatments. Dies steht den Erwartungen, dass ein moralisches Bewusstsein im Sinne der Eigenverantwortung für die Beseitigung ausgeschiedener Emissionen entgegen. Mit 28% liegt der Anteil von Probanden, die die Einführung sehr oder etwas unterstützen würde niedriger als im Gruppendurchschnitt.

Abbildung 54: Unterstützung für die Einführung von CCS



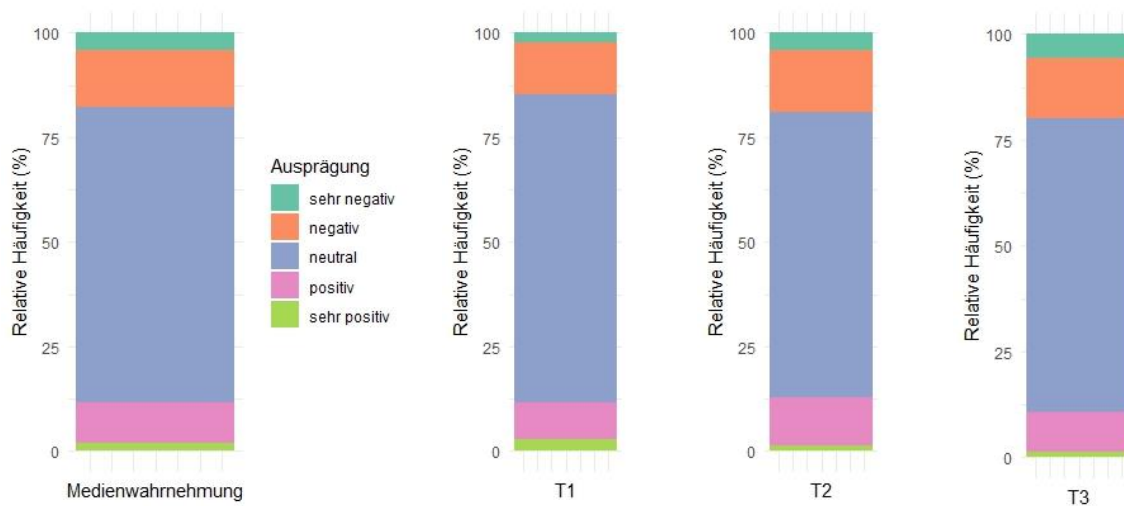
141

Die Wahrnehmung von CCS in den Medien und in der Politik ist mehrheitlich neutral. 74% der Probanden aus Treatment 1 empfinden dies so, in Treatment 2 und 3 sind es 68% beziehungsweise 70%. Fraglich ist auf Grund dieser Beobachtungswerte, ob tatsächlich eine neutrale Berichterstattung und Darstellung erfolgt, oder ob der Eindruck der Neutralität entsteht, weil insgesamt wenig über CCS berichtet wird. Die Ausprägungen für Treatment 2 und 3 verlaufen nahezu gleich. Mit 13% für Treatment 2 und 11% für Treatment 3 empfindet ein vergleichsweise kleiner Anteil die Darstellung von CCS in den Medien und in der Politik als positiv oder sehr positiv. Gut 20% hingegen empfinden die Darstellung, nach den Informationen aus Treatment 3, als (sehr) negativ, für Treatment 2 sind es 19% (Abbildung 55).

Der Anteil derer, die eine negative oder sehr negative Wahrnehmung der medialen und politischen Darstellung haben ist in Treatment 1 mit 14,5% etwas geringer. Auch in diesem Fall sind es rund 12%, die einen (sehr) positiven Eindruck haben (Abbildung 55).

¹⁴¹ Kompensation von schwer zu mindernden Emissionen (T1), Erreichung von negativen Emissionen (T2), Möglichkeit, dass Verursacher von CO₂-Emissionen diese selbst beseitigen (T3)

Abbildung 55: Mediale Wahrnehmung von CCS



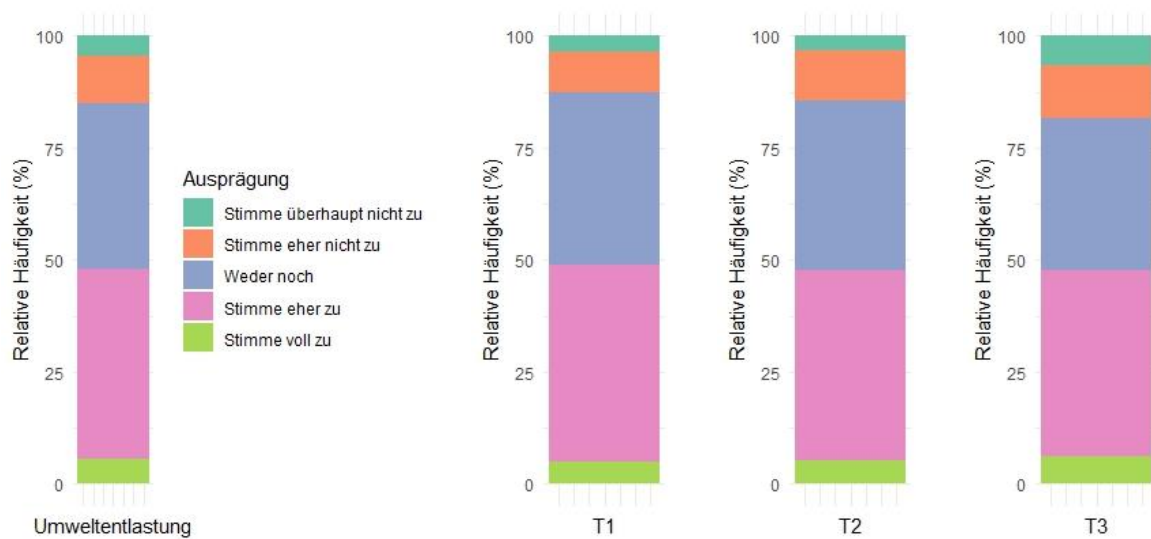
Risiken, Kosten und Vorteile

Die Thematik der Einführung der CCS-Technologie in Deutschland ist mit der Einschätzung von Vorteilen, Risiken und wirtschaftlichen Aspekten verbunden. Das Antwortbild der beiden abgefragten Vorteile, Umweltentlastung und effektives Instrument zur Bekämpfung des Klimawandels, weisen dabei Parallelen auf.

Abbildung 56 zeigt die gegebenen Antworten auf die Aussage, dass die Förderung und Einführung der CCS-Technologie im Allgemeinen eine Entlastung für die Umwelt bedeutet. Die Antwortmöglichkeit mit der höchsten Ausprägung ist für alle Treatments „Stimme eher zu“, wobei die Antwortmöglichkeit „weder noch“ jeweils nur wenige Prozentpunkte weniger aufweist. Die Probanden mit der Information aus Treatment 1 geben zu 44% an eher zuzustimmen und antworten zu 38% mit „weder noch“. Für Treatment 2 sind es 42% und 38%, für Treatment 3 41% die eher zustimmen und 34% die mit „weder noch“ antworten.

Der Anteil derer, die überhaupt nicht oder eher nicht zustimmen ist für Treatment 3 größer als für die anderen beiden. 18,4% stimmen entsprechend ab, während es für Treatment 2 und 3 14% beziehungsweise 12,5% sind.

Abbildung 56: Allgemeine Umweltentlastung durch CCS



Die Parallele im Antwortverhalten zu den Vorteilen von CCS wird deutlich in der Betrachtung von der Darstellung der Einschätzung zum Beitrag bei der Bekämpfung des Klimawandels in Abbildung 57. Auch hier ist die jeweils größte Ausprägung in der Antwortoption „*Stimme eher zu*“ mit 48%, 47% und 44%. Mit 31% für Treatment 1, 33% für Treatment 2 und 32% fallen auch die jeweiligen Anteile für die Antwortoption „*weder noch*“ verhältnismäßig hoch aus. Der Unterschied zwischen den Treatments 1 und 2 im Vergleich zu Treatment 3 liegt erneut im Anteil der Antworten, die der Aussage eher nicht oder überhaupt nicht zustimmen. Während die Werte für die erste Information (14%) und die zweite Information (13%) nahe beieinander liegen, ist der Anteil für die beiden Antwortmöglichkeiten in Informationstreatment 3 mit 16% höher. I

m Vergleich zu den zwei benannten Vorteilen haben mehr Risiken Raum in der Erhebung gefunden, um ihren möglichen Einfluss auf die gesellschaftliche Akzeptanz differenzierter abbilden zu können. Alle hier dargestellten Risiken von CCS haben in der Betrachtung gemeinsam, dass die Antwortoption „*weder noch*“ auf der 5-stufigen Likert-Skala die mit der höchsten Ausprägung ist. Die Probanden in Treatment 1 schätzen die Aussage, dass die Förderung und Einführung der CCS-Technologie zu einem verzögerten Ausbau der erneuerbaren Energien führen würde zu 41% mit „*weder noch*“ ein. Für Treatment 2 sind es 42% und für Treatment 39%. Mit 10% ist der Anteil derer, die der Aussage voll zustimmen für Treatment 1 etwas kleiner als für die anderen beiden (14% beziehungsweise 16%). Mit 33%, 30% und 28% ist der Anteil derer, die der Aussage eher zustimmen so groß, dass in Summe knapp die Hälfte der

Probanden pro Informationsgruppe die Meinung vertreten, dass der Einsatz einer solchen Technologie dazu führt, dass das Problem zunehmender Emissionen nur hinausgezögert wird (Abbildung 58).

Abbildung 57: Effektiver Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels

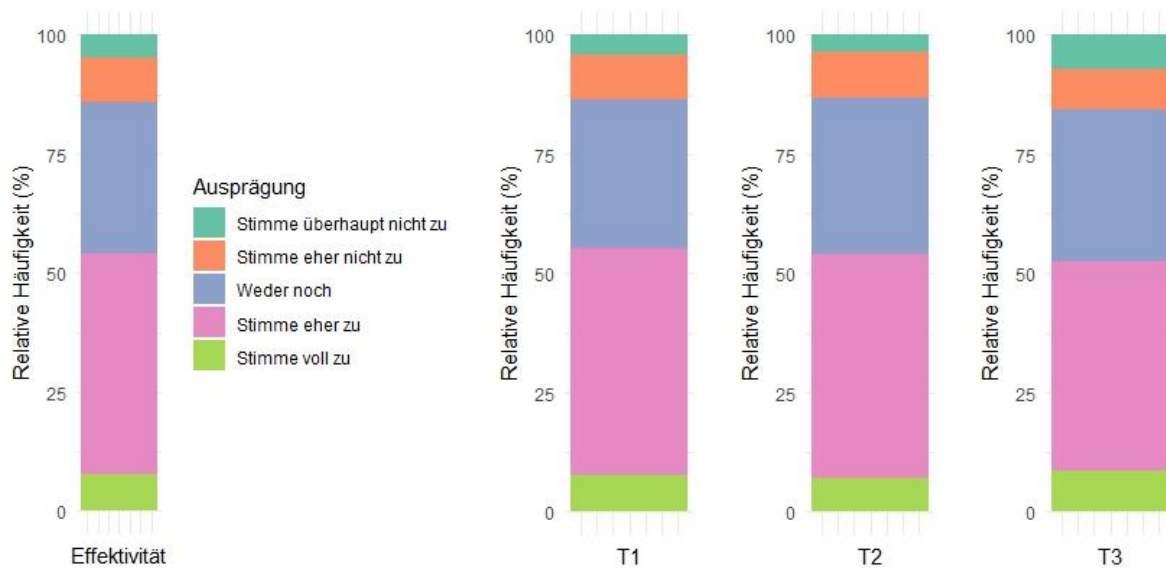
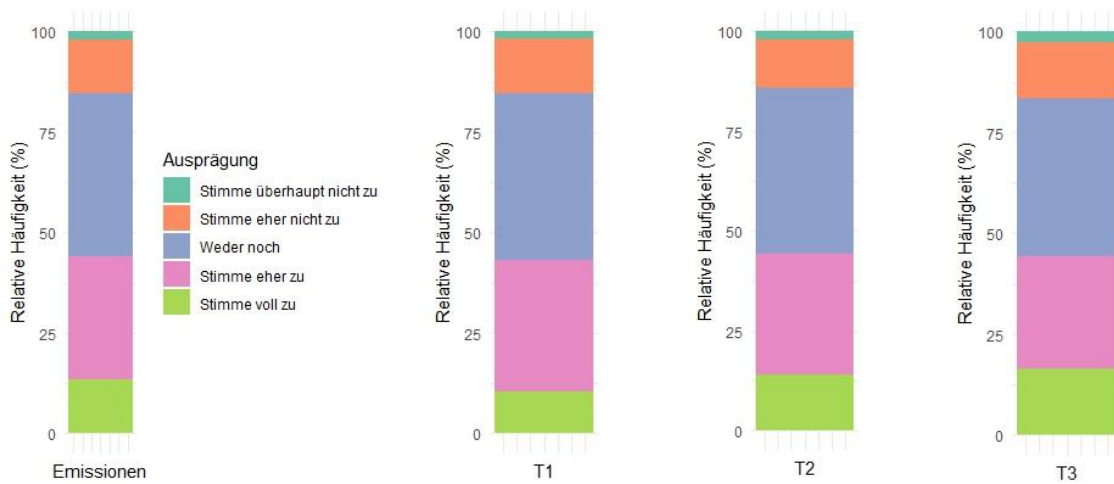
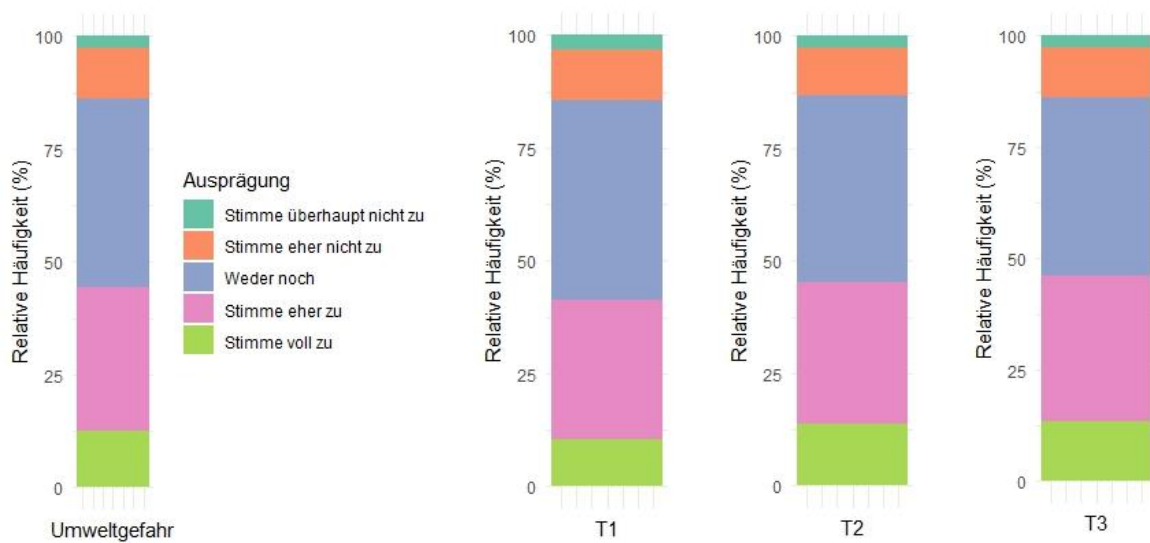


