

Entwicklung einer Referenzlösung
für ein weltweites klimaneutrales und
Wohlstand schaffendes Energiesystem



Abschlussreport

Global Energy Perspectives

2023

Autoren und Danksagungen

Autoren

Siddhant Bane, Jörn Becker, Ulrich Begemann, Leon Berks, Bert Beyers, Christof von Branconi, Simon Göß, Estelle Herlyn, Wilfried Lyhs, Tobias Orthen, Ludolf Plass, Franz Josef Radermacher, Hans-Peter Sollinger, Ralf Klemens Stappen, Jens Wagner, Hans-Jürgen Wernicke

Danksagungen

Für den während der gesamten Projektlaufzeit anhaltenden wertvollen inhaltlichen Austausch seien den involvierten Mitarbeitern der Projektpartner Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e. V. (GdW), Drees & Sommer SE, ebm-papst Muldingen GmbH, E.L.V.I.S. AG, Heraeus Holding GmbH, Kühne + Nagel (AG & Co) KG, Linde GmbH, Obrist Powertrain GmbH, Progroup AG, Schwenk Zement GmbH & Co. KG, Viebrock Holding KG sowie VINCI Deutschland GmbH gedankt.

Darüber hinaus seien als weitere Austauschpartner Mitarbeiter von Robert Bosch GmbH, Senat der Wirtschaft e.V. und dem ife Institut für Einzelfertiger, insbesondere dessen Präsident Manfred Deues, dankend erwähnt.

Für umfangreiche Arbeiten in den Bereichen Recherche und Formatierung seien Jürgen Dollinger, Michael Gerth, Julia Linne, Nikolas Lokau sowie Regina Simon gedankt.

Vorwort

Mit diesem Report legen der Verein Global Energy Solutions e.V. (GES) und das Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung (FAW/n) den Abschluss des Projekts *Global Energy Perspectives* vor, das seit 2021 wesentlich durch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) gefördert wurde. Darüber hinaus wurde das Projekt inhaltlich und finanziell durch zwölf Partner aus der Wirtschaft unterstützt. Die Partner waren Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e. V. (GdW), Drees & Sommer SE, ebm-papst Mulfingen GmbH, E.L.V.I.S. AG, Heraeus Holding GmbH, Kühne + Nagel (AG & Co) KG, Linde GmbH, Obrist Powertrain GmbH, Progroup AG, Schwenk Zement GmbH & Co. KG, Andreas Viebrock als Aufsichtsrat der Viebrock Holding KG sowie VINCI Deutschland GmbH.

Das Ziel des Projekts war das Aufzeigen eines Weges in eine Welt, die im Zeitraum 2050 – 2070 allen dann lebenden zehn Milliarden Menschen ein Leben in Freiheit mit angemessenem Wohlstand in sozialer Balance, intakter Umwelt und stabilem Klimasystem ermöglicht. Eine Lösung, die diesen Anforderungen genügt, wird als **Referenzlösung** bezeichnet. A priori war nicht klar, ob eine solche existiert.

Im Laufe der Projektarbeit gelang es jedoch, eine solche Lösung zu entwickeln. Sie wird in dem vorliegenden Abschlussreport beschrieben. Mit der Referenzlösung wird kein Anspruch auf Alleinstellung erhoben. Wenn es einmal gelungen ist zu zeigen, dass es eine Lösung gibt, ist davon auszugehen, dass es viele weitere gibt.

Neben diesem Abschlussreport wurde im Rahmen der Projektarbeit eine umfangreiche **Basisdokumentation** erarbeitet, die auf der Webseite des Vereins verfügbar ist.¹ Diese besteht aus einem „**Technischen Werkzeugkasten**“, der den Stand des Wissens zu den für das Thema relevanten Sachgebieten aus den Bereichen Energie und Natur-basierte Lösungen zusammenfasst, und aus dem Teil „**Treibhausgas verursachende Branchen**“, der die Ausgangssituation und Handlungsoptionen für die wesentlichen Treibhausgase-emittierenden Sektoren beschreibt.

Dem BMZ und den zwölf Partnern aus der Wirtschaft gilt der Dank für die eröffnete Chance, dieses spannende und herausfordernde Projekt bearbeitet haben zu dürfen. Auf der Suche nach Erkenntnis und Lösung waren einige Um- und Irrwege zu gehen. Dass jetzt eine Referenzlösung vorliegt, wo vorher Unklarheit über ihre Existenz vorherrschte, ist beglückend. Trotz aller Schwierigkeiten gibt es begründete Hoffnung auf Umsetzung. Hoffentlich wird diese Chance nicht verspielt, wie so viele andere zuvor. Beide Organisationen, GES und FAW/n, werden sich auch weiterhin engagieren, um dazu beizutragen, Fehler zu vermeiden und bestehende Chancen zu nutzen.

¹ Vgl. <https://global-energy-solutions.org>

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	9
TABELLENVERZEICHNIS	10
EXECUTIVE SUMMARY	11
1 EINLEITUNG	16
1.1 ZIELSETZUNG DES REPORTS	16
1.2 AUFBAU DES REPORTS.....	17
2 DER AKTUELLE KONTEXT	19
2.1 DIE AGENDA 2030	19
2.1.1 <i>Vorgeschichte</i>	20
2.1.2 <i>Umsetzungsherausforderungen</i>	20
2.2 DAS PARISER KLIMASCHUTZABKOMMEN	22
2.2.1 <i>Logik des Abkommens</i>	22
2.2.2 <i>Schwächen des Abkommens</i>	23
2.2.3 <i>Resultierender Status quo beim Klimaschutz</i>	24
2.3 DIE SITUATION IM ENERGIEBEREICH.....	25
2.4 NICHT-KOOPERATION UND NEUE BLOCKBILDUNG	26
2.5 SICH ABZEICHNENDE ENTWICKLUNGEN BIS 2050	27
3 LÖSUNGSRAHMEN UND ANFORDERUNGEN	29
3.1 ÖKOLOGISCH-SOZIALE MARKTWIRTSCHAFT ALS RAHMEN	29
3.2 ANFORDERUNGEN AN DIE LÖSUNG	31
3.2.1 <i>Anforderungen im Bereich Entwicklung</i>	31
3.2.2 <i>Anforderungen im Bereich Klima</i>	32
3.2.3 <i>Weitere Anforderungen</i>	33
4 ERWEITERTE OECD, CHINA-CLUB UND CHALLENGE-GRUPPE	35
4.1 DIE ERWEITERTE OECD.....	35
4.2 DER CHINA-CLUB.....	37
4.3 DIE CHALLENGE-GRUPPE	40
4.4 ECKDATEN DER DREI LÄNDERGRUPPEN	42
4.5 UNTERTEILUNG DER CHALLENGE-GRUPPE ZUR DIFFERENZIIERTEN KOOPERATION IM KLIMASCHUTZ	45
5 TECHNISCHE UND NATÜRLICHE ELEMENTE DER REFERENZLÖSUNG	48
5.1 AUSGANGSSITUATION UND CHARAKTERISIERUNG DER ERFORDERLICHEN LÖSUNGSELEMENTE.....	48
5.2 DIE ELEMENTE DER REFERENZLÖSUNG IM ÜBERBLICK	56
5.3 STROM AUS NEUEN ERNEUERBAREN UND ZUVERLÄSSIG STEUERBAREN QUELLEN.....	60
5.3.1 <i>Potenziale und Grenzen der neuen Erneuerbaren</i>	60

5.3.2	<i>Potenzial und Grenzen von Stromspeichern</i>	63
5.3.3	<i>Die Grenzen von grünem Wasserstoff und die Alternativen</i>	66
5.3.4	<i>Die Rolle fossiler Energieträger als zuverlässig steuerbare Energie</i>	73
5.3.5	<i>Nuklearenergie</i>	74
5.3.6	<i>Die richtige Kombination der Stromerzeugungsarten</i>	75
5.4	DIE GROÙE BEDEUTUNG VON CARBON CAPTURE AND STORAGE	78
5.4.1	<i>Die Schlüsselrolle von Carbon Capture</i>	78
5.4.2	<i>Umgang mit Prozessindustrien am Beispiel Zement</i>	83
5.5	KLIMANEUTRALE TREIBSTOFFE UND ENERGIE TRÄGER	85
5.5.1	<i>Mobilität</i>	85
5.5.2	<i>Situation bei Gebäuden</i>	92
5.6	BESEITIGUNG TECHNISCHER METHAN-LECKAGEN	93
5.7	NATUR-BASIERTE LÖSUNGEN.....	96
5.7.1	<i>Erhalt der tropischen Regenwälder</i>	98
5.7.2	<i>Aufforstung auf 1 Milliarde Hektar degradierter Flächen</i>	100
5.7.3	<i>Restaurierung von 1 Milliarde Hektar degradierter Böden</i>	101
5.7.4	<i>Weitere Potenziale im Bereich der Natur-basierten Lösungen</i>	102
5.7.5	<i>Kurzumtriebsplantagen auf 150 Millionen Hektar</i>	103
6	GOVERNANCE UND FINANZIERUNG – REGULATORISCHE UND FINANZIELLE ASPEKTE DER REFERENZLÖSUNG	105
6.1	HERLEITUNG DER GOVERNANCE- UND FINANZIERUNGSERFORDERNISSE	106
6.2	PROGRAMME FÜR ERHALT, AUSBAU UND ENTLASTUNG DER NATÜRLICHEN SYSTEME ALS CO ₂ -SPEICHER SOWIE BESEITIGUNG TECHNISCHER METHAN-LECKAGEN.....	110
6.2.1	<i>Regulatorische Flankierung des Erhalts der verbliebenen Regenwälder</i>	111
6.2.2	<i>Regulatorische Flankierung von Wiederaufforstung und Restaurierung degradierter Flächen</i>	113
6.2.3	<i>Regulatorische Flankierung des Aufbaus von Kurzumtriebsplantagen</i>	114
6.2.4	<i>Regulatorische Flankierung der Beseitigung technischer Methan-Leckagen</i>	115
6.3	PROGRAMME ZUM AUF- UND UMBAU DES ENERGIESYSTEMS	116
6.3.1	<i>Kofinanzierung transnationaler Energieinfrastrukturen</i>	117
6.3.2	<i>Differenzkostenübernahme bei Carbon Capture</i>	117
6.4	SYSTEMISCHE ANSÄTZE	120
6.4.1	<i>Überarbeitung der konditionierten NDCs zur Ermöglichung ihrer Umsetzung</i>	120
6.4.2	<i>Implementierung eines Cap-and-Trade-Systems</i>	124
6.5	ZUSAMMENFASSENDE BETRACHTUNG	129
7	BEZÜGE ZU ANDEREN ANSÄTZEN UND STUDIEN	131
7.1	DIE JUST ENERGY TRANSITION PARTNERSHIPS	131
7.1.1	<i>Finanzierungserfordernisse im Süden</i>	131
7.1.2	<i>Exemplarische Just Energy Transition Partnerships</i>	132
7.2	LOCAL-GRID-PROGRAMME	134
7.3	UNTERSCHIEDE ZU ANDEREN NET-ZERO-STUDIEN	136

8	IMPLIKATIONEN	144
8.1	NET ZERO UND DIE ERREICHUNG DES 2°C-ZIELS	144
8.2	ENTWICKLUNGSWIRKUNGEN DER REFERENZLÖSUNG	149
8.3	„FROM BILLIONS TO TRILLIONS“ DURCH SYSTEMDIENSTLEISTUNGEN	153
8.4	UMSETZUNGSPERSPEKTIVEN FÜR DIE SDGs	156
8.5	SENSITIVITÄTSANALYSEN.....	163
9	HINDERNISSE UND LIMITATIONEN	166
9.1	RESTRIKTIONEN AUF DEM WEG ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM	166
9.1.1	<i>Geografie</i>	167
9.1.2	<i>Technologischer Entwicklungsstand</i>	168
9.1.3	<i>Infrastruktur</i>	168
9.1.4	<i>Finanzielle und ökonomische Gegebenheiten</i>	169
9.1.5	<i>Regulierung</i>	170
9.1.6	<i>Politisches System und Gesellschaft</i>	172
9.1.7	<i>Rohstoffverfügbarkeit</i>	173
9.2	AKTUELLE HINDERNISSE.....	175
9.2.1	<i>Mangelnde Kofinanzierungsbereitschaft seitens der erweiterten OECD</i>	175
9.2.2	<i>Nicht gelingende Einbindung privater Geldgeber</i>	177
9.2.3	<i>Uneinigkeit und Unstetigkeit im Bereich Regulierung</i>	179
9.2.4	<i>Ablehnung von Compliance-Anforderungen</i>	180
9.2.5	<i>Unklare internationale Zuständigkeitsfragen</i>	181
9.2.6	<i>Mangelnde Kooperationsbereitschaft</i>	183
10	POLICY EMPFEHLUNGEN	185
10.1	ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN.....	185
10.2	EMPFEHLUNGEN FÜR DIE ZUSAMMENARBEIT MIT DEN ENTWICKLUNGS- UND SCHWELLENLÄNDERN.....	190
11	FAZIT UND AUSBLICK	193
	LITERATURVERZEICHNIS	197
	ANHANG	209
A	ERGÄNZENDE INFORMATIONEN ZUR UNTERTEILUNG DER STAATEN	209
A.1	<i>Einteilung der Ländergruppen</i>	209
A.2	<i>Wirtschaftliche Entwicklung in der Referenzlösung</i>	211
A.3	<i>Cap-and-Trade-System und Challenge-Index</i>	214
B	INHALTSÜBERSICHT BASISDOKUMENTATION.....	221
B.1	<i>Technischer Werkzeugkasten</i>	221
B.2	<i>Wesentliche Treibhausgas verursachende Branchen</i>	221

Abkürzungsverzeichnis

BECCS	Bioenergy Carbon Capture and Storage
BIP	Bruttoinlandsprodukt
°C	Grad Celsius
CC	Carbon Capture
CCE	Circular Carbon Economy
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Usage
CCUS	Carbon Capture and Usage/ Storage
CDR	Carbon Dioxide Removal
CH ₄	Methan
CH ₃ OH	Methanol
COP	Conference of the Parties (hier: Klimakonferenzen)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2eq}	CO ₂ -Äquivalent
DAC	Direct Air Capture
EGR	Enhanced Gas Recovery
EOR	Enhanced Oil Recovery
GCCA	Global Cement and Concrete Association
GCF	Green Climate Fund
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
ha	Hektar
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
H ₂	Wasserstoff
IEA	International Energy Agency
IMF	International Monetary Fund
IPPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
JETP	Just Energy Transition Partnership
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LDCs	Least Developed Countries
NDC	Nationally Determined Contribution
NH ₃	Ammoniak
N ₂ O	Distickstoffmonoxid, Lachgas

ODA	Official Development Assistance
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries
PW	Petawatt
PWh	Petawattstunde
SDGs	Sustainable Development Goals
SMR	Small Modular Reaktor
UN	United Nations
UNDP	United Nations Development Programme
UNEP	United Nations Environment Programme
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization
4R	Reduce, Reuse, Recycle, Remove

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die 17 Nachhaltigkeitsziele der UN-Agenda 2030	19
Abbildung 2: Anteile der wichtigsten Klimagase an den weltweiten Emissionen	48
Abbildung 3: Sankey-Diagramm für Primärenergie und Endenergienutzung 2020	49
Abbildung 4: Klimagase verursachende Branchen.....	50
Abbildung 5: Die Elemente der Referenzlösung.....	57
Abbildung 6: Veränderung der Landnutzung in den letzten 10.000 Jahren	98
Abbildung 7: Einflussfaktoren auf Governance- und Finanzierungserfordernisse.....	107
Abbildung 8: CO ₂ -Reduktionsverläufe 2025-2070	126
Abbildung 9: Aus den CO ₂ -Reduktionsverläufen resultierende Cap-Linie	127
Abbildung 10: Weltweite Kooperation zur Stabilisierung des Klimasystems und zur Förderung von Entwicklung.....	130
Abbildung 11: Bausteine zur Erreichung von Net Zero	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bevölkerungszahlen in 2025 und 2050 (in Milliarden)	42
Tabelle 2: BIP-Entwicklungen von 2025 bis 2050 (in Billionen US-Dollar)	43
Tabelle 3: BIP-Zuwächse auf Basis von Energie-Mengen und -Effizienz-Effekten (in Billionen US-Dollar).....	44
Tabelle 4: Netto CO ₂ -Emissionen der Staatengruppen in 2025 und perspektivisch	45
Tabelle 5: Stützpunkte der CO ₂ -Reduktionspfade der Staatengruppen (in Mrd. Tonnen CO ₂).....	125
Tabelle 6: Jährliche Kosten für die erweiterte OECD (in Mrd. US-Dollar)	129
Tabelle 7: Wesentliche Energiedaten im Überblick.....	137
Tabelle 8: Prognostizierter Anteil der Elektrifizierung am Endenergieverbrauch.....	138
Tabelle 9: Die prognostizierte Bedeutung der Erneuerbaren Energien im Vergleich.....	139
Tabelle 10: Der prognostizierte Ausbau der Wasserstoffherzeugung.....	140
Tabelle 11: Prognosen für Wasserstoff und Biofuels im Vergleich.	140
Tabelle 12: Erwartete Entwicklung der Nutzung von Carbon Capture.	141
Tabelle 13: Verbleibende Rolle der fossilen Energieträger und Bedeutung der Nuklearenergie.	142
Tabelle 14: Bevölkerungszahlen in 2025 und 2050 (in Milliarden)	209
Tabelle 15: BIP-Entwicklungen von 2025 bis 2050 (in Billionen US-Dollar)	212
Tabelle 16: BIP-Zuwächse auf Basis von Energie-Mengen und -Effizienz-Effekten (in Billionen US-Dollar).....	212

Executive Summary

Die in diesem Report beschriebene Referenzlösung zeigt einen Weg auf, der es im Zeitraum 2050 – 2070 zehn Milliarden Menschen ermöglicht, ein Leben in Freiheit mit angemessenem Wohlstand in sozialer Balance, intakter Umwelt und stabilem Klimasystem zu führen. Von entscheidender Bedeutung ist dafür die Ausgestaltung des Energiesystems, da dieses von wesentlichem Einfluss auf Erfolg oder Misserfolg bei Klimaschutz und Wohlstandsaufbau ist.

Für die Entwicklung der Referenzlösung wurde ein **heuristischer Ansatz** gewählt. Sie wurde mit dem Ziel entwickelt, bei vorgegebenem Klimagas-Minderungspfad und zunächst ohne technologische Beschränkungen oder sonstige (ex ante gesetzte) Randbedingungen, eine gute Entwicklung für die Menschheit zu ermöglichen und möglichst geringe Kosten für alle Volkswirtschaften der Welt zu verursachen.

Leitidee ist weltweiter Energiewohlstand durch Innovation und Markt, statt Verwaltung von Energieknappheit. Die Referenzlösung ist in den Ordnungsrahmen einer globalen ökologisch-sozialen Marktwirtschaft mit ökologischen und sozialen Leitplanken („green and inclusive economy“) eingebettet und zielt auf eine vollumfängliche Umsetzung der Agenda 2030 (Sustainable Development Goals). Dabei muss es darum gehen, konsensfähige Wege in die Zukunft zu beschreiten, die weltweit eine hohe Zustimmungsfähigkeit finden können.

Der Referenzlösung liegt eine Unterteilung der Staaten in drei Gruppen zugrunde – die Gruppe der **erweiterten OECD** (reiche, westlich orientierte Länder, insgesamt 47), den **China-Club**, zu dem die Staaten zusammengefasst wurden, die historisch stark auf fossile Energien setzen und über entsprechende Ressourcen verfügen (zehn Länder) sowie die **Challenge-Gruppe**, überwiegend Entwicklungs- und Schwellenländer (128 Länder). Die etwa 39 Milliarden Tonnen CO_{2eq}-Emissionen der Welt stammen zum Zeitpunkt 2025, dem Startzeitpunkt der Umsetzung der Referenzlösung, etwa zu je einem Drittel aus den Ländern der erweiterten OECD, dem China-Club und der Challenge-Gruppe. Die Staaten der Challenge-Gruppe wollen zu Wohlstand kommen und sehen sich einem großen Bevölkerungswachstum gegenüber. Letztere stehen im Fokus der Referenzlösung.

Der Referenzlösung liegt zugrunde, dass sich der Energiebedarf in der Challenge-Gruppe bei Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums wie auch des angestrebten Wohlstandszuwachses über die nächsten Jahrzehnte potenziell um den Faktor 2,5 erhöhen wird – trotz einer Verdoppelung der Energieeffizienz im selben Zeitraum. Wenn der historische Energiemix auf diesem Weg beibehalten würde, wären bis 2050 zusätzlich etwa 20 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr aus diesen Ländern zu beseitigen. Das zu verhindern ist die eigentliche Herausforderung im globalen Klimaschutz.

Die **zentralen Elemente der Referenzlösung** und ihre Wechselwirkungen sind die folgenden:

Wichtiges Element der Lösung ist ein umfangreicher (1) **Ausbau der erneuerbaren Energien kombiniert mit zuverlässig steuerbaren Quellen zur Erzeugung von Strom**. Es wird kein Vollausbau der erneuerbaren Energien angestrebt. Vielmehr sollte die Energieversorgung auf „zwei Säulen“ ruhen. Neben den volatilen, erneuerbaren Energien haben zuverlässige, steuerbare Energieträger eine wesentliche Bedeutung zur Sicherstellung von bezahlbarem und klimaneutralem Strom. Diese müssen klimaneutral bereitgestellt werden. Hierzu spielen neben einem gewissen Umfang von Nuklearenergie weiterhin fossile Energieträger, insbesondere Erdgas, eine zentrale Rolle.

Durch den Einsatz von (2) **Carbon-Capture-Technologien** werden sie praktisch klimaneutral (sog. grün-fossile Energieträger). CO₂ wird abgefangen und gespeichert, etwa in Kavernen, oder in Silikat-haltigem Gestein karbonisiert. **Carbon Capture** ist der entscheidende **Joker** der Referenzlösung. Ein Hochlauf auf 15 Milliarden abgefangene Tonnen CO₂ pro Jahr bis 2050 erscheint machbar. Um nicht einen noch größeren Ausbau auf beispielsweise 20 Milliarden abgefangene Tonnen CO₂ pro Jahr erreichen zu müssen, sollte wo immer möglich die Stromerzeugung statt kohlebasiert auf Basis von Erdgas erfolgen, da dies die jeweils abzufangende CO₂-Menge halbiert.

Die Carbon-Capture-Technologien werden insgesamt wichtiger werden als die Erzeugung von grünem Wasserstoff, da sie leichter skalierbar sind und stärker dem Leitprinzip „Umbau statt Abriss“ folgen. Zudem erscheint das Potenzial für den Hochlauf der weltweiten Elektrolyseurkapazität bis 2050 auf maximal 4.000 Gigawatt beschränkt zu sein. Diese Kapazität wird bei weitem nicht ausreichen, um Elektrolyse-Wasserstoff zu einem globalen Back-Up-System für die fluktuierenden Erneuerbaren zu entwickeln.

Auch in Zukunft fossile Energieträger mit Carbon Capture zu nutzen, bedeutet zudem eine weniger einschneidende Anpassung der Geschäftsmodelle von Staaten, die heute von diesen Ressourcen leben und/ oder über bedeutsame Reserven verfügen. Dieses Vorgehen sollte die Kooperationsbereitschaft dieser Länder im Klimabereich erheblich steigern.

Zudem ist das unmittelbare Abfangen von CO₂ an Punktquellen deutlich günstiger als dessen spätere Entfernung aus der Atmosphäre im Kontext von Removal-Strategien. Carbon-Capture-Technologien können weiterhin eine wichtige Rolle dabei spielen, Prozessindustrien wie Stahl, Zement, Chemie oder Aluminium klimaneutral zu betreiben, und sind einfacher verfügbar als Wasserstoff. In vielen Fällen ist der Einsatz von Carbon Capture sogar unvermeidbar (hard-to-abate sectors wie z. B. Zement).

Ein weiteres wichtiges Lösungselement im Energiebereich bilden (3) **klimaneutrale Treibstoffe und Energieträger**. So müssen im Mobilitätssektor neben der Elektromobilität klimaneutrale Treibstoffe für Pkw und Lkw eingesetzt werden, um den stetig weiter wachsenden großen Bestand an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in einer Form nutzen zu können, dass er dem Klima nicht schadet. Es gibt unterschiedliche Wege zu derartigen Kraftstoffen. Hier Klimaneutralität zu ermöglichen,

ist ein entscheidender Beitrag für die zukünftige Mobilität für zehn Milliarden Menschen und den weltweiten Klimaschutz.

Darüber hinaus ist die (4) **Beseitigung technischer Methan-Leckagen** ein zentrales Lösungselement. Methan-Emissionen machen alleine 16 % der globalen Treibhausgaswirkung aus und sind aufgrund der Grenzen des Ersatzes von Molekülen durch Elektronen im Energiesektor ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Reduktion von Treibhausgasen. Dabei geht es um die Minimierung von Emissionen bei Förderung, Transport und Einsatz von Erdgas.

Sehr viel stärker als es heute der Fall ist, werden die biologischen Systeme durch (5) **Natur-basierte Lösungen** in den Dienst der Stabilisierung des Klimas gestellt – Wälder, Böden, Feuchtgebiete und Ozeane. Derzeit werden jährlich mindestens 14 Milliarden Tonnen CO₂ in biologischen Systemen und Ozeanen gespeichert, belasten das Klima also nicht. Die Natur ist also eine wichtige Senke für CO₂-Emissionen. Insbesondere solche, die nur schwer eliminiert werden können. Im Rahmen der Referenzlösung soll der natürliche Puffer für die Aufnahme von jährlich mehr als 10 Milliarden Tonnen CO₂ gestärkt werden, u. a. durch (5a) **konsequenten Regenwaldschutz**.

Zudem sind im Rahmen eines **Gigaprogramms Natur-basierte Lösungen** die (5b) **Aufforstung in den Tropen** (Forstwirtschaft) und die (5c) **verbesserte Humusbildung** (in der Landwirtschaft auf degradierten Flächen), jeweils auf einer Fläche von 1 Milliarde Hektar, Teile der Referenzlösung. Gelingt eine solche Stärkung, reduziert das die Menge an CO₂-Emissionen, die jährlich durch technologische Maßnahmen beseitigt werden müssen. Das Gigaprogramm Natur-basierte Lösungen trägt zur Wertschöpfung bei, steigert den allgemeinen Wohlstand und finanziert sich selbst.

Weiterhin spielt das Gigaprogramm bei der Nutzung der zuvor erwähnten klimaneutralen Treibstoffe eine wichtige Rolle: Die Natur muss auch langfristig als Senke für das aus flüchtigen Quellen emittierte CO₂ aus dem Mobilitätsbereich dienen. Es ist damit zu rechnen, dass aus einer Stärkung der biologischen Systeme insgesamt ein Puffer der Größe von mehr als 10 Milliarden Tonnen CO₂ möglich wird. Emissionen aus verbleibenden fossilen Quellen ohne CCS und klimaneutralen Treibstoffen unter Verwendung von Carbon Capture and Usage mit fossilem CO₂ (z. B. grünes Methanol auf der Basis von CO₂ aus Gaskraftwerken) können so kompensiert werden. Im Zusammenspiel mit den anderen Maßnahmen sollen diese Removals dazu führen, dass auf Dauer jedem Menschen ab 2070 noch Emissionen von im Mittel 1 Tonne CO₂ pro Jahr (10 Milliarden Tonnen CO₂-Removals für dann zehn Milliarden Menschen) möglich sind und aufgrund der Pufferwirkung des biologischen Systems dennoch Klimaneutralität entsteht.

Eine weitere wertschöpfende Maßnahme im Bereich der Natur-basierten Lösungen ist die Errichtung von (5d) **Kurzumtriebsplantagen** auf 150 Millionen Hektar zur Erzeugung von Biomasse und zur Gewinnung von biogenem CO₂.

Die folgenden Bausteine bilden die Ansatzpunkte, um die GES-Referenzlösung zu finanzieren und regulatorisch zu flankieren.

Ein kofinanziertes (6) **globales Cap-and-Trade-System** soll als Katalysator zur Minderung von CO₂-Emissionen auf Basis von Nationally Determined Contributions (NDCs) der Staaten dienen. Hierzu ist eine (7) **Überarbeitung der konditionierten NDCs** der Länder der Challenge-Gruppe entscheidend, die heute hinsichtlich ihrer Finanzierung meist an Konditionen geknüpft sind. Die konditionierten NDCs sind einer umfangreichen Analyse zu unterziehen, um realistische Pfade für ihre Umsetzung zu definieren. Dabei müssen sowohl die Finanzierung der notwendigen politischen Prozesse als auch die Umsetzung der Maßnahmen plausibel je Land geklärt werden. In der Zeit bis 2050 werden die immensen, aktuell in den NDCs formulierten Vorhaben im Bereich der Natur-basierten Lösungen bereits schrittweise aktiviert. Zusätzlich zum in Punkt (5) erwähnten Gigaprogramm geht es hier z. B. um Aufforstungen und Erschließung landwirtschaftlicher Flächen in ariden Gebieten außerhalb der Tropen, um boreale Nadelwälder oder um die Aktivierung des Potenzials von marinen Plantagen von Algen zur CO₂-Absorption oder Algen in Bioreaktoren. Hier lassen sich einige weitere Gigatonnen an CO₂-Removals im Rahmen der Überarbeitung der konditionierten NDCs erzeugen. Dieser Umgang mit den konditionierten NDCs erlaubt dann ab 2025 eine kanonische Ableitung eines Cap-and-Trade-Systems, das die NDCs der Staaten widerspiegelt. Es wird eine Trading-Option geschaffen, die Kosten für alle absenkt.

In der Referenzlösung ist es notwendig, insgesamt jährlich **1,2 Billion US-Dollar** (1.200 Milliarden US-Dollar) aus der **erweiterten OECD** zu aktivieren, ergänzt um freiwillige Beiträge nicht-staatlicher Akteure, um die Länder der Challenge-Gruppe vollumfänglich in die Transformation einzubinden.

Die Mehrkosten, die der Klimaschutz gegenüber einem Business as Usual verursacht, sollten – in Analogie zum zur Schließung des Ozonlochs erfolgreich umgesetzten **Montrealer Protokolls** – über (8) **Differenzkostenzahlungen** (CfD) aus der OECD-Welt übernommen werden. So müssen die reichen Länder etwa die Kosten der Carbon-Capture-Technologie oder des verstärkten Einsatzes von Gas statt Kohle für die Vermeidung von 8 - 12 Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr im Hochlauf bis 2050 in den Ländern der Challenge-Gruppe übernehmen. Hier fallen Kosten in Höhe von jährlich **600 Milliarden US-Dollar** an. Des Weiteren sind (9) **(transnationale) Energieinfrastrukturen** kofinanzieren, zum Beispiel im Bereich der Erneuerbaren, was **150 Milliarden US-Dollar** pro Jahr erfordert.

Weitere Kosten fallen im Kontext der **Natur-basierten Lösungen** an. Hier gilt es, Vorlaufkosten in Höhe von jährlich **200 Milliarden US-Dollar** zu tragen, mit denen die Voraussetzungen dafür geschaffen werden sollen, dass der Privatsektor in großem Umfang aktiv wird. Auch für das Programm zur **Vermeidung von technischen Methan-Leckagen** sind Vorlaufkosten zu tragen, um für den Privatsektor eine günstige Ausgangslage zu schaffen, dass dieser aufgrund politischer Vorgaben auf eigene Kosten die notwendigen Maßnahmen umsetzt.

Schließlich fallen für die **Überarbeitung der konditionierten NDCs** und die Ermöglichung ihrer Umsetzung **250 Milliarden US-Dollar** pro Jahr an.

Gelingt eine finanzielle Einbindung der erweiterten OECD in der beschriebenen Höhe nicht, wird die erforderliche weltweite Transformation nicht möglich sein, womit letztlich Klimaziele und Agenda 2030 unerreicht bleiben werden.

Auf die Bürger in der erweiterten OECD kommt somit eine mittlere Belastung in Höhe von 800 US-Dollar pro Kopf und Jahr zu. Das ist viel, sollte aber erreichbar sein – angesichts der sich weltweit zuspitzenden Krisen und der im eigenen Land stetig ansteigenden Kosten der Energietransformation, mit denen alleine man der globalen Herausforderungen nicht Herr werden kann. Umso mehr, als die beschriebene Lösung nicht nur die Energie- und Klimafragen adressiert, sondern letztlich alle 17 Sustainable Development Goals (Agenda 2030).

Dabei sind die internationalen Geldflüsse nicht als klassische Mittel für Entwicklungszusammenarbeit zu sehen, sondern als Mittel für (10) erbrachte **Systemdienstleistungen**, die der Stabilisierung der ökologischen und sozialen Systeme dienen, z. B. die Klimaschutz- und Biodiversitätsbeiträge. Sie dienen der Umsetzung der Sustainable Development Goals in all ihren ökonomischen, ökologischen und sozialen Facetten. Dabei finanzieren sich Teile der Maßnahmen selbst, indem sie zu neuen CO₂-Emissionsrechten führen, die erworben werden können.

Das Eigeninteresse der reichen Länder angesichts drohender Krisen und möglicher Systemzusammenbrüche sollte ein ausreichendes Argument dafür sein, die erforderlichen Geldflüsse möglich zu machen. Die jährlichen 1,2 Billionen US-Dollar stellen nichts anderes als einen **Marshallplan für die ärmeren Teile der Welt** dar. Durch die Verbindung aller beschriebenen Maßnahmen untereinander entstehen erhebliche wirtschaftliche Chancen für die gesamte Welt, insbesondere durch die Ermöglichung eines BIP-Anstiegs in den Entwicklungs- und Schwellenländern von 20 auf 80 Billionen US-Dollar bis 2050.

Bei Umsetzung der Referenzlösung gelingt es schließlich, bis 2070 weltweite Netto-Klimaneutralität und die Wieder-Erreichung des 2°C-Zieles zu erreichen. Im Rahmen der Referenzlösung wird kalkuliert, dass die erweiterte OECD Net Zero in 2050 erreichen wird. Dem China-Club gelingt dies, wie öffentlich angekündigt, in 2060. Die Challenge-Gruppe stellt die bisher unbeantwortete, aber entscheidende Herausforderung auf dem Weg zu Net Zero für die Welt dar, die erst im Jahr 2070 Klimaneutralität erreichen wird.

Die Referenzlösung setzt stark auf **Konsensfähigkeit** und auf **Kooperation**. Sie berücksichtigt die wesentlichen Anliegen der verschiedenen Staaten und ist in diesem Sinne friedensfähig. Sie zeigt einen Weg aus der Klimakrise auf, die die ganze Welt bedroht, und die kein Land der Erde alleine verhindern kann. Sie eröffnet zudem die Chance auf ein Weltwirtschaftswunder, mit dem alle entstehenden Kosten gut tragbar sein werden. Wird sie implementiert, besteht eine realistische Chance, die formulierten Ziele im Bereich Klima, Energie und Wohlstand im Zeitraum 2050 – 2070 zu erreichen.

1 Einleitung

Die Themen Energie, Klima und Wohlstand sind aufs Engste miteinander verknüpft. Bei einer vertieften Beschäftigung mit dem Thema Klimaschutz wird schnell klar, dass zugleich die Frage nach Wohlstand zentral betroffen ist. Dies hängt damit zusammen, dass der Klimaschutz im Wesentlichen eine Frage des Energiesystems ist, welches wiederum eine zentrale Voraussetzung für das Schaffen von Wohlstand darstellt. Heute stammen etwa 80 % der weltweiten CO₂-Emissionen aus dem energienahen Bereich, weshalb gelingender Klimaschutz entscheidend davon abhängig ist, ob es gelingt, das Energiesystem in Richtung von Net Zero umzubauen. Fordert man außerdem einen Wohlstandserhalt beziehungsweise – in weltweiter Perspektive – gar einen massiven Wohlbstandsaufbau, der nur mit einer Ausweitung der Energiemenge gelingen kann, erahnt man die Komplexität der Aufgabe und die unbedingte Notwendigkeit eines klugen Umgangs mit Technologie.

1.1 Zielsetzung des Reports

Im Rahmen des Projekts *Global Energy Perspectives* soll aufgezeigt werden, dass es eine wohlstandskompatible Lösung für die weltweiten Herausforderungen im Energie- und Klimabereich gibt. Eine solche wird als **Referenzlösung** bezeichnet. Im Sinne der Brundtland-Definition von Nachhaltigkeit soll gezeigt werden, dass es möglich ist, weltweit das Anliegen einer (nachholenden) wirtschaftlichen Entwicklung mit gelingendem Umwelt- und insbesondere Klimaschutz zu verbinden. Hierzu ist ein Referenzmodell zu entwickeln, das für verschiedene Industriezweige, Branchen und Staaten aufzeigt, wie diese zu ökonomisch tragfähigen Kosten in Richtung Klimaneutralität umgebaut werden können. Es geht dabei sowohl um die Bereitstellung von Energie, als auch um die Wandlung und Nutzung von Energie. Im Zentrum steht die Begrenzung des Treibhausgasgehalts in der Atmosphäre sowie wo immer sinnvoll CO₂-Kreisläufe – insbesondere technische, aber auch natürliche (Natur-basierte Lösungen). An dieser Stelle kommt also auch die Forst- und Landwirtschaft ins Spiel, die in diesem Report nicht als Sektor untersucht wurde.

Im Sinne dieser Aufgabenstellung wurde im Rahmen des Projekts modellhaft EINE Lösung gesucht, die auf heute bekannten Technologien aufbaut, und den formulierten Anforderungen Wohlstandskompatibilität und Klimaneutralität gerecht wird. Es war a priori nicht klar, dass eine solche Lösung existiert. Man kann deshalb froh sein, eine solche herausgearbeitet zu haben. Hat man einmal eine solche Lösung gefunden, ist zu erwarten, dass es weitere gibt. Der technische Fortschritt ist dabei von großer Bedeutung.

Dies ist sogar zu erwarten und zu hoffen. Der Verlauf der Geschichte hat gezeigt, dass Innovation und Technologie immer wieder dazu geführt haben, dass die Welt eine andere wurde. Das Ende dieser Geschichte ist sicher noch nicht erreicht. Zugleich ist eine erfolgreiche Implementierung der

in der Folge beschriebenen Lösung von zahlreichen Parametern abhängig und kein „Selbstläufer“. Vor diesem Hintergrund sind jede Weiterentwicklung, jede neue Idee und jeder weitere erfolgversprechende Weg sehr zu begrüßen.

Bei der in der Folge beschriebenen Lösung handelt es sich um eine **Heuristik**. Alle der Lösung zugrundeliegenden Daten leiten sich zunächst aus heutigen – nicht immer konsistenten - Ist-Daten ab und sind auf der Basis von aus der Vergangenheit bekannten Daten plausibilisiert. Dabei wurde im Bereich von CO₂-, Energie- und BIP-Daten nicht mit auf die Nachkomma-Stelle exakten Daten gearbeitet, sondern mit gerundeten Schätzdaten auf Basis offizieller Statistiken. Dies begründet sich damit, dass sehr langfristige Entwicklungen ab dem Jahr 2025 bis ins Jahr 2070 betrachtet werden, die von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig sein werden, die für sich mit unterschiedlichen Unsicherheiten in Bezug auf ihre Entwicklung behaftet sind. Für diesen Zeitraum können heute keine präzisen Daten vorliegen.

1.2 Aufbau des Reports

Neben der Einleitung besteht der vorliegende Report aus zehn weiteren Kapiteln. Die wichtigsten eigenentwickelten inhaltlichen Beiträge finden sich in den Kapiteln 4 - 6.

Im **Kapitel 2** wird der globale Kontext im Sinne der Ausgangssituation beschrieben, aus der heraus die Referenzlösung entwickelt wurde. Dabei wird neben dem Umsetzungsstand der Agenda 2030 auf das Pariser Klimaschutzabkommen eingegangen. Seine Logik wird erläutert und seine Schwachstellen werden benannt. Mit letzteren ist im Rahmen der Lösungsentwicklung zwingend umzugehen. Schließlich wird ein Blick auf aktuelle globale politische Entwicklungen geworfen, die ebenfalls von großem Einfluss auf die Konsensfähigkeit der vorgeschlagenen Lösung sind.

Das **Kapitel 3** enthält die Prämissen im Sinne von Anforderungen, Erwartungen und Anspruch an die zu entwickelnde Lösung. So geht es einerseits um eine (verspätete) Umsetzung der Agenda 2030 in allen ihren Dimensionen und um ein möglichst zeitiges Erreichen von Net Zero nach 2050.

Im Anschluss wird im **Kapitel 4** eine für den Report wesentliche Einteilung der Staaten der Welt in drei Gruppen vorgenommen. Im Einzelnen geht es um die „OECD-Staaten“, den „China-Club“ sowie um die „Challenge-Gruppe“. Letztere ist unter entwicklungspolitischen Gesichtspunkten von besonderem Interesse. Im Hinblick auf Klima und Energie stellt sie die Gruppe dar, in der die Herausforderungen am größten sind.

Im **Kapitel 5** werden schließlich die Elemente der Referenzlösung beschrieben. Dabei geht es einerseits um technische Elemente, andererseits um Lösungsbausteine, die die CO₂-Absorptionsfähigkeit der Natur nutzen, um Beiträge zum Ziel Net Zero zu leisten. Dem Kapitel 5 liegt eine über 700-seitige zweiteilige Basisdokumentation zugrunde. Diese besteht aus einem „**Technischen Werkzeugkasten**“, der den Stand des Wissens zu den für das Thema relevanten Sachgebieten

zusammenfasst, und aus dem Teil „**Treibhausgas verursachenden Branchen**“, der die Ausgangssituation und Handlungsoptionen für die wesentlichen Klimagase-emittierenden Sektoren beschreibt. Die Basisdokumentation enthält viele wichtige Hintergrundinformationen zu den in diesem Kapitel beschriebenen Lösungselementen, deren Aufnahme in diesen Report ihren Rahmen gesprengt hätte. Sie stellt eine bedeutende inhaltliche Fundierung der in diesem Report beschriebenen Lösung dar.

Das **Kapitel 6** widmet sich zwei weiteren entscheidenden Dimensionen der Lösung, der Governance und der Finanzierung. Es werden Ansätze und Instrumente aufgezeigt, wie die im Kapitel 5 beschriebenen technischen und natürlichen Lösungselemente regulativ flankiert und finanziert werden können.

Im **Kapitel 7** werden Bezüge zu anderen Ansätzen zum Umbau des Energiesystems in Richtung Klimaneutralität und zu anderen Studien, die ebenfalls Net-Zero-Lösungen zum Gegenstand haben, hergestellt.

Das **Kapitel 8** geht auf die Implikationen der Lösung im Sinne sich eröffnender Chancen und Möglichkeiten ein. Es geht um die Frage, welche positiven Beiträge die Lösung leistet und welche Ziele mit ihr erreicht werden können.

Diesen positiven Beiträgen werden im **Kapitel 9** die Limitationen entgegengesetzt. Welche Grenzen hat die Lösung? Welche Restriktionen sollten beachtet werden? Woran kann eine Umsetzung scheitern? In diesem Kapitel werden auch BMZ-spezifische Restriktionen behandelt, die Teil der Projektanforderungen waren.