Abbildung 58: Herauszögern des Problems zunehmender Emissionen



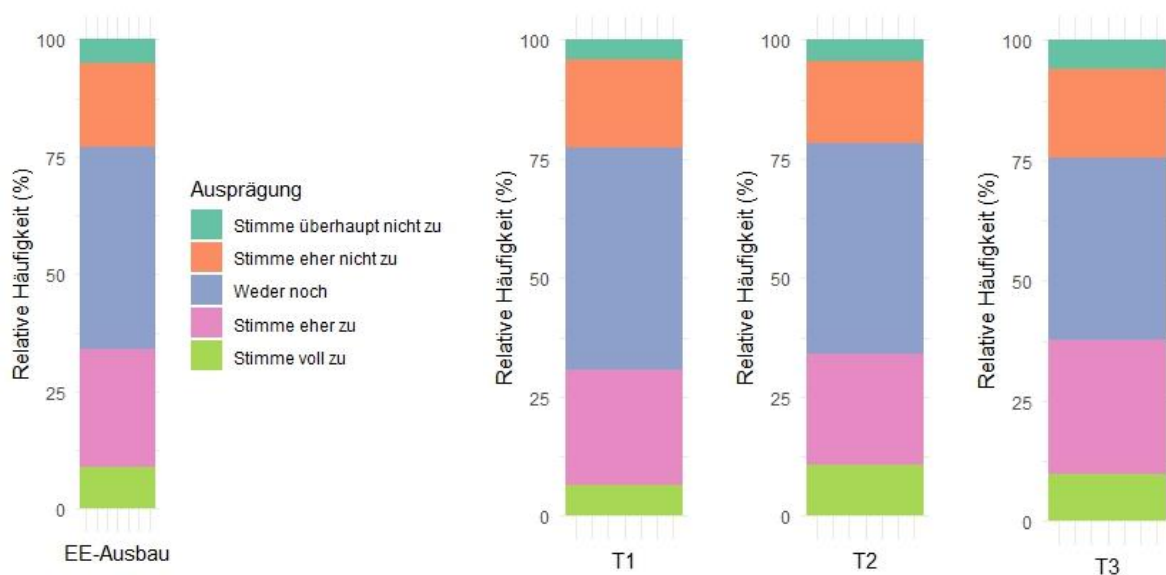
Das Stimmungsbild bezüglich der Aussage, dass die Förderung und Einführung von CCS Gefahren für die Umwelt birgt, ist mit Ausnahme marginaler Abweichungen gleich zu dem der letztgenannten Aussage (Abbildung 59).

Abbildung 59: Gefahren für die Umwelt durch CCS



Die Einschätzungen bezüglich der Verzögerung des Ausbaus der erneuerbaren Energien stellt sich insgesamt mit einem weniger hohen Anteil an Probanden dar, die der Aussage eher oder voll zustimmen. Zusammengefasst liegen die Anteile für Treatment 1 bei 30%, bei Treatment 2 bei 34% und bei Treatment 3 bei 38%. Den Hauptanteil machen aber auch hier, wie zu Beginn des Kapitels angeführt, die Anteile für die Antwortoption „weder noch“ aus. Sie liegen für die drei Informationsgruppen in der entsprechenden Reihenfolge bei 47%, 44% und 37%. Knapp ein Viertel der Probanden stimmen der Aussage eher oder überhaupt nicht zu, wie in Abbildung 60 deutlich wird.

Abbildung 60: Verzögerung des Ausbaus erneuerbarer Energien durch CCS



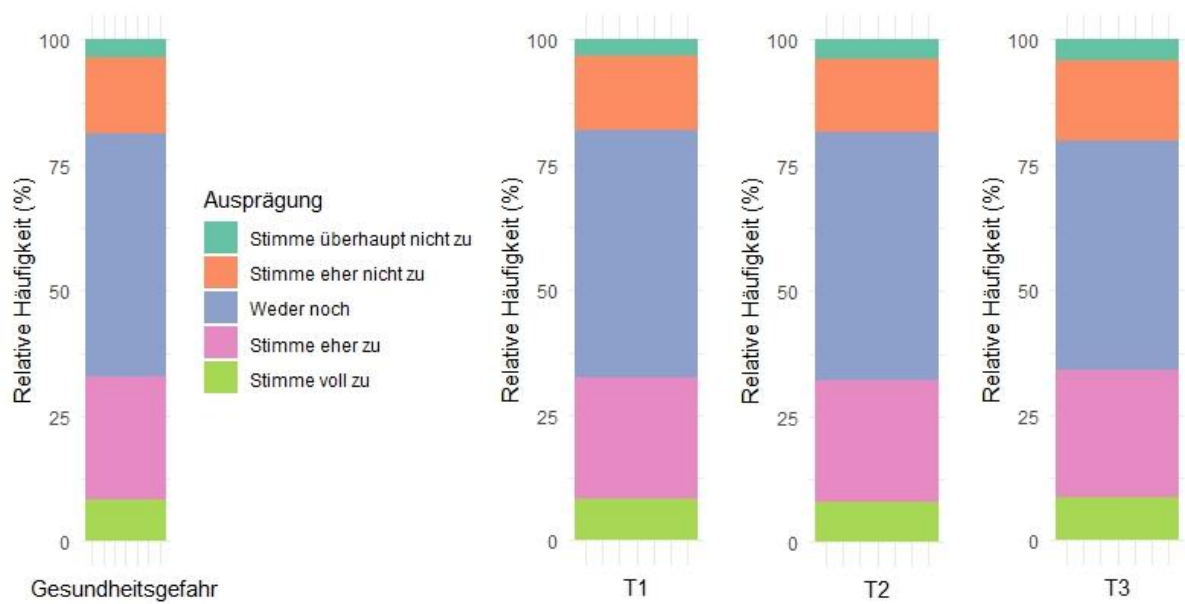
Im Vergleich zur gerade betrachteten Aussage bezüglich des Ausbaus erneuerbarer Energien ist der Anteil zustimmender Stimmen, die der in Abbildung 61 abgebildet werden, etwas größer. Sie beziehen sich auf die Aussage, dass die Einführung und Förderung von CCS nur ein Vorwand ist, weiter fossile Energieträger verbrennen zu können. Sie liegen bei 36% für Treatment 1 beziehungsweise 39% für die Treatments 2 und 3. Mit jeweils 6% macht der Anteil derer, die der Aussage überhaupt nicht zustimmen den geringsten Anteil aus, während die höchste Ausprägung mit Werten von 40% (Treatment 1), über 39% (Treatment 2) bis 38% (Treatment 3) auftritt. Rund 16% der Teilnehmer in allen Treatments und damit auch in der Gesamtgruppe stimmen der im Fragebogen getroffenen Aussage eher nicht zu.

Abbildung 61: CCS als Vorwand zur Weiternutzung fossiler Energieträger



In Abbildung 62 geht es um die Aussage, dass durch CCS Gefahren für die menschliche Gesundheit entstehen. Die Verteilung der Ausprägungen ist verglichen zwischen den drei Treatments sehr ähnlich. Nach der Information durch Treatment 1 oder 2 stimmen jeweils 49% der Probanden mit der Meinung ab, der Aussage weder zuzustimmen noch sie abzulehnen. In den ersten beiden Treatments stimmen rund 18% der Aussage eher oder überhaupt nicht zu, in Treatment 3 sind es 20%. Entsprechend ähnlich gestaltet sich auch der Anteil derer, die der Aussage eher oder voll zustimmen. Dies entspricht 38% für die Treatments 1 und 2 und 41% für Treatment 3.

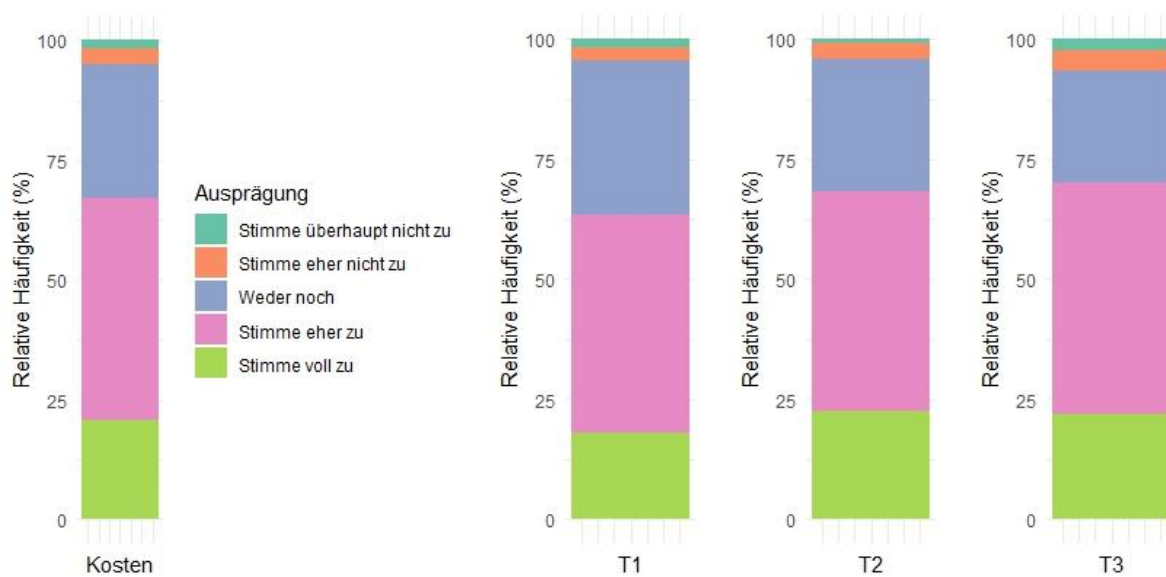
Abbildung 62: Gefahren für die menschliche Gesundheit durch CCS



In Ergänzung zu Vorteilen und Risiken werden auch zwei Fragen zu wirtschaftlichen Belangen von einer möglichen Einführung der CCS-Technologie betrachtet.

Die zusammengefassten Anteile von Probanden, die der Aussage, dass die Förderung und Einführung von CCS mit hohen Kosten für Abscheidung, Transport und Speicherung verbunden ist, liegt bei lediglich rund 5%. Nach der Information durch Treatment 1 beziehungsweise 2 vertreten jeweils 4% der Probanden diese Ansicht, bei Treatment 3 sind es 6%. Mit 45% (Treatment 1 und 2) und 48% werden die jeweils höchsten Ausprägungen für die Antwortmöglichkeit „*Stimme eher zu*“ erreicht. Zusammengefasst mit den Anteilen, die der Aussage vollumfänglich zustimmen (18%, 23%, 22%) liegt die Zustimmung somit bei 60-70%. Mit 32% für Treatment 1, 28% für Treatment 2 und 23% für Treatment 3 liegen die anteiligen prozentualen Werte für „*weder noch*“ bei dieser Frage vergleichsweise niedrig.

Abbildung 63: Hohe Kosten durch CCS



Für die Frage in Bezug auf die wirtschaftliche Realisierbarkeit von CCS in Deutschland ist das Stimmungsbild weniger deutlich als das vorherige. Mit 43% (Treatment 1 und 2), und 41% weist die Antwortoption „weder noch“ einmal mehr die höchste Ausprägung auf. Zusammengefasst stimmen ein Anteil von 40% für Treatment 1, 37% für Treatment 2 und 34% für Treatment 3 voll oder eher dafür, dass eine wirtschaftliche Realisierbarkeit möglich ist. Der jeweils kleinste Stimmenanteil entfällt für Treatment 1 und 2 auf die Aussage „Stimme überhaupt nicht zu“ (3% bzw. 4%). In Treatment 3 sind die 6%, die auf diese Antwortoption entfallen, die zweitniedrigste Angabe (Abbildung 64).

Abschließend stehen zwei allgemeine Aussagen zu Akzeptanz und Unsicherheit bezüglich der Förderung und Einführung von CCS in Deutschland.

Die Zustimmung dazu, dass der Erfolg von CCS abhängig von gesellschaftlicher Akzeptanz ist, ist deutlich (Abbildung 65). 52%, 53% und 47% (Treatment 1-3) stimmen der Aussage voll oder eher zu. Mit jeweils 43% ist die Aussage in den Treatments 1 und 2 auch die mit der jeweils höchsten Ausprägung. Die Antwortoption „weder noch“ wird von 40% (Treatment 1), 39% (Treatment 2), 41% (Treatment 3) der Probanden ausgewählt. Dies ist die höchste Ausprägung für Treatment 3. Die jeweils niedrigste Ausprägung liegt mit 2-3% für „Stimme überhaupt nicht zu“ vor.