Im nachfolgenden **Kapitel 10** werden schließlich Policy Empfehlungen formuliert. Diese unterteilen sich zum einen in sehr abstrakte, nicht auf einzelne konkrete Fragestellungen zielende Empfehlungen und zum anderen in spezifischere Empfehlungen, die den zukünftigen Umgang mit den Entwicklungs- und Schwellenländern betreffen.

Das abschließende **Kapitel 11** beinhaltet ein Fazit und einen Ausblick in die Zukunft.

2 Der aktuelle Kontext

Dieses Kapitel beschreibt die Ausgangssituation, aus der heraus das Lösungsmodell für ein klimaneutrales und Wohlstand schaffendes Energiesystem entwickelt wurde. Die Welt befindet sich in einer Situation, in der eine realistische Einschätzung der aktuellen Entwicklung nichts anderes als den Schluss zulässt, dass weder die Agenda 2030 noch das Pariser Klimaschutzabkommen auf den bisher eingeschlagenen Wegen erfolgreich umzusetzen sein werden. Das Themengebiet Energie ist bei alledem von zentraler Wichtigkeit. Zudem deuten sich auf der weltpolitischen Ebene große belastende Veränderungen und Konflikte an, die wesentlichen Einfluss auf das zukünftige Geschehen und insbesondere auf das Finden von Lösungen haben werden, die hohe internationale Zustimmung erfordern.

2.1 Die Agenda 2030

Die Agenda 2030 stellt seit dem Jahr 2016 international abgestimmte, rechtlich jedoch unverbindliche Zielsetzungen der Vereinten Nationen dar, die weltweit zu einer nachhaltigen Entwicklung führen sollen. Hinter der Agenda verbergen sich insgesamt 17 Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals – SDGs). Es geht um das Wohl aller Menschen auf der Welt (Ziele 1 - 6), wirtschaftliche Ziele (Ziele 7 - 12), Klima- und Umweltschutz (Ziele 13 - 15) sowie für eine erfolgreiche Zielerreichung hilfreiche oder gar unbedingt notwendige Voraussetzungen (Ziele 16/ 17).



Abbildung 1: Die 17 Nachhaltigkeitsziele der UN-Agenda 2030

2.1.1 Vorgeschichte

Die Vorgeschichte der Agenda 2030 lässt sich bis 1972 zurückverfolgen. In diesem Jahr fand die erste weltweite Umweltkonferenz in Stockholm statt. Doch der Umweltschutz blieb dort nicht das einzige Thema. Die damalige indische Ministerpräsidentin Indira Gandhi brachte aus Sicht der Entwicklungsländer viel wichtigere Themen auf die Tagesordnung: Das Wohl der Menschen und ihr Recht auf nachholende wirtschaftliche Entwicklung, das nicht dem Umweltschutz zum Opfer fallen dürfe. Die Idee einer nachhaltigen Entwicklung war geboren: die gleichzeitige Verfolgung von **(nachholender) wirtschaftlicher Entwicklung UND Umwelt- und Klimaschutz**. Dies wurde 1987 in der Brundtland-Definition festgehalten: *Eine nachhaltige Entwicklung wird den Bedürfnissen der heutigen Generation gerecht, ohne die Bedürfnisse der künftigen Generation zu gefährden, ihrerseits ihre Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil frei auszuwählen.*² Beide Anliegen spiegeln sich heute in den 17 Nachhaltigkeitszielen wider.

Unmittelbarer Anlass für die Verabschiedung der Agenda 2030 war die Nichterreichung der 8 Millenniumsentwicklungsziele, die im Zeitraum von 2000 – 2015 verfolgt wurden und damit die Vorgänger der 17 Nachhaltigkeitsziele waren. Ihre primäre Zielsetzung war die internationale Unterstützung der Entwicklungsländer in ihren wirtschaftlichen Aufholprozessen bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Umwelt- und Klimaschutz. Es ging um Armut- und Hungerüberwindung, Bildung, Gesundheit – und damit um Themen, die die Weltgemeinschaft bis heute beschäftigen und die noch immer darauf warten, gelöst zu werden. Trotz des Fokus auf die armen Länder wurde in der 15-jährigen Laufzeit in weltweiter Perspektive nicht viel erreicht. Anders als noch bei den Millenniumszielen ist die Reichweite der Agenda 2030 dagegen global. Zudem geht sie klar über reine Entwicklungsanliegen hinaus.

2.1.2 Umsetzungsherausforderungen

Die Umsetzungsherausforderungen im Umfeld der Agenda 2030 sind groß.³ Leider ist die Weltgemeinschaft meilenweit von einer erfolgreichen Erreichung der Ziele entfernt. Bei Lichte betrachtet entfernt sie sich im Gegenteil immer weiter von einer gelingenden Umsetzung. Die Gründe hierfür sind vielfältig und komplex. In der Folge werden wichtige und für die Lösungsentwicklung bedeutsame Aspekte beschrieben.

Ein zentraler Einflussfaktor auf das weltweite Geschehen ist das anhaltende weltweite **Bevölkerungswachstum**. Ende 2022 wurde die Acht-Milliardenschwelle überschritten. Im April 2023

² Vgl. World Commission on Environment and Development (1987).

³ Vgl. Herlyn (2019).

überholte Indien China als bevölkerungsreichstes Land der Erde und ist seitdem mit mehr als 1,4 Milliarden Menschen der neue „Spitzenreiter“.⁴

Es gibt viele bis heute nicht überwundene **Zielkonflikte**. Das weltweite Streben nach Wohlstand verschärft die Herausforderungen auf der Umwelt- und Klimaseite.

Die bestehenden Zielkonflikte sind nur durch Innovation und Technologie zu überwinden. **Technologiedefizite** verhindern jedoch Fortschritte. Diese bestehen einerseits hinsichtlich grundsätzlicher Verfügbarkeit von Technologien, andererseits hinsichtlich nicht stattfindender Technologietransfers.

Es mangelt zudem an **Finanzierung**. Zwar wurde bei den staatlichen Mitteln für Entwicklungszusammenarbeit in 2022 erstmals die Schwelle von 200 Milliarden US-Dollar überschritten. Dies ist jedoch alleine darauf zurückzuführen, dass erhebliche Mittel für ukrainische Flüchtlinge aufgebracht wurden und auch die Ukraine als Land umfangreiche finanzielle Unterstützung insbesondere von westlichen Gebern erhielt, die als Mittel für Entwicklungszusammenarbeit deklariert wurden.⁵ In einer Gesamtbetrachtung ist mit der Formulierung „From Billions to Trillions“ unverändert eindeutig beschrieben, in welcher Größenordnung Geldmittel insbesondere für eine Co-Finanzierung der Entwicklungs- und Schwellenländer fehlen.⁶ Dass eine umfangreiche Co-Finanzierung notwendig ist, war im Kontext der Millenniumsentwicklungsziele eine Selbstverständlichkeit und essentieller Bestandteil der Vereinbarung. In diesem Sinne sind die 17 Nachhaltigkeitsziele im Nachhinein als Rückschritt gegenüber den Vorgängerzielen anzusehen.

Viele Menschen vergessen die **internationale Dimension** und die Notwendigkeit **globaler Kooperation** und fokussieren sich alleine auf heimische Maßnahmen. Im Klimabereich entspricht ein solches Vorgehen dem dominierenden aktuellen Diskurs. Auch mag es im wahrsten Sinne des Wortes „naheliegender“ erscheinen, sich vor Ort zu engagieren. Der Sache und ihrem innersten Kern ist damit aber nicht gedient.

Schließlich sind die Ziele **nicht rechtlich verbindlich** und es gibt **keinerlei Sanktionen**, wenn die Ziele nicht erreicht werden. Fortschritte sind nur dann zu erwarten, wenn konsensfähige Wege in die Zukunft aufgezeigt werden können, die für alle zustimmungsfähig sind, weil sie als fair empfunden werden und allen Beteiligten Vorteile eröffnen.

⁴ Vgl. UNFPA (2023).

⁵ Vgl. OECD (2023).

⁶ Vgl. World Bank & IMF (2015).

2.2 Das Pariser Klimaschutzabkommen

Eines der 17 Nachhaltigkeitsziele der UN-Agenda 2030 ist das Ziel 13 – Maßnahmen zum Klimaschutz. Dieses Ziel ist die treibende Kraft hinter der Entwicklung der Referenzlösung, begründet sich doch die Notwendigkeit des zügigen Umbaus des weltweiten Energiesystems in Richtung Klimaneutralität einzig und allein mit dem Klimawandel, den es auf ein beherrschbares Maß einzudämmen gilt. Das Pariser Klimaschutzabkommen wurde im Dezember 2015 von knapp 200 Staaten und der Europäischen Union verabschiedet. Es trat im November 2016 in Kraft und ist damit die Nachfolge des Kyoto-Protokolls.

2.2.1 Logik des Abkommens

Bei der 15. Vertragsstaatenkonferenz zum Klimaschutz (COP15) in Kopenhagen in 2009 musste das Ziel der Einführung eines weltweiten CO₂-Emissionshandelssystem aufgegeben werden und damit die Hoffnung auf einen marktwirtschaftlichen und globalen Ansatz, der der Welt unter Beherrschung des Prinzips der Klimagerechtigkeit einen wesentlich einfacheren Weg zur Bewältigung des Klimawandels gewiesen hätte als alles andere, was danach folgte.

Stattdessen wurde die Aufgabe des Klimaschutzes auf die nationalstaatliche Ebene verlagert: Das Herzstück des Pariser Klimaschutzabkommens bilden freiwillige CO₂-Reduktionszusagen (Nationally Determined Contributions, NDCs) von knapp 200 Staaten sowie der Europäischen Union. Dabei unterscheiden sich die Zusagen der Industrieländer von denen der Entwicklungsländer. Während **Industrieländer absolute Reduktionszusagen** gemacht haben, sind die Zusagen der **Entwicklungsländer** in der Regel **relativ** – im Sinne einer Reduzierung der CO₂-Intensität ihres wirtschaftlichen Wachstums. So hat die EU angekündigt, ihre Emissionen bis 2030 um 50 % abzusenken und in 2050 als erster Kontinent der Welt klimaneutral zu sein. China – unverändert im Status eines Entwicklungslandes – hat zugesagt, die CO₂-Intensität seines Wachstums bis 2030 um mehr als 65 % abzusenken und vor 2060 den Status der Klimaneutralität zu erreichen.⁷

Die Zusagen der Entwicklungsländer zeichnen sich durch eine weitere Besonderheit aus: Sie sind in der Regel **konditioniert** an sehr hohe Zahlungen aus den Industrieländern. Ohne externe Geldzuflüsse werden die Zusagen also in keinem Fall eingehalten werden. Exemplarisch sei hier Kenia genannt – einer von über 50 Staaten in Afrika. Alleine Kenia fordert gut 50 Milliarden US-Dollar externe Finanzierung, wenn es sein NDC einhalten soll.

⁷ Vgl. Climate Action Tracker (2023).

Neben den beschriebenen sehr individuellen Zusagen der Staaten einigte man sich in Paris auf eine gemeinsame übergeordnete Zielsetzung – nämlich zunächst die Einhaltung des 2°C-Ziels, das auf Wunsch einiger Inselstaaten auf ein 1,5°C-Ziel verschärft wurde.

Die finanzielle Seite des Pariser Abkommens ist schnell beschrieben: Man verständigte sich darauf, dass **ab 2020 jährlich 100 Milliarden US-Dollar** von den Industrieländern bereitgestellt werden sollten, um die Entwicklungsländer in ihren Maßnahmen gegen den Klimawandel und zur Anpassung an ihn zu unterstützen.

Das inzwischen so wichtige weitere Thema der **Verluste und Schäden** (Loss & Damage) – und damit die Frage nach der Haftungspflicht für bereits eingetretene Verluste und Schäden in Folge des Klimawandels in Entwicklungsländern – wurde im Pariser Klimaschutzabkommen lediglich als Merkposten festgehalten – ohne jede konkrete Angabe darüber, wie mit diesem weiteren finanziell sehr gewichtigen Feld in Zukunft verfahren werden soll.

2.2.2 Schwächen des Abkommens

Bereits die reine Beschreibung der Logik des Pariser Klimaschutzabkommens lässt erkennen, dass es diverse Schwächen hat und bestenfalls als „halbe Miete“ bezeichnet werden kann.

Während viele Stimmen immer wieder die völkerrechtliche Bindung des Pariser Klimabekommens betonen, zeigt die Praxis, dass diese inhaltlich nicht besteht, die Nichteinhaltung gemachter Zusagen keinerlei Konsequenzen hat und dass es sogar möglich ist, folgenlos aus dem Abkommen auszutreten, um ihm später unter neuer Regierung wieder beizutreten, so geschehen im Fall der USA.

Zunächst ist festzuhalten, dass selbst bei Einhaltung aller bisherigen nationalen Zusagen weder das 1,5°C-Ziel noch das 2°C-Ziel erreicht würden. Eine Einhaltung würde zu einer Erwärmung von bis zu 2,8°C führen.⁸ Die Realität gestaltet sich jedoch so, dass selbst die nicht ausreichenden Zusagen weitüberwiegend nicht eingehalten werden und sich die Welt auf einem Pfad in Richtung von mehr als 3°C Erwärmung befindet. Eine völkerrechtliche Verpflichtung, die Ziele tatsächlich zu erreichen, existiert nicht.

Dass sich die Situation derart gestaltet, hat entscheidend mit dem Charakter der **NDCs der Entwicklungsländer** zu tun. Sie bilden die **Achillesverse des Paris-Vertrags**. Die Tatsache, dass diese „nur“ relative Reduktionszusagen gemacht haben, führt vor dem Hintergrund des in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern stattfindenden Wirtschaftswachstums dazu, dass die Emissionen dort absolut ansteigen. Relativ bedeutet das, dass die Entwicklungsländer (lediglich) die CO₂-Intensität ihres wirtschaftlichen Wachstums reduzieren. In der Folge steigen auch die weltweiten

⁸ Vgl. IPCC (2023).

Emissionen, mit Ausnahme des Corona-Jahres 2021, bis heute weiter an. In Summe sind die Einsparungen in den Industrieländern kleiner als die Zuwächse in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Betrachtet man die NDCs der Entwicklungsländer, ist ein Ende dieser Entwicklung bestenfalls 2030 zu erwarten.

Hinzu kommt, dass die Net-Zero-Ziele der Entwicklungsländer nicht selten in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts liegen, so zum Beispiel bei den zwei bevölkerungsreichsten Ländern der Erde Indien (Net Zero 2070) und China (Net Zero vor 2060).

Eine weitere in der breiten Öffentlichkeit wenig diskutierte, zugleich ungelöste und schwierige Charakteristik der NDCs der Entwicklungsländer ist ihre **Konditionierung**. Es geht in Summe um Billionen von US-Dollar, die aus den Industrieländern in die Entwicklungsländer fließen müssten, um dort eine Zielerreichung zu ermöglichen und die Länder überhaupt dafür zu gewinnen, sich ernsthaft auf den Weg in Richtung Net Zero zu machen. Denn für diese bevölkerungsreichen und in Teilen sehr armen Staaten ist nachholender Wohlstandsaufbau die zentrale Zielsetzung, nicht die Vermeidung von CO₂-Emissionen. Diese dürfen sie nach internationaler Logik sogar noch erhöhen.

Den bis heute offenen Geldforderungen stehen bisher viel zu kleine Summen gegenüber, die im Kontext des Green Climate Fund (GCF) aufgebracht werden, um die Entwicklungsländer beim Klimaschutz und bei der Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen. Der ab 2020 zugesagte Betrag von 100 Milliarden US-Dollar pro Jahr wurde noch nie erreicht.

Eine breit angelegte Querfinanzierung der Entwicklungsländer, die ein weltweites Cap-and-Trade-System „von alleine“ herbeigeführt hätte, weil die Marktkräfte große Summen in die Teile der Welt gelenkt hätten, in der die CO₂-Vermeidungskosten gering sind, ist im Pariser Klimaabkommen nicht angelegt.

Dies gilt auch für den dritten großen Bereich der internationalen Klimafinanzierung, nämlich für den Bereich Loss & Damage, der im Vertrag lediglich als „Merkposten“ geführt wird. Bei der letzten Klimakonferenz, der COP27 in Ägypten, wurde dieser erstmals mit einem eigenen Fonds bedacht – jedoch ohne bereits Festlegungen darüber zu treffen, wer wann in welcher Höhe dort einzahlt.

2.2.3 Resultierender Status quo beim Klimaschutz

In der Folge der beschriebenen Situation sieht sich die Welt weiter steigenden CO₂-Emissionen gegenüber. Die bisherigen Bemühungen um Klimaschutz sind alles andere als erfolgreich und wirkungsvoll.

Die weltweiten Treibhausgasemissionen (ausgedrückt als CO₂-Äquivalente – CO_{2eq}) beliefen sich im Jahr 2020 brutto auf rund 53 Milliarden Tonnen.⁹ Gut 34 Milliarden Tonnen CO_{2eq} entfielen dabei auf die Nutzung von fossiler Energie und den Energieeinsatz im Prozessindustriebereich (z. B. Zement und Chemie). Etwa 5,5 Milliarden Tonnen CO_{2eq} resultierten aus der Landwirtschaft und Landnutzungsänderungen, z. B. der Zerstörung von Regenwald.¹⁰

Neben CO₂ ist Methan von besonderer Bedeutung. Es ist in der Wirkung auf 100 Jahre ein mindestens 24-mal klimaschädlicheres Gas als CO₂. Die Methanemissionen beliefen sich im Jahr 2020 auf rund 8,5 Milliarden Tonnen CO_{2eq}, von denen ca. 60 % menschengemacht sind und einerseits aus Methanleckagen im Bereich der Industrie und aus der Landwirtschaft andererseits resultieren.¹¹ Weitere klimarelevante Beiträge kommen von Stickstoff- und Fluorverbindungen.

2.3 Die Situation im Energiebereich

Von größtem Einfluss auf die beschriebene Lage beim Klimaschutz ist das Thema Energie, ist doch die Verbrennung fossiler Energieträger die entscheidende Ursache für den Ausstoß von CO₂. Wie zuvor genannt, geht es heute dabei weltweit um etwa 34 Milliarden Tonnen CO₂. Der Primärenergieverbrauch belief sich im Jahr 2020 insgesamt auf 157 PWh.¹²

Ergänzend zu diesen die Welt als Ganzes betreffenden Zahlen sei auf die von den Vereinten Nationen im Rahmen ihres letzten Fortschrittsberichts zum SDG 7 – *Bezahlbare und saubere Energie* geschilderte Situation in Entwicklungsländern verwiesen: *„Der Zugang zu Strom und sauberen Brennstoffen zum Kochen hat sich in vielen Teilen der Welt verbessert. Dennoch sind **675 Millionen Menschen noch immer nicht an ein Stromnetz angeschlossen** und 2,3 Milliarden Menschen kochen noch immer mit ineffizienten und umweltschädlichen Brennstoffen. Der Krieg in der Ukraine und die weltweite wirtschaftliche Unsicherheit führen weiterhin zu erheblichen Schwankungen bei den Energiepreisen, was einige Länder dazu veranlasst, ihre Investitionen in erneuerbare Energien zu erhöhen, während andere vermehrt auf Kohle setzen, wodurch der grüne Übergang gefährdet wird. Wenn das derzeitige Tempo anhält, werden bis 2030 noch immer rund 660 Millionen Menschen keinen Zugang zu Strom haben und fast 2 Milliarden Menschen weiterhin auf umweltschädliche Brennstoffe und Technologien zum Kochen angewiesen sein.“*¹³ Die bestehende **Energiearmut** droht sich fortzusetzen.

⁹ Vgl. Climate Watch (2023).

¹⁰ Vgl. IPCC (2021).

¹¹ Vgl. IEA (2020).

¹² Vgl. IEA (2021a).

¹³ UN (2023a).

2.4 Nicht-Kooperation und neue Blockbildung

Die Kapitel 2.1 und 2.2 haben erkennen lassen, dass mangelnde Kooperation eine der wichtigsten Ursachen für die ausbleibenden Erfolge im Bereich einer nachhaltigen Entwicklung und insbesondere auch im Bereich des Klimaschutzes ist. Kooperation zwischen „Globalem Norden“ und „Globalem Süden“ sowie zwischen staatlichen und nichtstaatlichen Akteuren sind unbedingt notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der Agenda 2030 und gelingenden Klimaschutz.¹⁴ Beides findet heute nicht in ausreichendem Maße statt. **Ungelöste Gerechtigkeitsfragen** sind ein entscheidender Grund für **ausbleibende Kooperation zwischen Industrie- und Entwicklungsländern**. Die Geschichte der Menschheit zeigt, dass Gerechtigkeit Voraussetzung für Kooperation ist, die freiwillig und nicht unter Zwang geschieht.¹⁵ Da es in der heutigen Welt kaum mehr möglich ist, Kooperation im Bereich des Klimaschutzes zu erzwingen, haben nur solche Lösungen eine Chance, die allgemein als gerecht empfunden werden. Niemand verfügt heute mehr über die notwendigen Machtmittel zur Durchsetzung von Zwang – anders als zum Beispiel zur Zeit des Kolonialismus.

Die beschriebenen Zusammenhänge sind auf eine Situation anzuwenden, die durch zahlreiche Konflikte (z. B. Ukraine - Russland, China - Taiwan) und neue Blockbildungen geprägt ist.

So sind die asiatisch-afrikanischen Beziehungen in Bewegung. Eine Facette dieser Entwicklung ist, dass China sich zunehmend erfolgreich um ein positives Bild auf dem afrikanischen Kontinent bemüht und auf dem Weg ist, dort als neue Weltmacht akzeptiert zu werden.¹⁶ Eine US-amerikanische Studie brachte jüngst hervor, dass die Resonanz afrikanischer und südamerikanischer Empfänger auf Beiträge aus den chinesischen Staatsmedien positiver ist als auf solche aus den Industrienationen. Zugleich verliert die westliche Welt aus althergebrachter Skepsis gegenüber China das neu entstehende globale Bild aus den Augen.¹⁷ So blieb weitgehend unbemerkt, dass sich sehr viele Staaten des Globalen Südens China anschlossen und in Folge des Ukraine-Krieges keine Sanktionen gegen Russland verhängten.¹⁸

Auch im Bereich der Wirtschaft und Finanzen verändert sich die Welt. So lösten die Chinesen im Jahr 2020 die USA als weltweit größte Handelsnation ab. Für die große Mehrheit der Staaten des Globalen Südens ist China inzwischen der größte Handelspartner.¹⁹ Vieles deutet darauf hin, dass das Land dabei ist, Staaten um sich zu versammeln, die der westlichen Welt kritisch gegenüber stehen. Hierzu zählen die Ölstaaten, Brasilien, Argentinien und Indonesien, aber auch Indien. Es

¹⁴ Vgl. Herlyn et al. (2023).

¹⁵ Vgl. Radermacher (2023).

¹⁶ Vgl. Ziltener; Suter (2023).

¹⁷ Vgl. Mattingly et al. (2022).

¹⁸ Vgl. Castellum.AI (2023).

¹⁹ Vgl. Ghosh (2020).

geht dabei u. a. darum, eine Staatengruppe zu bilden, die den US-Dollar meidet. Im Rahmen des mBridge-Projekts entsteht gerade ein neues internationales Zahlungssystem, das die amerikanische Währung umgeht. Für den Westen drohen Finanziers aus diesen Ländern verloren zu gehen, was wiederum das Zinsniveau hochhalten und die Inflation weiter befeuern könnte.²⁰

Die heutige Welt kann als multipolare Welt bezeichnet werden. Die Bipolarität früherer Zeiten in Bezug auf USA und China bzw. zuvor USA und Sowjetunion ist Geschichte. In dieser Welt gewinnt die Geopolitik enorm an Bedeutung und nimmt auch auf Entscheidungen in anderen Politikfeldern bedeutenden Einfluss, zum Beispiel in der Energiepolitik.

2.5 Sich abzeichnende Entwicklungen bis 2050

Was die **Bevölkerungsentwicklung** betrifft, so werden aus den heute acht Milliarden Menschen bis 2050 zehn Milliarden Menschen werden, ein **Plus von 25 %**. Dieses Wachstum wird vor allem in Afrika und Asien geschehen, also in Ländern des Globalen Südens mit heute niedrigem Wohlstand. Die Länder des Globalen Nordens werden in Bezug auf ihre Bevölkerungsgröße hingegen stagnieren und weiter altern.

Damit ist klar, dass auch zukünftig Milliarden Menschen nach höherem Wohlstand streben werden. Sie alle eint, dass ihre ökonomische Ausgangssituation eine schlechte ist. Vor diesem Hintergrund ist mit einem weiteren **signifikanten Anstieg des weltweiten BIP** zu rechnen.

Die Dimension dessen, was für die kommenden Jahre und Jahrzehnte zu erwarten ist, vermittelt eine Aussage des aktuellen UN-Generalsekretärs Antonio Guterres im Umfeld der Global Cement and Concrete Association (GCCA) im Jahr 2021: „*Three quarters of the infrastructure that will exist in 2050 has yet to be built.*“²¹ Dass es hier um eine (allerdings wohl übertriebene) Aussage zum Bereich des Bauens geht, einem extrem energie- und damit CO₂-intensiven Sektor, unterstreicht die Relevanz einer solchen Prognose für die Bereich Energie und Klima.

Nicht nur aufgrund der zu erwartenden Entwicklungen im Bereich des Bauens wird der weltweite **Primärenergiebedarf** bis 2050 weiter **ansteigen**. Verschiedene Quellen nennen Werte bis zu 230 PWh.²²

Auch die **CO₂-Emissionen**, vor allem die des Globalen Südens, werden – in Übereinstimmung mit dem Pariser Klimavertrag – weiter **ansteigen**. Wie zuvor beschrieben, befindet sich die Welt auf

²⁰ Vgl. Stelter (2023).

²¹ Vgl. GCCA (2021).

²² Vgl. Shell (2021).

einem Pfad einer Erwärmung um weit mehr als 2,5°C. Ein 2°C-Ziel oder eine Net-Zero-Situation erscheinen allenfalls nach 2050 erreichbar.

3 Lösungsrahmen und Anforderungen

In diesem Kapitel geht es einerseits darum, das ökonomische System zu umreißen, das dazu beitragen soll, die beschriebene Lösung hervorzubringen. Andererseits sollen die an die Lösung gestellten Anforderungen beschrieben werden: Welche Erwartungen bestehen an die Lösung? Welchen Ansprüchen muss sie genügen?

3.1 Ökologisch-soziale Marktwirtschaft als Rahmen

Die zu entwickelnde Referenzlösung soll im Geiste einer ökologisch-sozialen Marktwirtschaft konzipiert werden – einem Wirtschaftssystem, das Markt und Wettbewerb sowie Nachhaltigkeitsanliegen vereint.²³ In einem solchen System werden die **vier großen Freiheiten** garantiert – Freiheit des Eigentums, Vertragsfreiheit, Freiheit zur Innovation und Freiheit zur Kreditaufnahme bzw. Kreditgewährung.²⁴ Zentrale Elemente eines solchen Systems sind Innovationen, eine balancierte Einkommensverteilung, Ordnungspolitik sowie eine faire Besteuerung aller wertschöpfenden Prozesse.²⁵ Trotz aller Realisierungsherausforderungen auf der globalen Ebene, die unter anderem aus dem Trilemma der Globalisierung resultieren,²⁶ sollte das Ziel der Staatengemeinschaft sein, weltweit im Sinne einer ökologisch-sozialen Marktwirtschaft zu operieren und sich einerseits die Kräfte des Marktes zunutze zu machen und andererseits durch kluge Rahmensetzung ökologische und soziale Anliegen im notwendigen Maße zu berücksichtigen.

Bedeutende Elemente einer ökologisch-sozialen Marktwirtschaft sind **Innovation und Technologie**. Die Historie zeigt, dass sie entscheidende Voraussetzungen für die Schaffung von Wohlstand und Wachstum sind. Im Rahmen eines marktwirtschaftlichen Systems werden keine technologischen Pfade vorgeschrieben, sondern Zielvorgaben (zum Beispiel im Bereich Klimaschutz) formuliert, für die im Rahmen eines technologieoffenen Wettbewerbs im Markt die besten Lösungen für eine Zielerreichung gefunden werden sollen. Natürlich ist dabei zu beachten, dass die technologische Entwicklung der letzten Jahrzehnte immer wieder auch ihre Janusköpfigkeit offenbart hat: Auf der einen Seite ist der technische Fortschritt ein unbedingtes Muss, auf der anderen Seite können durch ihn auch neue Probleme entstehen, die potenziell größer sind als die vorherigen. Exemplarisch genannt sei das Phänomen des Rebound-Effekts, dass Einsparungen, die durch Effizienzverbesserungen (pro Einheit) erzielt wurden, letztlich nicht oder nur teilweise werden, weil die Anzahl der Einheiten ständig schneller wächst als der Einspareffekt pro Einheit.²⁷ Es empfiehlt sich daher,

²³ Vgl. Radermacher et al. (2011).

²⁴ Vgl. Herlyn; Radermacher (2014).

²⁵ Vgl. Radermacher; Beyers (2011).

²⁶ Vgl. Rodrick (2011).

²⁷ Vgl. Kapitza (2014).

im Sinne einer nach vorne gerichteten Technikfolgenabschätzung einen ganzheitlichen Blick auf die stattfindende technologische Entwicklung zu haben.²⁸

Auch eine **balancierte Einkommensverteilung** ist ein zentrales Merkmal eines ökologisch-sozial regulierten Systems. In diesem Zusammenhang offenbart ein Blick in die Geschichte, dass ausgeglichene Gesellschaften in vielerlei Hinsicht besser positioniert sind als Gesellschaften mit hoher Ungleichheit. So zeigt sich, dass Staaten hinsichtlich Wachstum und Wohlstand dann gut aufgestellt sind, wenn sie sich in der sog. *efficient inequality range* befinden.²⁹ Ein breiter Wohlstand ist dann zu haben, wenn die soziale Ungleichheit weder zu klein noch zu groß ist.

Im internationalen Kontext findet man häufig den Begriff einer **green and inclusive economy** oder auch *inclusive green economy*.³⁰ Diese Begrifflichkeiten sind seit der Rio+20-Konferenz, die 2012 in Johannesburg stattfand, Teil der internationalen Agenda. Die Weltfinanzkrise in 2009 war der Anstoß, das bis dato existierende Wirtschaftsmodell eines weitgehend unregulierten Marktes in Frage zu stellen und nach Alternativen zu suchen. Eine *green and inclusive economy* stellt ein solches alternatives Wirtschaftsmodell dar, bei dem es keine Externalisierung von ökologischen und sozialen Kosten zu Lasten der Umwelt, des Klimas und der Menschen gibt. Trotz aller konzeptioneller Auseinandersetzung mit diesem Modell ist eine *green and inclusive economy* auf der regulatorischen Seite bis heute allerdings nicht durchgesetzt.

Im deutschen Kontext kann man eine ökologisch-soziale Marktwirtschaft als eine Weiterentwicklung der sozialen Marktwirtschaft interpretieren, die vor dem Hintergrund der in den letzten Jahrzehnten immer weiter zunehmenden Bedeutung von Umwelt- und Klimaschutz um eine ökologische Dimension ergänzt wird.

Eine ökologisch-soziale Marktwirtschaft führt letztlich dazu, dass Umwelt- und Klimaschutz ökonomisch tragfähig werden, weil bisher externalisierte Umweltkosten in das Marktgeschehen internalisiert und damit unmittelbar entscheidungsrelevant werden. Zugleich werden auch soziale Kosten nicht mehr länger externalisiert und die Idee der **Querfinanzierung** bekommt eine große Bedeutung. Die Preise sagen in einer idealen Ausprägung einer derartigen Marktwirtschaft die ökologische und soziale Wahrheit.³¹

In Deutschland ist zu beobachten, dass der Begriff einer ökologisch-sozialen Marktwirtschaft in jüngerer Zeit häufiger benutzt wird – häufig jedoch in einer anderen Interpretation, nämlich mit weniger Markt und in der Folge mehr Staat.³²

²⁸ Vgl. Grunwald (2022).

²⁹ Vgl. Cornia; Court (2001).

³⁰ Vgl. UNEP (2023).

³¹ Von Weizsäcker (1992).

³² Vgl. FÖS (2023).

3.2 Anforderungen an die Lösung

In diesem Unterkapitel werden verschiedene Anforderungen beschrieben, die an die Referenzlösung bestehen. Was muss die Lösung leisten? Welche Ziele soll sie helfen zu erfüllen? Weil in weltweiter Perspektive die Entwicklungsseite einer nachhaltigen Entwicklung prioritär vor der Umweltseite zu sehen ist, wird die Entwicklungsdimension vor den Anforderungen im Klimabereich thematisiert.

Die formulierten Anforderungen sind extrem ambitioniert, geht es doch letztlich darum, allen Menschen ein gutes Leben in Wohlstand zu ermöglichen und zugleich die Umwelt und das Klimasystem so zu stabilisieren, dass Umwelt- und Klimaveränderungen auf einem beherrschbaren Niveau gehalten werden. Es geht um nichts anderes als eine vollständige Umsetzung der Agenda 2030, wobei es völlig unrealistisch ist, dass dies bis 2030 gelingt. Allenfalls ist dies im Zeitraum zwischen 2050 und 2070 möglich.

3.2.1 Anforderungen im Bereich Entwicklung

Im Kern besteht die entwicklungsseitige Anforderung an die Lösung darin, dass sie weltweit allen Menschen ein Leben in Wohlstand und Freiheit ermöglichen soll. Eine derartige, gewaltige Transformation ist bisher niemals gelungen – Wohlstand und Freiheit gab es immer nur für kleinere Teile der (Welt-) Bevölkerung.

Auf der Energieseite übersetzt sich dies in eine Forderung nach **Energiereichtum**, weil die Verfügbarkeit von Energie unbedingt notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Wohlstand ist. Die zuvor beschriebene heutige Energiearmut – fast 700 Millionen Menschen leben ohne Zugang zu Strom – soll überwunden werden.

Was das Thema Wohlstand betrifft, ist das Bruttoinlandsprodukt (BIP) und damit die Summe der produzierten Güter und Dienstleistungen die entscheidende Größe. Es ist auch im Kontext der UN-Nachhaltigkeitsziele von zentraler Bedeutung (vgl. SDG 7). Die Referenzlösung soll auch in Zukunft ein weltweites BIP-Wachstum ermöglichen. Dabei ist in den Entwicklungsländern ein erheblicher Wohlstandsaufbau notwendig, was sich in ein entsprechendes BIP-Wachstum übersetzt.

An die Referenzlösung wird der Anspruch erhoben, dass sie den Entwicklungsländern (ohne China) ein starkes BIP-Wachstum ermöglicht. In diesem Teil der Erde geht es um eine **Vervielfachung der Wirtschaftsleistung**, um in diesen Ländern ein jährliches Wachstum von etwa 6 % zu erzielen. China, für viele Entwicklungsländer das Vorbild für eigene Aufholprozesse, verzeichnete in den

letzten 30 Jahren oftmals sehr viel höhere Wachstumsraten, die in den besten Jahren nur knapp unter 15 % blieben.³³

Für die am wenigsten entwickelten Länder (least developed countries, LDCs), in denen mehr als eine Milliarde Menschen leben, ist in der **Agenda 2030** ein Zielwert von **wenigstens 7 % BIP-Wachstum** formuliert (Unterziel 8.1).³⁴ Mit der Referenzlösung soll dieser Zielwert für diese Länderkategorie erreicht werden können. Da die LDCs aber einen ohnehin sehr geringen Anteil der Wirtschaftsleistung der Entwicklungs- und Schwellenländer haben (weit weniger als 10%), können wir in einer guten Näherung von **6 % Wirtschaftswachstum für die gesamte Ländergruppe** sprechen.

Hierbei ist zu beachten, dass das in den Entwicklungsländern anhaltende Bevölkerungswachstum diese Zahlen relativiert. Ein Wachstum von 6 % pro Kopf bei fünf Milliarden Menschen entspricht ungefähr einem Wachstum von 4,9 % pro Kopf, wenn aus den fünf Milliarden Menschen in 25 Jahren sieben Milliarden werden.

Die Tatsache, dass das Zielwachstum nicht höher angesetzt wird, begründet sich mit Restriktionen im Bereich der Finanzierung, die wiederum einen Einfluss auf die zur Verfügung stehenden Technologien und die erzeugbaren Energiemengen haben.

Für alle Entwicklungsländer wird zudem angenommen, dass sie die **Energieintensität** ihrer Ökonomien noch einmal um dasselbe Maß verbessern können, wie im Zeitraum 2000 – 2019. Das scheint machbar, weil für alle Szenarien, die eine klimaneutrale Welt anstreben, ein enormer Technologietransfer von den reicheren Staaten in die ärmeren Staaten eine absolute Voraussetzung ist.

Für die Nicht-Entwicklungsländer und China sollen sich in der Referenzlösung die Wachstumsraten gemäß der offiziellen Projektionen der OECD weiterentwickeln. Dies entspricht über den Zeitraum von 2025 – 2050 (je nach Region) einer Steigerung um einen Faktor 1,5 (jährliches Wachstum von 1,6 %) bis zu einem Faktor 1,8 (jährliches Wachstum von 2,3 %). Für die Nicht-Entwicklungsländer und China wird außerdem angenommen, dass auch sie die Energieintensität ihrer Wirtschaft verbessern, und zwar dass sie noch einmal um die Hälfte besser werden, als sie sich im Zeitraum 2000 – 2019 verbessert haben.

3.2.2 Anforderungen im Bereich Klima

Im Klimabereich soll vor dem Hintergrund einer realistischen Betrachtung der NDCs der Staaten eine Erreichung von **Net Zero im Zeitraum bis 2070** erreicht werden. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei die NDCs der Schwellenländer, insbesondere Chinas und Indiens.³⁵ China strebt als

³³ Vgl. statista (2023).

³⁴ Vgl. UN (2023a).

³⁵ Vgl. Climate Action Tracker (2023).

größter CO₂-Emittent der Welt, auf dessen Territorium fast ein Drittel der weltweiten Emissionen entfallen, Net Zero im Zeitraum bis 2060 an. Indien, hinter China und den USA drittgrößter CO₂-Emittent mit hohen Wachstumsambitionen, hat das Erreichen von Net Zero erst für das Jahr 2070 vorgesehen.

Eine weitere Anforderung an die Lösung besteht in der **Erreichung des 2°C-Ziels**. Es ist durchaus möglich, dass es der Welt nicht gelingen wird, dieses Ziel zu erreichen. Selbst ein Temperaturanstieg um 3°C kann im Rahmen der Unsicherheiten der Projektionen nicht ausgeschlossen werden. Eine (mindestens) temporäre Überschreitung der 2°C-Grenze ist zu erwarten. Nicht überraschend mehren sich die Stimmen, die sagen, dass es für die Erreichung des 1,5°C-Ziels zu spät ist – egal, welche Wege zukünftig eingeschlagen werden.³⁶ Dennoch ist es anzustreben, auch nach einem eventuellen nachträglichen Erreichen des 2°C-Ziels weiter Treibhausgase aus der Atmosphäre zu entfernen, um möglichst nah an das Konzentrationsniveau für 1,5°C heranzukommen.

3.2.3 Weitere Anforderungen

Hinzu kommen weitere Anforderungen an die Lösung, die in der Folge beschrieben werden.

Die erforderliche **Finanzierung** der Lösung muss von der Weltgemeinschaft als **machbar** eingeschätzt werden können. Hier geht es insbesondere um die ökonomische Leistungsfähigkeit des Globalen Nordens und damit der OECD-Staaten, die in erheblichem Umfang die Transformation des Globalen Südens kofinanzieren müssen („From Billions to Trillions“). Die Belastungen für die Bürger und andere Akteure der reichen Länder müssen erträglich sein. Zugleich erscheint die Erreichung derartiger Summen zum ersten Mal in der Geschichte machbar, weil ein weiteres Nichtstun noch teurer zu werden droht. Insofern sind die Beiträge der reichen Länder nicht als Wohltätigkeit zu verstehen, sondern als eine Finanzierung von **Systemdienstleistungen** der Länder des Südens, die einer Stabilisierung der ökologischen und sozialen Systeme dienen, zum Beispiel dem Klimaschutz. Das bedeutet, dass Zahlungen nur dann erbracht werden, wenn die messbaren Systemdienstleistungen in den Ländern des Südens auch nachweislich stattfinden und zudem die intendierten Wirkungen erzielt werden. Die Beiträge des Südens sollen die Welt und damit auch die reichen Länder vor den Folgen einer „Klimakatastrophe“ schützen, die diese nicht allein mit Maßnahmen auf ihren Territorien verhindern können.

Wenn auch noch nicht implementiert, ist der Ansatz von Systemdienstleistungen keine völlig neue Idee. Der World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) erwähnt im Kontext seiner Vision 2050 einen notwendigen Mindset „Regeneration“. Dazu heißt es „*Business has to move beyond a “doing no harm” mindset. It’s time to unlock the potential of living systems – social and*

³⁶ Vgl. UNEP (2022a), IPCC (2023).

*ecological – that business depends on, and build their capacity to regenerate, thrive and evolve.*³⁷

Auch hier geht es um die ökologischen und sozialen Systeme, die für eine gute Zukunft des Wirtschaftens stabilisiert bzw. regeneriert werden müssen. Im Rahmen der Referenzlösung soll es darum gehen, diesen Ansatz akteursübergreifend zu verfolgen.

Weil kriegerische Auseinandersetzungen jede Zielerreichung massiv erschweren, muss die Lösung **Frieden erhaltend** und an manchen Stellen der Welt sogar **Frieden schaffend** sein. Sie muss sich also durch eine **sehr hohe Zustimmungsfähigkeit** auszeichnen. Es kann ausgeschlossen werden, dass in den nächsten 50 Jahren eine Instanz mit diktatorischer Macht der Welt aufzwingen kann, was zu tun ist, dieses gesamtökonomisch umsetzen kann und dabei alle mitmachen. Vielmehr zeichnet sich eine multipolare Welt ab, in der auch Entwicklungs- und Klimafragen nur im Konsens über den Weg der Kooperation angegangen werden können. Ansonsten führt der Weg unvermindert weiter in Richtung einer immer weitergehenden Verschärfung des Klimawandels und dadurch ausgelöster Wohlstandsverluste überall auf der Welt.

Insbesondere muss die Lösung einen Konflikt der OECD mit Russland, China und weiteren Staaten, die über große Reserven an fossilen Energieträgern verfügen, vermeiden. Sie muss einen Weg eröffnen, der auch für Länder gangbar ist, für die die Nutzung bzw. der Verkauf dieser Energieträger ein wesentliches Element ihrer eigenen Finanzierungsbasis darstellt.

Mit der Referenzlösung wird der Anspruch erhoben, entscheidend zur Lösung der globalen Energie- und Klimaprobleme beizutragen. Natürlich bedeutet dies nicht, dass sich die Welt in Richtung der Lösung bewegen wird. Sie könnte es aber tun und wäre damit auf einem Pfad, mit dem es gelingen kann, die beschriebenen Ziele zu erreichen. Es gilt zu zeigen, dass es überhaupt eine Lösung gibt, mit der die weltweiten Anliegen in den Bereichen Energie, Klima und Wohlstand erfüllt werden können. Wenn es eine Lösung gibt, wird es sicher weitere geben. Alleine der technische Fortschritt erweitert immer wieder den Raum der Möglichkeiten.

Dabei wird das Ziel verfolgt, „auf der sicheren Seite zu sein“, nicht nur technologisch, sondern auch ökonomisch und politisch. Die beschriebene Lösung soll im Sinne einer „konservativen“ Herangehensweise **keine Überschätzungen von Lösungsbeiträgen** enthalten, sondern im Gegenteil vorsichtig bei der Bemessung lösungsrelevanter Parameter sein, wie zum Beispiel der CO₂-Wirkung, Kosten einzelner Elemente der Lösung, technische Readiness Level oder auch politische Durchsetzbarkeit.

³⁷ WBCSD (2021).

4 Erweiterte OECD, China-Club und Challenge-Gruppe

In den vorherigen Kapiteln wurde bereits deutlich, dass die heutigen Situationen der Staaten in Hinblick auf die Themen Energie und Klima sehr unterschiedlich sind. Das Gleiche gilt für ihre Rollen in der Lösungsentwicklung. Diese globalen Verhältnisse gilt es in ihren wirtschaftlichen, sozialen, geografischen, ökologischen und demografischen Dimensionen zu berücksichtigen.

Denn aus den unterschiedlichen Gegebenheiten resultieren unterschiedliche Ausgangssituationen und Interessen, die es zu berücksichtigen gilt, wenn man zu einer ganzheitlichen Lösung kommen möchte.

Um die entscheidenden Unterschiedlichkeiten transparent zu machen und um sie in angemessener Weise bei der Lösungsentwicklung zu berücksichtigen, werden die rund 200 Staaten der Welt in drei Gruppen unterteilt. Diese sind die **erweiterte OECD**, der sog. **China-Club** und die **Challenge-Gruppe**.

Die insgesamt berücksichtigten Länder der drei Gruppen erweiterte OECD, China-Club und Challenge-Gruppe decken mehr als 99 % der Weltbevölkerung und mehr als 98 % des weltweiten BIPs ab. Die drei Gruppen werden in der Folge beschrieben.

Im abschließenden Unterkapitel wird die Challenge-Gruppe auf der Basis eines selbst entwickelten "Challenge-Indexes" in drei Untergruppen unterteilt. Es gerät darum, die Staaten nach der Größe der Herausforderung, Net Zero zu erreichen, zu klassifizieren.

4.1 Die erweiterte OECD

Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) ist die Organisation der „reichen“ Länder. Die 38 Mitgliedsstaaten verteilen sich auf der gesamten Welt.³⁸ Ihre Bevölkerungsgröße liegt bei insgesamt etwa 1,5 Milliarden Menschen. Diese wird sich bis 2050 nicht wesentlich verändern. Alle OECD-Staaten arbeiten mit eigenen finanziellen Mitteln am Ziel Klimaneutralität 2050 (oder sogar früher). Die einzige Ausnahme ist die Türkei, deren NDC auf Klimaneutralität 2053 zielt, nur vage Aussagen im Bereich der Klimafinanzierung macht und Hilfe anderer Staaten erwartet.³⁹

Neben der OECD gibt es neun weitere Länder in einer vergleichbaren Situation mit ähnlichen Plänen im Bereich des Klimaschutzes. Diese sind Bahamas, Bermuda, Grönland, Liechtenstein, Malta,

³⁸ Vgl. Anhang A.1.

³⁹ Vgl. Climate Action Tracker (2023).

Monaco, Puerto Rico, Singapur und Zypern. Diese neun Staaten bilden gemeinsam mit den OECD-Ländern die **erweiterte OECD**. Insgesamt umfasst diese Gruppe also **47 Staaten**.⁴⁰

Diese Staaten werden ihren Weg zu Net Zero bis 2050 (oder sogar früher) nach heutiger Einschätzung gehen und sich nach eigenen Vorstellungen einen Maßnahmenmix zusammenstellen. Dabei können sie aus etablierten Lösungselementen auswählen, z. B. (1) alte Erneuerbare, (2) neue Erneuerbare, (3) Carbon Capture and Usage sowie Storage, (4) Direct Air Capture, (5) Nuklearenergie, (6) Wärmepumpen, (7) Low-carbon Wasserstoff, (8) synthetische Kraftstoffe, (9) Natur-basierte Lösungen, (10) Effizienzgewinne, (11) Lebensstilveränderung, (12) Kontingentierung von Mobilität und (13) induzierte bzw. akzeptierte Verarmung/ neue Wohlstandsbegriffe.

Welcher Maßnahmenmix gewählt wird, hängt sehr stark von den konkreten Gegebenheiten in den Ländern ab. Überall gilt es, verschiedene Arten von Restriktionen zu berücksichtigen, die aus den lokalen Gegebenheiten resultieren (vgl. hier Kapitel 9 - Limitationen). Einige dieser Restriktionen sind politischer Art. Das betrifft zum Beispiel nationale Vorbehalte gegenüber bestimmten Technologien (z. B. keine Atomkraft) und entsprechende Narrative, die letztlich die konkrete Politik vor Ort formen. Dabei ist klar, dass die politischen Entscheidungen für oder gegen einzelne Maßnahmen einen großen Einfluss auf die Wohlstandsperspektive der jeweiligen Länder haben. Manche Länder werden vielleicht sogar ihre Industrie „vertreiben“. Klar ist aber auch, dass in eben diesen nationalen Entscheidungen die Autorität von Staatssystemen, auch von Demokratien, liegt. Sie dürfen sich entscheiden, auch für Wohlstandseinbußen, wenn es der mehrheitlichen Meinung entspricht. Wohlstandseinbußen können vor allem dann entstehen, wenn Ziele zur Energieeinsparung gesetzlich festgeschrieben werden, die nicht über Energieeffizienzgewinne erreicht werden können.⁴¹

In Summe gilt: Für die Referenzlösung ist die erweiterte OECD ein verhältnismäßig unkompliziertes Umfeld. Es gibt einen Maßnahmenkasten, aus dem man sich bedienen kann, vgl. Kapitel 5. Es gibt die notwendigen finanziellen Mittel. Die Staaten müssen ihren Weg wählen und für diesen Mehrheiten finden. Mit der Referenzlösung werden in der Folge Lösungselemente und Maßnahmenmixe vorgeschlagen, derer sich natürlich auch die OECD bedienen kann. Den Erfolg der Energie- und Klimapolitik der betrachteten Staaten voraussetzend, bildet die konkrete Politik dieser Länder auf dem Weg zu Net Zero den auf diese Länder bezogenen Teil der Referenzlösung.

Vor dem beschriebenen Hintergrund ist die erweiterte OECD nicht das primäre Zielfeld der Referenzlösung, auch nicht in Bezug auf aktuelle Auseinandersetzungen wie zum Beispiel den EU-Streit, ob Elektrolyse-Wasserstoff auf Basis von Strom aus Kernkraftwerken grün ist oder nicht. Aus der Perspektive der Referenzlösung ist eine solche Frage keine Frage der prinzipiellen Lösbarkeit der globalen Probleme im Energie- und Klimabereich. Es sind dies eher lokale Phänomene, die aus der

⁴⁰ Vgl. Anhang A.1.

⁴¹ Vgl. Fuest (2023).

jeweiligen Vorgeschichte, dominierenden Narrativen sowie dem Ringen um Deutungshoheit und politische Macht resultieren, mit denen lokal umzugehen ist.

Dennoch kommen der erweiterten OECD zwei gewichtige Rollen in der Lösungsentwicklung zu. Erstens muss sie wesentlich zu ihrer Finanzierung beitragen und zweitens fungiert sie weiterhin als bedeutender Innovations- und Technologielieferant, da ein Großteil der für eine Klimaneutralität 2070 erforderlichen Technologien heute noch nicht zur Verfügung steht. Dies sind, neben dem Erreichen der eigenen Klimaneutralität in 2050, für eine erfolgreiche Umsetzung der Referenzlösung entscheidende Beiträge.

4.2 Der China-Club

Die aufstrebende Großmacht China wird zentralen Einfluss auf die Zukunft der Welt haben. Das gilt auch und insbesondere im Klima- und Energiebereich, ist doch China der größte CO₂-Emittent der Welt und zugleich größter Kohle-Produzent und -Nutzer. Vieles deutet darauf hin, dass China im Begriff ist, das Zentrum einer neuen Blockbildung zu werden, vgl. Kapitel 2.4. Weitere einflussreiche Staaten, die man in diesem Kontext nennen muss, sind Russland und Saudi-Arabien. Auch für sie sind fossile Energieträger von großer Bedeutung. Hinzu kommen weitere Staaten, die ebenfalls reich an fossilen Energieträgern sind, und für die diese Energieträger eine zentrale Grundlage ihrer Existenz und Finanzierung sind. Sie sind in der **OPEC**, der Organisation erdölexportierender Länder, organisiert. Die Staaten sind Bahrain, Hongkong, Kuwait, Macao (CN), Oman, Qatar und die Vereinigten Arabischen Emirate. Diese insgesamt **zehn Staaten** bilden im Rahmen der Referenzlösung den sogenannten **China-Club**. Die Bevölkerungsgröße dieser Gruppe liegt 2025 bei etwa 1,5 Milliarden Menschen. Sie wird sich bis 2050 nicht wesentlich verändern.

Die im Kapitel 2.4 beschriebene neue Blockbildung um China ist noch sehr viel weitreichender und reicht bis in die Entwicklungsländer hinein. Dieses Phänomen wird an späterer Stelle aufgegriffen.

Ohne Kooperation mit den Staaten des China-Clubs werden die Klima- und Energieprobleme der Welt nicht lösbar sein. Die zehn Staaten vertreten vor dem Hintergrund ihrer gesellschaftlich-kulturellen Vorstellungen und ihrer Zukunftspläne im Energiebereich häufig andere Positionen als weite Teile der erweiterten OECD.

Aufschlussreich ist ein genauerer Blick auf China, Russland, Saudi-Arabien und die Vereinigten Arabischen Emirate – als Gastgeber der nächsten Klimakonferenz COP28.

Saudi-Arabien ist ein Schwergewicht im Bereich der fossilen Energieträger, was der Staatskonzern Saudi Aramco widerspiegelt. Er ist der mit Abstand größte Energiekonzern der Welt. Im

Geschäftsjahr 2022 erzielte das Unternehmen einen Rekordgewinn von 161 Milliarden US-Dollar.⁴² Dass das Land auch zukünftig auf fossile Energien setzen wird, wurde bereits im Kontext des G20 Gipfels in 2020 deutlich, den Saudi-Arabien ausrichtete, und bei dem eine **Circular Carbon Economy** (CCE) Plattform ins Leben gerufen wurde, in deren Zentrum das **4R Framework** „Reduce, Reuse, Recycle and Remove“ steht.⁴³ Damit steht fest, dass fossile Energieträger weiter eine Rolle spielen werden, und Carbon Capture ein Schlüssel zum Erreichen von Net Zero sein wird. Diese Einschätzung findet man auch in Äußerungen des aus den **Vereinigten Arabischen Emiraten** stammenden Präsidenten der nahenden COP28 Sultan Al Jaber und im Abschlussdokument des Petersberger Dialogs 2023 wieder, in dem es um einen „**Ausstieg aus den fossilen Emissionen**“, **nicht aber um einen „Ausstieg aus den fossilen Energien“ geht.**⁴⁴

Russland ist das Land mit dem größten Territorium der Welt. Es ist eine führende Macht im Bereich der fossilen Energieträger und verfügt über sehr große Erdgasvorkommen, die für die Finanzierung des Landes von zentraler Bedeutung sind. Hinzu kommen sehr große biologische Ressourcen. Russland profitiert in mancherlei Hinsicht vom Klimawandel, etwa in der Arktis, wo in Folge der Erderwärmung Ressourcen erschließbar werden, die zuvor nicht zugänglich waren. Auch die sich öffnende Nordwestpassage bietet neue Entwicklungschancen. Wohin der Ukraine-Konflikt führen wird, kann heute nicht beurteilt werden. Russland orientiert sich weg von Europa.

China ist die aufstrebende Supermacht. Der Westen fühlt sich, wie auch viele direkte Nachbarstaaten, durch die Ambitionen Chinas bedroht. China rüstet schnell auf. Es bedroht Taiwan, das international nicht als eigenständiger Staat anerkannt ist, und das China in sein Reich eingliedern möchte, wie zuvor Hongkong. China beansprucht große Teile des Südchinesischen Meers, auch gegen die Ansprüche anderer Staaten, wie z. B. Vietnam und die Philippinen und nimmt dabei auch den Rechtsspruch des Ständigen Schiedsgerichts in Den Haag zu den legitimen Ansprüchen in dieser Region nicht zur Kenntnis.

China ist der größte Energieverbraucher der Welt und beansprucht zugleich weiter seinen Status als Entwicklungsland. Dieser erlaubt ihm, noch bis 2030 seine CO₂-Emissionen zu steigern, wovon das Land Gebrauch machen möchte. China verfolgt im Klimabereich viele parallele Ansätze, ist aber zugleich der größte Verbraucher und Produzent von Kohle, gefolgt von Indien. Zusammen verbrauchen beide Länder etwa 80 % der weltweit eingesetzten Kohle. Das Verbrennen erzeugt pro Jahr etwa 14 Milliarden Tonnen CO₂, was mehr als einem Drittel der weltweiten Emissionen im energienahen Bereich entspricht.

⁴² Vgl. statista (2023b)

⁴³ Vgl. Climate Transparency (2020).

⁴⁴ Vgl. Auswärtiges Amt (2023).

Auf internationalen Konferenzen werden China und Indien immer wieder bedrängt, aus der Kohle auszusteigen. Tatsächlich haben sich 2022 auf dem G20-Gipfel in Rom die beteiligten Staaten darauf geeinigt, in den nächsten Jahrzehnten die Kohle auszuphasen. Das gilt allerdings nur für **unabated coal**, also für Kohleverbrennung ohne Carbon Capture (CC). So ist es im Abschlusscommuniqué von Rom festgehalten. Ähnlich positionieren sich auch die USA. Das gilt in gleicher Weise für das Abschlusscommuniqué der Klimakonferenz 2022 im ägyptischen Sharm El Sheikh. Es ist wichtig festzuhalten, dass sowohl in China als auch in Russland Carbon Capture wesentlicher Bestandteil der eigenen Planungen ist, Net Zero zu erreichen. Beide Staaten haben, ebenso wie Saudi-Arabien, dieses Ziel für 2060 erklärt. Angesichts der Herausforderungen, vor denen die Länder stehen, ist das ein früher Zeitpunkt. Ob das Ziel erreicht werden wird, ist schwer zu beurteilen.

Die OECD-Welt wird nicht viel Einfluss auf Zielerreichung dieser Staaten nehmen können. Wenn aber die Anforderungen an diese und andere Länder zu sehr erhöht werden, etwa in Richtung einer totalen Defossilisierung, ist damit zu rechnen, dass diese Staaten die Debatten mit dem „Westen“ beenden und ihre eigenen Vorstellungen verfolgen werden.

Von China und Russland wurden bisher **keine Forderungen nach finanzieller Unterstützung** für ihre Wege in Richtung Net Zero gestellt. Allerdings wehrt sich China dagegen, für Loss and Damage in den übrigen Entwicklungs- und Schwellenländern aufzukommen. Russland sieht das wahrscheinlich ähnlich.

Die Länder des China-Clubs werden ihren Pfad in Richtung Net Zero selbst gestalten. Ob Zielerreichung 2060 realistisch ist, ist heute kaum abschätzbar. Dabei werden insbesondere China und Russland, an denen sich aktuell weite Teile der Welt orientieren, kaum Vorschriften des Westens akzeptieren. Wie auch im Falle der erweiterten OECD ist damit die Einflussmöglichkeit in Form von Überlegungen zu einer Referenzlösung gering. Im Prinzip können die Staaten Net Zero bis 2060 erreichen. Fossile Energieträger werden im China-Club allerdings von zentraler Bedeutung bleiben. Carbon Capture wird dabei ein zentrales Element sein. Die neuen Erneuerbaren haben für China und Russland ein Potenzial, es ist aber aufgrund der klimatischen und sonstigen Bedingungen begrenzt. Energetisch und finanziell ist es für beide Staaten existentiell, ihren Großmachtstatus zu halten. Wer den Klimawandel bewältigen möchte, sollte einen kooperativen Weg mit diesen beiden Staaten suchen und ihre Stabilität nach Möglichkeit nicht gefährden.

Aufgrund des Gesagten stellen die erweiterte OECD wie auch der China-Club für die Referenzlösung nicht die primären Untersuchungsobjekte dar. Die erweiterte OECD kann Wohlstand und Net Zero mit den verfügbaren Instrumenten bis 2050 aus eigener Kraft erreichen, für den China-Club gilt das für 2060. Die Entwicklungsperspektiven der Länder der Challenge Gruppe sollten davon nicht beeinflusst werden.

4.3 Die Challenge-Gruppe

Als zentrale Herausforderung verbleiben damit die übrigen Staaten, nämlich die Entwicklungs- und Schwellenländer, die als Challenge-Gruppe bezeichnet werden. Sie sind der **zentrale Gegenstand des vorliegenden Reports**. Die Situation ist in diesen Ländern wesentlich schwieriger als in der erweiterten OECD und im China-Club. Sie bilden die dritte Gruppe, die wegen der dort im Klima- und Energiebereich bestehenden Herausforderungen zentral ist.

In vielen Ländern der Challenge-Gruppe herrschen Armut und ein hohes Bevölkerungswachstum. Wieder andere haben in den letzten Jahren bereits eine Mittelschicht entwickelt und sehen Perspektiven, dass es in den nächsten Jahren weiter bergauf geht. Junge Familien haben hier bereits weniger Kinder, häufig sogar nur zwei pro Haushalt. Alle Länder der Challenge-Gruppe haben große Wohlstandserwartungen. China ist oft das Vorbild für das, was man gerne erreichen würde.

Anders als es in den meisten anderen Studien der Fall ist, wird im Rahmen der GES-Referenzlösung die **Wohlstandsperspektive für die Challenge-Gruppe** in den Mittelpunkt gestellt. Der Begriff „Challenge“ umfasst dabei alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit: die Ökologie, die Ökonomie und den sozialen Bereich. Die Herausforderung bei der Erreichung der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (SDGs) besteht darin, die Zielkonflikte zwischen diesen drei Dimensionen zu überwinden. Das ist die Challenge. Diesbezüglich sind die Länder der Challenge-Gruppe sehr divers. Je nach Land stehen eine oder mehrere der drei Dimensionen als besondere Herausforderung im Vordergrund.

Staaten der Challenge-Gruppe mit einem moderat hohem Einkommen haben bereits Mechanismen entwickelt, Wohlstand aufzubauen. Hier kommt es darauf an, dass das weitere Wachstum mit möglichst wenig Emissionen stattfindet. Die ökonomische und soziale Dimension scheint beherrschbar. Klimaneutrales Wachstum ist die Herausforderung, insbesondere dann, wenn das BIP-Wachstum pro Jahr hoch ist. Bei Staaten mit besonders hohem Bevölkerungswachstum steht die soziale Seite im Vordergrund, insbesondere weil diese Staaten meist noch sehr arm sind. Auch aus humanitärer Sicht ist hier entscheidend, wie viele Menschen pro Jahr absolut dazu kommen.

In Afrika ist die Lage besonders dramatisch. In 30 Jahren wird sich die dortige Bevölkerung von 1,2 Milliarden auf 2,4 Milliarden verdoppeln. Nigeria wird mit 400 Millionen Menschen das dritt-bevölkerungsreichste Land hinter Indien und China und vor den USA sein. In jedem der nächsten drei Jahrzehnte wird in Afrika so viel gebaut werden wie in Europa im letzten Jahrhundert.

Es ist der Anspruch dieses Reports, eine Lösung aufzuzeigen, die allen Menschen Wohlstand bringt. Dabei geht es in 2025 um fünf Milliarden Menschen, in 2050 bereits um sieben Milliarden Menschen. Die reiche Welt und die zwei nicht-westlichen Großmächte, China und Russland, fallen mit insgesamt drei Milliarden Menschen bevölkerungsseitig (immer) weniger ins Gewicht. Die Zielkonflikte

zwischen Ökologie, Ökonomie und Sozialem treten besonders dort auf, wo begründet hohe Wohlstandserwartungen für viele Menschen potenziell zu hohen Emissionen und damit einem nochmals beschleunigten Klimawandel führen. Auf entsprechende Staaten gilt es als internationale Staatengemeinschaft einen besonderen Fokus der Handlungen zu legen.

Natürlich sind die Gegebenheiten in den Ländern der Challenge-Gruppe sehr unterschiedlich. Dies macht ein Blick in die World Development Indicators der Weltbank deutlich.⁴⁵

So gibt es Staaten, die sich durch eine besondere Entwicklungsdynamik auszeichnen, die es bei der Lösungsfindung zu berücksichtigen gilt. Diese „**Schwergewichte**“ zeichnen sich durch ein hohes Bevölkerungswachstum und/ oder ein für ein Entwicklungsland hohes BIP pro Kopf aus.

Selektiert man anhand der World Development Indicators die Staaten, die sich durch ein **BIP pro Kopf in Höhe von über 10.000 US-Dollar** oder ein **Bevölkerungswachstum von mehr als 900.000 Menschen pro Jahr** oder ein **Bevölkerungswachstum von über 500.000 Menschen pro Jahr** bei gleichzeitigem **BIP-Wachstum von über 3,5 % pro Jahr** auszeichnen, erhält man insgesamt 40 Staaten.

Ein BIP pro Kopf von über 10.000 US-Dollar deutet darauf hin, dass die Ausgangslage relativ gut ist. Entsprechende Staaten sind zum Beispiel Argentinien oder Malaysia. Ein BIP pro Kopf dieser Größe deutet allerdings auch darauf hin, dass diese Staaten kurzfristig in der Lage sind, ihren weiteren Wohlstandszuwachs auf klimaschädliche fossile Energieträger zu stützen, sollten keine Querfinanzierung für Carbon Capture sowie erneuerbare Energien bereitgestellt werden.

Ein Bevölkerungswachstum von über 900.000 Menschen pro Jahr deutet auf eine sehr hohe Dynamik auch im Bereich des zukünftigen BIP-Wachstums hin. Sollte dieses – wie in China geschehen – auf Basis fossiler Energien (ohne Carbon Capture) erfolgen, würden jegliche Klimaschutzbemühungen der übrigen Staaten der Welt ausgehebelt. Staaten, die dieses Kriterium erfüllen, sind u. a. Ägypten, Afghanistan, Bangladesch, Brasilien, Kongo, Dominikanische Republik, Indien, Indonesien, Kenia, Nigeria, Pakistan und die Philippinen. Darunter sind offensichtlich einige Staaten mit großer weltpolitischer Bedeutung.

In der Challenge-Gruppe finden sich natürlich auch die Staaten, die zu den ärmsten der Welt zählen. Auf UN-Ebene werden diese als „Least Developed Countries“ (LDCs) bezeichnet. Hier bestehen oftmals sehr spezifische Problemlagen, wie zum Beispiel Bürgerkrieg, kein Meereszugang („land locked“) etc. Aktuell zählen 41 Staaten zu den LDCs.

⁴⁵ Vgl. World Bank (2023).

Die Challenge-Gruppe umfasst insgesamt **128 Staaten**. Eine Übersicht, in der die LDCs rot hervorgehoben sind, findet sich im Anhang.⁴⁶

4.4 Eckdaten der drei Ländergruppen

Für die drei zuvor beschriebenen Gruppen von Staaten werden in diesem Kapitel die wesentlichen Eckdaten zusammengefasst, die der Referenzlösung zugrunde liegen. Hierzu zählen das **Bevölkerungswachstum**, die **Entwicklung des BIPs**, entsprechende **Zuwächse der Energiemenge** sowie resultierende **CO₂-Emissionen**. Sie alle ergeben sich aus den Inhalten der Kapitel 2 und 3. Im Kapitel 2 wurde der Status quo beschrieben sowie auf zukünftige Entwicklungen zum Beispiel im Bereich der Bevölkerungsentwicklung eingegangen. Im Kapitel 3 wurden die Anforderungen an die Lösung formuliert.

Die nachfolgenden Tabellen vermitteln einen Überblick über zentrale Parameter, die bei der Entwicklung der Referenzlösung berücksichtigt wurden. In Klammern sind jeweils die kalkulierten Werte genannt. Bei den Werten vor den Klammern handelt es sich um Rundungen, die zu einer besseren Kommunizierbarkeit der Zahlen führen sollen.

In Tabelle 1 ist dargestellt, wie sich die Bevölkerungszahlen in den drei betrachteten Gruppen nach heutigem Kenntnisstand im Zeitraum von 2025 – 2050 entwickeln werden:

	2025	2050
Erweiterte OECD	1,5 (1,40)	1,5 (1,40)
China Club	1,5 (1,56)	1,5 (1,44)
Challenge Gruppe	5 (5,1)	7 (6,7)
Welt gesamt	8 (8,06)	10 (9,53)

Tabelle 1: Bevölkerungszahlen in 2025 und 2050 (in Milliarden)

In Tabelle 2 ist dargestellt, welche BIP-Entwicklungen die Referenzlösung in den kommenden Jahren von 2025 – 2050 in den betrachteten drei Gruppen ermöglichen soll. Insbesondere soll für die Challenge-Gruppe ein BIP-Wachstum von 20 Billionen US-Dollar in 2025 auf 80 Billionen US-Dollar in 2050 erreicht werden können. In diesem Teil der Erde geht es also um eine Vervielfachung der Wirtschaftsleistung, was einem jährlichen Wachstum von etwa 6 % entspricht. Angegeben sind Werte für die Jahre 2025 und 2050 sowie Zuwächse für den Zeitraum zwischen diesen Jahren:

⁴⁶ Vgl. Anhang A.1.

	2025	BIP-Zuwachs durch Bev.- wachstum	BIP-Zuwachs durch andere Faktoren	2050
Erweiterte OECD	75 (72,8)	3 (2,6)	35 (33,8)	110 (109,1) ¹
China Club	30 (28,7)	-4 (-3,8)	25 (26,3)	50 (51,1) ²
Challenge Gruppe	20 (18,5)	10 (11,2)	50 (51,0)	80 (80,7) ³
Welt gesamt	120 (120)	10 (9,6)	110 (110)	240 (241,1)

Tabelle 2: BIP-Entwicklungen von 2025 bis 2050 (in Billionen US-Dollar)

Den kalkulierten BIP-Werten in 2050 liegen die folgenden Projektionen zugrunde:

¹ Erweiterte OECD: 25 Jahre á 1,6 % Wachstum pro Jahr; Faktor 1,5; pro Kopf 1,6 %

² China-Club: 25 Jahre á 2,3 % Wachstum pro Jahr; Faktor 1,8; pro Kopf 2,6 %

³ Challenge-Gruppe: 25 Jahre 6 % Wachstum; LDCs 7 % pro Jahr; Faktor 4,4; pro Kopf 4,9 %

Den LDCs soll also gemäß SDG 8.1 ein Wachstum von 7 % ermöglicht werden. Durch dieses etwas höhere Wachstum bei den LDCs hat die Challenge-Gruppe im Jahr 2050 ein um 1,5 Billionen US-Dollar höheres BIP, als wenn diese ebenfalls „nur“ 6 % Wachstum hätten. Es beläuft sich auf 80,7 statt 79,2 Billionen US-Dollar.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass BIP-Wachstum Energie erfordert. Um abschätzen zu können, wie hoch die benötigte **Energiemenge** sein muss, um die projizierten BIP-Zahlen zu erreichen, ist eine Betrachtung der **erwartbaren Effizienzgewinne** im Bereich der Energienutzung notwendig. Für die erweiterte OECD und für den China-Club wird angenommen, dass sie die Energieintensität ihrer Wirtschaft verbessern werden – und zwar um die Hälfte besser werden, als es im Zeitraum 2000 – 2019 der Fall war. In Bezug auf die Entwicklungsländer wird angenommen, dass diese im Zeitraum 2025 – 2050 im Durchschnitt genauso hohe Effizienzgewinne erzielen können wie in den vergangenen Jahren (2000 – 2019). Das scheint realistisch, weil für alle Szenarien, die eine klimaneutrale Welt anstreben, ein enormer Technologietransfer von den reicheren Staaten in die ärmeren Staaten eine absolute Voraussetzung ist.

Diese Annahmen führen zu der in nachfolgenden Tabelle 3 dargestellten Aufteilung der BIP-Zuwächse auf einerseits **Mengen-Effekte** und andererseits auf **Effizienz-Effekte** im Bereich der Energieerzeugung.

	2025	Mengen- effekt	Effizienz- effekt	2050
Erweiterte OECD	75 (72,8)	10 (11,5)	25 (24,9)	110 (109,1)
China Club	30 (28,7)	5 (5,3)	15 (17,1)	50 (51,1)
Challenge Gruppe	20 (18,5)	30 (30,8)	30 (31,3)	80 (80,7)
Welt gesamt	120 (120)	10 (9,6)	110 (110)	240 (241,1)

Tabelle 3: BIP-Zuwächse auf Basis von Energie-Mengen und -Effizienz-Effekten (in Billionen US-Dollar)

Der Energieverbrauch wächst bei der erweiterten OECD von 2025 bis 2050 um 20 % von 75 PWh auf 90 PWh. Auch beim China-Club steigt der Verbrauch um 20 % von 50 PWh auf 60 PWh. Hierbei nehmen wir an, dass diese Länder noch einmal die Hälfte der Energieeffizienzsteigerung pro Einheit BIP erreichen werden, wie im Zeitraum von 2000 – 2019 geschehen. Für die erweiterte OECD bedeutet das einen Übergang von 1 kWh auf 0,8 kWh pro 1 US-Dollar BIP. Der China-Club bewegt sich von 1,75 kWh auf 1,2 kWh pro 1 US-Dollar BIP.

Bei den Ländern der Challenge-Gruppe nehmen wir an, dass sie in der Zeit bis 2050 noch einmal die gleiche Effizienzsteigerung schaffen können, die sie zwischen 2000 – 2019 bereits erreicht haben. Das scheint plausibel zu sein, da sie für ihren Wohlfahrtsaufbau modernere Energiesysteme zubauen müssen. Bei unserem Ansatz spielt die internationale Kooperation in Hinblick auf Net Zero und die Umsetzung der Sustainable Development Goals eine zentrale Rolle. Dies schließt enorme Geldtransfers und den Ausgleich von Differenzkosten für das Energieprogramm der Challenge-Gruppe mit ein.

Dabei steigt der Energieverbrauch der Challenge-Gruppe von rund 20 PWh um den Faktor 2,5 auf rund 50 PWh. Das BIP steigt im Vergleich von 20 Billionen US-Dollar um den Faktor 4 auf 80 Billionen US-Dollar. Die Energieeffizienz verbessert sich von 1 kWh auf 0,625 kWh pro 1 US-Dollar BIP.

Zu den relevanten Eckdaten der drei Staatengruppen zählen natürlich auch die erwartbaren CO₂-Mengen, mit denen im betrachteten Zeitraum zwischen 2025 und 2050 umzugehen ist.

Aufgrund der Entwicklungen der Vergangenheit wird im Rahmen der Referenzlösung für das Jahr 2025 unterstellt, dass sich die weltweiten CO₂-Emissionen gleichmäßig auf die drei Staatengruppen verteilen. Ein entscheidender Zeitpunkt der Vergangenheit, der charakteristisch für die weltweiten

Entwicklungen ist, war das Jahr 2019. In diesem Jahr erreichte China erstmals dasselbe Emissionsniveau wie alle OECD-Staaten zusammen.⁴⁷

Der Referenzlösung liegt die folgende Verteilung der weltweiten CO₂-Emissionen im Jahr 2025 und perspektivisch für die nächsten Jahre zugrunde.

	2025	Perspektivisch
Erweiterte OECD	13	0
China Club	13	0
Challenge Gruppe	13	33
Welt gesamt	39	33

Tabelle 4: Netto CO₂-Emissionen der Staatengruppen in 2025 und perspektivisch

Die perspektivischen Werte erklären sich wie folgt: Es wird unterstellt, dass die erweiterte OECD und der China-Club Net Zero aus eigener Kraft erreichen werden, die OECD in 2050, der China-Club in 2060. Unter Berücksichtigung der kalkulierten BIP-Zuwächse, des Anstiegs der Energiemenge und der erzielbaren Effizienzverbesserungen werden die Emissionen in der Challenge-Gruppe hingegen auf etwa 33 Milliarden Tonnen CO₂ ansteigen, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden, zu denen die erweiterte OECD in erheblichem Umfang finanziell beitragen muss. Die Referenzlösung beschäftigt sich explizit damit, wie diese 33 Milliarden Tonnen CO₂ bis 2050 auf netto 3 Milliarden Tonnen CO₂ reduziert und bis 2070 Net Zero erreichen können.

4.5 Unterteilung der Challenge-Gruppe zur differenzierten Kooperation im Klimaschutz

Wie zuvor erwähnt, sind die Herausforderungen auf dem Weg zur Erreichung von Net Zero von Staat zu Staat sehr verschieden. Insbesondere innerhalb der Challenge-Gruppe sind die Gegebenheiten sehr unterschiedlich. Mithilfe eines „**Challenge-Index**“ werden die Staaten der Challenge-Gruppe in drei Untergruppen eingeteilt, je nach Größe der „Challenge“, Net Zero zu erreichen. Der Index wird aus Daten zu unterschiedlichen Größen abgeleitet, die die zu bewältigenden Herausforderungen beeinflussen. Dazu zählen das **BIP pro Kopf**, das absolute **Bevölkerungswachstum**, die **Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern**, das **Potenzial von Solarenergie**, das **Potenzial für Natur-basierte Lösungen** und ein Wert mit Aussage zur **Good Governance**. Natürlich kann der Challenge-Index eine genaue Analyse der jeweiligen Situation der einzelnen Staaten für einen

⁴⁷ Vgl. Rhodium Group (2021).

individuellen Pfad zu Net Zero bei gleichzeitiger Förderung der SDGs nicht ersetzen. Für jedes Land muss eine Einzelfallbetrachtung durchgeführt werden. Dies geht jedoch weit über das im Rahmen dieser Arbeit Mögliche hinaus, in der exemplarisch einzelne Staaten einer detaillierteren Analyse unterzogen wurden und auf dieser Basis Prinzipien abgeleitet wurden. Der Challenge-Index gibt eine grobe Orientierung für den Umgang mit den unterschiedlichen Staatengruppen, so zum Beispiel im Kontext der in Kapitel 6 vorgeschlagenen Governance- und Finanzierungsansätze inklusive ihrer technologischen und intellektuellen Erfordernisse.

Der Challenge-Index baut sich durch Addition von sechs Einzelwerten auf, ist also ein sog. **Composite Indicator**. Höhere Werte bedeuten größere Herausforderungen, wobei je nach Land die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie inkl. Klimaschutz und Soziales) eine unterschiedlich starke Rolle spielen. Ist das BIP pro Kopf hoch, ist das aus sozial-ökonomischer Sicht eine gute Ausgangssituation. Allerdings ist es hier sehr wahrscheinlich, dass diese Staaten weiterhin auf fossile Energieträger setzen, sollten eine Querfinanzierung für Carbon Capture vermehrten Einsatz von Gas oder Nuklearenergie bzw. erneuerbare Energien ausbleiben. Je höher das BIP pro Kopf, desto höher ist also die Challenge. Je mehr Menschen pro Jahr in einem Land hinzukommen, desto höher ist die Herausforderung sowohl aus sozialer, ökonomischer und auch aus Klimasicht, da Wohlstandszuwachs angestrebt ist, der für alle Menschen realisiert werden soll. Die Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern wird zugleich als Chance und Herausforderung gesehen, weil diese Staaten diese vorrangig erschließen werden, um Wohlstand aufzubauen. Die Challenge ist daher hoch. Ein nur geringes Potenzial für Solarenergie, stellvertretend für die erneuerbaren Energien, ist eine Herausforderung. Ist das Potenzial für Natur-basierte Lösungen pro Kopf hoch, ist das hilfreich, der Index-Wert daher niedrig. Es besteht dann auch ein Potenzial für Negativemissionen, die in einem Cap-and-Trade-System gewinnbringend eingesetzt werden können. Mit der Good Governance steht und fällt jedes Konzept, weswegen der Index-Wert hoch ist, sofern die Good Governance schlecht abschneidet.

Für jede der sechs Größen wird ein System eingesetzt, das für jedes Land Punkte von 1 - 10 vergibt. Je höher die Punktzahl, desto höher die Challenge. Da die Punkte für jedes Land aufaddiert werden, beträgt der minimal mögliche Index-Wert 6 Punkte und der maximal mögliche Wert 60 Punkte.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der drei Untergruppen ist schließlich der Zeitpunkt, zu dem sie Net Zero erreichen. So erreicht die Untergruppe 1 Net Zero in 2050. Untergruppe 2 erreicht dieses Ziel in 2060 und Untergruppe 3 schließlich in 2070.

Zur Untergruppe 1 zählt z. B. Brasilien, das u. a. über ein großes Potenzial im Bereich der Bioenergie und im Bereich der Natur-basierten Lösungen verfügt.

Zur Untergruppe 2 zählt z. B. der Iran, der mit verschiedenen territorialen und politischen Problemen zu kämpfen hat und sicher auf Carbon Capture Technologien zurückgreifen wird.

Zur Untergruppe 3 zählt z. B. Indien, das durch ein riesiges absolutes Bevölkerungswachstum und immer noch große Armut charakterisiert ist. Außerdem verfügt Indien über die Möglichkeiten, seine wirtschaftliche Entwicklung zu großen Teilen auf fossilen Energieträgern aufzubauen. Gleichzeitig ist die Verfügbarkeit von Biokapazität pro Kopf gering.

Weitergehende Informationen zu den Datenquellen, zum entwickelten Punktsystem sowie zur Einteilung der Staaten in die drei Untergruppen finden sich im Anhang.⁴⁸

⁴⁸ Vgl. Anhang A.3.

5 Technische und natürliche Elemente der Referenzlösung

In diesem Kapitel wird mit den technischen und natürlichen Elementen der Referenzlösung der „Baukasten“ beschrieben, dessen man sich bedienen kann, um Net Zero herbeizuführen. Neben einer Reihe technischer Elemente, die unmittelbar das Energiesystem betreffen, gehören auch Naturbasierte Lösungsbausteine zum grundsätzlichen Mix, der in Abhängigkeit von den lokalen Gegebenheiten in ganz unterschiedlichen Kombinationen Anwendung finden kann. In diesem Kapitel wird vielfach auf die 700-seitige und aus den zwei Teilen „Technischer Werkzeugkasten“ und „Treibhausgasverursachende Branchen“ bestehende Basisdokumentation zurückgegriffen.⁴⁹

5.1 Ausgangssituation und Charakterisierung der erforderlichen Lösungselemente

Nachdem die globalen Verhältnisse in ihren wirtschaftlichen, sozialen, geografischen und demografischen Dimensionen beschrieben wurden, geht es nun um technische Fragen. Wie kann ein klimaneutrales Energiesystem der Zukunft für eine Welt mit rund zehn Milliarden Menschen aussehen, die in Freiheit und Wohlstand leben? Im Folgenden wird eine Alternative zu einer Lösung entwickelt, die auf eine weitgehende Dekarbonisierung setzt. Es wird begründet, warum eine „Electricity-Only“-Lösung ohne extreme Wohlstandsverluste nicht funktionieren kann. Für eine Referenzlösung im Sinne des Projekts ist dies nicht zulässig. Anschließend werden die technischen Elemente der Referenzlösung betrachtet. Beginnen wollen wir mit einem **Zustandsbericht des globalen Energiesystems** und den daraus **resultierenden Treibhausgas-Emissionen**, also dem Status quo.

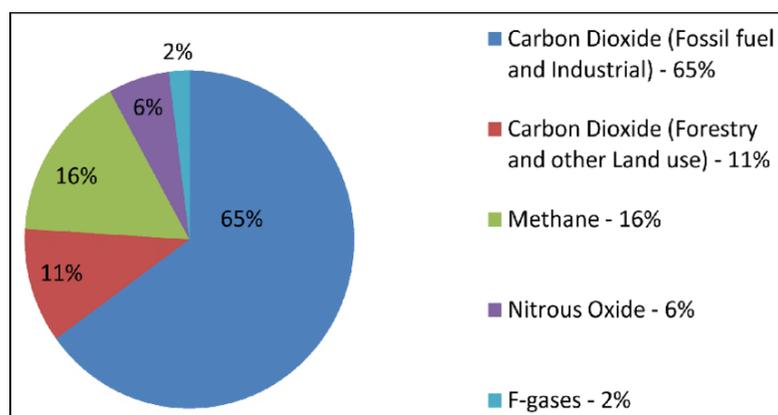


Abbildung 2: Anteile der wichtigsten Klimagase an den weltweiten Emissionen

Quelle: IPCC Report (2014)

⁴⁹ Eine Inhaltsübersicht der Basisdokumentation findet sich im Anhang B.

Die Anteile der wichtigsten Klimagase weltweit (dargestellt in CO₂-Äquivalenten) sind in Abbildung 2 dargestellt.⁵⁰ CO₂ kommt dabei, mit fast 65 % Anteil aus fossilen Quellen sowie aus industriellen Reaktionsprozessen, die wichtigste Bedeutung zu. Die Bedeutung von CO₂ wird zudem durch weitere 11 % aus Land- und Forstwirtschaft erhöht, so dass in Summe rund 76 % der Emissionen unmittelbar aus CO₂ bestehen. Methan steht mit einer Klimawirkung von 16 % CO₂-Äquivalenten an zweiter Stelle: Weitere wichtige Gase mit klimaschädlicher Wirkung sind Lachgas (N₂O) und fluorhaltige Gase. Die Klimawirkung von Wasserstoff wird weiter unten gesondert behandelt.