Abbildung 64: Wirtschaftliche Realisierbarkeit von CCS

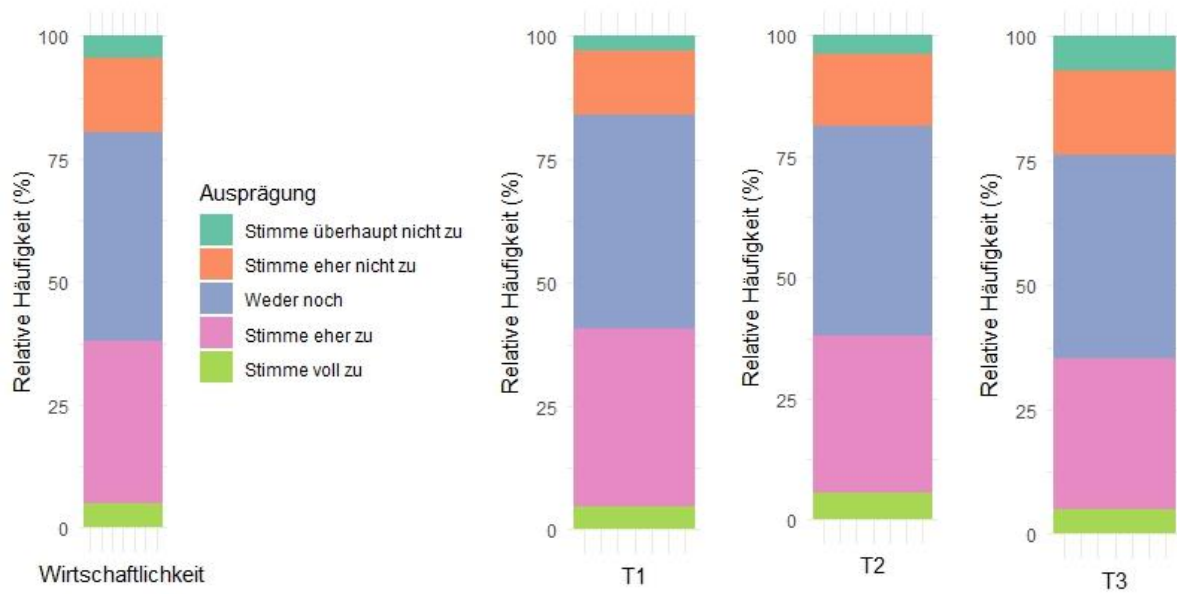
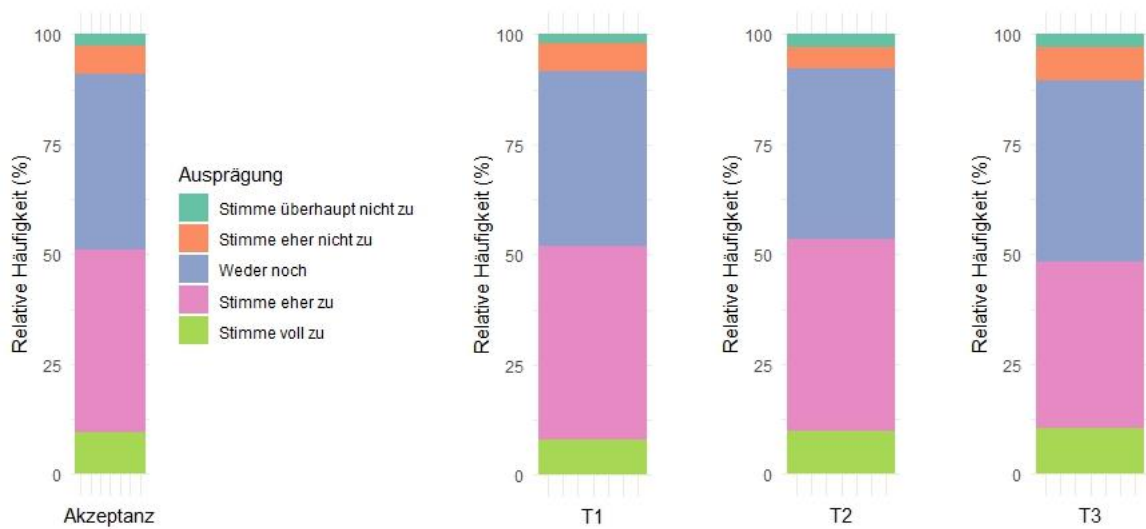
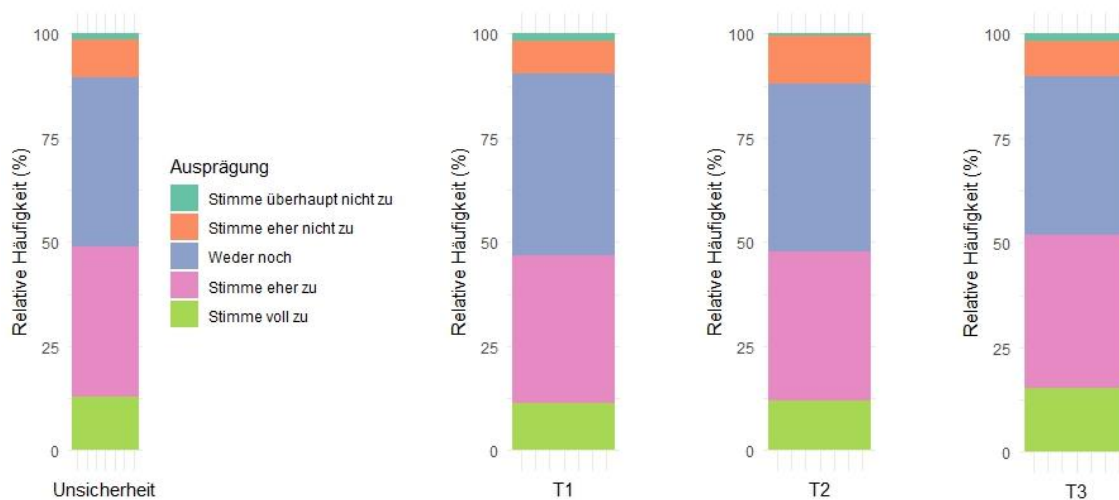


Abbildung 65: Erfolg für CCS abhängig von gesellschaftlicher Akzeptanz



Ein ähnliches Bild zeichnet sich als Antwort auf die Aussage ab, dass CCS mit großen Unsicherheiten verbunden ist (Abbildung 66). Mit im Schnitt 40% liegt die jeweils höchste Ausprägung in der Antwortoption „weder noch“. Die niedrigste Ausprägung liegt mit 1-2% bei der Einschätzung, überhaupt nicht zuzustimmen. In Treatment 1 und 2 sind es knapp 50% die sich insgesamt dafür aussprechen, dass die Einführung mit Unsicherheiten verbunden wäre, für Treatment 3 liegt der Wert knapp über dieser Grenze.

Abbildung 66: CCS ist mit Unsicherheiten verbunden

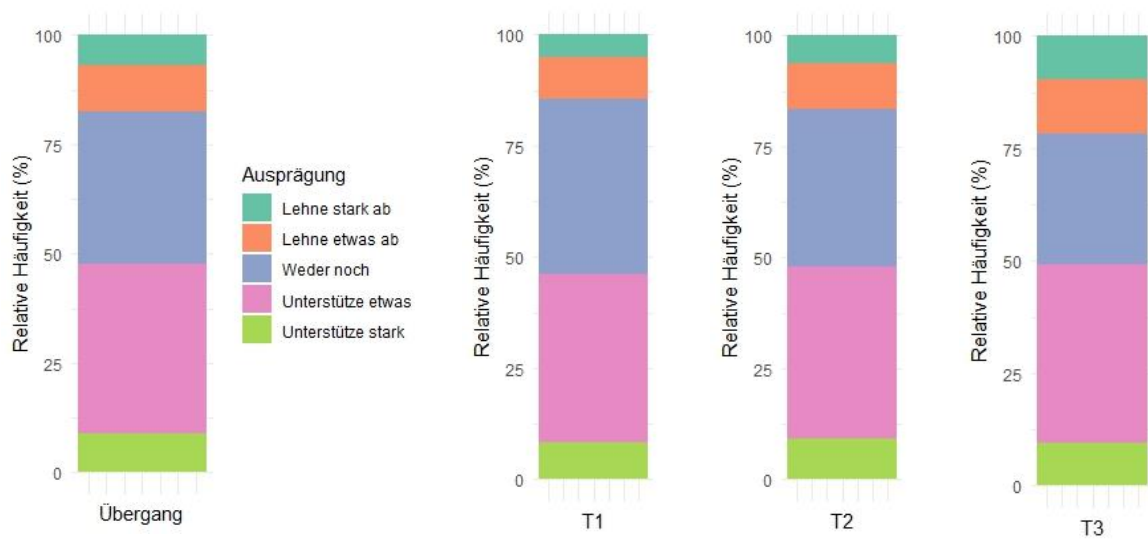


Bedingte Unterstützung

Die Einführung von CCS kann auf unterschiedliche Art und Weise gestaltet werden. Auf diesen Aspekt bei der Einführung und Förderung von CCS in Deutschland zielt dieser Teil der erhobenen Daten ab. Es werden vier verschiedene Konstellationen benannt, von denen sich drei auf den Ort der Speicherstätte beziehen. Erwartet wurde, dass besonders im Zuge der Informationen durch Treatment 3, die Verantwortungsmoral dahingehend verläuft, dass eine Speicherung im Inland gegenüber einer Speicherung im Ausland bevorzugt wird, wenn auch mit Einschränkungen. Die Unterstützung gegenüber der Speicherstätte in der Nähe des eigenen Wohnorts würde geringer ausfallen.

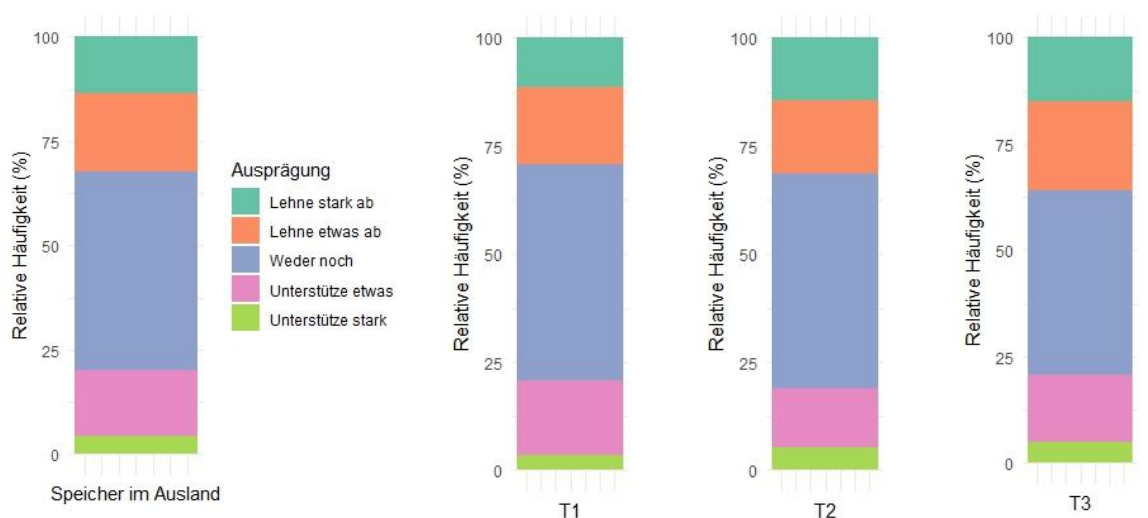
CCS ist als Übergangslösung, bis der Ausbau erneuerbarer Energien weiter fortgeschritten ist denkbar. Die Anteile derer, die diese Aussage etwas unterstützen und die sie mit „weder noch“ beantworten ist ähnlich. Für Treatment 1 sehen die Beobachtungspunkte wie folgt aus: Lehne stark ab 5%, Lehne etwas ab 9%, weder noch 40%, unterstütze etwas 38% und unterstütze stark 8%. Die Ausprägungen für Treatment 2 weichen jeweils um einen Prozentpunkt nach oben oder unten ab, entsprechen in ihrer wesentlichen Aussage aber denen von Treatment 1. In Treatment 3 ist der Anteil derer, die mit „weder noch“ stimmen etwas geringer (29%) und der Anteil derer, die die Aussage etwas ablehnen (12%) etwas größer. Insgesamt sind die Beobachtungen sehr ähnlich (Abbildung 67).

Abbildung 67: CCS als Übergangslösung



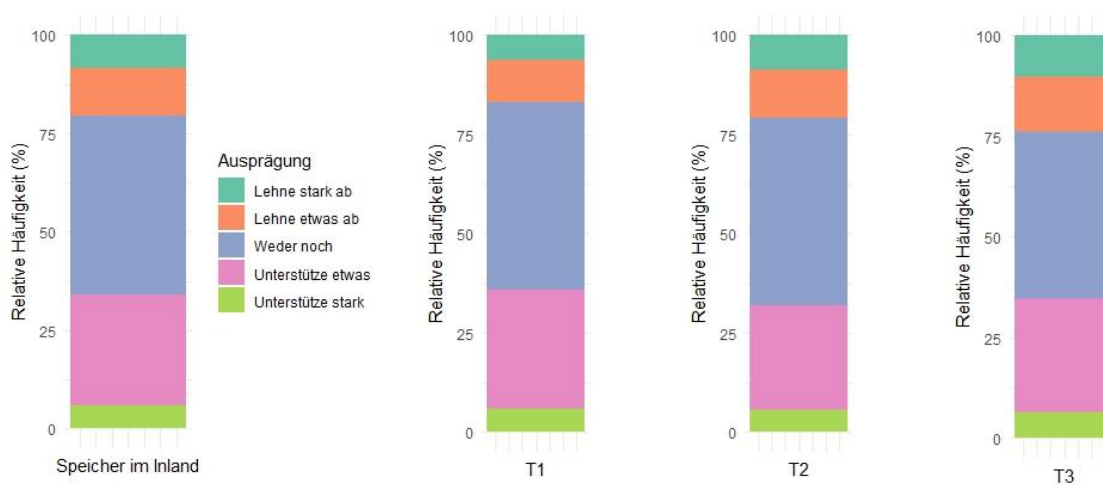
Die den Speicherort betreffenden Fragen weisen alle ein gemeinsames Muster auf. Während die Ausprägungen für Treatment 1 und 2 jeweils nahezu gleich sind, ist der Anteil derer, die die Aussage stark oder etwas ablehnen in Treatment 3 etwas größer. Rund 50% der Teilnehmer würden in Treatment 1 und 2 eine Speicherung im Ausland weder bevorzugen noch unterstützen. In Treatment 3 verfolgen diese Einstellung nur 43% der Teilnehmer. Mit circa 20% ist der Anteil derer, die eine Speicherung im Ausland stark oder etwas unterstützen würden unabhängig von der Informationsgabe gleich hoch ausgeprägt. In Treatment 3 ist der Anteil derer, die eine solche Speicherung etwas oder stark ablehnen höher (Abbildung 68).

Abbildung 68: Speicherort im Ausland



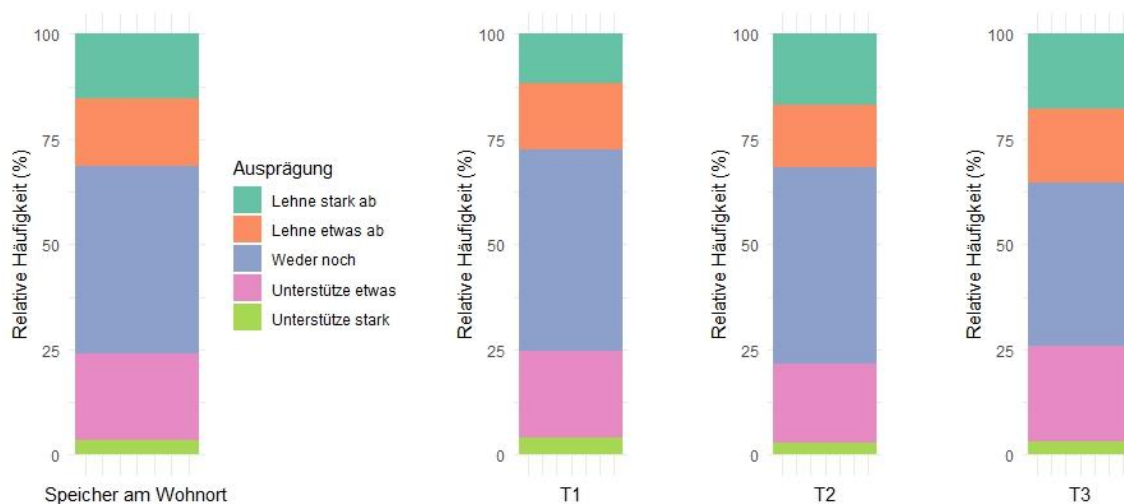
Für die Inlandsspeicherung lässt sich nach Auswertung der Daten sagen, dass der Unterschied zwischen den Ausprägungen in Treatment 1 und 2 mit 3 weniger groß sind (Abbildung 69). Insgesamt ist der Anteil derer, die eine Speicherung im Inland etwas oder stark unterstützen mit 36% (Treatment 1), 32% (Treatment 2), 35% (Treatment 3) größer als bei der Frage nach der Speicherung im Ausland. Entsprechend geringer ist der Anteil Probanden, die die Speicherung stark oder etwas ablehnen.

Abbildung 69: Speicherort im Inland



Erwartungsgemäß sinkt die Zustimmung bei der Frage der Zustimmung bei einer Lage in Wohnortnähe wieder. Am stärksten ist dies in der Gruppe, die die Frage nach Informationen durch Treatment 3 beantwortet hat. Die höchste Ausprägung liegt in der Antwortoption „weder noch“ (48%, 47%, 39%). Die niedrigste Ausprägung ist für alle Treatments die Antwort „unterstütze stark“ und liegt zwischen 3% und 4%. Zusammengefasst mit „unterstütze etwas“, stimmen rund ein Viertel der Teilnehmer der Aussage zu. 15-17% lehnen die wohnortnahe Speicherung etwas ab, 12% (Treatment 1), 17% (Treatment 2) und 18% (Treatment 3) lehnen eine Speicherung im Rahmen der CCS-Technologie in der Nähe ihres Wohnortes stark ab (Abbildung 70).

Abbildung 70: Speicherort in der Nähe des Wohnorts

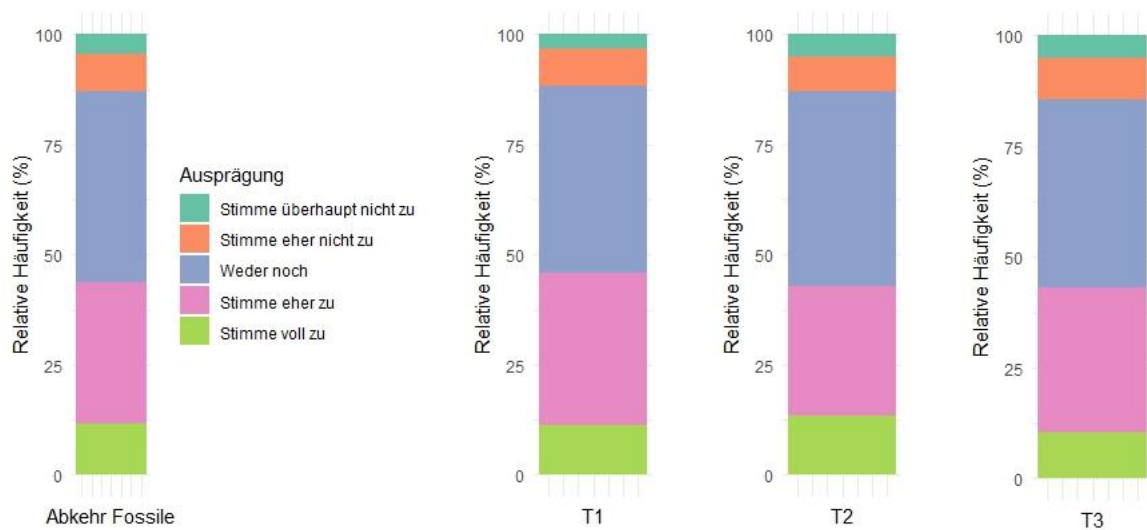


4.4 Länder des globalen Südens

Auch für den folgenden Absatz gilt die in Kapitel 4.3 eingeführte Differenzierung zwischen der Gesamtgruppe, sowie den nach den einzelnen Treatments unterteilten Beobachtungen. In Ländern des globalen Südens gibt es auf Grund des im Vergleich zu Deutschland anderem Status quo in Bezug auf die Verbrennung fossiler Energieträger andere denkbare Optionen zur Integration von CCS in das System und zur künftigen Entwicklung.

Abbildung 71 gibt die graduelle Zustimmung zur Aussage an, dass die Abkehr von fossilen Brennstoffen in den Energiesystemen auf gerechte, geordnete und ausgewogene Weise, um im Einklang mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen bis 2050 einen Netto-Nullpunkt zu erreichen, erstrebenswert ist. Mit im Schnitt 43% entspricht die höchste Ausprägung auch hier der Antwortoption „weder noch“. Im Vergleich der drei Treatments ist eine Steigerung der nicht ausgesprochenen Zustimmung zu beobachten. 11,5% stimmen der Aussage nach den Informationen durch Treatment 1 eher nicht oder überhaupt nicht zu, für Treatment 2 sind es 13% und für Treatment 3 14%. Mit 3% im ersten und jeweils 5% in den beiden weiteren Gruppen ist darin mit der Option „stimme überhaupt nicht zu“ auch die niedrigste Ausprägung enthalten. Im Gegenzug nimmt die Zustimmung („stimme voll zu“ und „stimme eher zu“) ab, stellt man die Beobachtungen innerhalb der Treatments nebeneinander: Rund 44% der Probanden äußern in der ersten Gruppe ihre Zustimmung, 42% in der zweiten Gruppe und 34% in der Dritten.

Abbildung 71: Abkehr von fossilen Brennstoffen



Wie zuvor wird auch hier das Konstrukt betrachtet, in dem die Entwicklung von Technologien wie CCS insbesondere in Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen beschleunigt werden soll. Der größte Stimmenanteil entfällt jeweils auf die Antwortoption „*Stimme eher zu*“. Der Anteil liegt in Treatment 1 und 2 jeweils bei 41%, in Treatment 3 bei 37%. Für die letztgenannte Gruppe ist der Anteil, die mit „*weder noch*“ geantwortet haben gerundet gleich hoch, mit je 36% in den beiden erstgenannten Treatment-Gruppen etwas geringer. Die zustimmenden Antwortoptionen zusammengefasst wird im Schnitt jeweils ein Anteil von rund 50% erreicht. Die Hälfte der Probanden würde einer Beschleunigung des CCS-Technologieausbaus in Kombination mit schwer vermeidbaren Emissionen in Ländern des globalen Südens also zustimmen. Die geringsten Werte weist die Ausprägung „*stimme überhaupt nicht zu*“ auf, wobei prozentuale Werte von 3%, 6% und 7% erreicht werden. Zusammengefasst mit der Antwortoption „*eher nicht zuzustimmen*“ liegt der Anteil bei 11-12% der Probanden (Abbildung 72)

Auch bei der in Abbildung 73 dargestellten Erhebung geht es um die Entwicklungsbeschleunigung von Transformationstechnologien wie CCS, jedoch in diesem Fall im Zusammenspiel mit der Weiternutzung fossiler Energieträger, um dennoch Netto-Null-Emissionen erreichen zu können. Für Treatment 1 entfallen 41% der Stimmen auf die Option „*stimme eher zu*“ und 34% auf „*weder noch*“. Welche der Ausprägungen die am häufigsten gewählt ist, kehrt sich für die beiden anderen Treatment-Gruppen um. Mit jeweils 34% sinkt der Anteil derer, die der Aussage eher

zustimmen im Vergleich, während der Anteil für die Antwortoption „weder noch“ auf 39% beziehungsweise 38% ansteigt. Der niedrigste Anteil entfällt mit 5% (Treatment 1) und 7% (Treatments 2 und 3) jeweils darauf, der Aussage überhaupt nicht zuzustimmen. Insgesamt ist der Anteil mit einer ablehnenden Haltung etwas höher als im Vergleich zur Nutzung von CCS in Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen und der Grad der Zustimmung in diesem Fall sinkt etwas und liegt nur für das erste Treatment noch über 50%.

Abbildung 72: CCS im Sektor mit schwer vermeidbaren Emissionen

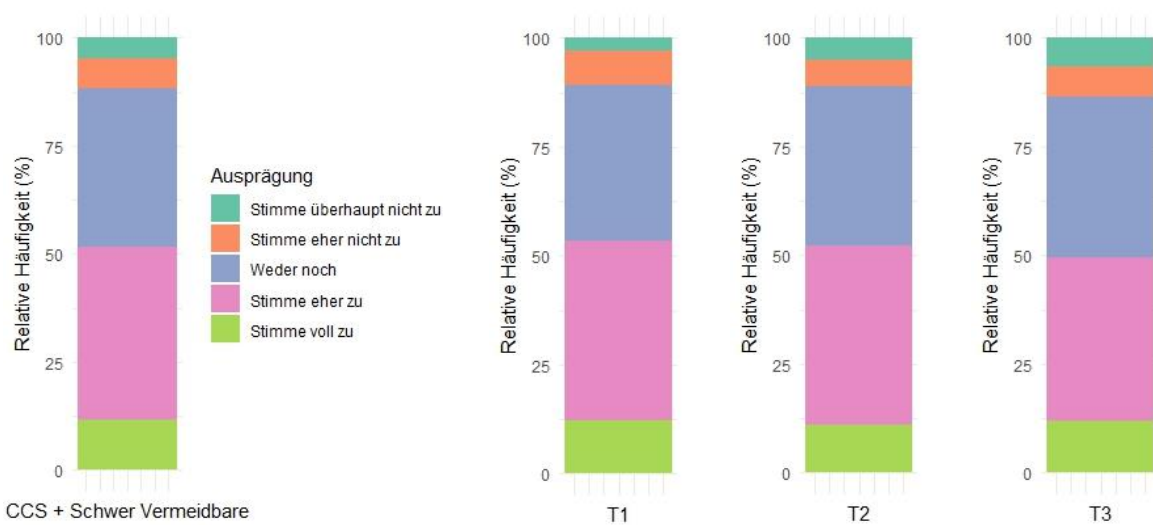
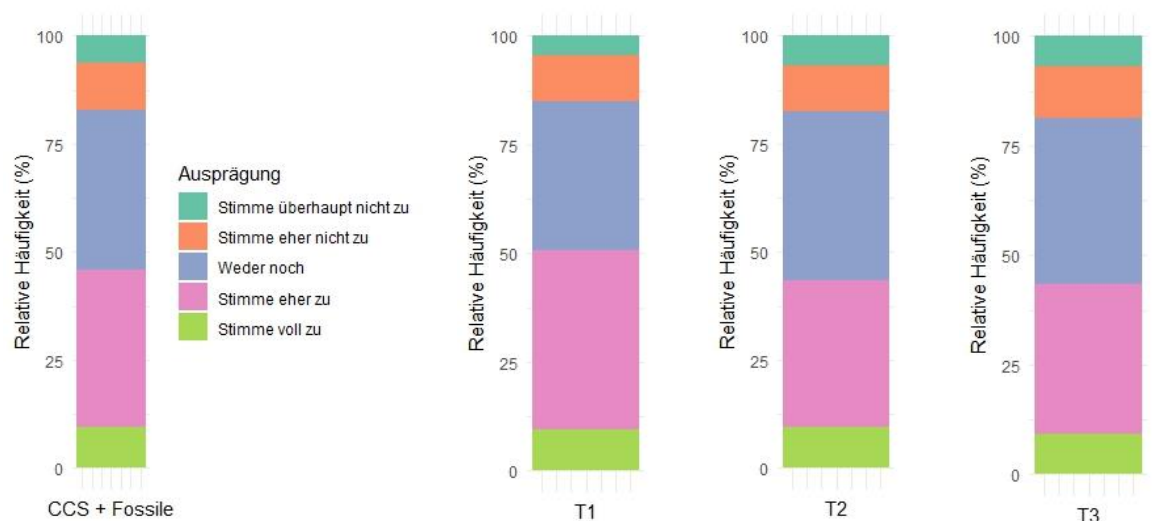


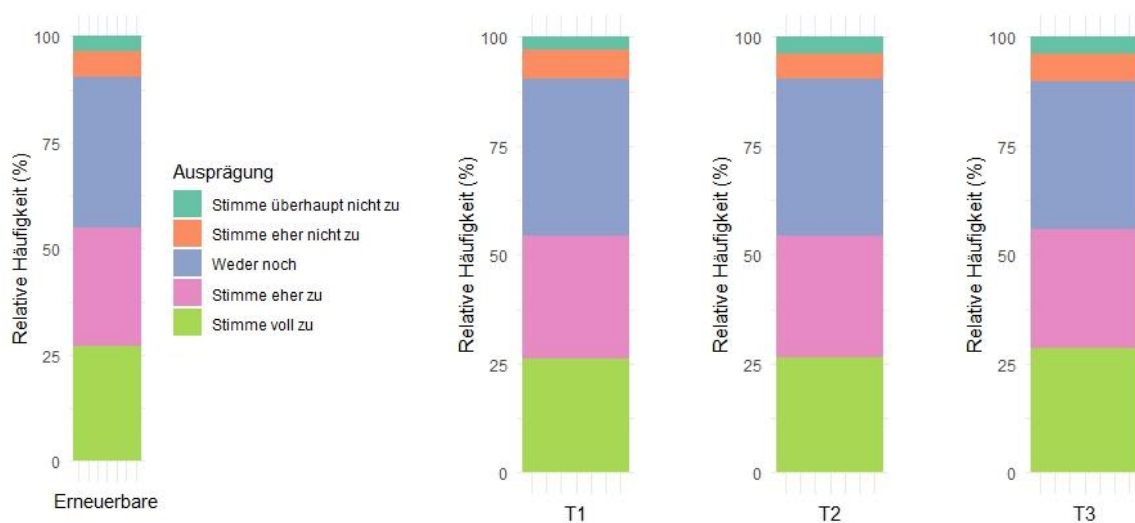
Abbildung 73: CCS in Kombination mit der Nutzung fossiler Energieträger



„Der Einsatz von erneuerbaren Energien ist dem Einsatz von CCS vorzuziehen“ – erwartungsgemäß fallen die Zustimmungswerte für diese Aussage deutlich höher aus als die, die der Aussage eher oder überhaupt nicht zustimmen. Im Schnitt antworten

35% der Befragten mit „weder noch“, die damit einmal mehr die höchste Ausprägung darstellt. Mit jeweils 26% in Treatment 1 und 2 und 28% in Treatment 3 ist der Anteil derer, die der Aussage voll zustimmen hier im Vergleich zu den anderen aufgeworfenen Fragen und Aussagen sehr hoch. Insgesamt liegt die Zustimmung bei knapp 55% in allen Treatments. Entsprechend geringer ist der Anteil der Teilnehmer, die eher nicht oder überhaupt nicht zustimmen. Mit 3% in Treatment 1 und 4% in den anderen beiden liegt der kleinste Anteil jeweils bei der Antwortoption überhaupt nicht zuzustimmen vor (Abbildung 74).