Im Rahmen seiner Arbeit hat GES auf Basis der Daten der IEA von 2020 die Abbildung 3 entwickelt, die eine Übersicht zum weltweiten Primärenergieeinsatz gibt, und die wesentlichen Grundlagendaten für die Energieströme zur Stromherstellung sowie für den Energieeinsatz in den Sektoren Transport, Industrie und nicht energetischer Sektor darstellt.⁵¹

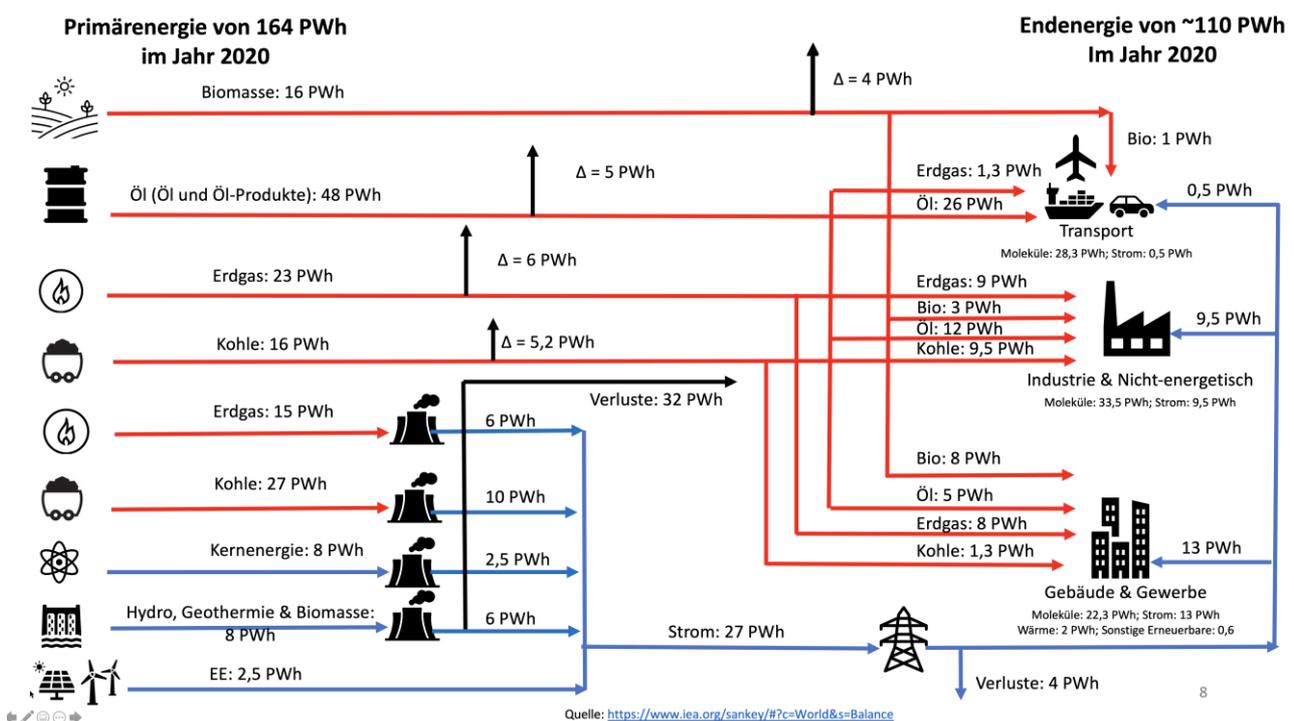


Abbildung 3: Sankey-Diagramm für Primärenergie und Endenergienutzung 2020

Quelle: IEA und eigene Darstellung

Daraus ist erkennbar, dass im Jahr 2020 60,5 Petawattstunden (PWh)⁵² Primärenergie eingesetzt wurden, um 27 PWh Strom zu erzeugen, der nach Verlusten einerseits zu 13 PWh (57 %) im Sektor Gebäude und Gewerbe und andererseits zu 9,5 PWh (41 %) im Sektor Industrie (nicht energetisch)

⁵⁰ Vgl. IPCC Report (2014).

⁵¹ Vgl. IEA (2020a).

⁵² 1 Petawattstunde entspricht 1 Billion Kilowattstunden oder 1.000.000.000.000.000 Wattstunden.

eingesetzt wurde. Nur 0,5 PWh (< 2 %) des erzeugten Stroms wurden im Sektor Mobilität eingesetzt. Angesichts der Zielsetzung, die direkte Verwendung von Strom in den diversen Sektoren zu erhöhen, ist die Frage besonders relevant, welche Elektrifizierungsanteile bei den einzelnen Verbrauchern tatsächlich erreicht werden können. Hierauf wird im Rahmen der Entwicklung der Referenzlösung eingegangen.

Diese Zahlen der IEA zeigen einen direkten Anteil fossiler Energieträger an dem gesamten Primärenergieeinsatz 2020 von 79 %.⁵³ Im Transportbereich ist der Anteil von Öl am Endenergieeinsatz 90 %, im Bereich Industrie und sonstige immer noch 71 %.

GES hat die Zahlendokumentation der IEA als Grundlagendaten für die Energiestrom-Zusammenhänge für die Plausibilisierung seines Referenzmodells benutzt.

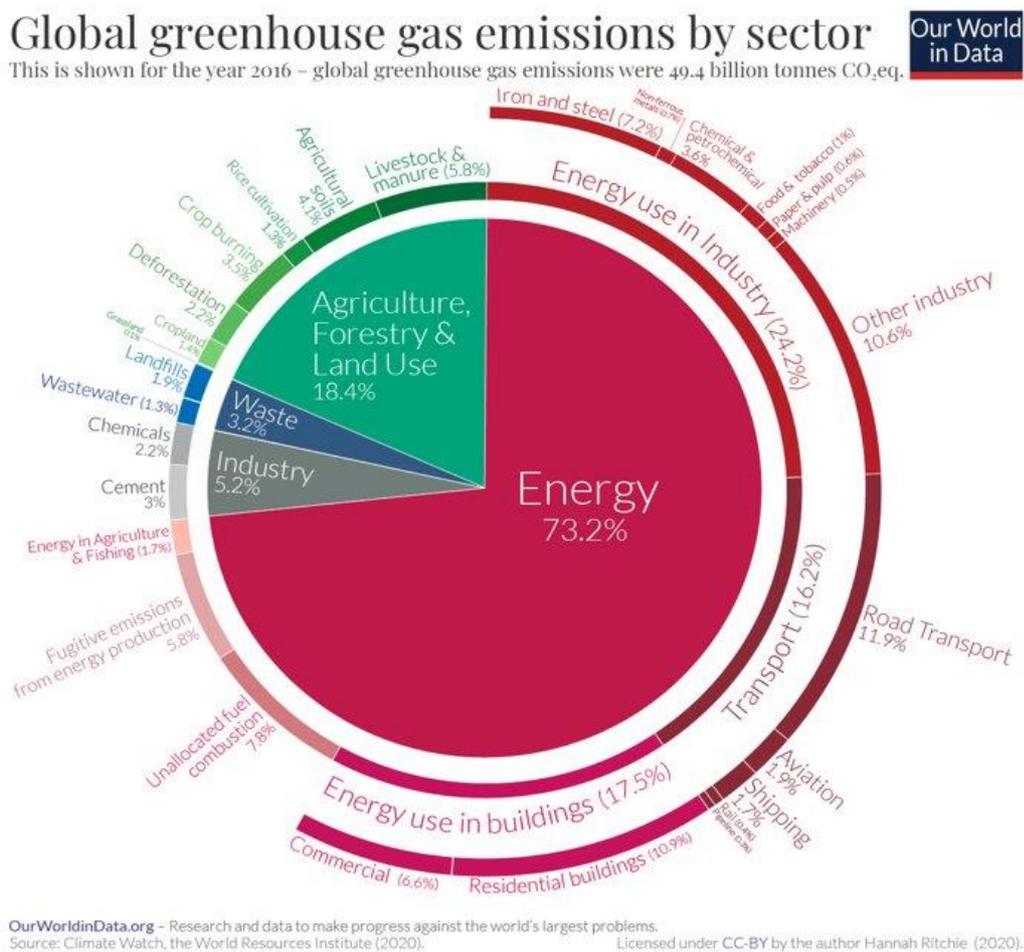


Abbildung 4: Klimagase verursachende Branchen

Quelle: Our Word in Data (2022)

⁵³ Vgl. IEA (2020a).

Neben den von der Energienutzung verursachten Emissionen zeigt die Abbildung 4 weitere CO_{2eq}-Emissionen aus unterschiedlichen Bereichen. Industriell sind dies die chemische Industrie sowie der Zementsektor. Bei der Abfallbehandlung sind Mülldeponien und Kläranlagen explizit genannt. Darüber hinaus verursachten die Land- und Forstwirtschaft sowie die Landnutzung wesentlich Emissionen.

Im Jahr 2020 gab es im energienahen Bereich global etwa 34 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr aus 157 PWh Primärenergieeinsatz, die klimawirksam sind.⁵⁴ Hinzu kommen 7 Milliarden aus den Bereichen Zement, Chemie, Abwasser und Deponien. Der Primärenergieeinsatz resultiert zu ca. 80 % aus fossilen Energieträgern, also Kohle, Gas und Öl. Im Endenergieverbrauch werden 20 % in Form von Strom (Elektronen) und 80 % in Form von Energieträgern (Molekülen) genutzt.

Der Primärenergieverbrauch wird bis 2050 noch erheblich steigen, wir erwarten in unseren Hochrechnungen einen Verbrauch von 210 PWh 2050. Dabei wird der Energieverbrauch vor allem in den Entwicklungs- und Schwellenländern mit rasch wachsender Bevölkerung (siehe **Challenge-Gruppe**) deutlich zunehmen. Aus Sicht von GES wird sich dort entscheiden, ob die Welt die Net-Zero-Emissionsziele erreichen kann – und wenn ja, wann das der Fall sein wird.

In Kapitel 4 wurde hergeleitet, dass sich der Energieverbrauch für den Aufbau des angestrebten Wohlstands der Challenge-Gruppe so weit vergrößern wird, dass sich die CO₂-Emissionen beim aktuellen Energiemix von 13 Milliarden Tonnen CO₂ im Jahr 2025 auf 33 Milliarden Tonnen CO₂ in 2050 erhöhen würden, wenn keine wirksamen Maßnahmen dagegen unternommen werden. Und dies, obwohl angenommen wird, dass der Wohlstandszuwachs der Gruppe von 20 Billionen auf 80 Billionen US-Dollar zur Hälfte durch höhere Energieeffizienz und Lebensstilanpassungen/-änderungen ermöglicht wird.

Klimaneutralität im Bereich der Entwicklungs- und Schwellenländer zu sichern, ist der Fokus des Reports. Nicht überraschend setzen daher die meisten Instrumente der GES-Referenzlösung an dieser Stelle an. Das Zusammenwirken der fünf technischen und Natur-basierten Elemente **(1) Stromsystem auf „zwei Säulen“, (2) Carbon Capture, (3) klimaneutrale Treibstoffe und Energieträger, (4) Vermeidung technischer Methan-Leckagen** und **(5) Natur-basierte Lösungen** bedeutet eine Reduktion/ Ausgleich der CO₂-Emissionen im Jahr 2050 um etwa 50 Milliarden Tonnen CO₂, ausgehend von insgesamt 39 Milliarden Tonnen CO₂ weltweit im Jahr 2025 (der Anteil, der von der Natur ohnehin absorbiert wird, 14 Milliarden Tonnen CO₂, wird in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt). Die erweiterte OECD reduziert dabei ihre Emissionen von 13 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr auf Null, der China-Club reduziert von 13 Milliarden auf 2 Milliarden und die Challenge-Gruppe reduziert ihre 13 Milliarden aus dem Jahr 2025 auf 3 Milliarden. Zwischenzeitlich wären im

⁵⁴ Vgl. IEA (2020a).

Hochlauf von 2025 – 2050 bei der Challenge-Gruppe bis zum Jahr 2050 die o. g. zusätzlichen 20 Milliarden Tonnen CO₂ dazugekommen, die jedoch ebenfalls über das genannte Zusammenwirken der Elemente der Referenzlösung eliminiert werden. In der Summe werden innerhalb der 25 Jahre des Modells also $13 + 11 + 10 + 20 = 54$ Milliarden Tonnen CO₂ eliminiert. Das ist die Größenordnung der im Jahr 2025 angenommenen global entstehenden Treibhausgasemissionen von 53 Milliarden Tonnen CO_{2eq}, von denen ja wie beschrieben 14 Milliarden Tonnen CO₂ durch die bestehenden natürlichen Systeme absorbiert werden.

Referenzlösung bedeutet, dass der beschriebene Weg möglich ist. Er ist so angelegt, dass einerseits keine Verarmungsstrategie verfolgt wird und dass andererseits keine politisch inakzeptablen Finanztransfers erforderlich sind. Wirtschaft und Freiheit werden gefördert, es handelt sich um einen (ökosozialen) marktwirtschaftlichen Ansatz entlang der heute weltweit dominierenden Sicht auf gelingende ökonomische Systeme (**ökosozial/ green and inclusive**).

Worauf ist zu achten? In einer Referenzlösung wechselt man in der Regel auf die „schwierigere“ Seite. Wir unterstellen also ein relativ hohes Wachstum des Energieverbrauchs für die Entwicklungs- und Schwellenländer, insbesondere für Afrika. **Diese Länder sollen sich, falls sie das wünschen, alle voll industriell entwickeln können.**

Wir gehen von einem Energiesystem aus, in dem die Primärenergieumwandlung zu Strom erheblich ausgebaut wird mit dem Ziel, dass 2050 ca. 35 % des Endenergieverbrauchs in Form von Strom eingesetzt wird. Dies erfordert einen substanziellen Ausbau der neuen Erneuerbaren Wind und Solar, die in unserer Hochrechnung von 2,9 PWh Primärenergieerzeugung 2020 auf 46 PWh 2050 ausgebaut werden müssen.

Entsprechend der aus unseren Analysen resultierenden Einsicht, dass ein balanciertes Stromerzeugungssystem tendenziell zu einer Hälfte aus neuen Erneuerbaren und zur anderen Hälfte aus zuverlässig steuerbaren Energiequellen bestehen soll, gehen wir von einem derartigen Energiemix aus. Dabei wird dem Ausbau der Erdgas-basierten Stromerzeugung mit Carbon Capture eine besondere Bedeutung zukommen müssen, da die Möglichkeiten zum Einsatz von strombasiertem Wasserstoff sowohl effizienzseitig als auch von der Verfügbarkeit von Elektrolyseuren begrenzt sind (siehe Kapitel 5.3.3). Darüber hinaus werden weiterhin Kohle (mit Carbon Capture), Nuklearenergie, Wasserkraft, Geothermie und Biomasse zum Einsatz kommen, um die erforderliche Energiemenge als Strom zu erzeugen.

Für eine Referenzlösung ist es dabei unerheblich, ob der Anteil von erneuerbaren Energien (auch in einzelnen Ländern) auf 70 % angehoben werden kann, wenn bereits ein Verhältnis von 50:50 funktioniert. Zu beachten ist, dass bei dieser Konstellation der **Stundenbeitrag** der neuen Erneuerbaren zwischen 0 und 150 % des Stundendurchschnitts schwanken wird. Während die Kapazitäten der zuverlässig steuerbaren Energieträger in Richtung Vollausbau erfolgen muss, um zu jeder Zeit

eine ausreichende Versorgung mit Strom zu gewährleisten, auch wenn im Jahresmittel nur die Hälfte oder weniger der verfügbaren Leistung benutzt wird.

Unsere Referenzlösung beruht also darauf, dass für die nächsten Jahrzehnte ein **kluger Mix** verschiedener Formen der Energieerzeugung wichtig ist, wenn eine klimakompatible Welt in Wohlstand das Ziel ist. **Der Mix muss jeweils länderspezifischen Restriktionen genügen** (vgl. Kapitel 9.1.1).

Die nachfolgend genannten fünf Punkte erläutern, warum eine Lösung, wie sie von GES entwickelt wurde, zwingend ist.

1) Erforderliches Wachstum

Für eine Welt in Wohlstand kalkulieren wir für die Challenge-Staaten 6 % BIP-Wachstum pro Jahr in Zeitraum 2025 – 2050, denn Wohlstandsaufbau und Umsetzung der SDGs in 2050 – 2070 ist explizit Teil der Zielsetzung der Referenzlösung. Das führt von einem BIP von etwa 20 Billionen US-Dollar in 2025 zu etwa 80 Billionen im Jahr 2050. Für die ärmsten Länder (Least Developed Countries) setzen wir 7 % Wachstum an, so wie es in SDG 8 postuliert wird. Das BIP für die Challenge-Gruppe in 2050 wächst dadurch um zusätzlich etwa 1,5 Milliarden US-Dollar. Zieht man das hohe Wachstum der Bevölkerung der Challenge-Staaten im Zeitraum 2025 – 2050 in Betracht, reduziert sich das BIP-Wachstum pro Kopf von etwa 6 auf 5 %. Zum Vergleich: In China lag das Wachstum in den vergangenen 30 Jahren fast in jedem Jahr oberhalb von 10 %, teils sogar deutlich darüber.

Für die anderen betrachteten Ländergruppen wurden die OECD-Projektionen übernommen. Details sind im Anhang zu finden.

2) Eine „Electricity-only“-Welt ist nicht möglich

Unsere Projektion ergibt einen Primärenergiebedarf im Jahr 2050 von 210 PWh, von denen wir erwarten, dass ca. 50 % zur Herstellung von Strom genutzt werden, gegenüber 27 % in 2020. Den Endenergiebedarf sehen wir bei 172 PWh. Es gibt viele Gründe, warum neben Strom (Elektronen) weiterhin Moleküle eine zentrale Rolle bspw. im Transportsektor und in der Industrie spielen werden. Vaclav Smil führt in seinem Buch „Wie die Welt wirklich funktioniert“ die vier vom Volumen her wichtigsten Materialkomponenten auf, ohne die unsere Zivilisation nicht möglich wäre.⁵⁵ Alle vier brauchen sehr viel Energie, gerade auch solche vom Molekültyp. Es sind dies Zement (fast 4 Milliarden Tonnen jährlich), Stahl (fast 2 Milliarden Tonnen jährlich), Plastik (etwa 850 Millionen Tonnen jährlich) und Ammoniak für die Düngemittelproduktion (etwa 350 Millionen Tonnen jährlich).

⁵⁵ Vgl. Smil (2023).

Wollte man den gesamten Primärenergiebedarf 2050 mit neuen Erneuerbaren realisieren, müsste der Stromeinsatz bei den Energieverbrauchern gegenüber diesen Zahlen nochmal deutlich gesteigert werden. Da zahlreiche Anwendungen (z. B. Flugzeuge) realistisch nicht auf Strombasis mit Energie versorgt werden können, bleibt ein hoher Restbedarf an Energie, der chemisch in Form von Molekülen verfügbar sein muss. Wir halten es maximal für erreichbar, dass zwei Drittel des Endenergiebedarfs durch Elektronen gedeckt werden, gegenüber einem Bedarf von einem Drittel als Moleküle.

Dies würde bedeuten, dass 114 PWh direkt mittels Elektronen genutzt werden könnten, und 57 PWh auf Basis von Wasserstoffmolekülen aus der Elektrolyse erzeugt werden müssten. Mit einem Wirkungsgrad von 75 % von Strom zu Wasserstoff und Wasserstoff-Derivat beträgt der Bedarf an neuen Erneuerbaren zur Herstellung dieser 57 PWh Wasserstoff 67 PWh. Hinzu kommt der Effekt, dass die Volatilität der neuen Erneuerbaren über zusätzlichen Energiespeicherbedarf kompensiert werden muss. Wir rechnen hier mit einem Faktor von 130 %. Insgesamt müsste also in einem Energiesystem, das zu zwei Dritteln auf Strom setzt, die Primärenergieerzeugung gegenüber dem von GES im Jahr 2050 beschriebenen Ausbauzustand 224 PWh Erzeugung neuer Erneuerbarer betragen.

2020 wurden mit einer weltweit installierten Leistung von 733 Gigawatt Windkraft und 714 Gigawatt Solarenergie insgesamt 2,9 PWh Strom erzeugt, d. h. die durchschnittliche Jahreslaufzeit über Wind und Solar betrug bei dieser installierten Kapazität 1.979 Stunden. Das entspricht einem Kapazitätsfaktor von 23 % bezogen auf ein Jahr.⁵⁶ Um die erforderlichen 224 PWh Energie zu erzeugen, müsste bei einem unveränderten Mix gegenüber 2020 der Ausbau um den Faktor 77 gesteigert werden, also 6-mal mehr als im anspruchsvollen GES-Referenzszenario. Auch wenn in China erhebliche Fertigungskapazitäten für Fotovoltaik bestehen, wären signifikante Rohstoffengpässe zu erwarten, auch weil der Rohstoffbedarf der Windräder erheblich wäre.⁵⁷

Und schon die Wandlung von 67 PWh Strom in 50 PWh Wasserstoff trifft auf die Ausbaugrenze der Elektrolyse: Die Erzeugung von Wasserstoff aus 67.000 TWh Strom braucht bei einer Effizienz der Nutzung der Elektrolyseure von knapp 75 % (6.570 Stunden von 8.760 Stunden im Jahr) 10 Terawatt (TW) Elektrolyseurkapazität. Das deckt noch nicht den weiteren Elektrolysebedarf, der in der Schaffung von chemischen Energiespeichern liegt, die die Volatilität eines solchen gigantischen Systems neuer Erneuerbarer kompensieren müssten.

Selbst bei (so kaum zu erwartendem) rasanten Hochlauf sind aber bis 2050 allenfalls **4 TW Elektrolyseurkapazität** möglich. Das wird in Kapitel 5.3.3 genauer beschrieben. Deshalb muss ein

⁵⁶ Vgl. IEA (2020a).

⁵⁷ Vgl. Radermacher, Dollinger (2021).

erfolgreicher Weg in die Zukunft auch weiter in hohem Umfang – wir erwarten zwei Drittel statt der heutigen 80 % – Moleküle als Primärenergieträger nutzen.

Die Kapitel 2.1 - 2.3 der Basisdokumentation behandeln alle Aspekte der regenerativen Erzeugung von Strom, der Erzeugung von Strom mittels Kernkraft sowie der Speicherung von Strom. Kapitel 2.4.3 behandelt die Herstellung von Wasserstoff auf Basis der Elektrolyse und die Herausforderungen und Limitierungen des Upscalings.

3) Die Molekülwelt braucht Carbon Capture

Die Weltgesellschaft braucht Energie in Form von Strom (Elektronen) und in Form von Molekülen (z. B. Treibstoffe und weitere Energieträger). Zur zweiten Anwendergruppe gehören die Bereiche Industrie (wie Stahl, Zement, Chemie, etc.) und Transport bzw. Mobilität (Kraftstoffe etc.).

Wir kalkulieren ca. ein Drittel des Primär- und ca. ein Drittel des Endenergiebedarfs auf Basis von Elektronen. Ca. 67 % des Energieeinsatzes verbleibt in fossiler Form (heute über 80 %) und benötigt, wo immer möglich, Carbon Capture. Die erforderliche Menge an Carbon Capture ist für diese Aufteilung bei einem linearen Hochlauf unserer Ansicht nach über die nächsten 25 Jahre darstellbar.

4) Die Stromerzeugung muss auf „zwei Säulen“ stehen

Es liegt in der Natur der Sache, dass Wind- und Solaranlagen volatil sind. Wenn der Wind nicht weht und die Sonne nicht scheint, gibt es auch keinen Strom. Vor allem Industriegesellschaften sind aber auf zuverlässige Energiebereitstellung angewiesen. Zwangsläufig benötigen neue Erneuerbare die ständige Bereitstellung eines zuverlässigen und steuerbaren Backups. Damit die kontinuierliche Stromversorgung im akzeptierten Umfang gewährleistet ist.

Die **Bereitstellungskosten sind ganzjährig zu tragen**. Der Umfang an benötigten Energieträgern und an zu speicherndem CO₂ hängt aber direkt von dem Einsatzzeitraum ab. Das gilt neben dem Prozess des Abfangens von CO₂ insbesondere auch für den Transport und die Deponierung bzw. Verpressung des CO₂. Je weniger die fossilen Energieträger gebraucht werden, umso geringer die variablen Kosten. Was in jedem Fall bleibt, sind die Bereitstellungskosten, die Kosten für vorgehaltenes Personal etc., das ist unvermeidbar. Denn das Vorhalten ist entscheidend, wenn die Erneuerbaren nicht (ausreichend) liefern können oder der Scale-up begrenzt ist. Das zuverlässig steuerbare Back-up-System (z. B. Fossil mit Carbon Capture oder Nuklearenergie) muss dann ggfs. auf Basis gespeicherter Energie kurzfristig einspringen.

Diese systeminhärente Dynamik erfordert entweder die Zulassung von hohen Preisspitzen, damit die Kosten der Auslastungsschwankungen aufgefangen werden können, oder die Einrichtung von Kapazitätsmärkten, in denen die Vorhaltung von Kapazität vergütet wird.

5) Wasserstoff ist teuer

Wasserstoff – als Gas für Kraftwerke zur Beherrschung von Volatilität – ist in zahlreichen Dimensionen deutlich teurer und schwieriger zu handhaben als Erdgas (inklusive Carbon Capture).⁵⁸ Zudem endet die Rückverstromung von Elektrolyse-Wasserstoff bei einem Wirkungsgrad von ca. 25 %. Das wird in Kapitel 5.3.4 beschrieben.

Man würde ihn also nur dann für diesen Zweck nutzen, falls es (1) entweder nicht genügend Erdgas gibt oder (2) Carbon Capture nicht funktioniert oder (3) prohibitiv teuer wäre. Dabei sind 100 US-Dollar pro Tonne CO₂ für Abfangen, Transport und Speicherung akzeptabel.

Kostenrelevante Felder für Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas:

- 1) Bereitstellung
- 2) Sicheres Handling
- 3) Transport
- 4) Speicherung
- 5) Speicherkapazität
- 6) Verbrennungsverhalten

5.2 Die Elemente der Referenzlösung im Überblick

Wenn in Zukunft die globale Nachfrage nach Energie noch einmal deutlich steigt und wenn zugleich eine „Electricity-Only“-Welt nicht möglich ist, welche technischen Wege bleiben dann noch, um ein klimaneutrales Energiesystem für die Welt zu entwickeln? GES hat bei der Entwicklung seines Referenzmodells fünf Elemente benannt, deren Zusammenspiel wir in diesem Kapitel skizzieren. Diese Grundbausteine werden ihre Wirkung jedoch ohne einen politischen Rahmen nicht entfalten können. Das zeigt die folgende Abbildung: Nur unter der Bedingung ausreichender Governance-Strukturen und der entsprechenden Finanzierung kommen die anderen Zahnräder „ans Laufen“. Bevor wir uns Governance und Finanzierung zuwenden (s. Kapitel 6), geht es im Folgenden erst einmal um die technischen und natürlichen Elemente der Lösung.

⁵⁸ Vgl. Hydrogen Council/McKinsey & Company (2021).

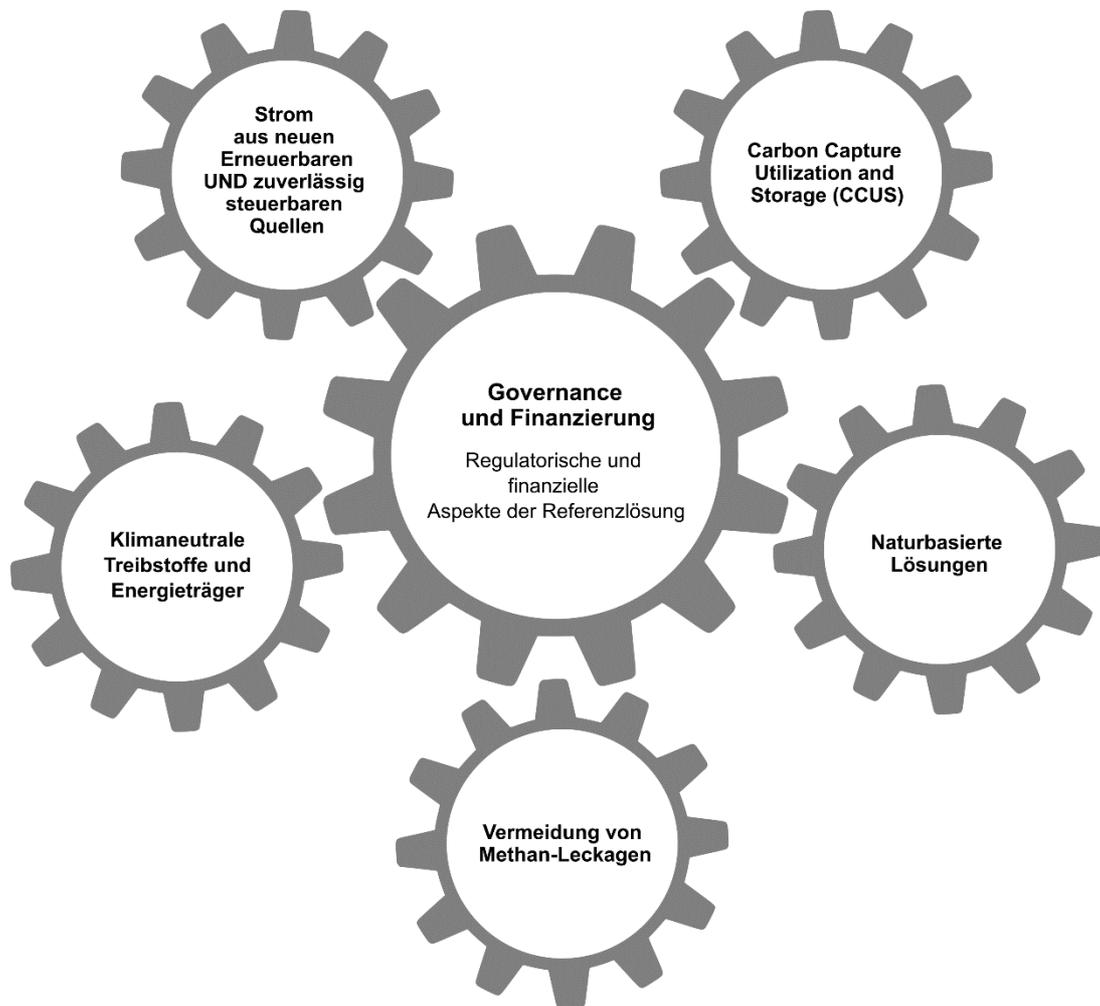


Abbildung 5: Die Elemente der Referenzlösung

Quelle: Eigene Darstellung

1. Strom aus neuen Erneuerbaren kombiniert mit zuverlässig steuerbarer Erzeugung

Die erneuerbaren Energien sind weltweit auszubauen. Das gilt auch für Lösungen für viele Nutzungsbereiche, z. B. Wärme, Industrieproduktionen, Mobilität etc. Der GES-Vorschlag befindet sich in diesem Bereich im Rahmen der heutigen politischen Diskussion, wobei der Vorschlag aber **nicht auf einen Vollausbau setzt**. Das scheitert schon an der Unmöglichkeit, den weltweiten Primärenergiebedarf allein über neue Erneuerbare bereitzustellen (dafür müssten die neuen Erneuerbaren ggü. den Prognosen mindestens um den Faktor 6 höher ausgebaut werden, als die anspruchsvollsten Ausbauziele bis 2050 angeben). Unter der hypothetischen Annahme, dass die Primärenergie alleine aus neuen Erneuerbaren erzeugt werden könnte, würde die entsprechend verfügbare Primärenergie im genannten Zeitraum auf ungefähr 25 % sinken. Dies erscheint nicht als eine tragfähige Lösung, die massive Verarmung vermeidet. Perspektivisch sollen die entsprechenden Installationen immer

dann, wenn Sonne und Wind genügend abgreifbare Energie liefern, mit anderen, klassischen Erneuerbaren allein – bzw. zu einem hohen Anteil – den gesamten Strombedarf abdecken können.

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine Gesellschaft ihre Stromversorgung auch in Zeiten, zu denen kein Wind weht oder nicht genügend Solarenergie zur Verfügung steht, sichern muss. Diese Zeiträume umfassen leicht mehrere Tage, gelegentlich auch mehrere Wochen.⁵⁹

2020 wurde der überwiegende Teil des global genutzten Stroms – gemäß IEA ca. 80 % – auf Basis fossiler Energieträger erzeugt.^{60,61} Die GES-Referenzlösung steht vor diesem Hintergrund auf „zwei Säulen“. Neben den **volatilen Erneuerbaren**, die keine oder kaum CO₂-Emissionen erzeugen, umfasst die zweite Säule Energieträger, die jederzeit den gesamten Energiebedarf auch alleine abdecken können. Klassische fossile Energieträger mit Carbon Capture, Nuklearenergie, Wasserkraft, Geothermie, Biomasse sind wesentliche Bausteine für die zweite Komponente. Diese muss kurzfristig auf jedes Niveau zwischen 0 - 100 % des Strombedarfs herauf- und heruntergeregelt werden können.

Daher die Bezeichnung **zuverlässig steuerbar**. Der LDES-Council, eine gemeinnützige Organisation mit 60 Mitgliedsfirmen aus 19 Ländern, zeigt in einem einführenden Bericht auf, dass die Speicherkosten bei einem Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung von über 50 % überproportional ansteigen.⁶² Vor diesem Hintergrund erscheint es als wirtschaftliches Optimum, auch perspektivisch mit zwei Energiequellen zu planen: den neuen erneuerbaren mit einem signifikant gestiegenen Anteil und zuverlässig steuerbaren in dem Umfang, wie es eine Gesellschaft für die kontinuierliche Sicherung ihrer Stromversorgung für erforderlich hält und zu akzeptierten Kosten.

Siehe Kapitel 2.1 der Basisdokumentation zu allen Aspekten der Erzeugung von Strom aus regenerativen Quellen.

2. Carbon Capture

Carbon Capture bei fossilen Energieträgern, bei Stahl und Zement und in der Chemie ist in den nächsten Jahrzehnten aus Sicht von GES wohl der **wichtigste Joker**, um die weltweite Energie- und Klimaprobleme mit einer Freiheits- und Wohlstandsperspektive zu bewältigen, viel wichtiger als z. B. grüner Wasserstoff.^{63,64}

⁵⁹ Eigene Modellierungen GES (2023).

⁶⁰ Vgl. IEA (2020a).

⁶¹ Vgl. Science Media Center (2021).

⁶² Vgl. LDES Council, McKinsey & Company (2021).

⁶³ Vgl. McKinsey (2020).

⁶⁴ Vgl. Skea (2022).

CO₂ wird abgefangen, genutzt bzw. alternativ in alte Öl- und Gasfelder oder zahlreiche Kavernen, teilweise unter dem Meer, verpresst oder durch die Einbringung in Silikat-Gesteine durch Mineralisierung dauerhaft gebunden.^{65,66} Damit wird gleichzeitig eine **CO₂-Kreislaufwirtschaft** etabliert bzw. befördert, für die heute schon Staaten wie die USA und Norwegen mit größeren Programmen stehen.

Das Kapitel 2.8 der Basisdokumentation behandelt alle Aspekte des technischen Abfangens und der Speicherung von CO₂, Kapitel 2.9 die Verwendungsoptionen von CO₂ im Sinne von Usage.

3. Klimaneutrale Treibstoffe und Energieträger

Kraftstoffe haben eine zentrale Bedeutung für die Sicherung der **Mobilität**. Diese wiederum ist, gerade auch als **Individualmobilität**, ein Rückgrat für **Freiheit und Wohlstand**.

HVO, Methanol, Methanolbenzin, Methanoldiesel, synthetisches Methan und ggfs. auch Ammoniak gehören zu den synthetischen Kraftstoffen. Basis sind Wasserstoff und CO₂, alternativ Biomasse, z. B. aus Kurzumtriebsplantagen oder Abfällen der Land- und Forstwirtschaft für sog. Biotreibstoffprozesse der 2. Generation,⁶⁷ d. h. nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelkette stehend.

Kapitel 2.6 der Basisdokumentation behandelt die Herstellung und Nutzung von Wasserstoffderivaten und Kapitel 2.7 die Herstellung von klimaneutralen Treibstoffen.

4. Beseitigung technischer Methan-Leckagen

Methanemissionen entstehen sowohl aus natürlichen, als auch – und zwar in größerem Umfang – aus anthropogenen Quellen.

Eine Kontrolle und Absenkung der anthropogenen Methan-Emissionen hat eine hohe Hebelwirkung im Hinblick auf eine Beschränkung der Erderwärmung.

Das im Pariser Klimavertrag vereinbarte Ziel, die Erderwärmung infolge des Klimawandels auf 1,5°C gegenüber vorindustriellen Zeiten zu begrenzen, ist nur erreichbar, wenn der derzeitige jährliche Ausstoß von Methan bis 2030 um mindestens 45 % verringert wird.⁴ Über 100 Länder haben auf der COP26 den Global Methane Pledge unterzeichnet und verpflichten sich, ihre Methan-Emissionen innerhalb von zehn Jahren wenigstens um 30 % gegenüber dem Stand von 2020 zu reduzieren.

⁶⁵ Vgl. Mahnke (2015).

⁶⁶ Vgl. Massey (2021).

⁶⁷ Vgl. Nagler & Gerace (2020).

Die Initiatoren des Global Methane Pledge sprechen von einem möglichen Rückgang der Erderwärmung um mindestens 0,2 - 0,3°C bis 2050, wenn das Abkommen in Bezug auf Methan global eingehalten wird.²

Kapitel 2.12.1 bis 2.12.3 der Basisdokumentation behandeln Status quo und Optionen zur Verminderung der Methan-Emissionen sowie die Kontrolle von LNG-Vorkettenemissionen und von Restgasfackeln.

5. Natur-basierte Lösungen

In der Summe der Wirkungen liegt bei Natur-basierten Lösungen ein weiterer Hebel zur Lösung der Probleme im Klimabereich. Dieser Aspekt wird in der politischen Debatte bis heute meist übersehen. Zu den Natur-basierten Lösungen, die in Kapitel 5.6 diskutiert werden, gehören ein **konsequenter Regenwaldschutz**⁶⁸ in der südlichen Hemisphäre, Aufforstung auf 1 Milliarde Hektar degradierter Böden in den Tropen (Hochlauf über 25 Jahre), Restauration von Mangrovenwäldern, Humusbildung als Teil von Bodenverbesserungsprogrammen auf ebenfalls 1 Milliarde Hektar ausgelaugter landwirtschaftlich genutzter Böden, inklusive Einsatz von Biokohle (Hochlauf über 25 – 40 Jahre).⁶⁹ Hier sind neue Wege erforderlich, die in diesem Text dargestellt werden.

Kapitel 2.10 der Basisdokumentation behandelt die Natur-basierten Lösungen, Kapitel 2.11 die Ozeane als Senke für anthropogenes CO₂.

5.3 Strom aus neuen Erneuerbaren und zuverlässig steuerbaren Quellen

Ein wichtiger Baustein eines leistungsfähigen Energiesystems ist die Stromseite und damit die Dimension von **Elektronen**. Die Stromversorgung sollte auf zwei Säulen ruhen – der Säule der neuen Erneuerbaren einerseits und der Säule der zuverlässig steuerbaren Quellen andererseits. Dies wird in diesem Unterkapitel begründet.

5.3.1 Potenziale und Grenzen der neuen Erneuerbaren

Die neuen Erneuerbaren haben in die Welt der Energieversorgung wichtige neue Elemente eingebracht, vor allem die Fotovoltaik mit enormem Mengenpotenzial. Tatsächlich kann man schon mit

⁶⁸ Vgl. Mills et al. (2023).

⁶⁹ Vgl. Griscom et al. (2017).

einer Nutzung eines Teils der Sahara die ganze Welt mit Energie versorgen.⁷⁰ Das war schon die Idee von „**Desertec**“.⁷¹ Die Schwierigkeiten liegen aber beim Abtransport des so erzeugten Stroms und bei der Volatilität, also der Frage, zu welchen Zeiten der Strom verfügbar ist. Es könnte trotzdem von Vorteil sein, diesen Strom in Afrika z. B. über den ganzen Kontinent zu verteilen. Eine andere Idee ist es, diesen z. B. nach Europa zu exportieren. Im Moment ist z. B. ein Projekt in Vorbereitung, Strom aus Marokko mit einer Leitung nach England zu bringen. Hier bieten sich **Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ)** an, da sie nur geringe Transportverluste verursachen.

Alternativ zu der Verteilung des erneuerbaren Stroms können **Local Grids** aus Fotovoltaik-Panels für Menschen, die bisher ohne Zugang zu Elektrizität sind, ein großer Fortschritt sein, auch um das Ziel zu erreichen, dass alle Menschen Zugang zu Strom haben – SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“. **Zugang zu Strom als Menschenrecht**: Für dieses Ziel ist ein Local Grid viel mehr als nichts. **Muhammad Yunus**, der Friedensnobelpreisträger, verfolgt dieses Thema in Bangladesch schon seit Jahrzehnten sehr erfolgreich, finanziert über **Microkredite**. Die Bundesregierung engagiert sich in diesem Bereich im Rahmen ihrer Entwicklungspolitik. Aber all das ist natürlich keine Basis für eine weitergehende Industrialisierung, bei der man über 24 Stunden garantiert Strom zu Verfügung haben will/ muss.

Neben Fotovoltaik tritt der Wind – und zwar onshore wie offshore. Die Installationen dieser Windanlagen gehen mit einem hohen Ressourcenverbrauch an z. B. Stahl und Beton einher. In unseren Breiten liefern Windparks (Kapazitätsfaktor 25 - 30 %, an manchen Standorten bis 40 %) allerdings Strom um einen Faktor 2 größer als Fotovoltaik (Kapazitätsfaktor ca. 16 %).⁷² Zudem ergibt Windnutzung zumindest teilweise die Möglichkeit, die Energieschwankungen der Fotovoltaik auszugleichen.

Die Herausforderung der neuen Erneuerbaren ist die **Volatilität**. Die Energie ist da, wenn die Sonne scheint, wenn sie nicht scheint, ist keine Energie vorhanden. Die Situation beim Wind ist entsprechend.

Es ist übrigens auch nicht so, dass diese Energie umsonst zu haben ist, da die Sonne angeblich „keine Rechnungen schickt“. Das Problem sind z. B. das „Einsammeln“ der „Sonnenstrahlung“ sowie die zuverlässige und bedarfsorientierte Bereitstellung des Stroms im Anschluss, was mühsam und aufwändig und natürlich mit Kosten verbunden ist.^{73, 74}

⁷⁰ Vgl. Radermacher, Dollinger (2021).

⁷¹ Vgl. TREC (2008).

⁷² Vgl. Our World in Data (2022).

⁷³ Vgl. Global Solar Atlas (2018).

⁷⁴ Vgl. Wind Energy: The Facts (2022).

Der Ausbau der neuen Erneuerbaren ist mit weiteren Herausforderungen verbunden, da die Regelbarkeit im Stromnetz aufgrund der Volatilität erhöht werden muss. Somit entstehen **wirtschaftliche Zusatzbelastungen**, die in einem konventionellen System nicht vorhanden sind.

Die zuverlässig steuerbaren Kraftwerke werden bei diesen meist nicht mehr im Grundlastbetrieb betrieben, sondern als flexible Unterstützer. Das belastet deren Wirtschaftlichkeit, da die Auslastung zurück geht und entsprechend kein Anreiz für Investitionen besteht. Aufgrund der Schwankungen der erneuerbaren Energien entsteht zudem die Notwendigkeit zur Schaffung von zusätzlichen Speicherkapazitäten, bspw. durch Aufstellen von Batterieparks aus Lithium-Ionen-Batterien. Diese können sowohl im begrenzten Umfang Variationen in der Last ausgleichen als auch zusätzliche Netzstabilisierungsaufgaben (Bereitstellung Blindstrom und Sicherstellung Frequenzstabilität) übernehmen, die in historisch gewachsenen Stromnetzen durch die Schwungräder konventioneller Kraftwerke übernommen werden. Zur Erhöhung der Flexibilität ist zukünftig vermehrt auch die Nutzung des Speicherpotenzials von Autobatterien denkbar, allerdings verbunden mit erheblichem Regelungsaufwand. Die Funktion der Stabilisierung des Stromnetzes können die neuen Erneuerbaren nicht übernehmen und es entstehen zusätzliche Aufwendungen.