Abbildung 74: Vorzug Einsatz erneuerbarer Energien vor CCS



4.5 Zahlungsbereitschaft

Die vierte benannte Forschungsfrage nimmt Bezug auf die Zahlungsbereitschaft für verschiedene Optionen der CO₂-Minderung. Die Probanden hatten die Möglichkeit eine Summe von maximal 100€ zur Reduktion von 100kg CO₂-Emissionen zu spenden. Die Spendenoption war derart gestaltet, dass eine Spende der Gesamtsumme oder in Teilen möglich war. Zur Auswahl standen die drei im Kapitel zur Struktur des Fragebogens benannten Optionen.

Die Betrachtung der Ergebnisse erfolgt auch hier differenziert nach den Treatments. Die drei Optionen Minderung (M), Natürliche Senke (N) und Technische Senke (T) werden in Tabelle 10 entsprechend abgekürzt. Die Anzahl der Beobachtungen ist in diesem Fall geringer als bei den anderen betrachteten Variablen, da nicht alle Antworten verwertbar waren. Es wurden sowohl Textantworten wie „ja“ oder „nein“ nicht mit in die Auswertung aufgenommen, als auch Antworten, die in der Summe für

die drei Reduktionsoptionen mehr als 100€ ergeben haben oder wenn nur in einem Feld etwas angegeben war. Insgesamt liegen 942 auswertbare Antworten vor, die sich entsprechend der Zeile „Anzahl“ auf die drei Treatment Gruppen verteilen. Es wurde in allen Treatments für alle drei Optionen der Spielraum für mögliche Investitionen voll ausgenutzt, der Maximalwert liegt jeweils bei 100€, der Minimalwert bei 0€. Der Median liegt jeweils unter dem Mittelwert (MW) der einzelnen Datensätze und beträgt in für alle Treatments gleichermaßen 30€ für die Optionen der CO₂-Minderung und der natürlichen Senke und 10€ für die Option der technischen Senke. Beim Vergleich von Treatment 1 und 2 wird deutlich, dass sich die Lage der Mittelwerte im Vergleich zwischen den 3 Optionen ähnlich verteilt. Der für die technische Senke ist deutlich niedriger als die anderen beiden, es wird im Schnitt aber etwas mehr in die natürliche Senke als in die vorher stattfindende Emissionsreduktion investiert. Dabei fallen die Werte für Treatment 1 etwas höher aus als die für die zweite Treatment Gruppe. Auch die Maße für die beobachtete Standardabweichung (SAW) sind ähnlich. Abweichung vom Mittelwert: Eine Standardabweichung von circa 28 - 29 bedeutet, dass die meisten Datenpunkte zwischen ungefähr 6€ und 62€ an liegen. Dies zeigt, dass die Daten relativ weit um den Mittelwert von 33 - 34 herum verteilt sind. Mit der möglichen Bandbreite von 0€ bis 100€ für die Zahlungsmöglichkeiten zeigt eine Standardabweichung von 28, dass die meisten Datenpunkte im mittleren Bereich liegen, aber einige Werte könnten sehr nahe bei 0 oder 100 liegen, um eine so breite Streuung zu erzeugen, wie durch die Angabe von Minimal- und Maximalwert auch deutlich wird. Da der Median bei 30 liegt, deutet dies darauf hin, dass die Verteilung der Daten nicht symmetrisch ist. Der Median ist niedriger als der Mittelwert, was darauf hindeutet, dass es einige niedrigere Werte gibt, die den Durchschnitt nach unten ziehen könnten. Die Streuung für die Investitionen für die technische Senke ist mit 18 beziehungsweise 17 deutlich geringer. Die Datenpunkte sind in einem engeren Intervall um das arithmetische Mittel von 15 beziehungsweise 14 verteilt, wobei es auch in dieser Konstellation mit dem maximalen Investitionswert von 100€ Ausreißer gibt.

Auch die bestimmten Werte für Treatment 3 sind denen der anderen beiden Treatments im Wesentlichen ähnlich. Die Zahlungen für die Minderung und die natürliche Senke fallen im Schnitt mehr als doppelt so hoch aus wie für die technische Senke und auch die Streuung ist für den letztgenannten Teil auch in diesem Fall wesentlich geringer, als in den anderen beiden Gruppen. Der Durchschnittswert für

eine Zahlung zur Emissionsminderung durch den Einsatz von erneuerbaren Energien ist in diesem Fall am niedrigsten, gleichzeitig ist die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft für eine Speicherung in einer natürlichen Senke wie Bäumen in diesem Fall höher.

Tabelle 10: Lagemaße der Zahlungsbereitschaft nach Treatments

	Treatment 1			Treatment 2			Treatment 3		
	M	N	T	M	N	T	M	N	T
Anzahl	307	307	307	317	317	317	318	318	318
MW	34,44	34,75	15,2	33,3	33,91	14,3	32,74	34,46	14,14
Median	30	30	10	30	30	10	30	30	10
Maximal	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Minimal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SAW	28,49	28,94	17,96	28,83	28,15	17	28,54	29,27	18,2
Varianz	811,8 4	834,2 6	322,5 3	830,9 3	792,5 8	288,9 7	814,2 6	856,8 9	331,2 9

5 Konklusion

Die Untersuchung der verschiedenen Akteure im Kontext des Klimawandels hat deutlich gemacht, dass die Frage nach ihrer jeweiligen Rolle unterschiedlich bewertet wird. Ein interessantes Ergebnis ist, dass Einzelpersonen im Vergleich zu Industrie- und Politikakteuren eine geringere Bedeutung im Klimawandel zugeschrieben wird. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Verantwortung und die Handlungsmöglichkeiten zur Bewältigung des Klimawandels eher auf struktureller und institutioneller Ebene gesehen werden.

Ein weiterer bemerkenswerter Befund liegt im Bereich der Fragen zur Technologieakzeptanz vor. Hier zeigt sich ein überwiegend einheitliches Meinungsbild, wobei nur wenige Befragte eine neutrale Antwortoption wählen. Dies legt nahe, dass eine klare Tendenz zur Meinungsbildung besteht und nur wenige Personen ambivalente Haltungen gegenüber Technologiefragen einnehmen.

Die Rolle der Wiederaufforstung in der Bekämpfung des Klimawandels zeigt ein breites Spektrum an Meinungen und Einschätzungen. Dies spiegelt die Komplexität dieses Themas wider und deutet darauf hin, dass es keine einheitliche Sichtweise gibt, sondern vielmehr verschiedene Perspektiven und Argumente.

Interessanterweise zeigt sich bei den Fragen zu CCS in Deutschland und dem Einsatz der Technologie in Ländern des globalen Südens jeweils ein hoher Anteil von Befragten, die die Aussagen neutral oder mit "weder noch" bewerten. Dies könnte darauf hindeuten, dass diese Themen in der öffentlichen Diskussion weniger präsent sind oder dass es an spezifischen Informationen und Kenntnissen mangelt.

Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen ein Bild zeichnen, das auf eine begrenzte Information über Technologie hinweist, aber gleichzeitig eine grundsätzliche Tendenz zur Akzeptanz in der Gesellschaft zeigt. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer umfassenden Aufklärung und Sensibilisierung über Technologien im Zusammenhang mit dem Klimawandel, um eine informierte öffentliche Debatte und Entscheidungsfindung zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis zu A.2

Arning, K.; Offermann-van Heek, J.; Linzenich, A.; Kaetelhoen, A.; Sternberg, A.; Bardow, A.; Ziefle, M. (2019): Same or different? Insights on public perception and acceptance of carbon capture and storage or utilization in Germany. In: *Energy Policy* 125, S. 235–249. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.10.039.

Dechezleprêtre, A. Fabre, A.; Kruse, T.; Planterose, B.; Sanchez Chico, A.; Stantcheva, S. (2022): Fighting Climate Change: International Attitudes Toward Climate Policies. In: *NBER WORKING PAPER SERIES* (NBER Working Paper No. 30265). DOI: 10.3386/w30265.

Fishedick, M.; Pietzner, K.; Supersberger, N.; Esken, A.; Kuckshinrichs, W.; Zapp, P. et al. (2009): Stakeholder acceptance of carbon capture and storage in Germany. In: *Energy Procedia* 1 (1), S. 4783–4787. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.02.304.

Fuss, S.; Jones, C. D.; Kraxner, F.; Peters, G. P.; Smith, P.; Tavoni, M. et al. (2016): Research priorities for negative emissions. In: *Environ. Res. Lett.* 11 (11), S. 115007. DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/115007.

Jakob, M.; Kübler, D.; Steckel, J.; van Veldhuizen, R. (2017): Clean up your own mess: An experimental study of moral responsibility and efficiency. In: *Journal of Public Economics* 155, S. 138–146. DOI: 10.1016/j.jpubeco.2017.09.010.

Kraeusel, J.; Möst, D. (2012): Carbon Capture and Storage on its way to large-scale deployment: Social acceptance and willingness to pay in Germany. In: *Energy Policy* 49, S. 642–651. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.07.006.

Lee, H.; Calvin, K.; Dasgupta, D.; Krinner, G.; Mukherji, A.; Thorne, P. et al. (2023): IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

L'Orange Seigo, S.; Dohle, S.; Siegrist, M. (2014): Public perception of carbon capture and storage (CCS): A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, S. 848–863. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.017.

Merk, C.; Andersen, G.; Nordø, D.; Helfrich, T. (2023): Carbon Capture and Storage: Publics in five countries around the North Sea prefer to do it on their own territory. In: *KIEL Working Paper*, Artikel No. 2252. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/10419/273361>.

Merk, C.; Nordø, Å.; Andersen, G.; Lægreid, O.; Tvinnereim, E. (2022): Don't send us your waste gases: Public attitudes toward international carbon dioxide transportation and storage in Europe. In: *Energy Research & Social Science* 87, S. 102450. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102450.

Parasuraman, A.; Colby, Charles L. (2015): An Updated and Streamlined Technology Readiness Index. In: *Journal of Service Research* 18 (1), S. 59–74. DOI: 10.1177/1094670514539730.

Perdan, Slobodan; Jones, Christopher R.; Azapagic, Adisa (2017): Public awareness and acceptance of carbon capture and utilisation in the UK. In: *Sustainable Production and Consumption* 10, S. 74–84. DOI: 10.1016/j.spc.2017.01.001.

1. Fragebogen

Experiment CCS

Forschungsfragen

2. Von welchen Faktoren ist Akzeptanz für Transformationstechnologien wie CCS abhängig?
3. Wie beeinflusst der Kontext des Einsatzes der Technologie die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS in Deutschland?
4. Wie beeinflusst der Kontext des Einsatzes der Technologie die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS in Ländern des globalen Südens?
5. Wie unterscheidet sich die Zahlungsbereitschaft für verschiedene Formen der Senkung von CO₂?