Um längere Dunkelflauten zu überwinden, sind alternativ als zuverlässig steuerbare Stromspeicher auch Power-to-X-Anlagen in der Planung, bei denen Spitzenstrom in Wasserstoff umgewandelt, gespeichert und rückverstromt werden soll. Dieses Konzept ist mit hohen Verlusten verbunden, da von dem aus Erneuerbaren gewonnenen Strom nur 25 - 30 % wieder zur Verfügung stehen, wenn dieser gebraucht wird.⁷⁵ Zudem muss der Wasserstoff transportiert, gespeichert und in einem zuverlässig steuerbaren Kraftwerk wieder rückverstromt werden. Es ist offensichtlich, dass dieser Weg zu zuverlässig steuerbarem Strom mit gravierenden Kosten verbunden ist, da die erforderlichen Elektrolyseure teuer sind und zur Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit eine hohe gleichmäßige Auslastung erfordern. Da nützt es auch wenig, dass der Spitzenstrom praktisch kostenfrei zur Verfügung stehen kann, weil Bereitstellung und Nutzung extrem aufwändig sind.

Zudem erhöhen sich beim Ausbau der neuen Erneuerbaren die Anforderungen an den Ausbau der Stromnetze in Abhängigkeit davon, wie nah die zusätzlichen Kapazitäten an den Verbrauchszentren errichtet werden können. Der vielfach erforderliche Ausbau der Übertragungsnetze ist sowohl zeit- als auch investitionsintensiv. Auch wird sogenanntes **Demand Side Management** im Sinne von Zu- und Abschaltung von Verbrauchern in Abhängigkeit vom Erzeugungsprofil der neuen Erneuerbaren erforderlich: Industrielle Prozesse müssen ggfs. heruntergefahren, Netzersatzanlagen hinzugeschaltet werden. Es versteht sich, dass alle diese Anforderungen an ein Stromsystem umso wichtiger werden, je größer der Anteil der neuen Erneuerbaren im System ist. Es kommt zu Abwägungsentscheidungen, zu welchen Kosten die klassischen zuverlässig steuerbaren Energieträger fossil

⁷⁵ Vgl. Prognos (2020).

mit Carbon Capture verfügbar gemacht werden können, relativ zu dem Aufwand für ein System aus neuen Erneuerbaren. Dabei spielt auch der Marktmechanismus, das sog. Strommarkt-Design, eine wichtige Rolle.

Ein hoher Anteil volatiler Erzeuger erfordert auch ein wesentlich flexibleres Preissystem, da Nachfrage und Angebotsspitzen weiter auseinanderfallen als in einem System mit flexibler Nachfrage und relativ konstanterem Angebot, wie es die zuverlässig steuerbaren Energieträger bieten. Daher wächst der Druck, zwischen zwei Extremen zu entscheiden: Entweder müssen hohe Preisspitzen akzeptiert werden oder es müssen Kapazitätsmärkte geschaffen werden, die die Mindestwirtschaftlichkeit von zuverlässig steuerbarer Energie zulassen.

In Summe steigt die **Komplexität der Regelung des Stromnetzes** mit der Erhöhung des Anteils neuer Erneuerbarer und damit steigender Volatilität deutlich an.⁷⁶ Diese höhere Regelungsintensität stellt auch eine besondere Herausforderung für die Strommarktgestaltung in den Ländern der Challenge-Gruppe dar.

Das Kapitel der Basisdokumentation 2.1 behandelt die regenerative Erzeugung von Strom, 2.14.3 die Bestandsaufnahme und Perspektiven der Strominfrastruktur.

5.3.2 Potenzial und Grenzen von Stromspeichern

Die Stromspeicherung rückt mit einer Erhöhung der Anteile neuer Erneuerbare verstärkt in den Fokus der Diskussionen um die Energiewende. Der zunehmenden volatilen Erzeugung von Strom in Wind- und Solaranlagen müssen in wachsendem Umfang Stromspeicher zur Seite gestellt oder Flexibilisierungen der Nachfrage geschaffen werden. Die Bedeutung der Speicherung von Strom ist also groß, sie wird aber hinsichtlich ihrer Möglichkeiten in der öffentlichen Diskussion häufig überschätzt.

Alternative Lösungssysteme zur Speicherung von Strom gibt es nur wenige: in Frage kommen Batteriesysteme, die nachfolgend näher betrachtet werden, klassische Pumpspeicherkraftwerke auf Basis von Wasser sowie Druckluftspeicher ggfs. auch Schwerekraftspeicher. Als einzige Lösung zur Speicherung großer Strommengen für lange Zeit stehen chemische Speicher auf Basis von Wasserstoff, erzeugt durch Wasser-Elektrolyse (Power-to-X), zur Verfügung.

Mit Batterien können, gemessen am Bedarf eines Landes, relativ geringe Energiemengen für Stunden-Zeiträume gespeichert werden.⁷⁷ Wasser- oder Druckluftspeicher speichern größere Energiemengen für Tage, chemische Speicher große Energiemengen beliebig lange.

⁷⁶ Vgl. IEA (2021c).

⁷⁷ Vgl. Lazard (2021).

Wasser- und Druckluftspeicher bieten die günstigsten Speicherkosten bei Wirkungsgraden in der Größenordnung von 70 - 80 %. Batteriespeicher sind vergleichsweise teurer bei Wirkungsgraden von 60 - 70 %, können aber einen Beitrag zur Frequenzstabilisierung des Netzes und zur Bereitstellung von Blindstrom leisten.⁷⁸ Chemische Speicher wie Wasserstoff haben den mit Abstand niedrigsten Wirkungsgrad, nur 30 - 40 %.⁷⁹ Sie sind aber die einzige Lösung, den Bedarf an Energie bei Dunkelflauten, die mehrere Tage oder Wochen dauern können, zu decken.

Eine einfache Rechnung zeigt das **begrenzte Potenzial** von heutigen Batterie-Stromspeichern:

Das deutsche Stromnetz muss heute eine durchschnittliche Leistung von ca. 65 Gigawatt (GW) bereitstellen. Diese Leistung für einen Tag ergibt eine Strommenge von $65 \text{ GW} \times 24 \text{ h} = 1.560$ Gigawattstunden (GWh). Deutschland verbraucht also an einem Tag durchschnittlich 1.560 GWh Strom.

Der bisher größte gebaute Batterie-Stromspeicher ist die Vistra-Moss-Landing-Battery in Kalifornien mit einer Speicherkapazität von 1,6 GWh – also ca. ein Tausendstel der notwendigen Energie, um Deutschland in einer Dunkelflaute einen Tag lang mit Strom zu versorgen.⁸⁰

Um **Dunkelflauten** oder gar die **saisonalen Schwankungen** der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen mit Batteriespeichern auszugleichen, wäre eine Speicherkapazität erforderlich, die weit oberhalb dessen liegt, was mit Batterie-Speichern wirtschaftlich realisierbar ist.

In dieser Betrachtung ist die heutige durchschnittliche Stromnetz-Leistung von 65 GW zu Grunde gelegt. Mit der Elektrifizierung vieler neuer Bereiche wie Verkehr und Transport, Heizen mit Wärmepumpen, Digitalisierung und die Elektrifizierung von ganzen Industrie-Bereichen wird die erforderliche Stromleistung in Deutschland noch beträchtlich zunehmen und somit der Bedarf zur Speicherung von Energie zum Ausgleich von Schwankungen.

Sinn und Zweck der existierenden und zukünftigen Batteriestromspeicher ist nicht die Überbrückung von Dunkelflauten und saisonalen Schwankungen in der Energieproduktion, sondern die kurzfristige Stabilisierung des Stromnetzes.⁸¹

Die Stromspeicher müssen dabei zunächst die Aufgabe der **Frequenzstabilisierung** übernehmen. Unser Netz wird mit einer Frequenz von 50 Hertz betrieben – vor allem durch die rotierenden Massen der Generatoren, sie drehen sich 3.000-mal in der Minute. Zu hohe wie auch zu niedrige Frequenzen im Stromnetz führen dazu, dass die angeschlossenen Geräte, etwa Elektromotoren oder Computer, nicht richtig funktionieren. Kommt nun mehr und mehr Strom aus erneuerbaren Quellen, verlieren die Generatoren ihre stabilisierende Funktion – dafür braucht es eine Alternative.

⁷⁸ Lazard (2021).

⁷⁹ Vgl. Prognos (2020).

⁸⁰ Vgl. Vistra (2022).

⁸¹ Vgl. Lazard (2021).

Batteriespeicher sind deshalb erforderlich und auch geeignet für die Stabilisierung der Stromnetze mit hohem Wind- und Solaranteil, weil sie einerseits sehr schnell reagieren können und andererseits die für kurzfristige Spitzen erforderlichen Speichergrößen realisierbar sind.

Für Regionen, die eine deutlich höhere Sonneneinstrahlung haben als Deutschland, gibt es noch eine weitere Option zum Einsatz für Batteriespeicher außer der Stromnetzstabilisierung. Man versucht in Regionen wie Nordafrika oder Kalifornien, die Stromlieferung für die Nacht sicher zu stellen, wenn die PV keinen Strom liefert.

Kombinierte Systeme aus Solaranlagen und Batterien mit einer vier- bis achtstündigen Kurzzeitspeicherung werden heute schon geplant.

Der bei weitem größte geplante Batteriespeicher der Welt soll in Marokko Ende dieses Jahrzehnts entstehen. Es ist das Morocco-UK-Power-Projekt mit einer 10,5 GW Wind- und PV-Anlage kombiniert mit einer Batteriespeicherkapazität von 20 GWh für eine vierstündigen Kurzzeitspeicherung. Damit will man sicherstellen, dass für mindestens 20 Stunden am Tag Strom geliefert werden kann.

Allein für diesen Batterie-Kurzzeitspeicher muss man Investitionskosten von mindestens 10 Milliarden Euro ansetzen, wobei in diesen Kosten eine weitere Kostendegression der Batteriespeicher von 50 % gegenüber Kupferzell-Batteriespeichern zu Grunde gelegt wurde, obwohl es sehr fraglich ist, ob es überhaupt in den nächsten Jahren zu einer weiteren Kostendegression kommt. Die **Rohstoffpreise für die Batterietechnologie** steigen wegen fehlender Minen zurzeit deutlich.

Völlig offen ist auch, ob Batterien für Kurzzeitspeicherung als Lösung in Zukunft infrage kommen. Batteriespeicher wie der Morocco-UK-Power-Speicher mit mindestens 10 Milliarden Euro Investitionssumme sind jenseits wirtschaftlicher Vorstellungen.

Batteriespeicher sind für große Energiemengen und erst recht für Langzeitspeicherung nicht geeignet, weil der Aufwand für die Skalierbarkeit der Batteriespeicher extrem hoch ist. Das liegt daran, dass das Speicher-Reservoir für den Strom bzw. für die Elektronen die Batteriezelle selbst ist, ein komplexes und materialintensives Bauelement, das relativ teuer und hinsichtlich der Lebensdauer begrenzt ist. Eine Skalierung der Speicher-Reservoirs bedeutet eine Skalierung der teuren und materialintensiven Batteriezellen.

Alternative Speicher haben in der Regel wesentlich leichter skalierbare Speicher-Reservoirs, wie beim Pumpspeicherwerk die großen Ober- und Unter-Wasserbecken, beim thermischen Speicher große Salztanks, beim Schwerekraftspeicher große Betonklötze oder wie beim Wasserstoffspeicher bzw. Gasspeicher große Gastanks bzw. unterirdische Kavernen.⁸²

⁸² Vgl. Mongird (2020).

Batteriespeicher sind geeignet und auch notwendig für die Stabilisierung der Stromnetze mit hohem Wind- und Solaranteil. Für Kurzzeitspeicher (Speicherkapazität von vier bis acht Stunden) sind Batteriespeicher wegen der hohen Skalierungskosten ungeeignet bzw. unwirtschaftlich. Günstigere alternative Speicher müssen hierfür noch entwickelt bzw. industrialisiert werden. Für die Langzeitspeicherung (Speicherkapazität größer als acht Stunden) bieten Batterien aus heutiger Sicht keine Lösung.

Somit bleiben für die Langzeitspeicherung zur Überbrückung von Dunkelflauten und saisonalen Schwankungen im Stromnetz mit hohem Wind- und Solaranteil nur der verlustreiche Weg über die Speicherung mittels Wasserstoff oder die Lösung mit Ersatzkraftwerken, die bereitgehalten werden, um einspringen zu können. Durch diese Doppelstruktur entstehen aber doppelte Fixkosten, einerseits für Wind- und Solaranlagen, andererseits für die Ersatzkraftwerke.

Als Ersatzkraftwerke kommen entweder konventionelle CO₂-freie Kraftwerke (Wasserkraft, Biomasse-Energie) infrage oder Gaskraftwerke, die mit klimaneutralen Brennstoffen wie Wasserstoff oder Erdgas in Verbindung mit CCS betrieben werden können sowie, je nach Entscheidung eines Landes, auch Nuklearenergie.

Das alles zusammen macht ein Stromnetz mit einem hohen Anteil von Wind- und Solarstrom sehr teuer und verschlechtert die günstigen Stromgestehungskosten bei Wind- und Solaranlagen deutlich.

Kapitel 2.3 der Basisdokumentation behandelt alle Aspekte der Speicherung von Strom.

5.3.3 Die Grenzen von grünem Wasserstoff und die Alternativen

Ein universeller Baustein jeder Prognose zur zukünftigen Energieversorgung ist **Wasserstoff**, der emissionsfrei verbrannt werden kann. Wasserstoff (H₂) ist das leichteste Element im Periodensystem. Es hat einen hohen Brennwert. Pro Kilogramm liefert Wasserstoff beispielsweise mehr als doppelt so viel Energie wie Methan (gravimetrische Energiedichte). Weil er aber so leicht ist, ist die Energieausbeute bei normalem Druck pro Kubikmeter sehr gering (volumetrische Energiedichte).

Bisher wird Wasserstoff weit überwiegend aus Erdgas gewonnen. Durch Hitze wird dieses in Wasserstoff und CO₂ zerlegt (**Dampfreformierung**). Dabei entweicht viel CO₂ in die Atmosphäre, rund 10 Tonnen pro Tonne produziertem Wasserstoff. Nach der gängigen „Farbenlehre“ handelt es sich dabei um grauen Wasserstoff. Wobei natürlich dieser Wasserstoff physikalisch nicht von anderem Wasserstoff unterschieden werden kann – so wenig wie grüner Strom von anderem Strom. Unterschiede bestehen also (nur) im Entstehungsprozess, nicht im „Wasserstoff“ selbst.

Grüner Wasserstoff wird durch **Wasser-Elektrolyse** produziert. Es handelt sich vereinfacht gesagt um ein Verfahren, bei dem elektrische in chemische Energie umgewandelt wird. Dabei soll

ausschließlich Strom aus regenerativen Quellen – und je nach Sicht auf das Thema auch Strom aus Nuklearenergie – zum Einsatz kommen. Damit ist grüner Wasserstoff fast CO₂-frei. Eine kostengünstige und etablierte Technologie ist die Alkali-Elektrolyse. Ihr Wirkungsgrad ist aber gegenüber anderen Verfahren (PEM- und Hochtemperatur-Elektrolyse) geringer.

Welche Rolle kann nun der sog. grüne Wasserstoff auf Basis von Wasser-Elektrolyse perspektivisch bis 2050 spielen? Dies ist eine Schlüsselfrage für eine weltweite Lösung der Klima- und Energieprobleme. Denn eine offensichtliche Grenze an dieser Stelle verunmöglicht einen Weg zu Net Zero allein auf Basis erneuerbarer Energien und daraus abgeleitetem Elektrolyse-Wasserstoff. Wir fragen dazu: Welche Entwicklung von grünem Wasserstoff erscheint möglich und welche Rolle kann grüner Wasserstoff als Sekundärenergieträger zukünftig spielen?

Diese Frage ist von entscheidender Bedeutung, da die Fähigkeit, große Mengen an Energie zu speichern, ausschlaggebend dafür ist, ob leistungsstarke, stabile und CO₂-freie Stromsysteme in den kommenden Jahrzehnten ohne fossile Brennstoffe (und CO₂-Abscheidung) oder Nuklearenergie möglich sind.

In der Ausgangssituation im Jahr 2023 werden weltweit Wasser-Elektrolysen mit einer Kapazität von deutlich weniger als 1 GW Leistung betrieben und nur deutlich weniger als 1 Promille des weltweit erzeugten Wasserstoffs mit dieser Technologie erzeugt.^{83, 84} Im Februar 2023 wurde von Sinopec die Inbetriebnahme der derzeit weltgrößten Einzelanlage mit einer Elektrolyse-Kapazität von ca. 250 Megawatt (MW) publiziert, für die die Installation von 270 MW Solar-PV und 450 MW Windkapazität mit einer Investition von 828 Millionen US-Dollar erfolgte. Die Anlage soll jährlich 30.000 Tonnen grünen Wasserstoff herstellen.

Derzeit beträgt die weltweit vorhandene Produktionskapazität zur Herstellung von neuen Elektrolyseanlagen in der Größenordnung von 5 - 8 GW Elektrolyseleistung pro Jahr.⁸⁵ Verschiedene Staaten haben Ziele für den Aufbau von Wasserstoff-Elektrolyseleistung angekündigt: die EU erwartet 20 GW installierte Leistung bis 2030, davon 10 GW in Deutschland. Großbritannien hat ebenfalls das Ziel einer Installation von 10 GW Leistung bis 2030 angekündigt.

Stand November 2021 ist der größte Anteil globaler Elektrolyse-Projekte im Megawatt-Bereich in Europa angekündigt (261 Projekte), gefolgt von Asien und insbesondere China (121 Projekte, die Hälfte davon in China), Nordamerika (67 Projekte), Ozeanien (43 Projekte), Lateinamerika (10 Projekte) und Nahost und Afrika (20 Projekte) – alles zusammen ergibt einen Ausbaukorridor in der Größenordnung von **93 GW installierter Elektrolysekapazität bis 2030**.⁸⁶ Der **Inflation Reduction**

⁸³ Vgl. Aurora Energy Research (2021).

⁸⁴ Vgl. IEA (2021d).

⁸⁵ Vgl. Hydrogen Council/McKinsey & Company (2021).

⁸⁶ Vgl. Hydrogen Council/McKinsey & Company (2021).

Act der USA, mit seinen vielfältigen, unkomplizierten Fördermöglichkeiten (z. B. auch für **blauen Wasserstoff**) wird die Dynamik in dieser Thematik voraussichtlich nach Nordamerika verlagern.

Die IEA prognostiziert, dass von diesen Ankündigungen Projekte mit einer Leistung von insgesamt 65 GW bis 2030 tatsächlich installiert sein werden.⁸⁷ Bei einem theoretischen Auslastungsfaktor von 70 % ergäbe sich mit dieser Leistung eine Produktion von ca. 8 Millionen Tonnen Wasserstoff pro Jahr, also ca. 10 % des heutigen Bedarfs an Wasserstoff, der nicht dazu verwendet wird, die Volatilität eines auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromsystems auszugleichen.

In globaler Perspektive hat das Fraunhofer Institut die Potenziale für die Erzeugung von Elektrolyse-Wasserstoff untersucht. Im PTX-Atlas errechnet das Institut außerhalb Europas eine **mögliche Erzeugungsmenge** von **109 PWh**.⁸⁸ Bedenkt man Fragen der Investitionssicherheit und der Infrastruktur, verringert sich das Gesteuerungspotenzial auf etwa 69 PWh Wasserstoff. Zum Vergleich: Zurzeit entspricht die globale Rohöl- und Erdgasförderung etwa 100 PWh. Diese Zahlen lassen daran zweifeln, dass Wasserstoff die fossilen Energieträger jemals vollständig ersetzen können wird. Zumal die globale Nachfrage nach Energie, wie auch in dieser Studie gezeigt, weiter steigt. Noch viel gravierender ist aber Folgendes: Wir sehen – wie auch andere Beobachter – bis 2050 maximal ein Ausbau-Potenzial für Elektrolyseure von 4.000 GW.⁸⁹ Damit ist das Potenzial von Elektrolyse-Wasserstoff bis 2050 auf etwa 24,5 PWh beschränkt, wenn eine Auslastung der Elektrolyseure von 75 % unterstellt wird. Wobei anzunehmen ist, dass eine so hohe Auslastung wahrscheinlich nicht erreichbar sein wird.

Welche Herausforderungen müssen nun zur Erhöhung des Beitrags aus grünem Wasserstoff und zum Erreichen dieser Prognosen überwunden werden?

Die industriellen Fertigungstechnologien müssen teilweise noch entwickelt und die bisher sehr begrenzten Fertigungskapazitäten signifikant erhöht werden. Dann muss bei einem konkreten Projekt erneuerbarer Strom günstig zur Verfügung gestellt und ein möglichst ununterbrochener Betrieb der Elektrolyse zur Senkung der Kosten pro Tonne Wasserstoff ermöglicht werden. Dabei werden von der Politik, insbesondere in Europa, **Additionalität** und **Gleichzeitigkeit** gefordert. Das bedeutet, dass eine Anlage zur Erzeugung von erneuerbarem Strom zusätzlich – gewissermaßen exklusiv – für das Betreiben der Elektrolyseanlage gebaut werden muss und der dort erzeugte Strom auch innerhalb eines festgelegten Zeitfensters (zunächst ein Monat, später eine Stunde) genutzt werden muss. Damit will man eine „Kannibalisierung“ der begrenzten Kapazitäten zur Erzeugung erneuerbaren Stroms vermeiden. Das erschwert aber signifikant die Realisierung von Projekten zur Erzeugung grünen Wasserstoffs, da der Gesamt-Investitionsaufwand durch diese Bedingungen signifikant

⁸⁷ Vgl. IEA (2021e).

⁸⁸ Vgl. Fraunhofer (2023).

⁸⁹ Hydrogen Council/McKinsey & Company (2021).

vergrößert wird und auch kein allgemeiner Netzstrom zur Absicherung der Auslastung der Elektrolyse verwendet werden kann.

Man kann die **Herausforderung für das Upscaling** zudem wie folgt charakterisieren: Der Preis zur Erzeugung von grauem Wasserstoff liegt in der Größenordnung von 1,5 Euro pro Kilogramm, bei Anwendung des von GES konsequent geforderten Carbon Capture erhöht sich dieser im Falle der Nachrüstung von CCS bei bestehenden Anlagen in die Größenordnung von 3 Euro pro Kilogramm (eigene Berechnungen). Neubauanlagen für Erdgas, bei denen die CO₂-Abscheidung von über 90 % von Anfang an bei der Prozessauslegung berücksichtigt wird, liegen hingegen in ihren Kosten sogar in der Größenordnung von bestehenden Anlagen von sog. grauem Wasserstoff.

Wie sieht nun die Situation für grünen Wasserstoff auf Basis von Elektrolyse aus? Neben den reinen Investitionskosten (Capex) sind die Auslastung sowie die Strom- und Wasserkosten von entscheidender Bedeutung. McKinsey und das Hydrogen Council kalkulieren dabei für 2030 Stromkosten von 0,5 US-Dollar pro Kilowattstunde (kWh) und Wasserkosten von 1 US-Dollar pro Kubikmeter sowie Investitionskosten von 200 US-Dollar pro Kilowatt. Ferner nehmen sie eine Auslastung der Elektrolyseure von 50 % an: In diesem Fall resultieren Produktionskosten von 3,4 - 5,4 US-Dollar pro Kilogramm, also deutlich höhere Kosten als mit moderner Erdgas-basierter Technologie erzielbar sind. Auch eine deutliche Erhöhung der Auslastung und eine Halbierung der Investitionskosten erlauben nicht, die möglichen Marktpreise des blauen Wasserstoffs zu erreichen: Entscheidend hierfür sind die Strombezugskosten. Um in die Größenordnung der Herstellkosten von fossilem low-carbon Wasserstoff (GES verwendet den Terminus **CO₂-armer Wasserstoff** für alle Varianten an H₂, die wenig CO₂-Emissionen verursachen) zu kommen, werden nach GES-Berechnungen bei Investitionskosten von 200 Euro pro Kilowatt, eine Auslastung von ca. 75 % und Strombezugskosten von 2 Cent pro kWh erforderlich.

Für ein Projekt zur Erzeugung von grünem Wasserstoff besteht auch die Herausforderung, eine günstige Versorgung mit Wasser zu gewährleisten, da nach momentanem Innovationsstand für die Elektrolyse Wasser in Trinkwasserqualität benötigt wird. Für die Produktion eines Kilogramms Wasserstoff werden theoretisch 9 Liter Wasser verbraucht, in der Praxis liegt der Wasserbrauch ca. 5 - 10 % darüber. Bei Elektrolyseprojekten in wasserarmen Regionen, in denen das benötigte Wasser zwangsweise aus Entsalzungsanlagen bezogen wird, erhöhen sich möglicherweise die Gesteungskosten für den Wasserstoff, zudem kann es aber auch lokale Schwierigkeiten geben, wenn die zusätzliche Entsalzungskapazität eigentlich für die lokale Wasserversorgung benötigt wird.

Ungeachtet dieser Themen werden für 2050 installierte Kapazitäten für die Herstellung von grünem Wasserstoff von ca. 3.000 GW prognostiziert.⁹⁰ Extrapoliert man die Fertigungskapazitäten, welche

⁹⁰ Hydrogen Council/McKinsey & Company (2021).

der Hydrogen Council für 2030 in Höhe von 65 GW vorhersagt, linear weiter, kommt man auf eine entsprechende Größe von 190 GW Herstellkapazität pro Jahr. Daraus folgen, je nach Annahmen zur Lebensdauer und Wiederverwendung von Teilen gebrauchter Elektrolyseure, Prognosewerte von 3.000 - 4.000 GW an installierten Kapazitäten. Damit sollte sich bei einer optimistischen Auslastung von 70 % für die Elektrolyseure, die ja auf Basis von nur volatil verfügbarer erneuerbarer Energie betrieben werden sollen, in der Größenordnung von 430 Millionen Tonnen grüner Wasserstoff herstellen lassen, also der weit überwiegende Teil des in drei Studien prognostizierten Wasserstoffbedarfs (siehe Kapitel 7.3). Dieser hätte dann je nach Autor einen Anteil von 12 bis 21 % am prognostizierten Endenergiebedarf.

Zudem muss ein Dilemma gelöst werden: In einem Land mit hohem Sonnen- und/ oder Windanteil könnte der Wasserstoff kostengünstig (< 2 Euro pro Kilogramm H₂) erneuerbar produziert werden, weil der benötigte Strom dort sehr günstig aus PV- oder Windanlagen zu erstehen ist, und die Investitionskosten gleichzeitig durch Subventionen gestützt werden können.⁹⁶ Doch wenn die Import-Destinationen mit langen Transportwegen und damit hohen Kosten verbunden sind, kann dies dazu führen, dass die **Gestehung von Wasserstoff schlussendlich unwirtschaftlich** wird. Da Wasserstoff sehr flüchtig ist, ist der Transport über große Distanzen ein Problem. Bei langen Transportwegen wird Wasserstoff aus diesen Gründen typischerweise in Form von Ammoniak oder Methanol, sog. Wasserstoff-Derivate, transportiert.⁹¹ Für beide Grundstoffe bestehen etablierte Logistikstrukturen. Bei der Verwendung als Derivat sind Umwandlungsverluste zu berücksichtigen, die erneut entstehen, wenn der Wasserstoff nicht unmittelbar in seiner Derivatform genutzt werden kann oder soll. Alternativ bleibt die Möglichkeit des lokalen Verbrauchs: Kostengünstiger grüner Wasserstoff wird nicht über teure Logistik in industrielle Abnehmerländer gebracht, sondern es werden lokale Verbrauchsstrukturen, z. B. über Wasserstoff-Verbrenner im Transportsektor etabliert.

Alles in allem ist die Entwicklung von grünen Wasserstoffprojekten sehr komplex: Es muss die gesamte Wertschöpfungskette – von der Erzeugung der erneuerbaren Energie, dem Bau und der Versorgung der Elektrolyseure über den Transport des Produktes bis hin zur Organisation des Absatzes des Wasserstoffs oder seines Derivats in einem Projekt für eine Finanzierung – zusammengeführt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt (April 2023) ist der Erfolg dieser Bemühungen selbst im Rahmen von regierungsgeförderten Konzepten wie H2Global nicht gesichert.⁹²

Es bleiben zudem Herausforderungen bei der Handhabung von Wasserstoff: H₂ hat eine geringe Energiedichte, ist leicht flüchtig, leicht entzündbar, führt zu Versprödung von Stahl und unterstützt die Bildung von Stickoxiden bei der Verbrennung. In Reinform sind zudem seine **Eigenschaften als**

⁹¹ Vgl. IRENA (2022b).

⁹² Vgl. H2 Global (2023).

indirektes Klimagas mit einer ca. **elffachen Wirksamkeit** gegenüber CO₂ zu berücksichtigen: Das unkontrollierte Austreten von Wasserstoff muss unterbunden werden.^{93,94}

Ein Teil der prognostizierten Elektrolyseleistung soll auch der Nutzung von Spitzenstrom von primär Solar- aber auch Windanlagen dienen: Der Wasserstoff wird mit Spitzenstrom erzeugt, gespeichert und bei Bedarf, z. B. bei einer Dunkelflaute, in einem Gaskraftwerk rückverstromt. Neben dem äußerst geringen Wirkungsgrad dieser Prozesskette, bei der nur rund ein Viertel der ursprünglich eingesetzten Strommenge wieder als Strom verfügbar wird, ist dieser Weg auch im Hinblick auf die ebenfalls geringen Nutzungszeiten der Elektrolyseure extrem teuer: Laufzeiten der Elektrolyseure von nur ca. 25 % der Jahreszeit führen zu einer Erhöhung der Gestehungskosten des Wasserstoffs, die leicht zwischen 30 - 50 % über denen in Gebieten hoher Auslastung liegen können. Das bedeutet, dass nur bei stark sinkenden Capex-Kosten der Elektrolyseure dem Wasserstoff eine Rolle als Langzeitspeichermedium von Überkapazitäten an grünem Strom zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten zukommen kann. In vielen Fällen wird die Verwendung von Erdgas mit Carbon Capture deutlich günstiger sein als der Aufbau einer verlustintensiven und wenig ausgelasteten Wasserstoff-Speicher-Lösung, bei der es nicht leicht sein wird, Kosten von weniger als 50 Euro pro MWh Strom bei der Rückverstromung des Wasserstoffs zu erreichen. Hinzu kommt folgendes: Elektrolyse-Wasserstoff hat hohe Vorlaufkosten, vor allem beim Netzausbau. Diese Kosten sind für die Länder des Globalen Südens sind prohibitiv hoch. Trotz der niedrigen Kosten für erneuerbaren Strom kann es deshalb sein, dass die Dynamik im Bereich Elektrolyse-Wasserstoff im Globalen Süden viel geringer sein wird, als von vielen erhofft bzw. erwartet wird.

Zusammenfassend folgen aus dieser Ausgangssituation und den Randbedingungen mehrere Punkte. Zum einen wird es grüner Wasserstoff angesichts der signifikanten Skalierungsherausforderungen schwer haben, die seitens der IEA und anderer gesetzten Erwartungen zu erfüllen. Selbst wenn diese Erwartungen erfüllt würden, würde grüner Wasserstoff als Sekundärenergieträger nur einen Beitrag von optimistisch betrachtet maximal 15 % an dem 2050 zu erwartenden Endenergiebedarf liefern können. Das ist ein wichtiger Beitrag, aber doch viel weniger als das, was teilweise in den Medien und in der Politik zu diesem Thema kommuniziert bzw. an Hoffnungen geschürt wird. Es bedarf also anderer Wege, um mit dem großen Energiehunger umzugehen, der mit der weiteren Entwicklung unvermeidbar verbunden ist, wenn Armut überwunden werden soll.

Wenn also die Potenziale von grünem Wasserstoff beschränkt sind, welche Alternativen gibt es?

Blauer Wasserstoff wird, wie grauer Wasserstoff auch, aus Erdgas hergestellt, das anfallende CO₂ wird allerdings abgeschieden und gespeichert (CCS). Eine Alternative ist die Vergasung von Biomasse (orangener Wasserstoff) oder Abfallstoffen. Türkiser Wasserstoff wird mittels thermischer

⁹³ Vgl. Ocko (2022).

⁹⁴ Vgl. Warwick (2022).

Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) gewonnen. Anstelle von CO₂ entsteht fester Kohlenstoff, der problemlos gespeichert oder genutzt werden kann. Diese Methode ist allerdings noch in der Entwicklung. Unter Klimagesichtspunkten ist die Produktionsweise sekundär. Entscheidend ist der CO₂-Footprint.

Auch das Klimagas Methan als Hauptbestandteil von Erdgas muss bei der Bestimmung des CO₂-Footprints berücksichtigt werden. Methan ist auf 100 Jahre betrachtet etwa 24-mal so klimaschädlich wie CO₂. Es tritt sowohl bei der Förderung als auch beim Transport von Erdgas aus, deshalb ist eine konsequente Überwachung der technischen Anlagen notwendig.

Nimmt man den Flaschenhals beim Hochlauf der Elektrolyseure ernst, bleibt nur die Erkenntnis: Ein globales klimaneutrales Stromsystem, das nur auf „einem Bein“ ruht, nämlich auf dem der Erneuerbaren und dem daraus abgeleiteten grünen Wasserstoff, ist nicht realisierbar.

Das sieht aus der isolierten Sicht eines **reichen Landes** anders aus. Wohlhabende Länder können sich bis 2050 mit so vielen Elektrolyseuren versorgen, dass sie auf diesem Weg ohne fossile Energieträger (mit Carbon Capture) und ohne Nuklearenergie klimaneutral werden können. Das wird allerdings sehr teuer und mindert folglich den Wohlstand. Es ist aber möglich. Natürlich werden die Knappheitsprobleme dabei auf andere (ärmere) Länder verschoben. Für sie sind entsprechend weniger Elektrolyseure vorhanden bzw. bezahlbar. GES schaut auf die Welt als Ganzes und plädiert deshalb für ein klimafreundliches Energiesystem, das auf „zwei Säulen“ steht: einerseits erneuerbare, volatile Energie, andererseits zuverlässige, steuerbare Energie, vor allem fossile Energieträger mit Carbon Capture.

Erhellend ist ein Hinweis des Wasserstoff-Experten Robert Schlögl, der als Berater eng in das Programm eines Industriepartners unseres Projekts eingebunden ist. Schlögl: *„Um das russische Gas durch Wasserstoff zu ersetzen, müssten alle Fabriken der Welt, die Elektrolyseure herstellen, 40 Jahre lang Elektrolyseure produzieren, damit man das ersetzen kann – aber nur für Deutschland.“*⁹⁵

Da beim blauen Wasserstoff bei der Aufspaltung des Erdgases ohnehin Carbon Capture erforderlich ist, kann man bei vielen Anwendungen, v. a. zur Speicherung und Verbrennung in Kraftwerken, gleich Erdgas verwenden. Erdgas ist fast immer vorteilhafter als Wasserstoff, wenn die Carbon-Capture-Option nicht ausgeschlossen wird. In der Regel ist dann die **Erdgas-Route auch deutlich preiswerter**.

Die Begrenztheit der Optionen im Umfeld Elektrolyse-Wasserstoff zeigt auch folgende Betrachtung: Sie betrifft den z. B. in Europa und vor allem in Deutschland propagierten Weg zu **klimaneutralem Stahl**. Dieser soll über Direktreduktion mit Elektrolyse-Wasserstoff klimaneutral erzeugt werden. Dies ist deutlich teurer als der heutige Weg. GES plädiert für eine Direktreduktion mit Hilfe von

⁹⁵ Vgl. Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (2022).

Erdgas in Verbindung mit Carbon Capture and Storage. Sieht man einmal von den Kosten ab, stellt sich gleich die Frage, ob überhaupt ausreichend Wasserstoff zur Verfügung steht.

Im Jahr 2019 wurden knapp 72 % der **Weltstahlproduktion** von 1.874 Milliarden Tonnen über die Hochofenroute realisiert, also mit Koks, gewonnen aus Kohle. Um die entsprechende Menge Roh-eisen (1.341 Milliarden Tonnen) klimaneutral mit Wasserstoff herzustellen, wäre der Einsatz von ca. 67 Millionen Tonnen Wasserstoff erforderlich. Das entspricht etwa 10 % bis 15 % der **erwarteten Maximal-Produktion** des Elektrolyse-Wasserstoffs im Jahr 2050. Wobei sich bis dahin die Weltstahlerzeugung wohl deutlich vergrößern dürfte, möglicherweise um 50 %. Mehr als 20 % des grünen Wasserstoffs würden dann alleine für die Stahlproduktion verbraucht. Gut, dass man Stahl auch anders klimaneutral herstellen kann.

Elektrolyse-Wasserstoff ist aus vielerlei Gründen kein brauchbarer Ersatz für den Einsatz von Erdgas. Vor allem wegen der Engpass-Situation bei den Elektrolyseuren. Wie dargestellt, wird man nach allen internationalen Schätzungen und auch nach unseren Analysen bis zum Jahr 2050 einen Faktor 5 - 10 unterhalb der Menge an Elektrolyseuren liegen, die man benötigen würde, wenn man nur über diesen Weg Klimaneutralität anstrebte. Kurz, der Hochlauf der Elektrolyseur-Produktion ist einfach zu gering. Auch deshalb geht auf absehbare Zeit kein Weg an fossilen Energieträgern vorbei. **Carbon Capture** kommt dann eine Schlüsselrolle zu.

Kapitel 2.4 der Basisdokumentation behandelt alle Aspekte der Herstellung von Wasserstoff, Kapitel 2.5 Transport und Speicherung von Wasserstoff sowie Kapitel 2.6 die Herstellung von Wasserstoffderivaten.

5.3.4 Die Rolle fossiler Energieträger als zuverlässig steuerbare Energie

Die heutige Welt versorgt sich immer noch zu gut 80 % mit Primärenergie aus fossilen Energieträgern. Behalten die fossilen Energieträger weiterhin eine tragende Rolle, werden viele Konflikte mit Staaten vermieden, die diese Energieträger fördern und deren Staatshaushalte davon profitieren. Dazu gehören insbesondere die Staaten des China-Clubs. Ohne die Kooperation dieser Staaten ist das Klimaproblem nicht lösbar. Die Supermächte China und Russland werden nicht akzeptieren, dass die OECD-Staaten ihnen und mit ihnen verbundenen Staaten Lösungen aufzwingen, die ihren Interessen diametral entgegenlaufen. Das vor allem deshalb nicht, weil wegen der Option "Carbon Capture" das Klima-Argument entfällt.

Die Ökonomie vieler, auch militärisch und politisch starker Länder, basiert auf dem Verkauf fossiler Energieträger. Andere Länder sind dankbar, wenn sie diese Energieträger einigermaßen preisgünstig erwerben können. Demgegenüber steht die Philosophie der **Defossilisierung**, dem vollständigen

Ausstieg aus fossilen Energieträgern wie Kohle, Gas und Öl. Die Befürchtung ist, dass über deren Verbrennung wie bisher CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Das muss allerdings nicht so sein.

„**Carbon Capture**“ ist die Alternative. Carbon Capture für fossile Energieproduktion ist aus unserer Sicht der **Joker für die Zukunft**. So entstehen zuverlässig steuerbare Energien, mit denen wir die Erneuerbaren komplementieren können, wenn nicht die Nuklearenergie diese Rolle übernimmt. Carbon Capture ermöglicht einen **klugen Kompromiss**, der den Förderländern fossiler Energieträger – wie auch der Welt insgesamt – eine Perspektive für Net Zero eröffnet. Ohne diese Länder ist die Zukunft ohnehin nicht gestaltbar – vor allem nicht in friedlicher Form.

Insofern gehen wir – aus **physikalischer Notwendigkeit** und **politischer Klugheit** – davon aus, dass die fossilen Energieträger noch über viele Jahrzehnte eine große Rolle spielen werden – allerdings nicht mehr die Rolle von heute. Wenn man es richtig macht, können Erneuerbare und Fossile sich sogar ergänzen. Die Technologie eröffnet die Chance, Kohlenstoff zu gewinnen, um ihn im Kreislauf zu führen, wie es die Natur vormacht. Möglicherweise balancieren sich die Gewichte zwischen volatilen Erneuerbaren und zuverlässig steuerbarer Energie über alles betrachtet etwa 50:50 aus. Wobei es gut so sein kann, dass in der Stromproduktion die Erneuerbaren einen größeren Anteil haben, aber deshalb im Bereich der Energie-Moleküle eher die fossilen Energieträger dominant werden. Letzteres vor allem auch, wenn man daran interessiert ist, die Energie zu speichern, leicht zu transportieren, in der Industrie einzusetzen und, wo notwendig, für Verbrennungsmotoren zu nutzen. In diesen Bereichen wird wohl auch in Zukunft für viele Jahrzehnte der größere Teil der Energie von der fossilen Seite herkommen. Und vielleicht wird das sogar der größere Teil der genannten Primärenergie bleiben, wenn auch nicht mehr so dominant, wie das heute der Fall ist.

5.3.5 Nuklearenergie

Unter dem Konzept „auf zwei Säulen stehen“ spielt die Nuklearenergie auch in Zukunft eine wichtige Rolle. Sie ist vom Volumen her heute die wichtigste zuverlässige (weitgehend) klimaneutrale Energiequelle, die **nicht volatil** ist. Laut Our World in Data hat sie an der globalen Stromgewinnung einen Anteil von 10 %, zur Primärenergie trägt sie 5 % bei.⁹⁶

Während Deutschland aus der Nuklearenergie aussteigt, nimmt die Zahl von Atomreaktoren in Europa zu, unter anderem in Finnland, Polen, Schweden, Frankreich und Großbritannien. Derzeit werden in 15 Ländern, vor allem in China, Indien und Russland, rund 60 Atomreaktoren gebaut. Etwa 100 Reaktoren sind in Auftrag gegeben oder geplant, mehr als 300 weitere sind in der Diskussion.⁹⁷

⁹⁶ Vgl. Our World in Data (2022b).

⁹⁷ Vgl. World Nuclear Association (2022).

Dass die Nuklearenergie mit Risiken einhergeht, steht außer Frage. Davon zeugt der dramatische Unfall in Tschernobyl (1986). Fukushima (2011) wird zwar auch oft erwähnt. Die dortigen Schäden und Todeszahlen waren aber im Wesentlichen Folgen eines Tsunamis, nicht eines Nuklearunfalls. Mit der Verbreitung der Nuklearenergie erhöht sich zudem die Gefahr der Weiterverbreitung von radioaktiven Substanzen und damit von Atomwaffen. Letztlich sind es aber die Staaten selber, die entscheiden, ob sie von der Nuklearenergie Gebrauch machen oder nicht, und ob sie in den Aufbau und den Betrieb dieser sicherheitsrelevanten Technik investieren.

Auch geht die Entwicklung der Nukleartechnologie weiter. In der Erprobung sind Reaktoren der 4. Generation, die mit sehr schnellen Neutronen arbeiten, den radioaktiven Müll der vorangegangenen Reaktoren nutzen und Energie daraus gewinnen können.⁹⁸ Dadurch wird das Müllaufkommen reduziert, die Endlagerungszeiten werden verkürzt.⁹⁹ Russland hat unterdessen das erste schwimmende Kernkraftwerk in Betrieb genommen. Es zählt zu einem weiteren Typ, den Small Modular Reaktoren (SMR), die sicherer sein sollen, als alle bisherigen Kernkraftwerke. Weitere SMR befinden sich in Argentinien, Kanada, China, Russland, Südkorea und in den USA im Bau oder in der Genehmigungsphase. Ob und wann die Kernfusion einsatzfähig sein wird, ist heute noch nicht abzusehen und wird daher in der Referenzlösung nicht berücksichtigt.

Kapitel 2.2 der Basisdokumentation behandelt ausführlich alle relevanten Aspekte der Erzeugung von Strom mittels Nuklearenergie.

5.3.6 Die richtige Kombination der Stromerzeugungsarten

Wie zuvor dargestellt, kann ein Industrieland nicht mit 100 % Erneuerbaren sinnvoll mit Strom versorgt werden. Denn nötig wäre dafür im heutigen Technologieumfeld der Einsatz von grünem Wasserstoff als Speicher von Energie und Rückverstromung der gespeicherten Energie dann, **wenn Sonne und Wind nicht ausreichend liefern**. Das ist ein sehr teurer Weg, der sehr viel erneuerbare Energie benötigt, aber ebenso eine sehr hohe Elektrolyseurkapazität. Genau das ist aber mit Blick auf 2050 keine realistische Option. Wir scheitern bereits am **Engpass Elektrolyseure**. Das ist ausführlich in Kapitel 5.3.3 dargestellt. Wir sehen hier bis 2050 eine Obergrenze von **maximal 4.000 GW Elektrolyseurkapazität**. Das reicht bei Weitem nicht aus, um die zukünftigen Energieprobleme der Welt über Elektrolyse-Wasserstoff zu lösen. Trotzdem sind die 4.000 GW von entscheidender Bedeutung, z. B. zur Sicherung eines Teils der Mobilität über synthetische Kraftstoffe.

Da Strom allein zur Energieversorgung einer Gesellschaft nicht ausreicht, hilft auch der **Desertec-Ansatz** mit 100 % Erneuerbaren nicht weiter. An dieser Erkenntnis scheitert auch der neue

⁹⁸ Vgl. Grytz (2021).

⁹⁹ Vgl. Vahrenholt (2023).

Lösungsansatz des Club of Rome.¹⁰⁰ 100 % Erneuerbare sind nicht realisierbar – oder nur bei weitgehender Verarmung. Genau das aber schlägt der neue Bericht des Club of Rome vor. Dies verbunden mit massiven Umverteilungsprogrammen und Vorstellungen von neuem Wohlstand. Aus Sicht von GES ist jedoch nicht zu erwarten, dass die Menschen mehrheitlich neue Wohlstandsvorstellungen akzeptieren, die de facto mit einer erheblichen Reduktion des Lebensstandards verbunden sind, solange es noch eine Alternative gibt. Unsere Referenzlösung beschreibt eine solche und basiert auf der gleichgestellten Nutzung von neuen Erneuerbaren neben zuverlässig steuerbaren Energien.

Der Versuch, eine Lösung nur auf Basis zuverlässig steuerbarer Energie-Komponenten, bspw. für die Challenge-Gruppe im Sinne von **Grün-fossil** aufzubauen, würde ebenfalls scheitern. Der Ansatz ist zwar mit etwa 100 Euro pro Tonne CO₂ von den Kosten her akzeptabel, aber nicht für den Fall der Differenzkostenübernahme der OECD-Staaten für die Challenge-Gruppe. Wenn z. B. auf Dauer, d. h. nach einem Hochlauf ab 2050, Grün-fossil mit 24 Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr im Bereich der Challenge-Gruppe über Carbon Capture abzuschneiden und zu finanzieren wären. Das wären **auf Dauer 2,4 Billionen US-Dollar** und mehr jährlich allein für Carbon Capture bei der Challenge-Gruppe, primär zu finanzieren von vielleicht 1,5 Milliarden Menschen in den OECD-Staaten. Umgelegt auf alle berufstätigen Bürger in diesen Ländern wären im Mittel **mehrere 1.000 US-Dollar** zu rechnen, was kaum vorstellbar und nicht notwendig ist. Hinzu kommt, dass wir bis 2050 für die **ganze Welt** ein maximales Abscheidepotenzial von 15 - 20 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr sehen.

Wir befürworten in der Referenzlösung einen ungefähren Mix von 50:50 aus (neuen) erneuerbaren und zuverlässig, steuerbaren Energiequellen.

Nur (neue) Erneuerbare geht nicht

Will man die Energieversorgung weitgehend auf (neue) Erneuerbare umstellen, ist – wie wir in Deutschland erfahren mussten und müssen – die Strombereitstellung nicht mehr preiswert. Das liegt daran, dass die Beherrschung der **Volatilität** die Hauptkosten verursacht, nicht die Stromerzeugung mit (neuen) Erneuerbaren selber, obwohl diese unter ungünstigen klimatischen Bedingungen wie in Deutschland auch nicht preiswert ist. Das eigentliche Problem ist die **Speicherherausforderung für Strom**. Die heute verfügbaren Speicher sind viel zu teuer. Sie erlauben nicht einmal die Speicherung von einem Prozent des kontinuierlich verbrauchten Stroms.

¹⁰⁰ Vgl. Club of Rome (2022).

Die vermeintliche Lösung ist die Produktion einer großen Übermenge von Strom aus Anlagen vom Typ neuer Erneuerbarer zur Erzeugung von erneuerbarem Strom (statt 100 % dann 130 %). Mit diesen Volumina aus Überstrom soll **grüner Wasserstoff** erzeugt werden, der die Rolle von Gas im heutigen Energiemix übernimmt und als chemischer Energiespeicher dient. Dieser Wasserstoff muss transportiert und gespeichert werden und bei Bedarf in Kraftwerken zum Einsatz kommen, um Lücken in der Stromversorgung zu schließen. Wird der Wasserstoff in Kraftwerken verbrannt, sind schließlich mehr als zwei Drittel der ursprünglichen grünen Energie aus Sonne und Wind verloren. Dieser Weg ist teurer als der über die Gasroute, selbst wenn das CO₂ bei der Verbrennung im Kraftwerk abgefangen wird.

Die Kosten sind **mindestens doppelt so hoch** bei Wasserstoff wie bei Erdgas, solange man von einem Gaspreis um die 10 US-Dollar pro MWh ausgeht, der in vielen Teilen der Welt gegeben ist. Zielt man die Zusatzprobleme beim Umgang mit Wasserstoff in Betracht, gilt das auch noch beim doppelten Gaspreis.

Wechselt man auf andere Wasserstoffarten, kann das Knappheitsproblem umgangen werden. **Carbon Capture ist dann aber ein unvermeidbarer Teil der Lösung.** Und zur Speicherung, zum Transport und für die Verbrennung ist Erdgas (mit Carbon Capture), wie dargestellt, ja ohnehin besser als Wasserstoff. Es ist dann aber unbedingt darauf zu achten, dass das Methan – Hauptbestandteil von Erdgas – nicht in die Atmosphäre entweicht.

Nur Fossil mit Carbon Capture

Nur fossil mit Carbon Capture wäre eine Politik des „Weiter so plus“. Für Indien, die Staaten Afrikas und viele Nicht-OECD-Staaten stünde eine Industrialisierung à la China an. Das Erreichen von Net Zero irgendwann zwischen 2050 und 2070 würde den noch rigoroseren Einstieg in CCS nach sich ziehen. Bis 2050 bedeutet das im Mittel nicht nur die Vermeidung von 6 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr in den Challenge-Ländern, sondern weltweit von vielleicht 24 Milliarden Tonnen CO₂. Im Bereich der OECD und noch mehr im China-Club wären insgesamt mindestens 15 Milliarden Tonnen CO₂ abzufangen. Das würde die **Kosten** im Vergleich mit dem GES-Referenzmodell **vervielfachen**, was angesichts der Notwendigkeit der Kofinanzierung ohne erhebliche wirtschaftliche und politische Verwerfungen kaum denkbar wäre. Hinzu kommt die bereits zuvor diskutierte Limitation für Carbon-Capture-Anlagen, die für 2050 eine Grenze bei der Abscheidung von 15 - 20 Milliarden Tonnen CO₂ erwarten lässt, wobei der niedrigere Wert realistischer ist.

5.4 Die große Bedeutung von Carbon Capture and Storage

Ein weiteres Schlüsselement eines leistungsfähigen Energiesystems ist die Seite der **Moleküle**. Es geht um mehratomige Teilchen, die durch chemische Bindungen zusammengehalten werden und im hier diskutierten Zusammenhang meist Kohlenstoff-Atome enthalten. Dass diese auch im Rahmen eines klimaneutralen Energiesystems im Einsatz bleiben werden und wie dies gelingen kann, wird in diesem Unterkapitel erläutert.

5.4.1 Die Schlüsselrolle von Carbon Capture

Ca. 80 % der weltweit genutzten Energie stammen aus fossilen Quellen.¹⁰¹ Viele denken, dass die Energiewende einen vollständigen Ausstieg aus Kohle, Gas und Öl bedeutet und die Erneuerbaren Schritt für Schritt übernehmen, alleine und endgültig. Das ist eine Illusion. Alle seriösen Studien zu einer klimaneutralen Welt 2050 gehen auch in Zukunft von einem hohen Anteil fossil erzeugter Energie aus – neben der stetig wachsenden Nutzung von erneuerbarer Energie.^{102,103,104,105} Das ist nicht verwunderlich, denn der weltweite Energiebedarf wird in den kommenden Jahrzehnten weiter steigen. Schon weil die Zahl der Menschen von heute acht auf bald zehn Milliarden anwachsen wird und die Länder der Challenge-Gruppe eine substantielle Erhöhung ihres Lebensstandards anstreben.

Kohle, Gas und Öl haben ein CO₂-Problem. Wenn es gelingt, dieses CO₂ zuverlässig abzufangen, um es anschließend zu entsorgen oder zu nutzen, wäre die Welt einen Schritt weiter. Deshalb ist Carbon Capture and Storage/ Usage (CCUS) ein Schlüsselthema. Der Faktor Zeit spielt dabei eine große Rolle. Denn CCUS verspricht rasche Verbesserungen hinsichtlich des CO₂-Fußabdrucks der Zivilisation. Für viele Anwendungen sind Technik und Businessmodelle ausgereift, Wirksamkeit und Effizienz sind hoch.

Interessant ist, dass die britische Regierung plant, eine **neue Kohlegrube zu eröffnen**, um Kohle dann massiv *mit* Carbon Capture zu nutzen. Der norwegische Ministerpräsident Jonas Gahr Støre hat im August 2022 in Oslo nach einem Treffen mit Kanzler Olaf Scholz angeboten, das gesamte in Europa in diesem Jahrhundert produzierte CO₂ bei sich in 3.000 Metern Tiefe unter der Nordsee einzulagern. Norwegen will das CO₂ später wieder als Rohstoff benutzen. Die Briten wollen ähnliche Angebote machen und mit dem Verpressen von CO₂ mehr Geld verdienen, als sie ursprünglich mit dem Erdgas in den entsprechenden Kavernen verdient haben. Es gibt weitere Aktivitäten dieser Art

¹⁰¹ Vgl. IEA (2020a).

¹⁰² Vgl. IEA (2021b).

¹⁰³ Vgl. IRENA (2021).

¹⁰⁴ Vgl. bp (2022).

¹⁰⁵ Vgl. Shell (2021).

in Europa, es gibt sie sowieso in den USA, Indien, China und Indonesien. Alle setzen sie bei ihren Net Zero-Zielen auf **Carbon Capture**. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass sowohl der **G20-Gipfel in Rom** wie die letzte **Klimakonferenz in Sharm El Sheikh** bezüglich Kohle immer von einem Ausphasen der Kohle gesprochen haben, soweit sie „unabated“ ist, also kein Abfangen von CO₂ stattfindet.

Dieser Punkt wird in der Kommunikation in den deutschen Medien oft nicht erwähnt. Es wird so getan, als würden sich alle Länder von der Kohle verabschieden. So ist es aber nicht, nur von „unabated coal“. Wir brauchen Klimaneutralität – mit Carbon Capture bei Fossilen. Der einzige alternative Weg, nämlich direkt vom Strom, also von den Elektronen zu Wasserstoff und damit zu Molekülen zu kommen, und zwar über den Einsatz von Elektrolyseuren ist, wie im Kapitel 5.3.3 beschrieben, angesichts der erforderlichen Dimensionen keine Alternative.

Was leistet Carbon Capture? Durch Carbon Capture (CC) kann man CO₂ aus sogenannten Punktquellen, zum Beispiel an Gaskraftwerken oder Zementfabriken, abscheiden.¹⁰⁶ Dafür gibt es viele technische Möglichkeiten.¹⁰⁷ Weit verbreitet ist die chemische Absorption durch **Amine**. CO₂ wird aus den Abgasen herausgewaschen. Das Klimagas kann aber auch durch Membranen abgetrennt werden.

Von Carbon Capture and Storage (CCS) spricht man, wenn das abgeschiedene CO₂ permanent eingelagert wird. Dafür gibt es vielfältige Möglichkeiten, von Kavernen über ehemalige Lagerstätten von Öl und Gas bis hin zur unterirdischen Mineralisierung, also der chemischen Umwandlung von Silikat- in Carbonatgesteine durch die Einlagerung von CO₂. Wird das Klimagas weiterverwendet, etwa für die Produktion von E-Fuels oder Harnstoff, spricht man von Carbon Capture and Usage (CCU). Wenn CO₂ durch CCU nutzbar gemacht wird, sind Synergieeffekte möglich. Am Ende der Nutzung gelangt das Klimagas allerdings häufig doch in die Atmosphäre. Bei der Deponierung von CO₂ bei CCS wird dies verhindert, allerdings kommen Entsorgungskosten hinzu.

CO₂ kann auch mittels **Direct Air Capture** (DAC) direkt aus der Luft entnommen werden. Der Anteil von CO₂ in der Atmosphäre ist aber sehr gering, nur etwa 0,04 %. Hier CO₂ abzuscheiden ist deshalb extrem energieintensiv und prohibitiv teuer. Die DAC-Anlagen enthalten mächtige Ventilatoren, die große Mengen Luft ansaugen. Anschließend wird das CO₂ verdichtet, um es dann abzuscheiden. All das kostet viel Energie. Auch deshalb ist DAC deutlich teurer als die CO₂-Gewinnung aus Abgasen, bei denen die CO₂-Konzentration meist mehr als 10 % beträgt.¹⁰⁸ Ökonomisch sinnvoller ist es, das CO₂ dort abzufangen, wo es mit hoher Konzentration in die Atmosphäre gelangt, nämlich am

¹⁰⁶ Vgl. Skea (2022).

¹⁰⁷ Vgl. NASA (2019).

¹⁰⁸ Vgl. DENA (2021).

Schornstein – und nicht, wenn es in der Atmosphäre bereits verteilt ist und zu deutlich höheren Kosten herausgefiltert werden muss.

Für DAC werden heute mindestens 500 US-Dollar pro Tonne CO₂ angesetzt. Hoffnungen zielen auf vielleicht 200 US-Dollar in einigen Jahrzehnten. Dies wäre, hochskaliert, für die Welt eine Obergrenze der CO₂-Vermeidungskosten.¹⁰⁹ Selbst wenn man das CO₂ über DAC aus der Atmosphäre entnimmt, stellt sich immer noch die Frage, was dann damit passiert. Wir stehen dann wie bei CC vor der Frage der Nutzung oder der Speicherung von CO₂.

CDR steht für Carbon Dioxide Removal, auf Deutsch: Negativemissionen. Dabei wird der Atmosphäre CO₂ entnommen und anschließend gespeichert. Das geschieht entweder auf technischem Weg durch DAC oder biologisch: Pflanzen entnehmen der Atmosphäre CO₂ und speichern es, etwa in Holz. Ein kombiniertes Verfahren ist Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS). Dabei wird zum Beispiel Biomasse von schnell wachsenden Pflanzen mit dem darin enthaltenen Kohlenstoff aus der Atmosphäre zur Energiegewinnung verbrannt. Das CO₂ wird abgeschieden und anschließend entsorgt.

Rund 30 CCUS-Projekte sind weltweit in Betrieb. Die mit Abstand meisten befinden sich in den USA und Kanada. Schon seit langem wird dort CO₂ in großen Mengen gewonnen, in Lagerstätten von Öl und Gas verpresst, um sie besser auszunutzen (Enhanced Oil/ Gas Recovery, EOR/ EGR). Weitere elf CCUS-Projekte werden derzeit gebaut, Europa und der Nahe Osten sind regionale Schwerpunkte. Noch einmal 150 Projekte sind in der Entwicklung.¹¹⁰ Die Anzahl der CCUS-Projekte weltweit nimmt deutlich zu. Derzeit werden rund 40 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr abgeschieden.

CO₂ in Gas- und Ölfeldern sowie Kavernen zu verpressen ist marktreif und hat seinen Ursprung in der Öl- und Gasförderung, als Mittel zum Zweck, um die Produktion zu unterstützen, sog. **Enhanced Oil Recovery**. Dabei geht es nicht primär um den Klimaschutz, sondern um die Erhöhung der **Ausbeute aus Öl- und Gasfeldern**. Dort nimmt nämlich mit zunehmender Förderung der Druck ab. Oft sind die Depots noch halb voll, „Restbestände“ von Öl- und Gas bleiben unter der Erde. Führt man nun CO₂ in die Felder, erhöht sich der Druck und das Feld kann fast bis zur Neige ausgebeutet werden. Das ist auch unter Klima- und Emissionsaspekten vernünftig, wenn bei dem Einsatz der zusätzlich gewonnenen Mengen Öl und Gas konsequent Carbon Capture genutzt wird, oder über z. B. Natur-basierte Lösungen vollständig kompensiert wird. Dabei sind die ökonomischen Vorteile so hoch, dass sie die Kosten für Carbon Capture (Abfangen, Transport, Verpressen) bei Enhanced Oil Recovery decken. Wie erwähnt, arbeitet auch Norwegen an der Lagerung von CO₂ in ehemaligen Gasfeldern unter der Nordsee.

¹⁰⁹ Vgl. DENA (2021).

¹¹⁰ Vgl. NETL (2021).

Vielversprechend ist die Mineralisierung, wie sie in Island erfolgreich erprobt wird. Dabei wird in Wasser gelöstes CO₂ in Basaltgestein verpresst – und verwandelt sich dort in wenigen Monaten zu Stein. Die Technik gilt als sehr sicher. Vulkanische Basaltsteine sind weltweit verbreitet. Deshalb gibt es theoretisch keine Kapazitätsprobleme für die Speicherung von CO₂.¹¹¹ Kosten für die Speicherung von einer Tonne CO₂ in Basaltgestein werden in der Höhe von 20 - 30 US-Dollar angegeben. Eine weitere ausgereifte Technologie ist es, CO₂ in salzwasserhaltigem Gestein zu speichern.

Carbon Capture and Storage aus Gründen des Klimaschutzes braucht mehr: einen definierten Abscheidegrad, beispielsweise 90 %, eine Dokumentation der verpressten Mengen und ein Monitoring, ob die Speicherung auch sicher ist. CO₂ in der Atemluft ist ab einem Vielfachen der normalen Konzentration von circa 0,04 % für Menschen schädlich. Das Gas ist – anders als Erdgas – aber nicht brennbar. Es versteht sich, dass Transport und Lagerung nach definierten Standards abgewickelt werden müssen.

CO₂ kann per Pipeline, LKW, Bahn oder Schiff transportiert werden.¹¹² Bis zu einer Entfernung von etwa 1.800 Kilometern ist der Bau von Pipelines trotz anfänglich hoher Investitionskosten günstiger als der Schiffstransport. Bei Schiffen ist der Transportraum begrenzt, das CO₂ wird stärker komprimiert und schließlich verflüssigt. Der Seetransport kann auf die Anforderungen des Marktes aber flexibler reagieren als ein fest verbautes Pipelinenetz. Anders als bei Erdgas gibt es beim Transport von CO₂ keine Risiken, die durch Feuer oder Explosionen auftreten können. Bislang ist eine CO₂-Transportinfrastruktur kaum vorhanden, Ausnahmen bilden die USA und Kanada. Hier gibt es ein CO₂-Pipelinenetz von über 8.000 Kilometern Länge.¹¹³

Wer Transportkosten senken will, muss unnötige Transporte vermeiden. Deshalb sind kurze Wege zwischen Abscheidung und Speicherung oder Nutzung von CO₂ von Vorteil. Das aber hängt von vielen Faktoren ab. Wo sind die Standorte der Emittenten? Wie ist die Geologie? Wo kann das CO₂ verpresst oder verbraucht werden? Sind CO₂-Abnehmer, etwa Produktionsanlagen für chemische Produkte oder zukünftig von synthetischen Kraftstoffen, in der Nähe? Es gibt viele Ansatzpunkte, um das Transportaufkommen zu reduzieren.

Will man CCUS im großen Maßstab einsetzen, wächst auch die Bedeutung von Transport und Logistik in der gesamten CO₂-Kette. Damit hängt die Zukunft von CCUS auch an der Bereitschaft der jeweiligen Staaten, die notwendige Infrastruktur zu schaffen.

¹¹¹ Vgl. Snoebjörnsdottir (2020).

¹¹² Vgl. Massey (2021).

¹¹³ Vgl. Righetti (2017).

Die Abscheidung von CO₂ in der Industrie kostet derzeit zwischen 40 - 120 US-Dollar pro Tonne.^{114,115} Die Preisspanne gilt sowohl für konventionelle Kraftwerke, also im Wesentlichen Kohle und Gas, vereinzelt auch Öl, als auch für die Stahl- und Zementproduktion. Nach chinesischen Angaben spricht viel dafür, dass die **Kosten bis 2050 auf ein Drittel sinken**.

In diesem Umfeld entstehen erste Businessmodelle. Sie setzen eine Kofinanzierung oder einen CO₂-Preis voraus. Der Preis für CO₂ muss höher sein als der für die Entsorgung. Wenn das der Fall ist, fangen die Emittenten an zu investieren, um ihre Emissionen zu vermeiden – soweit die ökonomische Theorie. In Europa beispielsweise gibt es mit dem Emissionshandelssystem ein Instrument, das zu einem steigenden CO₂-Preis führt. Anders auf globaler Ebene, dort hat ein durchgängiger CO₂-Preis absehbar keine Chance.

Kann CCUS bei der Lösung des Energie- und Klimaproblems eine tragende Rolle spielen? Die weltweit ausgestoßenen CO₂-Mengen aus dem energienahen Bereich betragen 2025 etwa 39 Milliarden Tonnen pro Jahr. Hinzu kommen etwa 14 Milliarden Tonnen CO_{2eq} zum Teil aus anderen Treibhausgasen wie Methan. Natürliche Puffer, wie Ozeane oder Wälder, speichern zugleich mindestens 14 Milliarden Tonnen CO₂ und helfen uns bei der Bekämpfung des Klimaproblems. Insbesondere viele Emissionen im biologischen Bereich, z. B. Methan aus Reisfeldern, werden so (gedanklich) kompensiert. Von den 34 Milliarden Tonnen im energienahen Bereich wird derzeit nur etwas über 1 % abgeschieden und eingelagert. Bei den „Schwergewichten“ der globalen Emissionen liegen die Kohlekraftwerke, und hier vor allem die Anlagen in China und Indien, weit vorne; global handelt es sich um etwa 10 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr.

Die Wirkungsgradverluste beim Einsatz von CCS sind jedoch erheblich. Um den gleichen Stromoutput zu erzielen, muss *mehr* Kohle verbrannt werden, alternativ muss erneuerbare Energie zu diesem Ziel bereitgestellt werden. Gleichzeitig entstehen gewaltige Mengen CO₂, die entsorgt oder genutzt werden müssen. Dafür braucht es Investitionen: in die Anlagen zur Abscheidung, für die Kompression und eine an die Geographie angepasste Transportinfrastruktur.

Es sind aber nicht die Kohlekraftwerke alleine: Gas- und Ölkraftwerke, Stahlwerke, Zementwerke, Anlagen in der Chemie etc. kommen hinzu. Wenn CCUS eine entscheidende Rolle bei der Lösung der Klimakrise spielen soll, stellt sich die Frage noch einmal härter: Gibt es eine realistische Chance, mittels dieser Technologie **jährlich 15 - 20 Milliarden Tonnen CO₂ zu eliminieren**, über drei Jahrzehnte, mit einer Abscheidungsrate von rund 90 %? Ist das überhaupt realistisch?

¹¹⁴ Vgl. DENA (2021).

¹¹⁵ Vgl. Massey (2021).

Die kurze Antwort lautet: technisch ja, die Knackpunkte sind – wie so häufig – ökonomischer und politischer Natur. Das Ganze muss politisch gewollt oder zumindest akzeptiert und finanziert werden. Und man sollte klug mit vorhandenen Infrastrukturen umgehen.

Letztlich braucht es einen praktischen Willen zur Kooperation, auch global. Beispiel Afrika: Der Kontinent ist gesegnet mit Potenzialen für erneuerbare Energie, also Sonne, Wind, ungenutzte Flächen in der Wüste. Aber Afrika verfügt auch über Kohle, Gas und Öl. Und das ist häufig die billigere Lösung, vor allem wenn Volatilität im Stromangebot vermieden werden soll. Was wiederum Voraussetzung für eine **Industrialisierung** ist. Und die braucht z. B. Afrika bei der anstehenden Verdoppelung der Bevölkerung auf 2,4 Milliarden Menschen bis 2050 (fünfmal die Bevölkerung der EU) dringend. In jedem der nächsten drei Jahrzehnte wird in Afrika so viel an Gebäuden und Infrastrukturen gebaut werden, wie in Europa im ganzen letzten Jahrhundert. Bill Gates beschreibt in seinem Buch „How to Avoid a Climate Disaster“, dass in den nächsten Jahrzehnten weltweit im Umfang von 500-mal New York gebaut werden wird: jeden Monat ein New York.

Kurz: Wenn sich afrikanische Staaten für fossile Energieträger entscheiden, müssen die reichen Länder die Mehrkosten für CC mittragen und die Verantwortung dafür übernehmen, dass die Energiebereitstellung auf diese Weise auf eine klimagerechte Art und Weise geschieht. Dies entspricht der Logik des **Montrealer Protokolls**, über das seit 1987 das Ozon-Problem erfolgreich adressiert wurde. Das Ozonloch konnte durch den Einsatz neuer Technologien wieder geschlossen werden. Die reichen Länder haben die Differenzkosten übernommen. So kam es zu einem Konsens. Nach diesem Vorbild kann auch die Kooperation mit den Entwicklungs- und Schwellenländern in der Klimafrage gelingen.

Kapitel 2.8 der Basisdokumentation behandelt das technische Abfangen und die Speicherung von CO₂ (CCS), Kapitel 2.9 die Verwendungsoptionen von CO₂ (CCU).

5.4.2 Umgang mit Prozessindustrien am Beispiel Zement

Die sog. Prozess- oder Grundstoffindustrien Stahl, Chemie und Zement sind ein bedeutender Grundpfeiler für Wohlstand und Wertschöpfung. Sie sind Eckpfeiler einer modernen Gesellschaft und schaffen zahlreiche Arbeitsplätze und Produkte, die für Aufbau und Erhalt der Gesellschaft notwendig sind.¹¹⁶ Sie sind allerdings sehr energieintensiv und gehen mit hohen CO₂-Emissionen einher. Zur Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens ist die Klimaneutralität dieser Industriezweige deshalb notwendig. Herausfordernd ist, dass in den Grundstoffindustrien selbst eine Versorgung mit 100 % erneuerbaren Energien das CO₂-Problem nicht lösen würde. Dies liegt an Emissionen, die

116 Vgl. Schneider (2019).

im Zusammenhang mit Industrieprozessen und nicht mit Energieversorgung stehen.¹¹⁷ Deshalb wird auch von „**hard to abate**“-Sektoren gesprochen, also Industrien, die technologische Sprunginnovationen benötigen, um bis 2050 vollständig klimaneutral zu werden.

An dieser Stelle soll beispielhaft die Zementindustrie behandelt werden. Andere Industriezweige werden in Kapitel 3 der Basisdokumentation detailliert behandelt.

Das **Bindemittel Zement** ist einer der am häufigsten verwendeten Werkstoffe der Welt.¹¹⁸ Es ist ein wichtiger Bestandteil von Beton und nimmt damit eine entscheidende Position in der gesamten Wertschöpfungskette der Bauindustrie ein. Weltweit wurden in 2021 ca. 4,3 Milliarden Tonnen Zement hergestellt.¹¹⁹ Damit hat sich die seit 1990 produzierte Zementmenge in etwa vervierfacht. Obwohl sich der Verbrauch von Zement in den letzten Jahren etwas stabilisiert hat, ist mit einem weiteren Anstieg in den nächsten Jahrzehnten zu rechnen.¹²⁰ Dies vor allem aufgrund des starken Bevölkerungswachstums und der Urbanisierung, z. B. in Indien und weiten Teilen Afrikas.

Problematisch ist der hohe CO₂-Ausstoß bei der Zementproduktion. Im Jahr 2021 gingen ca. 7 % der weltweiten CO₂-Emissionen auf das Konto der Zementindustrie (2,9 Gigatonnen).¹²¹ Die **Dekarbonisierung des Zementsektors** ist jedoch eine große Herausforderung. Das liegt vor allem an den prozessbedingten Emissionen, die während der Zementklinkerproduktion beim Austreiben des CO₂ aus dem Kalkstein, der sogenannten Entsäuerung, unvermeidbar entstehen.¹²²

Der entscheidende Rohstoff zur Herstellung von Zement ist Kalkstein. Er wird zusammen mit Ton und Mergel von Steinbrüchen zu den Zementwerken gebracht, gebrochen und zu Rohmehl verarbeitet. Um die benötigten chemischen Eigenschaften für den Zement zu erhalten, muss der Kalkstein bei ca. 950 °C kalziniert und anschließend bei 1.450 °C gebrannt werden. So entsteht Zementklinker, das Vorprodukt von Zement. Die Kalzinierung des Kalksteins ist für ca. zwei Drittel der CO₂-Emissionen in der Zementproduktion verantwortlich.

Der Zement wird anschließend mit anderen Rohstoffen vermischt. So entsteht Beton. Das übrige Drittel der CO₂-Emissionen entstammt den Brennstoffen, die für die Kalzinierung und Erhitzung des Drehofens, in dem der Zementklinker gebrannt wird, benötigt werden. Im Gegensatz zum Kalzinierungsprozess sind die brennstoffbedingten fossilen CO₂-Emissionen durch einen Austausch von fossilen hin zu alternativen Brennstoffen teilweise vermeidbar. Wasserstoff ist aufgrund seines Verbrennungsverhaltens praktisch allerdings nicht einsetzbar. Der vollständige Ausbau unserer Energieversorgung in Richtung 100 % erneuerbarer Energien kann das CO₂-Problem der

117 Vgl. Schneider (2019).

118 Vgl. GCCA Association (2022).

119 Vgl. IEA (2022b).

120 Vgl. IEA und Cement Sustainability Initiative (2018).

121 Vgl. Borenstein, S. (2022).

122 Vgl. McKinsey (2020).

Zementindustrie folglich nicht lösen. Dafür sind andere Technologien notwendig. Bei der Zementherstellung sind dies neue Bindemittel, also der Austausch bzw. die Reduzierung des Klinkeranteils im Beton, und vor allem Carbon Capture and Usage/ Storage (CCUS).¹²³

CCS beinhaltet die Abscheidung, den Transport und die dauerhafte Speicherung der bei der Zementklinkerherstellung anfallenden CO₂-Emissionen. Bei CCU wird das abgefangene CO₂ weiterverwendet, etwa zur Herstellung von Methanol. Dieses dient dann z. B. der chemischen Industrie als Ausgangsprodukt oder als Vorstufe für low-carbon Kraftstoffe. Natürlich muss das bei der Verwendung von CCU-Produkten ggfs. freiwerdende CO₂ über Natur-basierte Lösungen oder DAC mit Speicherung kompensiert werden.

Kapitel 3.2 der Basisdokumentation behandelt die wesentlichen Prozessindustrien, darunter 3.3.2 die Zementindustrie.

5.5 Klimaneutrale Treibstoffe und Energieträger

5.5.1 Mobilität

Mobilität ist nicht nur ein **wesentliches Element von Freiheit**, sondern auch **zentral für Wertschöpfung**. Wirtschaftlich betrachtet ist bei heutigen Preisen Mobilität günstig im Verhältnis zu dem, was an Wertschöpfungspotenzial und Freiheit erschlossen wird.

Weltweit wurden 2020 gut 26 % (29,2 PWh) der Endenergie im Transportsektor verbraucht, davon gut 92 % basierend auf Erdöl, Elektrizität kam auf einen Anteil von 1,4 % (0,4 PWh).¹²⁴ Die Herausforderungen im Mobilitätsthema können nach dem jeweiligen Beitrag eines Verkehrsmittels an den Emissionen (ca. 16 % der global emittierten Klimagase bzw. ca. 8 Milliarden Tonnen CO_{2eg}) betrachtet werden, die ja aufgrund des weitgehenden Erdöleinsatzes dem jeweiligen Energieeinsatz entsprechen:

1. Pkw ca. 7 %
2. Lkw und schwere Lkw ca. 5 %
3. Flugzeuge ca. 2 %
4. Schiffe ca. 2 %

Die bisherige Entwicklung zeigt, dass es besonders schwerfällt, im Mobilitätssektor die CO₂-Emissionen zu senken. Und weltweit nehmen die Emissionen noch zu, weil die Mobilität erheblich ausgebaut werden wird, wenn in den wirtschaftlich zurückliegenden Staaten (Challenge-Gruppe) bis 2050

¹²³ Vgl. Skea (2022).

¹²⁴ Vgl. IEA (2020a).

zwei Milliarden Menschen hinzukommen und – auch gemäß SDG-Programmatik – der Wohlstand massiv ausgebaut werden soll, wie es ja auch das Ziel unseres Referenzszenarios ist. Das Streben nach höherem Wohlstand wird automatisch mit dem Wunsch nach mehr Mobilität verbunden sein. Wir rechnen damit, dass der Endenergiebedarf in den verschiedenen Mobilitätssektoren in Summe bis 2050 um ca. 37 % auf über 40 PWh zunehmen wird.

Erwartet werden in diesem Kontext massive Wachstumsprozesse im Bereich der (schweren) Lkw für den Einsatz in Afrika. Dazu gibt es entsprechende Prognosen der Afrikanischen Union. Erwartet werden bis zu 1 Million mittelschwere und schwere Fahrzeuge bis 2030.¹²⁵

Um globale Klimaneutralität zu erreichen, muss man die durch das Transportbedürfnis des Menschen entstehenden Emissionen reduzieren und möglichst klimaneutral stellen. Flugzeuge und Schiffe scheinen aus heutiger Sicht für Re-Fuels prädestiniert zu sein. Unter Re-Fuels verstehen wir entweder strombasierte E-Fuels oder auf Basis von Biomasse erzeugte Bio-Fuels. Beide sind in diesem Sinne erneuerbar/ renewable. Auf absehbare Zeit sind alternative Lösungen, wie die Nutzung von Wasserstoff oder Strom weder für die Schifffahrt noch für den Flugverkehr wirtschaftlich tragfähig. Die entscheidende Frage lautet: Was wird aus Pkw und Lkw, und was wird aus der riesigen Bestandsflotte? Heute sind die CO₂-Emissionen aus diesem Bereich etwa dreimal so hoch wie die aus Schiffs- und Flugverkehr zusammen. Deshalb sind Lösungen für diese Sektoren wichtig.

Grundsätzlich ist die Frage der Reduktion der Emissionen im Mobilitätssektor eine Frage nach den Möglichkeiten das heute überwiegend benutzte Erdöl und die darauf basierenden Treibstoffe zu ersetzen.

Optionen sind:

Elektrizität (Strom/ Elektronen): Vorteilhaft ist die gute Antriebseffizienz, nachteilig sind die komplexe Rohstoffsituation der Batterien, die im Vergleich zu chemischen Treibstoffen um den Faktor 5 - 8 niedrigere Energiedichte und die erforderliche umfangreiche, teure elektrische Infrastruktur, um ein effizientes Laden der Batterien zu ermöglichen. Hinzu kommt, dass die Reichweitenbegrenzung batterieelektrischer Antriebe ihren Einsatzbereich einschränkt. Außerdem ist in vielen Fällen die CO₂-Bilanz schlechter als beim Verbrenner, solange der Strommix eine belastende CO₂-Bilanz, z. B. aufgrund hoher Anteile von fossilen Energieträgern, aufweist. Auch die im Vergleich mit Verbrennern deutlich höheren Anschaffungskosten der Stromer machen diese für viele Menschen, vor allem in den Schwellen- und Entwicklungsländern, unerschwinglich.

Klimaneutrale Treibstoffe (Re-Fuels/ Moleküle): Ausgangsstoff ist stets Wasserstoff, der rein oder in Verbindung mit anderen Molekülen (Wasserstoff-Derivate) genutzt werden kann, z. B. als Methanol, synthetisches Benzin/ Diesel oder Kerosin ggfs. auch als synthetisches Erdgas oder Ammoniak.

¹²⁵ Vgl. African Union (2017).

Der Wasserstoff muss mit minimalem CO₂-Anfall gewonnen werden, dabei sind Elektrolyse, Reforming, Vergasung oder Pyrolyse die konkurrierenden Verfahren. E-Fuels können kostengünstig gespeichert, transportiert und fossilen Kraftstoffen beigemischt werden, um diese dann letztlich zu ersetzen. In Sachen Klima entfalten E-Fuels ihre Wirkung sofort – je höher die Beimischung zu konventionellen Treibstoffen, desto besser. **Die bestehende Energie- und Mobilitätsinfrastruktur ist weiter nutzbar.** Dazu zählen Pipelines, Tanker, Tankstellen, außerdem Flugzeuge, Schiffe und vor allem die weltweite Bestandsflotte von Pkw und Lkw. Bereits heute ist absehbar, dass E-Fuels bei der Lösung der Klima- und Energiefragen eine entscheidende Rolle spielen müssen. Unter den regenerativ hergestellten Treibstoffen gibt es neben E-Fuels auch Biomasse-basierte Kraftstoffe (z. B. aus Mais oder bevorzugt aus Abfällen wie Stroh, Gülle oder Altholz), kurz: Bio-Fuels. Beide Stoffgruppen können klimaneutral produziert werden.

Im Falle der Nutzung von kohlenstoffhaltigen Derivaten wie Methanol oder E-Benzin, etc. steht dabei die Herkunft des CO₂ im Zentrum der Debatte. In einer strikten Defossilisierungs-Philosophie sind nur CO₂ aus **Direct Air Capture** oder **biogenes CO₂** (Verbrennen von Biomasse und Abfangen des CO₂ – BECCS) zulässig. Diese Verfahren fallen unter das Konzept des Carbon Dioxide Removal (CDR). Es entsteht ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf, weil nur so viel CO₂ wieder freigesetzt wird, wie vorher eingefangen wurde. Anders ausgedrückt: Der Kraftstoff bringt eine CO₂-Gutschrift mit. Klimaneutralität ist dann aus naturwissenschaftlicher Sicht gegeben. So wie beim brasilianischen Ethanol, das aus **Zuckerrohr** gewonnen wird. In Brasilien war es 2020 möglich, 24 % des Endenergieverbrauchs im gesamten Transportsektor auf Basis von Bio- und Abfallkraftstoffen zu decken.¹²⁶

Eine Alternative ist die Nutzung des abgefangenen CO₂ aus Verbrennungsprozessen, speziell Punktquellen (fossilen Kraftwerken, Stahlwerken, Zementwerken). In diesem Fall muss der später bei der Verbrennung des E-Fuels entstehende Kohlenstoff für eine vollständige Klimaneutralität über Natur-basierte Lösungen (Aufforstung, Humusbildung in der Landwirtschaft) oder durch Direct Air Capture mit anschließender Einlagerung des CO₂, auch in Form von Mineralisierung, gebunden werden. Diese Removals sollten vor Nutzung des E-Fuels bereits erfolgt (oder eingeleitet) und bezahlt sein. Dabei ist eine saubere Buchführung notwendig. D. h. es wird eine CO₂-Gutschrift geschaffen und finanziert. Dies ist ein Hauptvorschlag im GES-Referenzszenario und betrifft für den Gesamtverkehr weltweit aktuell bis zu 5 - 8 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr. Positiv gewendet entsteht hier eine Quelle für die Finanzierung der Removals. Genutzt werden kann das Gigaprogramm Natur-basierte Lösungen des GES-Vorschlags während des Hochlaufs der E-Fuels.

¹²⁶ Vgl. Hamburg Open Online University (2021).

Teilweise wird die Nutzung von CO₂ aus Punktquellen fossiler Energieträger abgelehnt, weil ein Verharren in „alten“ Technologien befürchtet wird (ein **Lock-in-Effekt**).

Derzeit kostet mittels Elektrolyse auf Basis erneuerbarer Energien gewonnener E-Fuel etwa doppelt so viel wie eine vergleichbare Energiemenge fossiler Kraftstoff. Bei größeren Produktionsmengen, guten Standortbedingungen und sinkenden Strompreisen können so erzeugte Kraftstoffe jedoch deutlich günstiger werden. Das erfordert allerdings milliardenschwere Investitionen in die Produktionsanlagen. Optimistische Prognosen gehen davon aus, dass Kosten für E-Fuels von 1 - 2 Euro pro Liter erreichbar sind, ohne Steuern. Transportkosten haben hieran nur einen Anteil von wenigen Cent.

Dass E-Fuels im großen Maßstab hergestellt werden können, dass genug erneuerbare Energie, ausreichend Flächen und Ressourcen vorhanden sind, ist wissenschaftlich erwiesen. Die Schwierigkeiten des Hochlaufs von E-Fuels liegen woanders: in der Schaffung der rechtlichen Rahmenbedingungen, die die Klimaneutralität von E-Fuels anerkennt und sie von Klimaabgaben freistellt, im Ausbau der Produktionskapazitäten, zum Beispiel von Elektrolyseuren, in der Bereitstellung des Kapitals, in der Gestaltung der globalen Lieferketten, insbesondere mit den Schwellen- und Entwicklungsländern der Challenge-Gruppe, und nicht zuletzt in der Finanzierung von Vermeidung und Kompensation von CO₂, sprich: CCUS und Natur-basierte Lösungen.

In der EU wurde im März 2023 nach heftigem Ringen ein Kompromiss erzielt, der ein fast schon beschlossenes Verbrennerverbot ab 2035 (keine Zulassung mehr von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor) verhindert. Die Entwicklung könnte Relevanz haben für die anstehende Regulierung des **Energieeinsatzes bei Lkw** (insbesondere schweren Lkw).^{127,128}

5.5.1.1 Pkw

Gegenstand vieler Debatten ist die weltweit große Flotte der Pkw, zahlenmäßig mehr als eine Milliarde. Es wird erwartet, dass diese Zahl bis 2050 in Richtung 1,5 Milliarden anwachsen wird, während gleichzeitig der Hochlauf der **Batterieelektrik** stattfindet. In den Challenge-Ländern bestehen zum Teil Möglichkeiten, erneuerbaren Strom bereitzustellen. Es fehlen aber die Mittel, teure, elektrische Fahrzeuge zu erwerben. Auch fehlen meist die Voraussetzungen für das Aufladen der Fahrzeuge. Zudem werden dort häufig gebrauchte Fahrzeuge, die früher in den Industrieländern im Einsatz waren, genutzt. Sie sind in der Beschaffung vergleichsweise billig.

In der GES-Referenzlösung für Pkw (und den regionalen Verteilverkehr bei Lkw) sehen wir eine Rolle für Batterieelektrik für Fahrzeuge, die sich über vergleichsweise geringe Entfernungen

¹²⁷ Vgl. Global Energy Solutions (2022).