Inhalt

Executive Summary	iii
1 Einleitung	10
1.1 Zielsetzung des Berichts	12
1.2 Aufbau und Gliederung des Berichts	13
2 Kontext	15
2.1 Der Konflikt um den „richtigen Weg“ in die Zukunft	15
2.2 Im Widerspruch: Ein Blick auf die internationale Debatte	18
2.3 „Der Elefant im Raum“ – Die Faktenlage zu Emissionen und der Nutzung von fossiler Energie mit Kohle	21
2.4 Versuch einer Erklärung	23
3 Die zentralen Probleme der globalen Energieversorgung	25
3.1 Energiearmut der Entwicklungs- und Schwellenländer	28

3.2	CO ₂ -Ausstoß der Entwicklungs- und Schwellenländer – Die UN-Position	34
3.3	CO ₂ -Entwicklung in den Industrieländern und Kosten	37
3.4	Bestandsaufnahme der NDCs der Entwicklungs- und Schwellenländer	43
4	Nutzung von Kohle und Einsatz von Verbrennungsmotoren – Status quo und Perspektiven weltweit	46
4.1	Die zentrale Bedeutung der Kohlekraftwerke – Tendenz wachsend	46
4.2	Die „Switch Coal“-Bewegung	54
4.3	Die zentrale Bedeutung der Verbrennungsmotoren – Tendenz wachsend.....	62
4.4	Die Probleme der Elektro-Mobilität	69
4.5	Ankündigungen nach Dubai.....	73
5	Die Alternativen für das Energiesystem.....	75
5.1	„Kampf“ der Narrative	75
5.2	„All Electric“ und strikte Defossilisierung.....	76
5.3	„All in“ und zwei Säulen für ein Energiesystem.....	79
5.4	Umbau statt Abriss mit gleitenden Übergängen	83
5.5	Die Wiederentdeckung von CCUS im Energiesektor.....	84
5.6	Synthetische Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren nutzen	87
6	Systemische Überlegungen.....	93
6.1	Kohle- und Gaskraftwerke klimafreundlich mit CCUS betreiben.....	93

6.2	Einblick China: Umrüstung der bestehenden Kohlekraftwerke	99
6.3	Vergleich der Kosten unterschiedlicher Antriebssysteme	105
6.4	LKW und Verbrenner (HVO)	115
6.5	Case-Study: Indien	119
6.6	Nature-based Solutions nutzen und finanzieren	131
Anhang		134
A.1	Expertenbefragung in Australien.....	134
A.2	Bevölkerungsbefragung zu CCS-Technologien	146
1.	Einleitung.....	147
2.	Fragebogen	149
2.1	Motivation und Forschungsfrage.....	149
2.2	Struktur	151
3.	Datenerhebung.....	157
4.	Datenauswertung.....	157
4.1	Sozioökonomischer Hintergrund und Einstellung zum Klimawandel	157
4.2	Technologieaffinität und allgemeine Kenntnis zu CCS	162
4.3	CCS in Deutschland	167
4.4	Länder des globalen Südens	180
4.5	Zahlungsbereitschaft	183
		190

5	Konklusion	185
	Literaturverzeichnis zu A.2	186
1.	Fragebogen.....	188
1	Klimawandel	192
2	Allgemeine Affinität und Akzeptabilität von Technologie.....	193
3	Kenntnis zu Carbon Capture and Storage (CCS)	193
4	Treatment	195
5	CCS – generelle Unterstützung	196
6	CCS – Risiken, Kosten, Vorteile	196
7	CCS – Bedingte Unterstützung.....	197
8	CCS – Länder des globalen Südens.....	197
9	Zahlungsbereitschaft	197
10	Sozioökonomischer Hintergrund.....	198
11	Feedback.....	199
	Literaturverzeichnis.....	200

Fragebogen:

#	Thema	Frage/Antwortoptionen	Anmerkungen Programmierung
	Einleitung	Willkommen! Vielen Dank, dass Sie an dieser Befragung teilnehmen möchten. Die Befragung ist Teil einer Studie von Forschenden der Ruhr-Universität Bochum und dauert ca. 10 Minuten. Ihre Angaben sind vollständig anonym und werden gemäß der geltenden hohen Standards zum Datenschutz behandelt. Rückfragen können Sie gerne per E-Mail an die folgende Adresse richten: johanna.ohlig@ruhr-uni-bochum.de	Startseite der Umfrage
			Antwortmöglichkeiten <i>[kursiv in eckigen Klammern]</i> Auswahl durch einfaches Anklicken, nur Dropdownmenü/Textfeld, wenn explizit geschrieben
		1 Klimawandel	
1	Realität	Ist der Klimawandel Ihrer Meinung nach eine Realität? <i>[Ja; Nein]</i>	
2	Menschliches Verschulden	Welcher Anteil des Klimawandels ist Ihrer Meinung nach auf menschliches Verschulden zurückzuführen? <i>[Keiner; ein kleiner Anteil; etwa die Hälfte; ein großer Anteil; Alles]</i>	5-stufige Likert-Skala
3	Problem global	Inwieweit stimmen Sie der folgenden Aussage zu? „Der Klimawandel ist ein globales Problem.“ <i>[Stimme überhaupt nicht zu; Stimme eher nicht zu; Weder noch; Stimme einigermaßen zu; Stimme voll zu]</i>	5-stufige Likert-Skala
4	Einfluss	Inwieweit glauben Sie, beeinflusst der Klimawandel Ihr Leben bereits jetzt oder wird es negativ beeinflussen? <i>[Überhaupt nicht; Ein wenig; Mäßig; Ziemlich; Sehr viel]</i>	5-stufige Likert-Skala
		Welche Rolle spielen die folgenden Akteure Ihrer Ansicht nach bei der Bekämpfung des Klimawandels?	5-stufige Likert-Skala

		<i>[Keine Rolle; eine kleine Rolle; eine moderate Rolle; eine große Rolle; eine sehr große Rolle]</i>	# 5-8 in Tabellenform; Frage übergeordnet, Rolle in Zeilen, Antwortmöglichkeiten Spalten
5	Rolle Einzelner	Jede*r Einzelne im eigenen Handeln und Tun	
6	Rolle der Industrie	Industrie, Firmen und Unternehmen	
7	Rolle der Regierung national	Entscheidungsträger*innen in der Politik auf nationaler Ebene	
8	Rolle EU	Akteur*innen auf europäischer Ebene	
		2 Allgemeine Affinität und Akzeptabilität von Technologie	
		Inwiefern stimmen Sie den folgenden Aussagen zu oder nicht? <i>[Stimme überhaupt nicht zu; Stimme eher nicht zu; Weder noch; Stimme einigermaßen zu; Stimme voll zu]</i>	5-stufige Likert-Skala # 9-11 in Tabellenform; Frage übergeordnet, Aussage in Zeilen, Antwortmöglichkeiten Spalten
9	Optimismus	Neue Technologien tragen zu einer höheren Lebensqualität bei.	
10	Abhängigkeit	Menschen sind zu sehr von Technologie abhängig.	
11	Rolle Lösungsmöglichkeiten	Umwelt-Probleme sollten vor allem mithilfe technologischer Lösungen bekämpft werden.	
		3 Kenntnis zu Carbon Capture and Storage (CCS)	
12	Selbsteinschätzung Wissen	Als wie hoch würden Sie Ihren Wissensstand zum Thema Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff, engl. Carbon Capture and Storage (CCS), beschreiben? <i>[Sehr hoch; Hoch; Moderat; Niedrig; Sehr niedrig]</i>	5-stufige Likert-Skala
		Inwieweit stimmen Sie den folgenden Aussagen zu? <i>[Stimme überhaupt nicht zu; Stimme eher nicht zu; Weder noch; Stimme einigermaßen zu; Stimme voll zu]</i>	
13	Emissionsverringern	CCS ist eine Option, um Emissionen aus fossilen Energie- und Industriequellen zu verringern, sofern die Möglichkeit zur geologischen Speicherung besteht.	5-stufige Likert-Skala
14	Netto-Null-Emissionen	Energiesysteme mit Netto-Null-Emissionen erfordern: eine erhebliche Verringerung des Gesamtverbrauchs an fossilen Brennstoffen, eine minimale Nutzung fossiler Brennstoffe ohne Vermeidungsmaßnahmen sowie den Einsatz	5-stufige Likert-Skala

		von CCS in den verbleibenden fossil betriebenen Systemen.	
15	Verlorene Vermögenswerte	Die Begrenzung der globalen Erwärmung auf 2 °C oder weniger wird eine beträchtliche Menge an fossilen Brennstoffen unverbrannt lassen und könnte erhebliche Teile der Infrastruktur für fossile Brennstoffe zu verlorenen Vermögenswerten werden lassen. Abhängig von seiner Verfügbarkeit könnte CCS eine längere Nutzung fossiler Brennstoffe ermöglichen und so das Ausmaß verlorener Vermögenswerte verringern.	5-stufige Likert-Skala
16	Emissionsintensive Industrie	Emissionsintensive Industriezweige, die stark gehandelte Grundmaterialien herstellen, sind dem internationalen Wettbewerb ausgesetzt. Für eine nachhaltige Industriewende sind breit angelegte und aufeinander aufbauende nationale und subnationale Strategien erforderlich, darunter Emissionsvermeidungsoptionen wie CCS.	5-stufige Likert-Skala
	Rollte CO ₂ -Speicherung Klimaschutz	Als wie hoch schätzen Sie die Rolle der folgenden Möglichkeiten zur CO ₂ -Speicherung in Bezug auf den Klimaschutz ein? <i>Sehr hoch; Hoch; Moderat; Niedrig; Sehr niedrig; Ich habe noch nicht davon gehört</i>	#17-22 gehören zusammen, Frage übergeordnet stellen
17		Aufforstung/Wiederaufforstung und Waldbewirtschaftung: Das Pflanzen von Bäumen, die CO ₂ binden und so der Atmosphäre entziehen und es in lebender Biomasse speichern.	5-stufige Likert-Skala
18		Beschleunigte Verwitterung: Das Zerkleinern und Verteilen von Gesteinen, die von Natur aus CO ₂ aufnehmen, um ihre Oberfläche zu vergrößern, damit sie schneller CO ₂ aufnehmen.	5-stufige Likert-Skala
19		Bindung von Kohlenstoff im Boden: Die Verbesserung der Bindung von Kohlenstoff im Boden durch Erhöhung des Kohlenstoffzuflusses oder Zugabe verbrannter Biomasse.	5-stufige Likert-Skala
20		Ozeandüngung: Die Düngung des Ozeans, damit Meerespflanzen mehr CO ₂ aufnehmen und nach ihrem Absterben in die Tiefsee sinken und Kohlenstoff binden.	5-stufige Likert-Skala
21		Direct Air Capture: Die Verwendung von Chemikalien, um CO ₂ aus der Atmosphäre zu ziehen, das anschließend für die feste Speicherung mineralisiert oder in geologische Lagerstätten gepumpt wird.	5-stufige Likert-Skala
22		CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung: Das Einfangen, Transportieren und unterirdische Speichern von ausgestoßenem CO ₂ .	5-stufige Likert-Skala

		4 Treatment	Informationstreatments Treatments C, T1, T2, T3 nicht gemeinsam in einer Umfrage, randomisiert, wer welche Information bekommt, gleiche Anteile
C	Controlgroup/Baseline information	Beim Abscheiden und Speichern von CO ₂ werden CO ₂ -Emissionen abgeschieden und eingefangen (Carbon Capture), anschließend zum Speicherort transportiert und dort unter hohem Druck unterirdischen gespeichert (Storage).	
T1	T1: Schwer zu mindernde Emissionen	Beim Abscheiden und Speichern von CO ₂ werden CO ₂ -Emissionen abgeschieden und eingefangen (Carbon Capture), anschließend zum Speicherort transportiert und dort unter hohem Druck unterirdischen gespeichert (Storage). Die Begrenzung der globalen Erwärmung erfordert Netto-Null-Emissionen. Dazu sind massive Minderungen der CO ₂ -Emissionen aus der bestehenden Nutzung von fossilen Brennstoffen erforderlich, um das verbleibende Kohlenstoffbudget nicht zu überschreiten. CCS könnte die verbleibenden schwer zu mindernden Emissionen kompensieren.	
T2	T2: Negative Emissionen	Beim Abscheiden und Speichern von CO ₂ werden CO ₂ -Emissionen abgeschieden und eingefangen (Carbon Capture), anschließend zum Speicherort transportiert und dort unter hohem Druck unterirdischen gespeichert (Storage). Wenn die globale Erwärmung 1,5 °C überschreitet, könnte sie schrittweise wieder gesenkt werden, indem CO ₂ -Emissionen aus der Atmosphäre entnommen werden und so negative CO ₂ -Emissionen entstehen. Dies würde einen Einsatz von CO ₂ -Entnahmetechnologien, darunter auch CCS, erfordern.	
T3	T3: Trade Off Effizienz und Moral	Beim Abscheiden und Speichern von CO ₂ werden CO ₂ -Emissionen abgeschieden und eingefangen (Carbon Capture), anschließend zum Speicherort transportiert und dort unter hohem Druck unterirdischen gespeichert (Storage).	

		CCS bietet die Möglichkeit, dass Verursacher von CO ₂ -Emissionen diese selbst beseitigen. Die Speicherung in Deutschland kann mehr Kosten verursachen, als eine Speicherung im Ausland.	
		5 CCS – generelle Unterstützung	
23	Generelle Unterstützung	Unterstützen Sie die Einführung von CCS in Deutschland oder lehnen Sie diese ab? <i>[Lehne stark ab; Lehne etwas ab; Weder noch; Unterstütze etwas; Unterstütze sehr]</i>	5-stufige Likert-Skala
24	Mediale Wahrnehmung	Wie nehmen Sie die Darstellung von CCS in den Medien und in der Politik wahr? <i>[Sehr negativ; negativ; neutral; positiv; sehr positiv]</i>	5-stufige Likert-Skala
		6 CCS – Risiken, Kosten, Vorteile	
		Uns interessiert Ihre Meinung zum Thema Kohlenstoff Speicherung. Inwieweit stimmen Sie den folgenden Aussagen zu? Die Förderung und Einführung der CCS-Technologie... <i>[Stimme überhaupt nicht zu; Stimme eher nicht zu; Weder noch; Stimme eher zu; Stimme voll zu]</i>	
25	Umweltentlastung	bedeutet allgemein eine Entlastung für die Umwelt.	5-stufige Likert-Skala
26	Effektivität	trägt dazu bei, den Klimawandel zu bekämpfen.	5-stufige Likert-Skala
27	Herauszögern Emissionen	zögert das Problem der zunehmenden Emissionen nur heraus.	5-stufige Likert-Skala
28	Umweltgefahren	birgt Gefahren für die Umwelt.	5-stufige Likert-Skala
29	Verzögerungen EE Ausbau	verzögert den Ausbau der erneuerbaren Energien.	5-stufige Likert-Skala
30	Vorwand status quo	ist nur ein Vorwand, um weiter fossile Energieträger verbrennen zu können.	5-stufige Likert-Skala
31	Gesundheitsgefahren	birgt Gefahren für die menschliche Gesundheit.	5-stufige Likert-Skala
32	Prozesskosten	bedeutet hohe Kosten für Abscheidung, Transport und Speicherung.	5-stufige Likert-Skala
33	Wirtschaftlichkeit	ist wirtschaftlich realisierbar.	5-stufige Likert-Skala
34	Akzeptanz	ist für ihren Erfolg abhängig von der gesellschaftlichen Akzeptanz der Technologie.	5-stufige Likert-Skala
35	Unsicherheiten	ist mit großen Unsicherheiten verbunden.	5-stufige Likert-Skala

		7 CCS – Bedingte Unterstützung	
		Die Einführung von CCS kann auf unterschiedliche Weise gestaltet werden. Würden Sie die Einführung von CCS in Deutschland unterstützen oder ablehnen, wenn... <i>[Lehne stark ab; Lehne etwas ab; Weder noch; Unterstütze etwas; Unterstütze stark]</i>	#36-39 in Tabellenform; Frage übergeordnet, Satzfortführung in Zeilen, Antwortmöglichkeiten Spalten 5-stufige Likert-Skala
36	Übergangslösung	es eine Übergangslösung wäre bis der Ausbau der erneuerbaren Energien weiter fortgeschritten ist?	
37	Speicherstätte Ausland	die Speicherstätten im Ausland liegen?	
38	Speicherstätte Inland	die Speicherstätten in Deutschland liegen?	
39	Speicherstätte Wohnort	eine Speicherstätte in der Nähe ihres Wohnorts liegt?	
		8 CCS – Länder des globalen Südens	
		CCS kann auch in Ländern des globalen Südens eingesetzt werden. Inwieweit stimmen Sie den folgenden Aussagen zu? <i>Stimme überhaupt nicht zu; Stimme eher nicht zu; Weder noch; Stimme eher zu; Stimme voll zu</i>	#40-43 gehören zusammen, Frage übergeordnet stellen
40	Abkehr fossile Brennstoffe	Die Abkehr von fossilen Brennstoffen in den Energiesystemen auf gerechte, geordnete und ausgewogene Weise, um im Einklang mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen bis 2050 einen Netto-Nullpunkt zu erreichen, ist erstrebenswert.	5-stufige Likert-Skala
41	CCS + schwer vermeidbare	Die Entwicklung von Technologien wie CCS, insbesondere in Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen, soll beschleunigt werden.	5-stufige Likert-Skala
42	CCS + Fossile	Die Entwicklung von Technologien wie CCS soll beschleunigt werden, um in Kombination mit der Nutzung fossiler Energieträger eingesetzt zu werden, damit Netto-Null-Emissionen erreicht werden.	5-stufige Likert-Skala
43	Erneuerbare	Der Einsatz von erneuerbaren Energien ist dem Einsatz von CCS vorzuziehen.	5-stufige Likert-Skala
		9 Zahlungsbereitschaft	

44		<p>Gehen Sie davon aus, dass Sie 100€ zur Verfügung haben. Sie haben die Möglichkeit diese in Teilen oder ganz zu spenden. Wie viel wären Sie bereit, für die Reduktion von 100kg CO₂-Emissionen zu spenden?</p> <p>Option 1: Minderung. Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien wird weniger CO₂ ausgestoßen.</p> <p>Option 2: Natürliche Senke. CO₂ wird nach dem Ausstoß in natürlichen Senken wie Bäumen gespeichert.</p> <p>Option 3: Technische Senke. CO₂ wird nach dem Ausstoß mit Hilfe technologischer Methoden eingefangen, transportiert und unterirdisch gespeichert.</p>	Felder zum freien Eintragen von Text hinter den jeweiligen Optionen
		10 Sozioökonomischer Hintergrund	
		Wir möchten Sie bitten, die folgenden Fragen zu ihrer Person zu beantworten.	
45	Alter	<p>Wie alt sind Sie? <i>Open-ended</i></p>	Textfeld
46	Geschlecht	<p>Welchem Geschlecht fühlen Sie sich zugehörig? <i>[Weiblich; Männlich; Anderes]</i></p>	Dropp-Down-Feld
47	Bildung	<p>Welcher ist ihr höchster Bildungsabschluss? <i>[Keine abgeschlossene Schulbildung; Untere Sekundarstufe (z.B. Hauptschul- oder Realschulabschluss); Beruflicher Abschluss/Ausbildung; Abitur; Bachelor; Master/Diplom oder Promotion]</i></p>	
48	Beschäftigungsstatus	<p>Wie ist Ihr Beschäftigungsstatus? <i>[Vollzeit angestellt; Teilzeit angestellt; Selbstständig; Schüler*in/ Student*in; Im Ruhestand; Arbeitslos (auf Jobsuche); Inaktiv (Nicht auf Jobsuche)]</i></p>	
49	Ballungsraum	<p>In welcher Art von Ballungsraum leben Sie? <i>[Ländliche Gegend; Kleinere Kleinstadt (5.000-20.000 Einwohner); Große Kleinstadt (20.000-50.000 Einwohner); Stadt oder Vorstadt einer solchen (50.000-250.000 Einwohner); Großstadt oder Vorstadt einer solchen (250.000-1.000.000 Einwohner); Metropole (über 1 Million Einwohner)]</i></p>	
50	Bundesland	In welchem Bundesland leben Sie?	Drop-Down-Feld

		<i>[Baden-Württemberg; Bayern; Berlin; Brandenburg; Bremen; Hamburg; Hessen; Mecklenburg-Vorpommern; Niedersachsen; Nordrhein-Westfalen; Rheinland-Pfalz; Saarland; Sachsen; Sachsen-Anhalt; Schleswig-Holstein; Thüringen]</i>	
51	Kinder	Wie viele Kinder haben Sie? <i>[0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10 oder mehr]</i>	Drop-Down-Feld
52	Einkommen	In welche der folgenden Kategorien lässt sich das monatliche Nettoeinkommen Ihres <u>Haushalts</u> im Jahr 2023 einordnen? Gemeint ist die Summe, die sich aus Lohn, Gehalt, Einkommen aus selbstständiger Tätigkeit, Rente oder Pension, jeweils nach Abzug der Steuern und Sozialversicherungsbeiträge ergibt. Rechnen Sie bitte auch die Einkünfte aus öffentlichen Beihilfen, Einkommen aus Vermietung, Verpachtung, Wohngeld, Kindergeld und sonstige Einkünfte hinzu. <i>[Unter 700 Euro; 700 bis unter 1.200 Euro; 1.200 bis unter 1.700 Euro; 1.700 bis unter 2.200 Euro; 2.200 bis unter 2.700 Euro; 2.700 bis unter 3.200 Euro; 3.200 bis unter 3.700 Euro; 3.700 bis unter 4.200 Euro; 4.200 bis unter 4.700 Euro; 4.700 bis unter 5.200 Euro; 5.200 bis unter 5.700 Euro; 5.700 bis unter 8.000 Euro; 8.000 bis unter 15.000 Euro; 15.000 Euro oder mehr; [keine Angabe]]</i>	
53	Wahlverhalten	Welche Partei haben Sie bei der vergangenen Bundestagswahl gewählt? <i>[AfD; Bündnis 90/Die Grünen; CDU/ CSU; FDP; Die Linke; SPD; Andere; Keine; Ich möchte diese Frage nicht beantworten; Ich habe kein Stimmrecht in Deutschland]</i>	Drop-Down-Feld
		11 Feedback	
54	Feedback	Haben Sie zum Abschluss noch Anmerkungen zu dieser Befragung? Tragen Sie diese gerne hier ein. <i>(open-ended, optional)</i>	Freies Textfeld, optionale Eingabe

Literaturverzeichnis

AA – Auswärtiges Amt (2023). *The Petersberg Climate Dialogue 2023*. Im Internet unter: <https://www.auswaertiges-amt.de/blob/2595566/5324a0a6dcaa4c989e13eb3618560c09/230504-pcd-co-chairs-summary-data.pdf>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

Aatola, H. et al. (2008). *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine*. In: SAE International Journal of Engines. 1. Im Internet unter: <http://dx.doi.org/10.4271/2008-01-2500>. Abgerufen am: 17. Juni 2024.

BETD – Berlin Energy Transition Dialogue (2024). *The Conference*. Im Internet unter: <https://www.energydialogue.berlin/the-conference/>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

BCG – Boston Consulting Group (2021). *Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*. Im Internet unter: <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>. Abgerufen am: 9. April 2024.

BP (2021). *Statistical Review of World Energy. 2021 | 70th edition*. Im Internet unter: <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2021-a-dramatic-impact-on-energy-markets.html>. Abgerufen am: 9. April 2024.

BP (2023). *bp Energy Outlook. 2023 edition*. Im Internet unter: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Canals, C. et al. (2020). *The COVID-19 dilemma: mobility and economy*. In: CaixaBank Research. Im Internet unter: https://www.caixabankresearch.com/sites/default/files/content/file/2020/06/90783-im06_20_06_ei-ue_focus_7_en.pdf. Abgerufen am: 9. April 2024.

CEA – Central Electricity Authority, Indien (2023). *Private Kommunikation*.

CEET – Council of Engineers for the Energy Transition (2024). *Issue Briefs*. Im Internet unter: <https://www.unsdsn.org/ceet>. Abgerufen am: 18. April 2024.

CREA – Centre for Research on Energy and Clean Air; Global Energy Monitor (2023). *China's new coal power spree continues as more provinces jump on the*

- bandwagon*. Im Internet unter: https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2023/08/CREA_GEM_China-coal-power-briefing-2023H1_08.2023.pdf. Abgerufen am: 9. April 2024.
- Delhaes, D. (2022). *Die drei Illusionen der deutschen Verkehrspolitik*. In: Handelsblatt. Im Internet unter: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/neue-mobilitaet-die-drei-illusionen-der-deutschen-verkehrspolitik/28010798.html>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- dena – Deutsche Energie-Agentur (2018a). *dena-Leitstudie. Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*. Im Internet unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf. Abgerufen am: 2. Mai 2024.
- dena – Deutsche Energie-Agentur (2018b). *Power to X: Technologien*. Im Internet unter: https://h2-dialog.info/fileadmin/H2_Dialog/Dokumente/Factsheets/DENA-Factsheet2_Power_to_X_Allgemein.pdf. Abgerufen am 13.06.2024.
- dena – Deutsche Energie-Agentur (2022). *Vergleich der „Big 5“-Klimaneutralitätsszenarien*. Im Internet unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/vergleich-der-big-5-klimaneutralitaetsszenarien/>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.
- Destatis – Statistisches Bundesamt (2023a). *Straßenverkehr: Dominanz des Autos ungebrochen*. Im Internet unter: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Verkehr/Auto.html>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- Destatis – Statistisches Bundesamt (2023b). *Straßenverkehr: EU-weite CO₂-Emissionen seit 1990 um 21 % gestiegen*. Im Internet unter: [https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO₂_Strassenverkehr.html](https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2_Strassenverkehr.html). Abgerufen am: 9. April 2024.
- Drechsler, W.; Lumme, C. (2022). *Energiekrise - Ersatz für russisches Gas: Europa setzt auf die Trans-Sahara-Pipeline*. In: Handelsblatt. Im Internet unter: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/energiekrise-ersatz-fuer-russisches-gas-europa-setzt-auf-die-trans-sahara-pipeline/28470276.html>. Abgerufen am: 28. April 2024.
- Edwards, M. R. et al. (2022). *Quantifying the regional stranded asset risks from new coal plants under 1.5 °C*. In: Environ. Res. Lett. 17 024029. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4ec2>. Abgerufen am: 3. Mai 2024.

European Commission (2021). *EU Reference Scenario 2020. Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050*. Im Internet unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/35750>. Abgerufen am: 9. April 2024.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2022a). *The State of World's Forests – Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. Im Internet unter: <https://doi.org/10.4060/cb9360en>. Abgerufen am: 28. Februar 2023.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2022b). *Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – GSOCseq v.1.1 – Technical Report*. Im Internet unter: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb9002en>. Abgerufen am: 21. Mai 2023.

Finanzen100 (2017). *Backpulver statt Abgase. Indien besitzt das erste Kohlekraftwerk, das kein CO₂ in die Luft pustet*. 05. Januar 2017. Im Internet unter: https://www.finanzen100.de/finanznachrichten/wirtschaft/backpulver-statt-abgase-indien-besitzt-das-erste-kohlekraftwerk-das-kein-co2-in-die-luft-pustet_H1437391333_364882/. Abgerufen am 14.06.2024

Friedlingstein, P., et al. (2022). *Global Carbon Budget 2021*. Earth System Scientific Data, 14, 1917–2005, 2022. Im Internet unter: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1917/2022/>. Abgerufen am: 27. April 2023.

Friedlingstein, P. et al. (2023). *Global Carbon Budget 2023*. In: Earth System Science Data, Volume 15, Issue 12. Im Internet unter: <https://essd.copernicus.org/articles/15/5301/2023/>. Abgerufen am: 28. April 2024.

Frontier Economics et al. (2018). *The Importance of the Gas Infrastructure for Germany's Energy Transition*. Im Internet unter: <https://www.frontier-economics.com/media/y1hg24pc/fnb-green-gas-study-english-full-version.pdf>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

Frontier Economics (2020). *Der Effizienzbegriff in der klimapolitischen Debatte zum Strassenverkehr. Ein gesamtheitlicher Ansatz für die Effizienzbewertung von Technologien*. Im Internet unter: https://en2x.de/wp-content/uploads/2021/08/Studie_Effizienzvergleich_Strassenverkehr_deutsch.pdf. Abgerufen am: 9. April 2024.

Fuhr, L. (2024). *Doch weiter mit Öl und Gas?* In: Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 12. Februar 2024.

Fusiek, D. A. (2022). *A drive to develop*. In: European Investment Bank. Im Internet unter: <https://www.eib.org/en/stories/developing-countries-transport-infrastructure>. Abgerufen am: 9. April 2024.

FVV – Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (2018). *Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft. Optionen für eine klimaneutrale Mobilität im Jahr 2050*. Im Internet unter: https://www.fvv-net.de/fileadmin/Transfer/Downloads/E-Paper/FVV_Kraftstoffe_Studie_Energiepfade_final_v.3_2018-10-01_DE.pdf. Abgerufen am: 9. April 2024.

FVV – Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (2020). *Cradle-to-Grave- Lebenszyklus-analyse im Mobilitätssektor. Metastudie zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe*. Im Internet unter: https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/020.30_Bilanz_gezogen/FVV_LCA_Lebenszyklusanalyse_Frontier_Economics_R595_final_2020-06_DE.pdf. Abgerufen am 13.06.2024.