¹²⁸ Vgl. European Federation for Transport and Environment (2022).

bewegen, etwa in Städten, und auf eine solide Stromnetzinfrastruktur mit einem low-carbon Strom zugreifen können. Dazu gehört auch Strom auf fossiler Basis mit Carbon Capture und Nuklearstrom. Die Ladeinfrastruktur muss stimmen.

Wenn ein länderübergreifender Stromnetzausbau gelingt, kann u. U. auch in den rasch wachsenden Städten Afrikas und in weiteren Städten in Entwicklungs- und Schwellenländern Batterieelektrik zukünftig eine relevante Rolle spielen, da der erneuerbare Strom häufig günstig produziert werden kann. Wenn dann über Nuklearenergie (wird z. B. von Indien oder Brasilien genutzt) oder grün-fossile Lösungen das Volatilitätsproblem gelöst wird, ist der Sonnenstrom wirklich billig.

Auf dem Lande, für große Distanzen, bei schwierigen Witterungsbedingungen und bei ungenügender Infrastruktur sind auch Pkw mit E-Fuels eine **Alternative**. Porsche weist mit seinem Projekt **Haru Oni** in Südchile den Weg, auch wenn die Nutzung von Direct Air Capture bislang sehr teuer ist. Haru Oni soll pro Jahr 350 Tonnen E-Methanol und 130.000 Liter E-Benzin produzieren. Die Anlage ist im Dezember 2022 in Betrieb gegangen.¹²⁹ Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die Firma Obrist.¹³⁰ Obrist hat ein Konzept zur klimaneutralen Methanolherstellung vorgestellt. Dieses soll anschließend in einem ebenfalls von der Firma entwickelten seriellen Hybrid zum Einsatz kommen. Die Batterie des Fahrzeugs ist so ausgelegt, dass auch längere Strecken rein elektrisch gefahren werden können.

Es gibt aber auch den Weg über **biogenes CO₂**, sogenanntes BECCS. Wir sehen dafür das Sonderprogramm **Kurzumtriebsplantagen** mit einem Potenzial gemäß UN von mindestens 3 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr im Vollausbau. Ansonsten wird in den Planungen vieler Staaten auch CO₂ aus fossilen Quellen genutzt, insbesondere aus Kohlekraftwerken mit heute 10 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr. Fängt man das CO₂ ab und nutzt es zur Herstellung von z. B. Methanol (die Zielsubstanz im Obrist-Projekt), wird das CO₂ einmal recyclet, bevor es mit der Verbrennung des Kraftstoffs in die Atmosphäre geht. Somit wird eine Halbierung der Neuemissionen erreicht (je nach Betrachtung ist das Kohlekraftwerk oder die Verbrennung des Kraftstoffs klimaneutral, oder beide Anwendungen zur Hälfte). Um den Gesamtprozess vollständig klimaneutral zu gestalten, wird zusätzlich die verbliebene Hälfte über Removals aus der Atmosphäre entfernt. Diese müssen vor Nutzung des so erzeugten Kraftstoffs bereits erfolgt und bezahlt sein.

So produziertes Methanol, Methan oder Methanolbenzin verringern die individuellen CO₂-Abfangkosten, weil diese z. B. zwischen den Kohlekraftwerksbetreibern und den Abnehmern des Methanol-Benzins aufgeteilt werden können. Das CO₂ kann nämlich vor Ort von Kraftwerken übernommen werden – Weitertransport und Verpressung entfallen – und geht später mit der Verbrennung in die Atmosphäre. E-Fuels verbilligen so erheblich das Carbon Capture bei einem Teil der Kraftwerke (mehrere Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr), gleichzeitig lenken sie benötigte Finanzmittel in die

¹²⁹ Vgl. Stölzel, T., Martin, S. (2022).

¹³⁰ Vgl. OBRIST Group (2023).

Finanzierung von Removals zu vollständigen Klimaneutralitätsstellung. Wegen der zentralen Bedeutung der Mobilität erwarten wir, dass ein signifikanter Teil der im GES-Referenzvorschlag bis 2050 schon verfügbar gemachten Emissionsrechte aus Natur-basierten Lösungen (Wald und Humusbildung) in die Klimaneutralitätsstellung der synthetischen Kraftstoffe investiert werden wird.

In diesem Bereich würde dann auch ein substanzieller Teil des Elektrolyse-Wasserstoffs eingesetzt, der nach unseren Schätzungen bis 2050 erzeugt werden kann. Die Aussichten, schon bald genügend erneuerbaren Strom für zahlreiche Anwendungen verfügbar zu haben und zusätzlich auch noch eine reine Batterieelektrik-Flotte in der Größe der heutigen Flotte zu 100 % versorgen zu können, sind unrealistisch.

Zu guter Letzt gibt es in vielen Schwellenländern den wichtigen **Sonderfall der Tuk-Tuks und Kleinstfahrzeuge** (auch Zweiräder). Für sie bieten sich batterieelektrische Lösungen an, speziell in Ballungsräumen. Dieser Prozess läuft schon, insbesondere in großen Städten wie Delhi oder Dakar. Es handelt sich um sehr leichte Fahrzeuge und Taxi-artige Dienste, um Kosten zu senken und die Kapazität zu erhöhen. In diesen Megacities, vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern, sind die hohe **Luftverschmutzung** und der **Lärm** ohnehin enorme Belastungen für die Bevölkerung. Die Tuk-Tuks decken sehr viel innerstädtischen Verkehr ab. Ihre Elektrifizierung trägt dazu bei, die Luftbelastung zu verringern und den Straßenlärm zu senken. Die Fahrzeuge sind in der Regel sehr leicht, deshalb reichen vergleichsweise kleine Batterien. Der benötigte (grüne) Strom kann teils vor Ort, teils auch über Local Grids, erzeugt werden.

Es sei aber auch darauf hingewiesen, dass es in den Challenge-Ländern noch rund 600 Millionen Menschen ohne Stromanschluss gibt. In diesen überwiegend ländlichen Bereichen muss erst die Strominfrastruktur aufgebaut werden oder müssen hinreichend starke Local Grids etabliert werden, bevor der Einsatz eines Batterie-elektrischen Kleinfahrzeugs möglich ist.

5.5.1.2 Lkw

Lkw sind das Rückgrat unserer Ökonomie, es geht dabei weltweit um etwa 2 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr. Weltweit gibt es 300 Millionen Lkw, der Gütertransport wird in der EU zu 85 % über die Straße abgewickelt. Die Zahl der Lkw wird weiter wachsen, der kumulative CO₂-Ausstoß ist fast so hoch, wie der von einer Milliarde Pkw mit Verbrennungsmotor. Die Frage ist insbesondere, wie eine Transformation des Lkw-Sektors in Richtung Klimaneutralität aussehen kann. Diskutiert werden der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen oder in einem weitgehend unveränderten Verbrennungsmotor, Batterien, Strom aus Oberleitungen auf Autobahnstrecken und Re-Fuels.

In Europa steht dazu ein weiterer Regulierungsschritt der EU an. Nach dem Modell der Pkw soll, wenn auch zeitlich gestreckt, der Verbrennungsmotor verboten werden. Als Alternativen sieht man

insbesondere Wasserstoff und Batterien. Bei Lkw ist vor allem der Batterieweg als fast schon unrealistisch, auf jeden Fall unpraktikabel, anzusehen.

Bei GES argumentieren wir schon lange für Verbrennungsmotoren mit Re-Fuels – für Pkw wie für Lkw. Unser Partner im Lkw-Bereich ist die E.L.V.I.S. AG, eine Organisation von etwa 200 Speditionen mit zusammen etwa 20.000 schweren Lkw. Es gibt dazu das Dokument „Betrachtung verschiedener Antriebsformen für schwere Lkw“.¹³¹

Zusammenfassende Bewertung zu Lkw

Batterieelektrik und Oberleitungen bieten keine tragfähige Lösung. Man wird sich zuerst auf Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe im Verbrennungsmotor und im weiteren Verlauf auch auf die Brennstoffzelle konzentrieren.^{132, 133} Damit ist man in der Lage, mit eigenem Kraftstoff große Strecken zu überbrücken, um beliebig durch Europa fahren und überall handlungsfähig sein zu können. Interessant ist dabei aktuell **HVO**, ein **klimaneutraler Kraftstoff** auf Basis von Altfetten etc. Er wird heute im Bereich der Lkw erprobt,¹³⁴ z. B. führt Bosch aktuell einen Großversuch durch.

5.5.1.3 Luftfahrt

Bei der Dekarbonisierung der Luftfahrt führt auf absehbare Zeit kein Weg an Re-Fuels vorbei. Batterien sind zu schwer und die Leistungsdichte des Wasserstoffantriebs ist zu gering. Das EU-Parlament fordert bis 2025 eine Beimischungsquote von 2 % Re-Fuels zu konventionellem Kerosin, bis 2050 sollen es sogar 70 % sein.

In der Luftfahrt gibt es aus Sicherheitsgründen besondere Zulassungsverfahren für beigemischte, nichtfossile Treibstoffe (**SAF - Sustainable Aviation Fuels**). Kerosin-artige Komponenten können z. B. CO₂-neutral mit Synthesegas aus Biomasse-Vergasung und nachfolgender Fischer-Tropsch-Synthese oder durch mildes Hydrocracken von natürlichen Fetten und Ölen (auch Altfetten und -ölen) hergestellt werden. Die Verfügbarkeit ist derzeit gering, in entsprechende Produktionskapazitäten muss auch angesichts der gesetzlichen Vorgaben investiert werden.

5.5.1.4 Seefahrt

Auch in der Schifffahrt ist zu Re-Fuels keine ernstzunehmende Alternative in Sicht. Die erfolgversprechenden Kandidaten sind Ammoniak (NH₃) und Methanol (CH₃OH), als Zwischenschritt LNG anstelle von Schweröl.

¹³¹ Vgl. Global Energy Solutions (2023a).

¹³² Vgl. H2Accelerate (2022).

¹³³ Vgl. International Transport Forum (2022).

¹³⁴ Vgl. Wernicke (2022).

Die Vorgaben der IMO, der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation, sind: Bis 2050 soll der CO₂-Ausstoß der Ozeanschiffe weitgehend klimaneutral sein, trotz des prognostizierten zusätzlichen Anstiegs der Schiffstransporte in den kommenden Dekaden. Ob dies gelingt, hängt auch hier von der Verfügbarkeit der entsprechenden low-carbon-Kraftstoffe ab.

Immerhin sind erste, mit Methanol betriebene Schiffe in Betrieb und Reedereien wie Maersk haben begonnen, die Versorgung mit grünem Methanol selber aufzubauen. Ammoniak befindet sich derzeit noch in der Erprobungsphase, findet aber auch zunehmendes Interesse.

Kapitel 2.7 der Basisdokumentation beschäftigt sich mit klimaneutralen Kraftstoffen, Kapitel 3.3 mit allen Aspekten der Klimaneutralität der verschiedenen Verkehrssektoren.

5.5.2 Situation bei Gebäuden

Weltweit wurden 2020 gut 30 % (33,4 PWh) der Endenergie in den Bereichen private und öffentliche Gebäude sowie öffentliche Dienstleistungen verbraucht, davon bereits 32,5 % unter Nutzung von Strom, schwerpunktmäßig zur Klimatisierung, aber in einigen Ländern auch in Form von Wärmepumpen. Auch haben biologische Kraftstoffe und die Nutzung von abfallbasierter Energieerzeugung mit einem Anteil von 24,3 % einen signifikanten Beitrag geleistet, gefolgt von Erdgas mit 23,2 %. Erdöl spielte mit 7,4 % weltweit ebenfalls noch eine wichtige Rolle, gefolgt von Wärmenutzung mit 5,1 %.¹³⁵

Perspektivisch spielt der weitere Ausbau der strombasierten Versorgung der Gebäude sicherlich eine wichtige Rolle. Wir erwarten, dass dieser Anteil bis 2050 auf deutlich über 50 % zunehmen wird. Auch erwarten wir von der Tendenz eine globale Verdoppelung der Wärmenutzung, die aufgrund möglicher Effizienzeffekte in ihrer Bedeutung weiter gefördert werden sollte. In vielen Ländern wird bisher Fernwärme überwiegend auf Basis fossiler Energieträger erzeugt, hier ist perspektivisch die fortgesetzte Nutzung bei einem entsprechenden Ausbau der CCS-Infrastrukturen möglich.

Daneben wird die Nutzung von biologischen Kraftstoffen und abfallbasierte Energieerzeugung bedeutsam bleiben, auch wenn eine weitere Steigerung ihres Beitrags nicht erwartet wird. Ob sich Wasserstoff als Energieträger zur Versorgung von Immobilien in großem Umfang etablieren wird, bleibt abzuwarten. Zum einen ist die Verfügbarkeit von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff begrenzt, so dass hier eher die Mobilitätsbereiche im Vordergrund stehen werden, zudem bleiben auch die Anforderung an eine alle Sicherheitsrisiken eliminierende Installation hoch. Auch erwarten wir, dass langfristig noch ein wesentlicher Teil von Gebäuden über Erdgas energetisch versorgt wird, da sowohl Verfügbarkeit als auch Logistik dies begünstigen. Letztlich werden auf Basis von Erdgas verbleibende Emissionen über Natur-basierte Lösungen kompensiert werden müssen, es sei denn

¹³⁵ Vgl. IEA (2020a).

es kommt ein E-Fuel-basiertes Methan zum Einsatz, wobei hier die Mengen perspektivisch begrenzt bleiben werden.

Die Rolle von Holz als Baumaterial wird heute von verschiedenen Seiten hervorgehoben. Den Möglichkeiten in diesem Bereich sind jedoch enge Grenzen gesetzt.¹³⁶

Kapitel 3.4 der Basisdokumentation behandelt die relevanten Aspekte zum Thema Wohnungswirtschaft und Gebäude im Detail.

5.6 Beseitigung technischer Methan-Leckagen

Methan ist eines der wichtigsten Klimagase mit einer vielfach höheren negativen Klimawirkung im Vergleich zu der von CO₂. Methan ist heute das zweitwichtigste Klimagas (16 % der weltweiten Emissionen). Die Methankonzentration in der Atmosphäre nimmt wie die des CO₂ seit Beginn der Industrialisierung kontinuierlich zu. Methanemissionen entstehen sowohl aus natürlichen als auch – und zwar in größerem Umfang – aus anthropogenen Quellen. Eine Kontrolle und Absenkung der anthropogenen Methan-Emissionen hat eine hohe Hebelwirkung im Hinblick auf eine Beschränkung der Erderwärmung.

Das im Pariser Klimavertrag vereinbarte Ziel, die Erderwärmung infolge des Klimawandels auf 1,5°C gegenüber vorindustriellen Zeiten zu begrenzen, ist nur erreichbar, wenn der derzeitige jährliche Ausstoß von Methan bis 2030 um mindestens 45 % verringert wird.¹³⁷ Über 100 Länder haben auf der COP26 den Global Methane Pledge unterzeichnet und verpflichten sich, ihre Methan-Emissionen innerhalb von zehn Jahren wenigstens um 30 % gegenüber dem Stand von 2020 zu reduzieren. Die Initiatoren des Global Methane Pledge sprechen von einem möglichen Rückgang der Erderwärmung um mindestens 0,2 - 0,3°C bis 2050, wenn das Abkommen in Bezug auf Methan global eingehalten wird.¹³⁸

Methan-Emissionen

Der Methangehalt der Atmosphäre ist von 730 ppb (parts per billion) im Jahr 1750 auf heute über 1.800 ppb angestiegen. Dies ist ein Anstieg um 150 Prozent und wie beim CO₂ der höchste Stand seit mindestens 800.000 Jahren, ermittelt durch Auswertung von Gaseinschlüssen in Bohrkernen. Der Anstieg der Methankonzentration in der Atmosphäre hat 2021 einen Rekordwert von 1.876 ppb erreicht, wobei die anteilige Zuordnung zu anthropogenen oder natürlichen Emissionsquellen nicht geklärt ist.

¹³⁶ Vgl. Global Energy Solutions (2022).

¹³⁷ Vgl. Copernicus Climate Change Service (2022).

¹³⁸ Vgl. COP26 (2021).

Methanemissionen stammen aus Feuchtgebieten, Seen, aber auch aus der Förderung von Kohle, Öl und Gas, von Deponien und vor allem aber auch aus der Landwirtschaft. Die Gesamtemission wird auf ca. 600 Millionen Tonnen (Jahr 2017) geschätzt, davon ca. 370 Millionen Tonnen aus anthropogenen Quellen und ca. 230 Millionen Tonnen aus natürlichen Quellen.

Methansenken, Methanbilanz und Prognosen

In Zusammenhang mit den Veränderungen der Methankonzentration in der Atmosphäre nach dem Ausbruch des Vulkans Pinatubo in 1992 wurden natürliche Methansenken näher untersucht. Im Wesentlichen wird Methan durch chemische Reaktion mit OH-Radikalen und Ozon in der Troposphäre (ca. 80 %), zum kleineren Teil in der Stratosphäre (15 %) abgebaut. Die wichtigste Senke ist die chemische Reaktion mit dem Hydroxyl-Radikal OH in der Troposphäre: $\text{OH} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Die Reaktion von Methan mit OH-Radikalen führt zur Bildung von Wasser und Methylradikalen, die über einige weitere Zwischenschritte letztendlich zu CO_2 umgesetzt werden. Durch diesen Prozess werden pro Jahr ca. 500 Millionen Tonnen Methan aus der Atmosphäre entfernt. Die Aufnahme von Methan im Boden oder in Ozeanen und bakterieller Abbau ist dagegen vernachlässigbar (5 %). Die Gesamtmenge Methan, die über Senken abgebaut wird, wird insgesamt auf unter 600 Millionen Tonnen pro Jahr geschätzt.

Optionen zur Verminderung von Methanemissionen

Methan-Emissionen sind im Vergleich zu CO_2 -Emissionen häufig diffuser Natur und daher schwieriger zu fassen und zu vermindern. Allein in den USA emittieren 600.000 Erdgas- und Erdölbohrungen, weltweit ein Viehbestand von ca. 1,5 Milliarden Rindern und 6.000 verlassene Kohleminen Methan.

Konkrete Maßnahmen sind im Wesentlichen die Abdichtung von Leckagen und das Abfangen von Restgasen bei der Produktion fossiler Energie und bei Deponien. Graduelle Verminderung von Methanemissionen sind in der Landwirtschaft und der Viehhaltung möglich. Mit bekannten Maßnahmen und Technologien könnten die Methan-Emissionen in dieser Dekade um bis zu 57 % gesenkt werden, ein Viertel davon ohne zusätzliche Netto-Kosten durch Erhöhung von Wirkungsgraden, Schließung von Leckagen und Methan-Rückgewinnung. Dies wäre nur erreichbar, wenn alle Emissionsquellen gleichzeitig, weltweit und mit hohem finanziellem Aufwand angegangen würden.

Öl und Gas

Methanemissionen entstehen bei der konventionellen Förderung von Erdgas und Erdöl als Begleitgase sowie aus unkonventionellen Quellen wie Schiefergas, so genanntes „tight gas“ aus gasdurchlässigen Sedimenten sowie Kohlebegleitgas.

Die Methanverluste in der Öl- und Gasindustrie werden von der IEA mit ca. 75 Millionen Tonnen pro Jahr beziffert. Bei Erdgas beträgt die Verlustrate bis zu 1,7 % der geförderten Gesamtmenge, in Russland sollen die Verluste bis zu 2,5 % der geförderten Menge betragen.

Besonders hoch sind die Emissionen beim Fracking mit Methanverlusten, die für die USA mit bis zu 3,7 % veranschlagt werden. Die zahlreichen Leckagen reichen bis in städtische Netze, so gelangen z. B. rund 286 Tonnen Methan jährlich allein über das Hamburger Gasnetz in die Atmosphäre.

Ab einer Verlustrate von 3,2 % trägt Erdgas stärker zum Klimawandel bei als Kohle. Hauptmaßnahmen zur Verminderung der Methanemissionen sind die Suche und Schließung von Leckagen an Bohrlöchern, Pipelines, Pumpen und Kompressoren entlang der gesamten Erdgas- und Öl-Prozesskette. Dies betrifft vor allem die Rückgewinnung von Erdölbegleitgasen, Erneuerung von Fackeln und Methan-Rückgewinnung aus Tanks und Blowdown-Behältern bis hin zu Tankstellen und lokalen Gasnetzen.

Kohle

Die Emissionen von Methan beim Kohleabbau, sowohl unter Tage, im Tagebau, aber auch aus stillgelegtem Abbau, sind erheblich. Schätzungen der IEA belaufen sich auf ca. 40 Millionen Tonnen pro Jahr, eine Studie des US JBCRI nennt 114 Millionen Tonnen pro Jahr aus aktivem und stillgelegtem Kohleabbau. Nur ein geringer Teil wird aufgefangen und energetisch genutzt. Damit wären die Kohle-bezogenen Emissionen höher als die der Öl- und Gasindustrie.

China ist geographisch der Schwerpunkt der Emissionen. Die Entfernung von Grubengasen („schlagende Wetter“, Flözgas) beim unterirdischen Kohleabbau durch Belüftung („Bewetterung“) ist aus Sicherheitsgründen seit langem Stand der Technik. Der Methangehalt ist allerdings für eine weitere Verwertung zu gering und kann über eine katalytische Abgasreinigung zu CO₂ oxidiert werden.

Grubengas entweicht aber auch aus bereits stillgelegten, nicht gefluteten Kohlebergwerken. Dieses kann abgesaugt und thermisch verwertet werden. In Deutschland wird die Menge auf ca. 1,5 Millionen Kubikmeter pro Jahr geschätzt und erzeugt eine Leistung von 200 MW.

Zusammenfassung und Ausblick

Die detaillierteste Untersuchung über Status und Minderungsmaßnahmen der Methanemissionen ist die 2021 veröffentlichte UNEP/ CCAC-Studie „Global Methane Assessment and Costs of Mitigating Methane Emissions“. Mit bekannten technischen Möglichkeiten könnten die Methanemissionen bis zum Ende der Dekade um 180 Millionen Tonnen pro Jahr vermindert werden. Dies würde einer Absenkung des Treibhauseffekts um 0,3°C entsprechen. Bereits geplante und eingeleitete Maßnahmen umfassen ca. 120 Millionen Tonnen pro Jahr, wobei der Sektor Öl/ Gas/ Kohle die Hälfte beiträgt – auch weil es sich um die am wenigsten diffusen Emissionsquellen handelt.

In mehreren anderen Studien wird das Potenzial der Methanemissionsminderung bis 2030 mit 29 - 57 Millionen Tonnen pro Jahr bei Öl und Gas, 12 - 25 Millionen Tonnen pro Jahr bei Kohle, 29 - 36 Millionen Tonnen pro Jahr bei Abfällen und Abwasser, 6 - 9 Millionen Tonnen pro Jahr beim Reisanbau und 4 - 42 Millionen Tonnen pro Jahr bei der Viehhaltung angegeben. Dies wären im Durchschnitt ca. 113 Millionen Tonnen pro Jahr mit jeweils weiten Bereichen.

Relevanz für die Referenzlösung

Methan ist nach CO₂ das zweitwichtigste Klimagas. Die Senkung von Methanemissionen entlang der Wertschöpfungsketten, vor allem die so genannten Vorkettenemissionen, sind bei weniger diffusen anthropogenen Quellen wie im Öl- und Gas-Sektor und einigen Bereichen der Landwirtschaft wie Reisanbau und Viehhaltung relativ leicht erreichbar und haben eine große Hebelwirkung. Eine durchdachte Strategie zur Reduzierung der Methanemissionen muss daher zwingend Teil der heutigen Klimaschutzaktivitäten sein, auch wenn eine „Methan-Neutralität“ letztlich nicht erreichbar ist. Zu beachten, aber schwer zu quantifizieren sind die Risiken einer unkontrollierten Methanfreisetzung aus natürlichen Quellen im Zuge allgemeiner Klimaveränderungen, die zum Auftauen von Permafrostgebieten und wärmeren Meeresströmungen und Zersetzung von Methanhydraten führen.

5.7 Natur-basierte Lösungen

Neben den zuvor beschriebenen technischen Möglichkeiten zur Vermeidung von CO₂ spielen die Natur-basierten Lösungen für den Klimaschutz eine entscheidende Rolle für die Realisierung von Net Zero. In diesem Kapitel werden die Lösungselemente beschrieben, die den Natur-basierten Lösungen für den Klimaschutz zuzuordnen sind. Die Natur ist eine **bedeutende CO₂-Senke** und es geht darum, diese **Absorptionsfähigkeit der Biosphäre zu erhalten, zu entlasten und auszubauen**. Die terrestrischen und marinen Ökosysteme speichern heute pro Jahr insgesamt bis zu **20 Milliarden Tonnen CO₂**.¹³⁹ Darüber hinaus besteht ein zusätzlich erschließbares Speicherpotenzial von mindestens 10 Milliarden Tonnen CO₂,¹⁴⁰ was etwa einem Viertel der heutigen weltweiten CO₂-Emissionen im energienahen Bereich entspricht. Andere Quellen deuten darauf hin, dass das zusätzliche Speicherpotenzial der Natur bis 2050 um 15 Milliarden Tonnen CO₂ ausgeweitet werden könnte, wenn entsprechende Maßnahmen ergriffen werden.¹⁴¹

In der vorliegenden Arbeit wird von einer jährlichen Absorption von 14 - 20 Milliarden Tonnen CO_{2eq} und einem zusätzlich erschließbaren Potenzial von ca. 10 Milliarden Tonnen CO_{2eq} ausgegangen. Für den weiteren Verlauf der Betrachtungen, insbesondere der Ausgangssituation für die GES-

¹³⁹ Vgl. Friedlingstein et al. (2022), FAO (2022).

¹⁴⁰ Vgl. Girardin et al. (2021).

¹⁴¹ Vgl. UNEP (2022a).

Referenzlösung, verwenden wir den konservativen Wert von 14 Milliarden Tonnen CO_{2eq}. Im Zuge des Ausgleichs der unter normalen Umständen entstehenden Emissionen durch den Wohlfahrtsaufbau der Challenge-Gruppe, wird dieser Wert sukzessive angehoben.

Doch die hohe Bedeutung für den Klimaschutz ist nicht der einzige Beweggrund dafür, dass die Natur-basierten Lösungen ein zentrales Element der Referenzlösung sind.¹⁴² Sie sind auch prädestiniert, **Entwicklung im Sinne der Agenda 2030** zu ermöglichen.¹⁴³ Die Land- und Forstwirtschaft sind gerade in Entwicklungsländern bedeutende Wirtschaftszweige, weshalb sie einen wichtigen Hebel für die Verbesserung der ökonomischen Situation in Entwicklungsländern darstellen. Schätzungen des Weltwirtschaftsforums zufolge könnten durch gezielte Förderungen und Rahmenbedingungen für Natur-basierte Lösungen in diesen Bereichen bis 2030 10 Billionen US-Dollar neue Wertschöpfung und 395 Millionen neue Arbeitsplätze entstehen.¹⁴⁴

Die Natur lässt sich in einer noch viel prinzipielleren Weise als **Grundlage für Wertschöpfung** verstehen. Bezeichnet man sie in ökonomischem Duktus als Naturkapital, wird klar, was gemeint ist. Wie auch andere Kapitalarten, z. B. Finanz-, Sach- und Humankapital, ist sie notwendige Voraussetzung für jedwede Form von Wertschöpfung, auch jenseits der Land- und Forstwirtschaft. Wie sehr die gesamte Wertschöpfung von der Natur abhängig ist, verdeutlichen die nachfolgenden Zahlen: Nach Angaben des Weltwirtschaftsforums hängt mehr als die Hälfte des weltweiten Bruttoinlandsprodukts, also mehr als 44 Billionen Dollar, von der Natur, also von Wäldern, Meeren und anderen Lebensräumen ab.¹⁴⁵ Vor diesem Hintergrund schätzen manche Stimmen die Gefahr des Verlustes der Biodiversität für die Stabilität und den Wohlstand der Menschheit als wahrscheinlich größer ein als den Klimawandel.¹⁴⁶ An den Klimawandel kann sich das (menschliche) Leben bis zu einem gewissen Grad anpassen. Wird aber das Leben in Form der biologischen Vielfalt zerstört, ist eine Anpassung schwierig. Eine Stabilisierung der Ökosysteme muss daher ein Gebot der Stunde sein.

In der Folge werden die Ansätze aus dem Bereich der Natur-basierten Lösungen beschrieben, die Teil der Referenzlösung sind und zum Erreichen eines Net Zero bis spätestens 2070 beitragen. Dies bedeutet nicht, dass es nicht noch weitere einflussreiche Entwicklungen im Bereich der natürlichen CO₂-Senken gibt, auf die unbedingt positiver Einfluss genommen werden sollte. Exemplarisch seien der Moorschutz oder auch der Schutz der borealen Wälder der Nordhalbkugel genannt. Alleine eine Betrachtung des zu kippen drohenden größten Mooregebiets der Welt im Kongogegebiet verdeutlicht die große Bedeutung der Moore für den Klimaschutz: Dort sind rund 30 Milliarden Tonnen CO₂

¹⁴² Vgl. ILO, UNEP & IUCN (2022).

¹⁴³ Vgl. Smith et al. (2019).

¹⁴⁴ Vgl. WEF (2020).

¹⁴⁵ Vgl. Gelinsky (2022).

¹⁴⁶ Vgl. IPBES (2019).

gespeichert.¹⁴⁷ Die borealen Wälder gaben in der Folge von Trockenheit und Waldbränden in 2021 so viel CO₂ ab wie niemals zuvor.¹⁴⁸ Es ist unerlässlich, dies zu vermeiden.

Die beschriebenen Bausteine aus dem Bereich der Natur-basierten Lösungen gehen mit einem **gigantischen Flächenbedarf von mehr als 2 Milliarden Hektar** einher. Es gibt diese Flächen: Von dem Viertel der weltweiten Landflächen, die heute degradiert sind, haben mehr als 2 Milliarden Hektar das Potenzial zur Restaurierung.¹⁴⁹ Alleine die entwaldeten Flächen, die wieder aufgeforstet werden könnten, machen 2 Milliarden Hektar aus.¹⁵⁰

Die nachfolgende Abbildung visualisiert die großen Veränderungen in der Flächennutzung in den letzten 10.000 Jahren, die heute dazu führen, dass die umfangreichen Maßnahmen im Bereich der Natur-basierten Lösungen in keinem Fall an einem Flächenengpass scheitern:

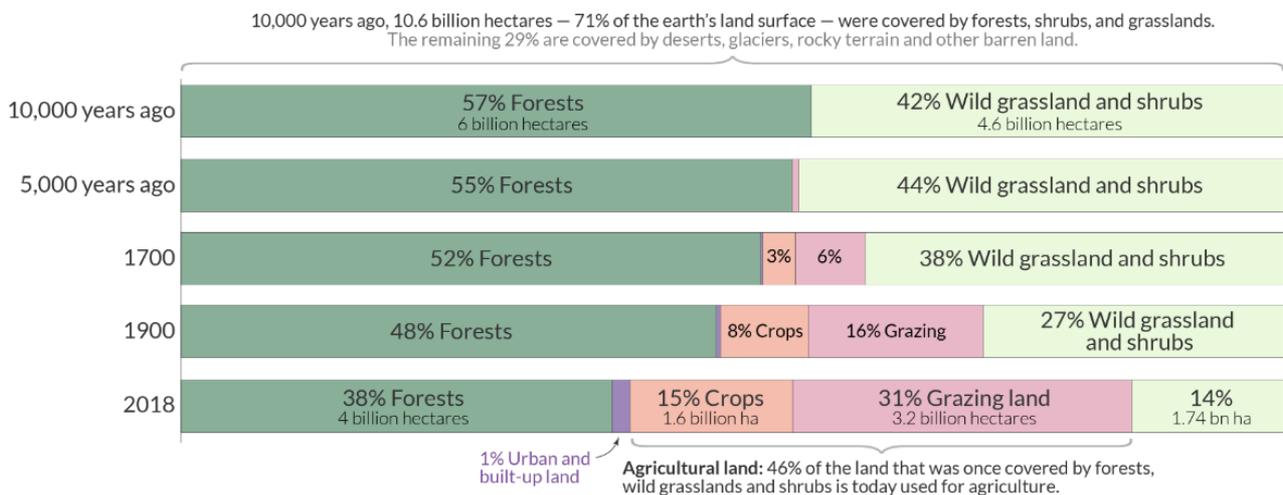


Abbildung 6: Veränderung der Landnutzung in den letzten 10.000 Jahren

Quelle: FAO

Kapitel 2.10 der Basisdokumentation erläutert ausführlich wichtige Aspekte der Natur-basierten Lösungen.

5.7.1 Erhalt der tropischen Regenwälder

Von großer Bedeutung ist ein breit angelegtes Programm zum Erhalt der verbliebenen tropischen Regenwälder. Unter Aspekten des Klimaschutzes geht es um den **Erhalt ihrer CO₂-Speicherfähigkeit**. Aus dem Blickwinkel der **Biodiversität** geht es um den Erhalt der Ökosysteme mit der höchsten

¹⁴⁷ Vgl. Garcin et al. (2022).

¹⁴⁸ Vgl. Zheng et al. (2023).

¹⁴⁹ Vgl. Vgl. WVI (2022).

¹⁵⁰ Vgl. WRI (2014).

Dichte and biologischer Vielfalt. Der tropische Regenwald speichert pro Hektar bis zu 700 Tonnen CO₂. Eine andere Faustformel beläuft sich auf 1 Tonne CO₂ je Kubikmeter Regenwald. Im Mittel speichern tropische Wälder 400 Tonnen CO₂ pro Hektar (inklusive der den Regenwald umgebenden Wälder, z. B. Sekundärregenwälder).

In den letzten Jahren gingen im Mittel 10 Millionen Hektar Wald pro Jahr verloren,¹⁵¹ darunter ca. 4 Millionen Hektar tropische Regenwälder.¹⁵² Gut 10 % der weltweiten Emissionen gehen auf Entwaldung zurück. Sie belaufen sich auf etwa 4 Milliarden Tonnen CO₂.

Die Welt verfügt heute noch über etwa 1,8 Milliarden Hektar tropischen Regenwald.¹⁵³ Diesen zu erhalten entspräche bei konservativer Schätzung (500 Tonnen gespeichertes CO₂ je Hektar) einer CO₂-Emissions-Vermeidung im Umfang von etwa 900 Milliarden Tonnen CO₂ im Vergleich zu einer vollständigen Abholzung.

Die verbliebenen Wälder und insbesondere die Regenwälder zu erhalten, ist also ein unstrittiges Gebot der Stunde. Hinzu kommen weitere Argumente, die diese Notwendigkeit untermauern. Wälder und insbesondere Regenwälder sind nicht nur die „Hotspots“ der Biodiversität, sondern außerdem die Lebensgrundlage für weltweit 1,6 Milliarden Menschen.¹⁵⁴

Der Regenwalderhalt ist in der Referenzlösung die einzige Komponente, bei der es um eine **negative Pflicht** geht, nicht um eine positive Pflicht: Es geht darum, etwas Schädliches zu unterlassen, und nicht darum, etwas Förderliches zu tun. Damit ist offensichtlich, dass dieser Baustein – zumindest in prinzipieller Hinsicht – derjenige ist, der am schnellsten umzusetzen ist: Es gibt keine vorbereitenden Maßnahmen, keine Entwicklungszeiten und keine Hochlaufkurven. Betrachtet man jedoch die Situation in den betroffenen Staaten, insbesondere Brasilien, Indonesien und Kongo, wird schnell deutlich, dass entscheidende Voraussetzungen für den Erhalt der Regenwälder heute nicht erfüllt sind.

Zur Erreichung von Net Zero weltweit im Jahr 2070 trägt der Regenwalderhalt in der Referenzlösung im Umfang von jährlich 3 Milliarden Tonnen CO₂ zur Reduktion von Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderung bei. In diesem Zeitraum geht es von 2025 – 2070 um 45 Jahre, also insgesamt um etwa 135 Milliarden Tonnen vermiedenes CO₂. Auf diese Weise wird der natürliche CO₂-Puffer zugleich erhalten und entlastet.

Die jüngsten Entwicklungen zeigen, dass sich die Situation im Bereich des Regenwalderhalts zuspitzt. Brasilien, der Kongo und Indonesien gründeten Ende 2022 eine Allianz, die von den Industrieländern Entschädigungszahlungen für die Reduzierung der Abholzung ihrer Wälder einfordert.

¹⁵¹ Vgl. FAO (2022a).

¹⁵² Vgl. statista (2022).

¹⁵³ Vgl. FAO (2022a).

¹⁵⁴ Vgl. BMZ (2017).

Fließen diese Mittel nicht, drohen sie die Flächen für anderweitige Nutzungen zu versteigern.¹⁵⁵ Zur Lösung der bestehenden Herausforderungen im Klimabereich muss gehören, einen Weg zu finden, der die geforderten Zahlungen beinhaltet. Umgekehrt bedeutet die Konzentration der Regenwälder auf im Wesentlichen nur drei Staaten, dass es einfacher möglich sein dürfte, entsprechende Verträge zum Regenwalderhalt auszuhandeln, als wenn es sich wie beim Klimathema um die Gesamtheit der Staatengemeinschaft handelt. Nüchtern betrachtet könnten eine kleine Gruppe der finanzstarken Staaten den Regenwald zusammen mit den drei Regenwald-Staaten angehen.

5.7.2 Aufforstung auf 1 Milliarde Hektar degradierter Flächen

Ein weiterer Baustein ist die Aufforstung auf 1 Milliarde Hektar degradierter Böden zur möglichst dauerhaften Speicherung von perspektivisch jährlich 5 Milliarden Tonnen CO₂, die in einem Hochlauf in einem Zeitraum von 25 Jahren bis 2050 erreicht werden (Afforestation). Das bedeutet, dass im Mittel 40 Millionen Hektar pro Jahr aufzuforsten sind. Die Bäume werden im Mittel nach 40 Jahren geerntet. Um in einen „steady state“ zu gelangen, sollten direkt nach der Ernte neue Bäume gepflanzt werden.

Es geht um **Nutzwälder** und damit um die Herstellung von **Anbau-Biomasse**, die über viele Jahre kaskadenartig, also mehrfach genutzt werden sollte, um eine **dauerhafte CO₂-Bindung** zu erreichen. Dabei sollte das Holz nicht verbrannt, sondern stofflich genutzt und am Ende seines Lebenszyklus zu Biokohle pyrolysiert und in die Böden eingebracht werden. Auf diese Weise entstehen echte CO₂-Removals. Das CO₂ wird dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt. Zudem leistet die Biokohle einen erheblichen Beitrag zur Bodenverbesserung, vgl. Kapitel 5.6.3.

Sollte Restholz thermisch genutzt werden, sollte es klimaneutral verbrannt werden, z. B. als Pellets. Das anfallende CO₂ sollte abgefangen werden. Es hat einen ökonomischen Wert und stellt als biogenes CO₂ einen Ausgangspunkt z. B. für die Produktion synthetischer Kraftstoffe dar, vgl. Kapitel 5.5.

Wenn bewirtschaftete Wälder unter der Maßgabe „maximale CO₂-Wirkung“ optimiert werden, ist es möglich, dass diese deutlich mehr CO₂ binden als Naturwälder es können.¹⁵⁶ Dies liegt u. a. daran, dass umfallende und vermodernde Bäume wieder CO₂ freisetzen. Hier muss eine sinnvolle Balance zwischen ökonomischer Bewirtschaftung und Forderungen an den Erhalt der Biodiversität gefunden werden, z. B. in Hinblick auf das Pflanzen von Monokulturen.

Dass ein derart großflächig angelegtes Aufforstungsprogramm **Wertschöpfung** erzeugt und viele **Arbeitsplätze** schafft, versteht sich von selbst. Die neben dem positiven Klimaeffekt resultierenden

¹⁵⁵ Vgl. FAZ (2022).

¹⁵⁶ Vgl. Luick et al. (2021).

umfangreichen Entwicklungswirkungen unterstreichen die Bedeutung eines solchen Bausteins für die Gesamtlösung.

5.7.3 Restaurierung von 1 Milliarde Hektar degradierter Böden

Ein weiterer sehr flächenintensiver Baustein ist die Restaurierung von 1 Milliarden Hektar degradierter Böden zur möglichst dauerhaften Speicherung von perspektivisch jährlich 5 Milliarden Tonnen CO₂, die in einem Hochlauf in einem Zeitraum von 25 Jahren bis 2050 erreicht werden (Soil Improvement). Diese Flächengröße deckt nur einen kleinen Anteil der weltweiten Flächen ab, für die ein großes Potenzial besteht, den CO₂-Gehalt des Bodens zu steigern, der infolge von Bodendegradierung in den letzten Jahren immer weiter abgesunken ist.¹⁵⁷ Auch die angestrebte CO₂-Menge von 5 Tonnen pro Hektar ist konservativ geschätzt, ist es doch möglich, bis zu 25 Tonnen CO₂ in einem Hektar Boden zu speichern.¹⁵⁸

Zentral geht es um den **Aufbau von Humus**, der nicht nur Kohlenstoff, sondern auch wichtige Pflanzennährstoffe und Wasser speichert, und wesentlich zu einem ausgeglichenen, gesunden Boden beiträgt. Es gibt drei Möglichkeiten, Humus aufzubauen. Diese sind die Maximierung der Vielfalt der angebauten Pflanzen und Kulturen, die Maximierung der Photosyntheseleistung durch Förderung des Pflanzenwachstums und eine Minimierung der Bodenstörungen durch häufige Bearbeitung und chemische Dünger. Es geht um eine gärtnerische Bearbeitung der Böden im landwirtschaftlichen Kontext.

Ein weiteres Element ist die Einbringung von **Biokohle/ Pflanzenkohle** in die Böden. Die Pflanzenkohle entsteht durch Pyrolyse z. B. von Ernteresten und anderen biogenen Abfallstoffen, die nicht im Bereich der Ernährung benötigt werden. Wenn verhindert wird, dass die Biomasse verbrannt wird und sie stattdessen als Kohle in die Böden eingebracht wird, entstehen auf diese Weise echte CO₂-Removals. Das CO₂ wird dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt, da die Pflanzenkohle in Wesentlichen über Jahrzehnte bis Jahrhunderte stabil ist und nicht abgebaut wird. Hier kann man mit 0,3 % pro Jahr an Abbau rechnen, abhängig von der Qualität der Kohle und den regionalen Bedingungen.

Ein derartiges Programm kann in seiner Wirkung kaum überschätzt werden. Wie auch im Bereich der Aufforstung entstehen **Wertschöpfung** und **Arbeitsplätze**. Zudem wird ein großer Beitrag zur Ernährungssicherung geleistet, weil die Ertragskraft der Böden entscheidend verbessert wird. Außerdem enthalten die Böden einen riesigen Anteil an Biodiversität, die aufgrund ihrer Komplexität bislang noch nicht zur Genüge erforscht werden konnte.

¹⁵⁷ Vgl. FAO (2022b)

¹⁵⁸ Vgl. Modell Ökoregion Kaindorf (2023).