FVV – Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (2021). *Zukünftige Kraftstoffe: FVV Kraftstoffstudie IV. Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter. Final Report. 1269 | 2021 – Frankfurt am Main*. Im Internet unter: https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/020.50_Sechs_Thesen_zur_Klimaneutralitaet_des_europaeischen_Verkehrssektors/FVV_Future_Fuels_StudyIV_The_Transformation_of_Mobility_H1269_2021-10_EN.pdf. Abgerufen am 10.05.2024

GES – Global Energy Solutions (2023). *Entwicklung einer Referenzlösung für ein weltweites klimaneutrales und Wohlstand schaffendes Energiesystem*. Im Internet unter: <https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2023/10/2023-Abschlussreport-Global-Energy-Perspectives.pdf>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

Global Energy Monitor et al. (2023). *Boom and Bust Coal 2023. Tracking the Global Coal Plant Pipeline*. Im Internet unter: <https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2023/03/Boom-Bust-Coal-2023.pdf>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Global Energy Monitor (2024). *Global Coal Plant Tracker*. Im Internet unter: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Graf, R. (2023). *Energy History and Histories of Energy*. Im Internet unter: <https://doi.org/10.14765/zzf.dok-2616>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

Hosp, G. (2024). «Die ganze Diskussion um die Energiewende scheint manchmal den Bezug zur Realität zu verlieren.», sagt Daniel Yergin, der einflussreichste

- Energie-Analytiker der Welt*. In: Neue Zürcher Zeitung. Im Internet unter: <https://www.nzz.ch/wirtschaft/die-ganze-diskussion-um-die-energiewende-scheint-manchmal-den-bezug-zur-realitaet-zu-verlieren-sagt-daniel-yergin-der-einflussreichste-energie-analytiker-der-welt-ld.1819617>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- Idel, R. (2022). *Levelized Full System Costs of Electricity*. In: Energy, Volume 259, 124905. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124905>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- IEA – International Energy Agency (2016). *Ready for CCS Retrofit*. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/ready-for-ccs-retrofit>. Abgerufen am: 3. Mai 2024.
- IEA – International Energy Agency (2019). *Transport sector CO₂ emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030*. Im Internet unter: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/transport-sector-co2-emissions-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- IEA – International Energy Agency (2021a). *About CCUS. Playing an important and diverse role in meeting global energy and climate goals*. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/about-ccus>. Abgerufen am 14.06.2024.
- IEA – International Energy Agency (2021b). *Is carbon capture too expensive?* Im Internet unter: <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>. Abgerufen am: 3. Mai 2024.
- IEA – International Energy Agency (2021). *Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector*. Im Internet unter: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. Abgerufen am: 10. Juli 2024.
- IEA – International Energy Agency (2023a). *Coal 2023. Analysis and forecast to 2026*. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/coal-2023>. Abgerufen am: 10. Juli 2024.
- IEA – International Energy Agency (2023b). *World Energy Outlook 2023*. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Abgerufen am: 28. April 2024.

- IEA – International Energy Agency (2023c). *World Energy Investment 2023*. Im Internet unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8834d3af-af60-4df0-9643-72e2684f7221/WorldEnergyInvestment2023.pdf>. Abgerufen am: 10. Juli 2024.
- IEAGHG – IEA Environmental Projects (2011). *Retrofitting CO₂ Capture to Existing Power Plants*. Im Internet unter: [https://ieaghg-publications.s3.eu-north-1.amazonaws.com/Technical+Reports/2011-02+Retrofitting+CO₂+Capture+to+Existing+Power+Plants.pdf](https://ieaghg-publications.s3.eu-north-1.amazonaws.com/Technical+Reports/2011-02+Retrofitting+CO2+Capture+to+Existing+Power+Plants.pdf). Abgerufen am: 3. Mai 2024.
- IEAGHG – IEA Environmental Projects (2023). *Proceedings: CCS Cost Network 2023 Workshop*. Im Internet unter: <https://ieaghg.org/publications/technical-reports/reports-list/10-technical-reviews/1103-2023-tr04-ccs-cost-network-workshop-proceedings-2023>. Abgerufen am: 3. Mai 2024.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2005). Rubin, E. und H. De Coninck. *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. UK: Cambridge University Press. TNO (2004): *Cost Curves for CO₂ Storage, Part 2* (2005): 14.
- IRENA – International Renewable Energy Agency (2021). *World Energy Transitions Outlook: 1,5 °C Pathway*. Im Internet unter: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf?rev=71105a4b8682418297cd220c007da1b9. Abgerufen am 10. Juli 2024.
- IRENA – International Renewable Energy Agency (2024). *Renewable Capacity Highlights*. 27 March 2024. Im Internet unter: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2024.pdf?rev=7692ae29458142dd8563618f496e0abb. Aufgerufen am 12. Juni 2024.
- Jakob, M.; Steckel, J. C. (2022). *The Political Economy of Coal: Obstacles to Clean Energy Transitions*. Routledge. Im Internet unter: <https://doi.org/10.4324/9781003044543>. Abgerufen am: 3. Mai 2024.
- Johnson, N. et al. (2015). *Stranded on a low-carbon planet: Implications of climate policy for the phase-out of coal-based power plants*. In: *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 90, Part A, Pages 89-102. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.02.028>. Abgerufen am: 3. Mai 2024.

- Käufer, T. (2023). *Energieversorgung - Deutschland ersetzt Atomstrom mit schmutziger Kohle aus Kolumbien*. In: WELT. Im Internet unter: <https://www.welt.de/politik/ausland/plus247255598/Deutschland-ersetzt-Atomstrom-mit-schmutziger-Kohle-aus-Kolumbien.html>. Abgerufen am: 28. April 2024.
- Koch, T. (2022). *Emissionen und CO₂ Reduktion im Sektor Verkehr: Eine Statusbeschreibung und Analyse*. [Vortrag]. Videoaufzeichnung im Internet unter: https://www.youtube.com/watch?v=f9uMxNNfxC0&list=PLlI6akk9oK2rbpsdNd_MveLy-xVvkkOXW&index=7. Abgerufen am: 9. April 2024.
- KPMG (2020). *Mobility 2030. ICE in Africa*. Im Internet unter: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/za/pdf/pdf2020/mobility-2030-ice-in%20africa.pdf>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- Li, B. et al. (2020). *Estimation of Regional Economic Development Indicator from Transportation Network Analytics*. In: Sci Rep 10, 2647. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59505-2>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- Lo, J. (2024). "A la carte menu": Saudi minister claims Cop28 fossil fuel agreement is only optional. In: Climate Home News. Im Internet unter: <https://www.climatechangenews.com/2024/01/10/a-la-carte-menu-saudi-minister-claims-cop28-fossil-fuel-agreement-is-only-optional/>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- MCC – Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (2018). *MCC Policy Brief. No. 4 – August 2018. Closing the deal on the end of coal. Price in the true costs of fossil fuels, de-risk low-carbon investments, support developing countries*. Im Internet unter: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/MCC_Policy_Brief_Coal_EN.pdf. Abgerufen am: 9. April 2024.
- McKinsey & Company (2022a). *Power to move: Accelerating the electric transport transition in sub-Saharan Africa*. Im Internet unter: https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/power-to-move-accelerating-the-electric-transport-transition-in-sub-saharan-africa#. Abgerufen am: 9. April 2024.
- McKinsey & Company (2022b). *The energy transition: A region-by-region agenda for near-term action*. Im Internet unter: <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/the-energy-transition-a-region-by-region-agenda-for-near-term-action>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- McKinsey & Company (2022c). *The net-zero transition: What it would cost, what it could bring*. Im Internet unter:

<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/the%20net%20zero%20transition%20what%20it%20would%20cost%20what%20it%20could%20bring/the-net-zero-transition-what-it-would-cost-and-what-it-could-bring-final.pdf>. Abgerufen am: 9. April 2024.

McKinsey & Company (2024). *Zukunftspfad Stromversorgung: Perspektiven zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit der Energiewende in Deutschland bis 2035*. Im Internet unter: https://www.mckinsey.de/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2024/2024-01-17%20zukunftspfad%20stromversorgung/januar%202024_mckinsey_zukunftspfad%20stromversorgung.pdf. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

Mulugetta, Y. et al. (2022). *Africa needs context-relevant evidence to shape its clean energy future*. In: *Nat Energy* 7, 1015–1022. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01152-0>. Abgerufen am: 9. April 2024.

OICA – International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (2020). *Motorization Rate 2020 – Worldwide*. Visualisierung: TastyCake Wikipedia. Im Internet unter: <https://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Öko-Institut e.V. et al. (2020). *StratON. Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge*. Im Internet unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Our World in Data (2023a). *Annual CO₂ emissions*. Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?time=1952..latest&country=OECD+%28GCP%29~USA~DEU~GBR~FRA>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Our World in Data (2023b). *Energy use per person, 2022*. Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

Our World in Data (2023c). *Per capita CO₂ emissions, 2022*. Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

Our World in Data (2023d). *Per capita electricity generation, 2022*. Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-electricity-generation>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

- Our World in Data (2024a). *Consumption-based CO₂ emissions per capita vs. Human Development Index, 2021*. Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-co-emissions-vs-human-development-index>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.
- Our World in Data (2024b). *Primary Energy Consumption by Source, 2024*. Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-substitution?time=1940..latest> Abgerufen am 12. Juni 2024.
- Pappalardo, L. et al. (2016). *An analytical framework to nowcast well-being using mobile phone data*. In: *Int J Data Sci Anal* 2, 75–92. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1007/s41060-016-0013-2>. Abgerufen am: 9. April 2024.
- Pauw, W. P. et al. (2019). *Conditional nationally determined contributions in the Paris Agreement: foothold for equity or Achilles heel?* *CLIMATE POLICY*, 2020, VOL. 20, NO. 4, 468–484, Im Internet unter: <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1635874>. Abgerufen am: 15.07.2024.
- Peters, R. et al. (2022). A Techno-Economic Assessment of Fischer-Tropsch Fuels Based on Syngas from Co-Electrolysis. *Processes* 2022, 10, 699. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/pr10040699>. Abgerufen am: 14. Juni 2024.
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2024): Im Internet unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/klimaschutzgesetz-2197410>. Abgerufen am 13.06.2024.
- Reçber, S. (2022). *Energiepreise – Folgen für Entwicklungs- und Schwellenländer*. In: Tagesspiegel Background. Im Internet unter: <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/krisenfolgen-fuer-schwellen-und-entwicklungslaender>. Abgerufen am: 28. April 2024.
- Ritchie, H. et al. (2023): *Energy*. Data adapted from U.S. Energy Information Administration, Energy Institute, verschiedene Quellen. Auf OurWorldInData.org. Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use>. Abgerufen am: 14. Juni 2024
- Schmidt, U. (2020). *Elektromobilität und Klimaschutz: Die große Fehlkalkulation*. In: Kiel Institut für Weltwirtschaft. Kiel Policy Brief, 143. Im Internet unter: <https://www.ifw-kiel.de/de/publikationen/elektromobilitaet-und-klimaschutz-die-grosse-fehlkalkulation-27178/>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Shell (2021). *The Energy Transition Scenarios*. Im Internet unter: https://www.shell.com/news-and-insights/scenarios/what-are-the-previous-shell-scenarios/jcr_content/root/main/section_1789847828/promo_copy_142460259/links/item0.stream/1652119830834/fba2959d9759c5ae806a03acfb187f1c33409a91/energy-transformation-scenarios.pdf. Abgerufen am 10. Juli 2024.

Statista (2021). *HVO biodiesel capacity worldwide in 2020, with a forecast for 2025, by region*. Im Internet unter: <https://www.statista.com/statistics/1297043/global-biodiesel-hvo-capacity-by-region/>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Statista (2023). *Anzahl der Kraftfahrzeuge weltweit in den Jahren 2005 bis 2020*. Im Internet unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/244999/umfrage/weltweiter-pkw-und-nutzfahrzeugbestand/>. Abgerufen am: 9. April 2024.

SwitchCoal (2023). *SwitchCoal. Switch coal profitably to renewable energy*. Im Internet unter: https://assets-global.website-files.com/652d400c9b45b02e0d6d9482/656e6648fb4d6a596049f130_SwitchCoal_Study_profitably_to_renewable_energy_231204_web.pdf. Abgerufen am: 9. April 2024.

TREC – Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation (2009). *Clean Power from Deserts. The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security. WhiteBook · 4th Edition*. Im Internet unter: https://www.earthpolicy.org/downloads/articles/trec_white_paper.pdf. Abgerufen am: 9. April 2024.

UN – United Nations (2023). *Secretary-General's opening remarks at press encounter at COP28*. Im Internet unter: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2023-12-11/secretary-generals-opening-remarks-press-encounter-cop28>. Abgerufen am: 18. April 2024.

UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification (2023). *At least 100 million hectares of healthy land now lost each year*. Press release 24. Oktober 2023. Im Internet unter: <https://www.unccd.int/news-stories/press-releases/least-100-million-hectares-healthy-land-now-lost-each-year>. Abgerufen am 09.07.2024

UNEP – United Nations Environment Programme (2023). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)*. Im Internet unter: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>. Abgerufen am: 10.07.2024.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2023a). *First global stocktake Proposal by the President Draft decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake*. Im Internet unter: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_L17_adv.pdf. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2023b). *Identifying GHG reduction opportunities for heavy industries – an engineer’s perspective*. [Paneldiskussion]. Videoaufzeichnung im Internet unter: <https://www.youtube.com/live/cAqnk6lfAao?si=RdtMJqGX4B8qXk8U>. Abgerufen am: 2. Mai 2024.

UNIDO – United Nations Industrial Development Organization (2024). *Renewable energy*. Im Internet unter: <https://www.unido.org/our-focus/safeguarding-environment/clean-energy-access-productive-use/renewable-energy>. Abgerufen am: 18. April 2024.

Varadhan, S. (2024). *India to increase coal-fired capacity in 2024 by the most in at least 6 years*. In: Reuters. Im Internet unter: <https://www.reuters.com/business/energy/india-increase-coal-fired-capacity-2024-by-most-least-6-years-2024-02-01/>. Abgerufen am: 9. April 2024.

Von Dulong, A. (2023). *Concentration of asset owners exposed to power sector stranded assets may trigger climate policy resistance*. In: Nat Commun 14, 6442. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42031-w>. Abgerufen am: 3. Mai 2024.

Wang, R. et al. (2020). *Retrofitting coal-fired power plants with biomass co-firing and carbon capture and storage for net zero carbon emission: A plant-by-plant assessment framework*. In: GCB Bioenergy, Volume 13: 143–160. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12756>. Abgerufen am: 3. Mai 2024.

Wei, N. et al. (2021). *Decarbonizing the coal-fired power sector in China via carbon capture, geological utilization, and storage technology*. Environmental Science & Technology, 55(19), 13164-13173. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01144>. Abgerufen am: 09.07.2024.

Yang, L. et al. (2022). *Optimal deployment for carbon capture enables more than half of China’s coal-fired power plant to achieve low-carbon transformation*. Iscience, 25(12). Im Internet unter: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105664>. Abgerufen am: 09.07.2024

Zukowski, D. (2017). *Carbon Capture Breakthrough in India Converts CO₂ Into Baking Powder*. EcoWatch. Im Internet unter: <https://www.ecowatch.com/carbon-capture-india-baking-soda-2177070984.html>. Abgerufen am 14.06.2024.