5.7.2 und 5.7.3 sehen wir in unserer Lösung als weiteren Joker. Im Hochlauf werden nach spätestens 40 Jahren etwa 10 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr zusätzlich zu all unseren sonstigen Aktivitäten der Atmosphäre entzogen. Die Programme erleichtern die ambitionierten Zielsetzungen sehr. Denn: Je näher man an Net Zero ist, umso teurer wird die Vermeidung jeder weiteren Tonne CO₂. Das kann man sich bei Nutzung des Potenzials der beschriebenen Ansätze schenken. Es ist so, als würden wir uns ein Ventil schaffen.

Interessanterweise werden unter einer vernünftigen Regulierung, die global favorisiert wird, private Akteure viel Geld für die entsprechenden Emissionsrechte zahlen. Das Programm rechnet sich also selber, wenn die Governance-Bedingungen geschaffen werden. Dadurch erleichtert das Programm die Zielerreichung in unserer anspruchsvollen Referenzlösung. Natürlich hat es auch eine Chance, das Programm zu nutzen, um Net Zero für die Welt noch schneller und auch das 2°C-Ziel in der Nähe von 2050 zu erreichen. Man muss sich aber im Klaren darüber sein, dass das sehr teuer werden wird, da die Zahlungen von sog. Emissionsrechten entfallen. Der Puffer wäre dann weg, stattdessen kommen große Kosten hinzu.

5.7.4 Weitere Potenziale im Bereich der Natur-basierten Lösungen

Außerdem existieren über die genannten je 1 Milliarde Hektar für Aufforstung und Bodenverbesserung weitere Potenziale für Negativemissionen aus dem Bereich der Natur-basierten Lösungen. Die riesigen **borealen Wälder** wurden bereits erwähnt. Abgebrannte Flächen und zusätzliche Flächen sollten wieder in Stand gesetzt werden, was insbesondere für die großen Gebiete in Russland und Kanada gilt, wo enorme Flächen in den letzten Jahren vernichtet wurden.

Des Weiteren existieren auch außerhalb der Tropen große Potenziale für Negativemissionen. Diese finden sich vielfach in den NDCs der Staaten der Challenge-Gruppe im Rahmen des Paris Abkommens. Insgesamt schätzt GES die dort aufgelisteten Ziele für extrem, in der Summe als zu ambitioniert ein. Dennoch zeigt sich darin, dass die in der Folge vorgeschlagenen Potenziale für Natur-basierte Lösungen in den NDCs der Staaten aufgehen könnten und somit keinen zusätzlichen Mechanismus zu deren Realisierung benötigen. Das alles ist zu klären, wenn ernsthaft der Versuch gemacht wird, die in der Regel konditionierten NDCs der Entwicklungs- und Schwellenländer in robuste, nicht mehr konditionierte NDCs zu überführen. Wie in Kapitel 6.4.1 genauer erläutert, wird dies viel Geld und viel intellektuellen Input erfordern, ist aber zugleich die Basis für das von GES vorgeschlagene Cap-and-Trade-System (vgl. Kapitel 6.4.2).

Die genannten Potenziale betreffen z. B. weitere Flächen, auf denen die Böden mit Humus und damit mit Kohlenstoff (Soil Organic Carbon/ Soil Organic Matter) angereichert werden können. Die meisten landwirtschaftlichen Flächen weisen heute nur geringe Prozentanteile dieser für die Lebensmittelqualität und Widerstandsfähigkeit der Böden gegen anstehende Klimaveränderungen

Indikatoren auf, auch in Europa, Nord- und Südamerika, sowie in ariden und semi-ariden Gebieten, die stärker vom Klimawandel betroffen sind.

Stark geforscht und probiert wird außerdem im Bereich **maritimer Lösungen** zur Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre in Biomasse und deren weiterer Verwendung. Dies betrifft vor allem den Einsatz von Algen, die, ähnliche wie Bäume an Land, auf großen schwimmenden Vorrichtungen vor den Küsten in den Weltmeeren "aufgeforstet" werden können. Manche Algen haben enorme Möglichkeiten große Mengen CO₂ aus der Luft zu entnehmen. Diese können geerntet und beispielsweise zu synthetischen Kraftstoffen oder wiederum zu Pflanzenkohle pyrolysiert und in den Boden eingebracht werden.

Wie wichtig Mangrovenwälder sind, hat sich in erschreckender Weise an den Auswirkungen des Tsunamis im indischen Ozean im Jahr 2004 gezeigt, der durch ein Seebeben ausgelöst wurde und zu hunderttausenden Toten, vor allem in Indonesien, geführt hat. Mangrovenwälder vor den Küsten wurden vorher großflächig abgeholzt und ökonomisch verwertet, die andernfalls einen natürlichen "Schutzschild" vor den tödlichen Wassermassen gebildet hätten. Außerdem gilt auch hier, dass Mangroven eine hohe Artenvielfalt aufweisen und positive Effekte weit über ihre Klimawirkung hinweg erzeugen, wenn man sie anpflanzt.

Insgesamt tragen diese Elemente der Natur-basierten Lösungen mit rund 5 Milliarden Tonnen CO₂ an Removals im Jahr 2050 dazu bei, dass die CO₂-Emissionen der Challenge-Gruppe auf dann 3 Milliarden Tonnen absinken. Im Zusammenspiel mit CCUS, dem Aufbau eines Energiesystems auf 2 Säulen mit neuen Erneuerbaren und zuverlässig steuerbaren Energien sowie möglichem Einsatz von Nuklearenergie werden in der Referenzlösung so die erforderlichen Beiträge zu den rund 54 Milliarden Tonnen CO₂ im Jahr 2050 geleistet, die eliminiert werden müssen, vgl. Kapitel 5.1.

5.7.5 Kurzumtriebsplantagen auf 150 Millionen Hektar

Ein weiterer Baustein, der nicht als Natur-basierte Lösung im engeren Sinne bezeichnet werden kann, jedoch ebenfalls auf die CO₂-Speicherfähigkeit der Natur setzt, ist die Errichtung von Kurzumtriebsplantagen auf degradierten Flächen einer Größe von 150 Millionen Hektar (ha). Das CO₂-Speicherpotenzial solcher Plantagen beträgt bis zu **20 Tonnen CO₂ pro Hektar**. Auf diesen Plantagen werden schnellwüchsige Pflanzen angebaut, die alle 6 - 10 Jahre geerntet werden können, z. B. Eukalyptus.

Die gewonnene Biomasse kann u. a. zur Herstellung von **klimaneutralen Kraftstoffen** dienen, unter Nutzung des biogenen CO₂. Alternativ kann die Biomasse vergast werden und auf diese Weise ebenfalls Ausgangsmaterial klimaneutraler Treibstoffe und Energieträger sein, vgl. hierzu auch das Kapitel 5.5.

Natürlich werden Kurzumtriebsplantagen keine wesentlichen Beiträge zum Erhalt der Biodiversität leisten. Es gilt, in einer Gesamtbetrachtung die Flächennutzung so auszugestalten, dass einerseits die Artenvielfalt gewährleistet ist, andererseits aber auch Flächen für eine industrielle Biomasseerzeugung vorgesehen werden. Solche sind notwendig, um die weltweiten Wohlstandambitionen zu erfüllen

6 Governance und Finanzierung – regulatorische und finanzielle Aspekte der Referenzlösung

Das Kapitel 5 hat mehr als deutlich gemacht, dass die Referenzlösung ein globales Mammutprogramm darstellt, dessen Implementierung förderliche Rahmenbedingungen und Geldsummen in Billionenhöhe erfordert.

Zu einer realistischen Einschätzung gehört die klare Feststellung, dass derartige Beträge in der Vergangenheit noch nie aufgebracht wurden. Insbesondere ist es in der Geschichte bisher niemals gelungen, entsprechende Summen für den Globalen Süden bereitzustellen. Es klaffen gigantische Finanzierungslücken, vgl. Kapitel 2.

OXFAM bezifferte die **Schulden**, die alleine die G7-Staaten bei den Ländern des Globalen Südens für Schäden **durch** den **Klimawandel** und die Bekämpfung dessen haben, jüngst auf **13 Billionen US-Dollar**.¹⁵⁹ Diese setzen sich wie folgt zusammen: 8,7 Billionen US-Dollar Schäden infolge von aus dem Klimawandel resultierenden Verlusten und Schäden, 4,5 Billionen US-Dollar für ausbleibende Zahlungen im Sinne des 0,7 %-Ziels im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit sowie 72 Milliarden US-Dollar für nicht erfüllte Zusagen zur internationalen Klimafinanzierung im Rahmen des Pariser Klimavertrags. Diese Zahlen sind im Detail kaum überprüfbar, zeigen aber die finanzielle Dimension der Herausforderung.

Die heutige Realität beinhaltet zugleich, dass die Länder des Globalen Südens den G7-Staaten bis 2028 täglich 232 Millionen US-Dollar Schulden zurückzahlen müssen. Immer wieder wird in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit der Umstrukturierung von Schulden oder auch von Schuldenschnitten aufgebracht, genauso wie auch die Forderung, dass Länder des Globalen Südens entgegen ihrer schlechten Ratings Zugang zu günstigem Kapital für wirkungsvolle Investitionen benötigen.¹⁶⁰

Im Vorfeld des Gipfeltreffens zu einem „Neuen Globalen Finanzpakt“ Ende Juni 2023 in Paris forderten zahlreiche Stimmen erneut eine Mobilisierung globaler Finanzmittel für den Globalen Süden in Billionenhöhe, darunter der Deutsche Rat für Nachhaltige Entwicklung, der sich für eine Reform der globalen Finanzarchitektur, Schuldenerlasse und einen wesentlich höheren internationalen Einsatz von Kapital für Klima und nachhaltige Entwicklung aussprach.¹⁶¹ Allen Forderungen zum Trotz endete jedoch auch dieses Treffen ohne konkrete neue Weichenstellungen.

Es ist also unverändert ein **Paradigmenwechsel notwendig**. Ein solcher kann nur gelingen, wenn in den Ländern des Globalen Nordens in großer Breite die Überzeugung Oberhand gewinnt, dass

¹⁵⁹ Vgl. OXFAM (2023).

¹⁶⁰ Vgl. Gates (2023).

¹⁶¹ Vgl. RNE (2023).

die erforderlichen enormen Geldflüsse in den Globalen Süden letztlich aus einsichtsvollem Egoismus erfolgen sollten, unvermeidbar sind und auch für die Menschen im Globalen Norden eine ökonomisch sinnvolle Lösung darstellen.

Vor diesem Hintergrund werden in diesem Kapitel Ansätze im Bereich der Governance und der Finanzierung beschrieben, die die Chance beinhalten, dass es gelingt, die bis heute bestehenden gigantischen Finanzierungslücken im Bereich der internationalen Zusammenarbeit und der internationalen Klimafinanzierung zu schließen. **Es geht also um die Frage, wie es gelingen kann, dass endlich die Summen aufgebracht werden, die notwendig sind**, um die beschriebenen Maßnahmen zur Erreichung von Net Zero und die angestrebten hohen Wachstumsraten in der Challenge-Gruppe zu erreichen.

Es wird unterstellt, dass sowohl die erweiterte OECD also auch der China-Club die bestehenden heimischen Finanzierungsherausforderungen mit eigenen Mitteln bewältigen werden. Diese beiden Staatengruppen sind insofern nicht Gegenstand dieses Kapitels, als es um die Finanzierung von Maßnahmen geht, die in den entsprechenden Staaten selbst stattfinden. Wohl aber kommt der erweiterten OECD eine entscheidende Bedeutung für die Finanzierung der Maßnahmen in den Challenge Ländern zu.

6.1 Herleitung der Governance- und Finanzierungserfordernisse

Unter Berücksichtigung des Status quo und der formulierten Anforderungen an die Referenzlösung wird in der Folge zusammenfassend hergeleitet, welche Governance- und Finanzierungserfordernisse bestehen und wie die einzelnen Maßnahmen bzw. Programme in der Wechselwirkung miteinander letztlich dazu führen, dass die Referenzlösung die eingangs beschriebenen Anforderungen, sowohl in Hinblick auf den Klimaschutz als auch in Hinblick auf die weltweiten Wohlstandserwartungen, erfüllen kann.

Die „lineare“ bzw. sequentielle Darstellung der notwendigen Maßnahmen stellt das Ergebnis eines nicht-linearen Suchprozesses dar, der in seinen Details nicht vollumfänglich beschreibbar ist.

Der nachfolgenden Abbildung ist zu entnehmen, welche **Parameter** in die Herleitung der notwendigen Maßnahmen, insbesondere auch der Governance- und Finanzierungsanforderungen eingeflossen sind. Es handelt sich um das **Bevölkerungswachstum**, das angestrebte **BIP-Wachstum**, der sich verändernde **Energiebedarf**, die zu eliminierenden **CO_{2eq}-Emissionen** sowie die zur Verfügung stehenden **Technologien**.

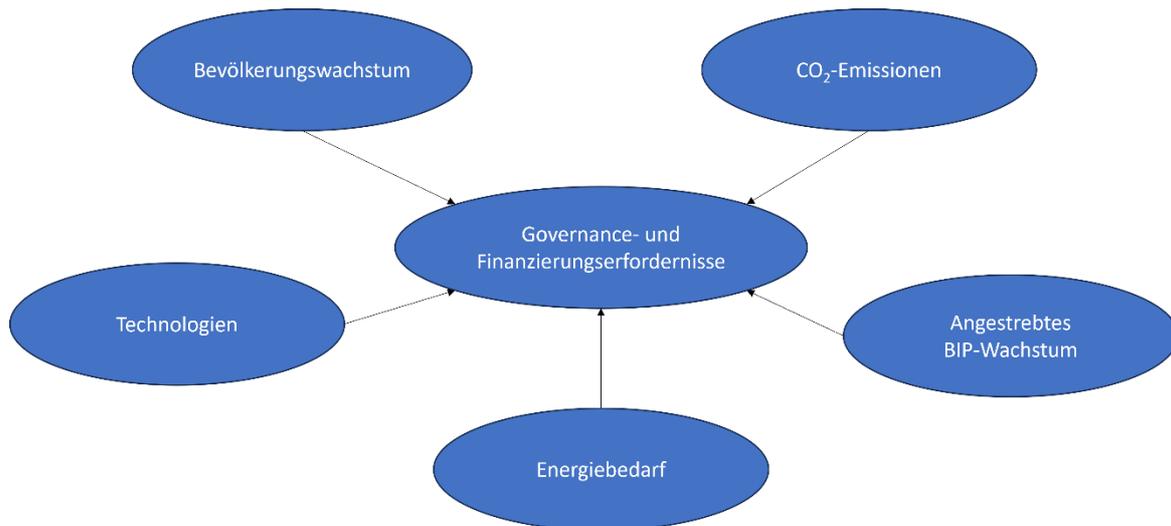


Abbildung 7: Einflussfaktoren auf Governance- und Finanzierungserfordernisse

In den Ländern der Challenge-Gruppe zu eliminierende CO_{2eq}-Mengen

In der Ausgangssituation im Jahr 2025 fallen etwa 53 Milliarden menschengemachte Tonnen CO_{2eq} an. Durch den Wohlstandszuwachs in den Ländern der Challenge-Gruppe werden sich die Emissionen bis 2050 von 53 auf 59 Milliarden Tonnen CO_{2eq} erhöhen (vgl. Kapitel 6.3.2 für die Herleitung). Von den 53 Milliarden Tonnen CO_{2eq} im Jahr 2025 werden etwa 14 Milliarden Tonnen CO_{2eq} durch die Natur absorbiert. Es verbleiben also 39 Milliarden Tonnen CO_{2eq}. Gegenüber einem Business-as-Usual-Szenario müssen **ab 2025** insgesamt etwa **720 Milliarden Tonnen CO_{2eq}** eliminiert werden, wenn das 2°C-Ziel erreicht werden soll.¹⁶²

Es besteht die Möglichkeit, diese Emissionsmenge direkt durch eine forcierte Nutzung bestimmter Natur-basierter Lösungen (**konsequenter Regenwaldschutz, Programm zu Kurzumtriebsplantagen**, weitere im Kapitel 5 genannte Potenziale in diesem Bereich) und indirekt durch eine Vermeidung von technischen **Methan-Leckagen** (Kapitel 6.2.4) um insgesamt **200 Milliarden Tonnen CO_{2eq}** zu verringern.

Die beschriebenen Natur-basierten Lösungen spielen dabei nur teilweise eine Rolle zur Erreichung von Net Zero. Dies gilt vor allem für die Programme zur Aufforstung und Wiederinstandsetzung von Böden auf je 1 Milliarde Hektar (siehe Kapitel 5.7.2 und 5.7.3). Diese übernehmen in der Referenzlösung die Rolle eines Puffers, weil ihre CO₂-Wirkung nicht in die Kalkulationen zur Erreichung von Net Zero einfließen. Bei diesem **Puffer** handelt es sich um einen 40 Jahre andauernden Aufbau natürlicher CO₂-Senken, der in der letzten Ausbaustufe zu einer CO₂-Bindung von je 5 Milliarden Tonnen CO₂ durch einerseits Aufforstungen auf degradierten Böden in den Tropen und andererseits

¹⁶² Vgl. IPCC (2021).

Restaurierung degradierter Böden von extrem niedriger Produktivität, vor allem auch in Ländern des Globalen Südens, führt. In der Summe geht es also final um 10 Milliarden Tonnen CO₂-Removals pro Jahr. Dass derart großvolumige Maßnahmen im Bereich der Forst- und Landwirtschaft in den Ländern der Challenge-Gruppe dringend benötigte Arbeitsplätze in großer Zahl schaffen, damit den Wohlstand steigern, die Biodiversität fördern und zudem zur Sicherung von Ernährung beitragen, versteht sich von selbst. Die in Kapitel 5.7.4 beschriebenen Potenziale weiteren Potenziale im Bereich der Natur-basierten Lösungen sollen im Zuge der Überarbeitung der NDCs gehoben werden und gehen somit in die Net Zero-Kalkulation mit ein.

Für die weitere Kalkulation für die Erreichung von Net Zero werden somit **520 Milliarden Tonnen CO_{2eq}** zugrunde gelegt.

Entsprechend der getroffenen Annahmen, dass 39 Milliarden Tonnen CO_{2eq} im Jahr 2025 zu je 13 Milliarden Tonnen CO_{2eq} gleichmäßig auf die drei Ländergruppen verteilen, bedeutet das, dass sich auch die Gesamtmenge der 520 Milliarden Tonnen CO_{2eq} gleichmäßig mit **je etwa 173 Milliarden Tonnen CO_{2eq} auf die Ländergruppen** verteilen: Die erweiterte OECD wird ihren Anteil bis 2050 eliminieren, der China-Club bis 2060.

In den Ländern der Challenge-Gruppe sind Maßnahmen zu finanzieren und mit einer förderlichen Governance zu versehen, die dazu verhelfen, diese CO_{2eq}-Menge zu bewältigen. Sie wäre in einem **Business-as-Usual-Szenario wesentlich höher**.

Das BIP-Wachstum der Challenge-Länder soll in der Referenzlösung im Mittel 6 % betragen und von 20 Billionen US-Dollar in 2025 auf 80 Billionen US-Dollar in 2050 anwachsen. Ein solches Wachstum erscheint im Kontext eines gewaltigen Transformations- und Finanzierungs-Programms möglich. Zugleich stellen 6 % Wachstum eine Obergrenze dessen dar, was machbar ist. Es geht um eine Größenordnung, in der sich auch der **Marshall Plan** nach dem Zweiten Weltkrieg bewegte, der vier Jahre andauerte. Im Kontext der Referenzlösung geht es um einem Zeithorizont von 45 Jahren (2025 – 2070).

Erfahrungen aus der Vergangenheit zeigen, dass ein BIP-Wachstum einen Anstieg des Energiebedarfs bedeutet. In "Hard truths about green growth"¹⁶³ findet sich mit Verweis auf Untersuchungen des Internationalen Währungsfonds seit 1990 der Hinweis, dass ein BIP-Anstieg von 1 % einen 0,7 %-igen Anstieg der CO₂-Emissionen des betreffenden Landes zur Folge hatte. Wir betrachten in der Referenzlösung ein BIP-Wachstum der Entwicklungs- und Schwellenländer von 300 %. Das würde dann bei den CO₂-Emissionen zu einem Zuwachs von 210 % bezogen auf 13 Milliarden Tonnen CO₂ insgesamt 27,3 Milliarden Tonnen CO₂ korrespondieren. Wir kalkulieren in unseren Abschätzungen vorsichtiger im Hinblick auf den Zuwachs bzw. ambitionierter, was die Entkopplung von BIP-

¹⁶³ Vgl. The Economist (2023a)

Wachstum und CO₂-Emissionen angeht, und rechnen mit einem Zuwachs um 20 Milliarden Tonnen CO₂.

Ein vertiefender Artikel zu dem Thema, "Development v Climate"¹⁶⁴ nimmt ebenfalls Bezug auf Untersuchungen durch den Internationalen Währungsfonds in Bezug auf den Einsatz von Kohle: Hier wird geschätzt, dass **357 Milliarden US-Dollar pro Jahr** für Indien, Indonesien und Südafrika bis 2030 nötig sind, wenn diese Länder ihre **Kohlekraftwerke bis 2050 ausphasen** sollen. Es geht um ca. 1,8 Milliarden Menschen in diesen Ländern. In der GES-Referenzlösung halten wir pro Kopf etwa 200 US-Dollar Förderung pro Jahr für notwendig, was auf einen ähnlichen Betrag hinausläuft. Die Einschätzungen gehen also in die gleiche Richtung.

Der Referenzlösung liegt die Annahme zugrunde, dass die Hälfte des BIP-Zuwachses (insgesamt 60 Billionen US-Dollar), also 30 Billionen US-Dollar, aufgrund von Effizienzverbesserungen und Lebensstilanpassungen keinen Energiezuwachs erfordert. Die zweite Hälfte, ebenfalls 30 Billionen US-Dollar, erfordert einen Energiezuwachs. Der zugrunde gelegte Energiezuwachs orientiert sich an Erfahrungen der Industrieländer und Chinas und ist zugleich knapp kalkuliert. 30 Billionen US-Dollar BIP-Zuwachs durch Energiezuwachs gehen mit 20 Milliarden Tonnen CO_{2eq} einher, was derselben Relation entspricht wie 13 Milliarden Tonnen CO_{2eq} bei 20 Billionen US-Dollar im Jahr 2025. Dieser Zuwachs von 20 Milliarden Tonnen CO_{2eq} ergibt zusammen mit den ursprünglichen 13 Milliarden Tonnen CO_{2eq} insgesamt einen Wert von **33 Milliarden Tonnen CO_{2eq} im Jahr 2050**.

Eine Betrachtung der NDCs der Staaten der **Challenge-Gruppe** sowie der darin enthaltenen Net-Zero-Zeitpunkte führt zu der Erkenntnis, dass selbst unter großen Anstrengungen maximal lediglich 30 Milliarden Tonnen CO_{2eq} bis 2050 eliminiert werden können, dies in Orientierung an zentralen Net-Zero-Versprechen, z. B. von Indien (2070), wie auch mit Blick auf das Netz-Zero-Ziel von China (2060).

Die Eliminierung der verbleibenden **3 Milliarden Tonnen CO_{2eq}** muss auf die Zeit **nach 2050** verschoben werden, ebenso wie 2 Milliarden verbleibende Tonnen CO_{2eq} des China-Clubs.

20 % der bis 2050 zu eliminierenden 30 Milliarden Tonnen CO_{2eq} sollen durch einen weiteren Ausbau der alten Erneuerbaren (Wasserkraft, Bioenergie, Geoenergie) abgedeckt werden, womit 24 Milliarden Tonnen CO_{2eq} verbleiben.

In Anlehnung an den Zwei-Säulen-Ansatz der GES-Referenzlösung wird unterstellt, dass 12 Milliarden Tonnen CO_{2eq} davon über neue Erneuerbare abgedeckt werden. Weitere 12 Milliarden Tonnen CO₂ werden im Bereich der fossilen Energien anfallen – soweit nicht alternativ auf Nuklearenergie als zuverlässig, steuerbare Energiequelle gesetzt wird oder sich standortbedingt ein weiterer Ausbau der Erneuerbaren über 50 % hinaus realisieren lässt. Der vermehrte Einsatz von Gas statt Kohle zur

¹⁶⁴ The Economist (2023b)

Stromerzeugung sollte hier ebenfalls Beiträge leisten, da Gas eine geringere CO₂-Intensität hat. Außerdem schlagen hier die weiteren Natur-basierten Lösungen aus Kapitel 5.7.4 zu Buche.

Die mittlere CO₂-Belastung pro Jahr aus den Fossilen liegt bei einem linearen Hochlauf bis 2050 also bei maximal etwa 6 Milliarden Tonnen CO₂ und sollte soweit wie möglich durch die anderen genannten Optionen verringert werden.

Eine absolute Notwendigkeit: Gewinnung der Challenge-Gruppe für eine Mitwirkung

Die Länder der Challenge-Gruppe müssen dafür gewonnen werden, ihre CO₂-Emissionen deutlich abzusenken, obwohl sie es aus UN-Sicht nicht müssen. Ihre heutigen NDCs sind aus unterschiedlichen Gründen nur von begrenztem Nutzen, sollten ausdifferenziert, bereinigt und genutzt werden, damit beispielsweise Teile der Natur-basierten Lösungen in ihnen aufgehen. Diese Situation ist eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Findung einer Referenzlösung. Zum Umgang mit dieser Situation sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Sie stellen entscheidende und nicht triviale Elemente der Governance und Finanzierung dar. Es geht im Bereich des Energiesystems um eine **Kofinanzierung transnationaler Energieinfrastrukturen** und eine **Differenzkostenübernahme** gegenüber einem Verharren im Status quo. Schließlich sind „systemische“ Maßnahmen erforderlich: **Die bisher wenig belastbaren NDCs der Länder der Challenge-Gruppe müssen bereinigt und ihre Umsetzung muss ermöglicht werden.**

Ein Gelingen der zuvor beschriebenen Maßnahmen würde es des Weiteren erlauben, in kanonischer Weise ein weltweites **Cap-and-Trade-System** abzuleiten, das auf den bereinigten NDCs basiert. Der Ansatz des „Gesamt-Deals“ muss dazu von allen Akteuren als fair und tragbar akzeptiert werden. Das Cap-and-Trade-System erleichtert für alle beteiligten Staaten den Weg zu Net Zero und erschließt Kostenvorteile für jeden Teilnehmer.

6.2 Programme für Erhalt, Ausbau und Entlastung der natürlichen Systeme als CO₂-Speicher sowie Beseitigung technischer Methan-Leckagen

Die in diesen Unterkapitel beschriebenen Programme dienen dem Erhalt, dem Ausbau und der Entlastung der natürlichen Systeme als CO₂-Speicher. In Summe reduzieren sie kumuliert zwischen 2025 und 2050 bzw. 2070 (Regenwälder) die jährliche CO₂-Belastung um 200 Milliarden Tonnen. Im Einzelnen geht es um klassische Natur-basierte Lösungen, nämlich um den Erhalt der verbliebenen Regenwälder, um ein Gigaprogramm im Bereich der Aufforstung und der Restaurierung von Böden in den Tropen, weitere Potenziale, z. B im Bereich borealer Wälder, Mangroven und Algen,

sowie um ein Fokusprogramm für Kurzumtriebsplantagen. Hinzu kommt ein Programm zur Vermeidung von technischen Methan-Leckagen.

Alle genannten Programme sollen im Rahmen der Referenzlösung privat finanziert werden.

Im Bereich der Governance besteht allerdings die Anforderung, einerseits Vorlaufkosten zu tragen und andererseits ein förderliches Umfeld für die privaten Geldgeber zu schaffen, das es ihnen insbesondere ermöglicht, wirksam und ohne Reputationsrisiken aktiv zu werden. Wir kalkulieren für die **Vorlaufkosten** aller in der Folge beschriebenen Programme in Summe **200 Milliarden US-Dollar** pro Jahr. Sie werden für die Etablierung entsprechender UN-Prozesse und Capacity Building benötigt.

6.2.1 Regulatorische Flankierung des Erhalts der verbliebenen Regenwälder

An der Notwendigkeit, dass die verbliebenen Regenwälder aus vielerlei Gründen konsequent erhalten werden sollten, besteht kein Zweifel. Obwohl die Erkenntnis über die Dringlichkeit zu handeln nicht neu ist, gelingt es der Welt bis heute nicht, die Zerstörung der Regenwälder zu stoppen. Dabei ist der Regenwalderhalt die preiswerteste und prinzipiell am schnellsten umsetzbare Maßnahme zum Klimaschutz, geht es doch letztlich „nur“ darum, etwas nicht mehr zu tun. Dass dennoch keine Erfolge erzielt werden, hat viel damit zu tun, dass die Regenwälder in Ländern des Globalen Südens liegen und es damit – wie in vielen anderen Kontexten auch – an Finanzierung mangelt, um den Schutz zu ermöglichen.

Die jüngste Entwicklung ist eine engere Zusammenarbeit der Staaten Brasilien, Kongo und Indonesien, um die reichen Länder zu „motivieren“, endlich in substanziellem Umfang finanzielle Mittel aufzubringen, um die tropischen Regenwälder zu schützen. Sollte das nicht passieren, wollen sie nach und nach immer mehr Regenwaldflächen anderweitig nutzen oder Flächen zur Nutzung versteigern.

Bisherige Ansätze, um über den freiwilligen CO₂-Markt finanzielle Mittel für den Regenwalderhalt zu erschließen, brachten nie den erhofften Erfolg. Trotz aufwendiger Zertifizierungsverfahren geraten Waldprojekte immer wieder in die Kritik.¹⁶⁵ Es geht um CO₂-Messmethoden, Permanenzanforderungen an die CO₂-Bindung und Fragen des Carbon Leakage. Unternehmen, die entsprechende Projekte unterstützen, fürchten Greenwashing-Vorwürfe und haben Sorge um ihre Reputation. Außerdem werden viele Finanzmittel für aufwendige Zertifizierungsprozesse und gelegentlich für rechtliche Auseinandersetzungen mit Kritikern verbucht. Für den Regenwaldschutz verbleiben dann nur noch Teile der ohnehin viel zu geringen Mittel übrig.

¹⁶⁵ Vgl. The Guardian (2023); Fischer, Knuth (2023).

Vor diesem Hintergrund wird ein anderer Ansatz vorgeschlagen, der wesentlich einfacher in der Umsetzung ist als alles Bisherige und versucht, in pragmatischer Weise die Bürokratie auf das unbedingt Notwendige zu verringern: Private Akteure, z. B. Unternehmen und Philanthropen, sollen dafür gewonnen werden, nach Hochlauf und Gewinnung entsprechend vieler Unterstützer, **für jeden Hektar Regenwald**, der ohne Qualitätsverlust ein Jahr in seinem natürlichen Zustand intakt gehalten wird, ex post, also nach Ablauf des Jahres, **100 US-Dollar** an das entsprechende Regenwald-Land zu bezahlen.

Insgesamt erscheint eine Summe von etwa **100 Milliarden US-Dollar pro Jahr** notwendig, wenn alle heute noch bestehenden Regenwaldflächen im Rahmen des beschriebenen Ansatzes erhalten werden sollen.

Die Flächen werden unter Nutzung von Geoinformationssystemen über Luft- und Satellitenbilder in einem Kataster erfasst. Dies könnte z. B. die Software „EarthRanger“ sein.¹⁶⁶ Der Zustand am Jahresanfang wird dokumentiert. Ein Vertrag, den der jeweilige Staat unterzeichnen kann, sichert eine Zahlung der 100 US-Dollar zu – unter der Bedingung, dass der betreffende Hektar Regenwald am Jahresende mindestens in der Qualität der Startsituation am Jahresanfang noch vorhanden ist. Zudem berücksichtigt er in geeigneter Weise das Potenzial des Regenwaldes für Agroforstwirtschaft und Tourismus.

Der Vertrag setzt auf die Wirkung des Geldes: Er garantiert eine sichere Einnahme von 100 US-Dollar pro Jahr für einen Hektar Regenwald, solange dieser erhalten wird. Dies ist ein anderer Weg, als er bisher besprochen wird: Obwohl es keine Permanenzanforderung gibt, eröffnet sich dennoch eine große Chance für einen dauerhaften Erhalt der meisten Hektar Regenwald. Die Leakage-Frage stellt sich aufgrund der ganzheitlichen jährlichen Betrachtung des Regenwaldbestandes und der damit einhergehenden Vergütung ebenfalls nicht.

Seitens der Governance besteht die Anforderung, einerseits Vorlaufkosten zu tragen und andererseits ein förderliches Umfeld für die privaten Geldgeber zu schaffen, das es ihnen ermöglicht, wirksam, nachhaltig und ohne Reputationsrisiken aktiv zu werden. Hier sollten UN-Organisationen in Kooperation mit professionellen privaten Organisationen, die im Bereich des Regenwalderhalts aktiv sind, zusammenarbeiten. Auf der privaten Seite könnten dies u. a. African Parks oder der WWF sein.

¹⁶⁶ Vgl. Earth Ranger (2023).

6.2.2 Regulatorische Flankierung von Wiederaufforstung und Restaurierung degradierter Flächen

In den Kapiteln 5.6.2 und 5.6.3 wurden die beiden Maßnahmen beschrieben, die zusammen als Gigaprogramm im Bereich der Natur-basierten Lösungen bezeichnet werden: Einerseits geht es im Bereich der Forstwirtschaft um die Aufforstung auf 1 Milliarde Hektar degradierter Böden in den Tropen, andererseits geht es im Bereich der Landwirtschaft um die Restaurierung einer weiteren Milliarde Hektar degradierter Böden von geringer Produktivität, ebenfalls primär in den Ländern des Globalen Südens, was in einem 40-jährigen Hochlauf erreicht werden soll. In beiden Fällen handelt es sich um wertschöpfende Aktivitäten, die sich ökonomisch rechnen – über die gewonnene Ressource Holz und über die Ertragssteigerung in der Landwirtschaft. Dies gilt umso mehr, wenn CO₂ im Rahmen eines Cap-and-Trade-Systems endlich zuverlässig einen angemessenen Preis bekommt und Maßnahmen honoriert werden, mit denen das CO₂ der Atmosphäre dauerhaft entzogen wird.

Im beschriebenen **Gigaprogramm** im Bereich der Natur-basierten Lösungen geht es am Ende des im Jahr 2025 beginnenden 40-jährigen Hochlaufs um **10 Milliarden Tonnen gebundenes CO₂**. Diese Menge an CO₂-Emissionsverminderungen fließt im Rahmen der Referenzlösung soweit möglich nicht in die Erreichung von Net Zero ein, sondern dient als **Puffer**. Die Finanzierung erfolgt über den Privatsektor.

Staatliche Mittel aus der erweiterten OECD werden allerdings für die Initiierung des Programms sowie für das Garantieren eines für die privaten Akteure reputationssicheren Umfeldes benötigt. So muss gewährleistet sein, dass strikte Nachhaltigkeitsprinzipien eingehalten werden, und das CO₂ dauerhaft gebunden bleibt (Removal), z. B. durch eine kaskadenartige Nutzung des Holzes. Es ist zu erwarten, dass entsprechende CO₂-Zertifikate gute Preise erzielen werden, was den Menschen in den Ländern der Challenge-Gruppe zugutekommt. Entsprechende Zertifikate könnten große Bedeutung für den Mobilitätsbereich erlangen, wo es darum gehen wird, auch für flüchtige CO₂-Quellen (z. B. mit bestimmten synthetischen Kraftstoffen betriebene Fahrzeuge) den Status bilanzieller Klimaneutralität zu erlangen.

Die Finanzierung erfolgt über ein eigens dafür eingerichtetes Cap-and-Trade-System, an dem alle Menschen – über ihre Staaten – bilanziell mit 1 Tonne CO₂-Emissionsrecht partizipieren.

Wenn das Gigaprogramm im Bereich der Natur-basierten Lösungen erfolgreich aufgebaut wird, baut sich für die Menschheit ein Puffer von etwa 1 Tonne CO₂ je Mensch auf, der einen Teil des Drucks aus dem Prozess des Rückbaus der CO₂-Emissionen nimmt.

6.2.3 Regulatorische Flankierung des Aufbaus von Kurzumtriebsplantagen

Vorgesehen ist ein System von Kurzumtriebsplantagen auf geeigneten 150 Milliarden Hektar Fläche. Das UN-Klimasekretariat kalkuliert, dass bis zu 750 Milliarden Hektar zur Verfügung stehen.¹⁶⁷ Die Pflanzungen werden nach sieben Jahren abgeerntet und wieder neu bepflanzt. Sie sind eine gute Energiequelle (Strom und Wärme), etwa von der Qualität wie Braunkohle. Das bringt eine solide Finanzierung für alle Länder des Südens, die solche Plantagen bei sich realisieren. Aus Klimagründen wird das biogene CO₂ abgefangen. Es ist ebenso geeignet wie CO₂ aus Direct Air Capture, um in Verbindung mit Wasserstoff für die Produktion von Re-Fuels genutzt zu werden. **So wird Einkommen generiert, außerdem Energie und ein wichtiger Rohstoff.** Die UN rechnet mit 150 Milliarden Hektar geeigneter Fläche und einer CO₂-Bindung von 25 Tonnen pro Hektar, also insgesamt 3,75 Milliarden Tonnen pro Jahr.

Ein positives **Beispiel**, das seinen Anfang in den 1960er Jahren hat, sind großflächige Forstplantagen für die kommerzielle Holzproduktion in **Brasilien**, die nicht auf Kosten des Regenwalds existieren. Dort kommen schnellwachsende Baumarten wie z. B. Eukalyptus zum Einsatz. Die Produktivität liegt bei durchschnittlich 38,9 Kubikmetern pro Hektar und Jahr. Die Plantagen sind auf ehemaligen Viehweiden angelegt, meist sind es degradierte Flächen. Es wird kein Regenwald gerodet.

Im Jahr 2021 betrug die Gesamtfläche der Naturwälder dieser Waldmosaik-Forstpflanzungen 6 Millionen Hektar, daraus erwächst eine reichere Biodiversität als es das ehemalige Weideland aufgewiesen hat. Die neuen Naturwälder bestehen mittlerweile zum Teil aus seltenen und bedrohten Ökosystemen. Die Agroforstwirtschaften umfassen heute ein Gebiet von 17,4 Millionen Hektar und sollen bis 2030 um weitere 9 Millionen Hektar vergrößert werden.¹⁶⁸

Für das gewonnenen Holz bestehen verschiedene Nutzungsmöglichkeiten: Biokohle auf Basis von Holzkohle ist eine Form der Nutzung der Erträge der Kurzumtriebsplantagen. **Altholz wird pyrolysiert.** Hier erfolgt nur wenig Energieproduktion, dafür entsteht viel Bio- oder Holzkohle. Das sind echte Removals und damit wertvolle Beiträge. Sie sind geeignet zur Bodenverbesserung, die sich ökonomisch unmittelbar auszahlt bei den Ernten auf diesen Flächen.

Schließlich kann Holz langfristig aus dem Kreislauf herausgenommen werden und z. B. in der Bauindustrie Verwendung finden. Auch in einem solchen Prozess bleibt das CO₂ dauerhaft gespeichert und es wird Wertschöpfung generiert.

Auch im Umfeld von Kurzumtriebsplantagen sollte die Politik regulatorisch für ein Umfeld sorgen, das eine Skalierung befördert. Zudem geht es auch hier um positive Kommunikation.

¹⁶⁷ Diese Zahl nannte Panna Siyag (UNFCCC) in einem Gespräch über das Potenzial von Bioenergie. Vgl. Lenton (2014).

¹⁶⁸ Vgl. Sollinger (2023).

Kurzumtriebsplantagen sollten nicht als Auslauger von Böden und Zerstörer Biodiversität wahrgenommen werden, sondern als positiver Beitrag für Klimaschutz und Wertschöpfung, wenn diese gewissenhaft betrieben werden.

6.2.4 Regulatorische Flankierung der Beseitigung technischer Methan-Leckagen

Eine sofortige Verhinderung weiterer Methan Emissionen ist dringend notwendig und sollte, soweit machbar, rasch umgesetzt werden.¹⁶⁹ Im Kontext der Referenzlösung ist die Beseitigung technischer Methan-Leckagen ein Baustein, der von großer Wirkung auf den Treibhausgasgehalt der Atmosphäre ist, geht es doch um Emissionen von derzeit jährlich etwa 600 Millionen Tonnen, von denen etwa 370 Millionen Tonnen aus anthropogenen Quellen stammen. Aufgrund des Klimafaktors von 24 entspricht dies einer Treibhausgasemission von jährlich insgesamt 14,4 Milliarden Tonnen CO_{2eq}, mit einem anthropogenen Anteil von 8,9 Milliarden Tonnen. Methan-Emissionen machen alleine 16 % der globalen Treibhausgaswirkung aus.¹⁷⁰

Im Bereich der Beseitigung technischer Methan Leckagen geht es um die **Minimierung von Emissionen, die bei Förderung, Transport und Einsatz von Erdgas und Flüssiggas (LNG) entstehen**. Wichtige Schlagworte sind Vorkettenemissionen und Fackeln. Entsprechende Maßnahmen sind relativ einfach umsetzbar. Technische Details hierzu sind im Kapitel 5.6 beschrieben.

Im Kontext der Vermeidung von Methan-Emissionen bestehen bereits einige Initiativen, auf die im Rahmen der Referenzlösung aufgebaut werden sollte.

Besonders hervorzuheben ist der bei der COP26 in Glasgow im Jahr 2021 gelaunchte **Global Methan Pledge**.¹⁷¹ Er zielt darauf ab, globale Maßnahmen anzustoßen und Unterstützung für bestehende internationale Initiativen zur Verringerung von Methanemissionen zu leisten. An Bord sind 150 Länder, auf die fast 50 % der weltweiten anthropogenen Methanemissionen und mehr als zwei Drittel des globalen BIP entfallen. Das Ziel des Pledges besteht darin, bis 2030 zu vermeiden, dass jährlich mehr als 8 Milliarden Tonnen Kohlendioxidäquivalente in die Atmosphäre gelangen. Neben einer Reihe nicht-staatlicher Organisationen ist UNEP als UN-Organisation als Unterstützer involviert.

Die geschätzten **Vermeidungskosten liegen bei 600 US-Dollar pro Tonne Methan**. Das ist relativ preiswert, entspricht doch eine Tonne Methanemissionen etwa 24 Tonnen CO_{2eq}-Emission. Damit

¹⁶⁹ Vgl. Wernicke (2023) Vermeidungsprogramm technische Methan- und Gas-Leckagen

¹⁷⁰ Vgl. IEA (2023a)

¹⁷¹ Vgl. Global Methan Pledge (2023).

beträgt der CO_{2eq}-Vermeidungspreis **etwa 25 US-Dollar pro Tonne CO_{2eq}**. Diese Möglichkeit eines effizienten Mitteleinsatzes sollte genutzt werden.

Die Maßnahmen zur Vermeidung von Methan-Emissionen sind weltweit noch nicht gebündelt. So entstehen immer wieder auch regionale Initiativen. So hat PETRONAS in Zusammenarbeit mit ASEAN-Energieunternehmen, Regierungsbehörden und internationalen Organisationen das ASEAN Energy Sector Methane Leadership Program (MLP) ins Leben gerufen und in Zusammenarbeit mit der Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC) Vorzeigeprojekte zur Methanreduzierung angekündigt.¹⁷²

Die Öl- und Gasindustrie bietet einige der besten und kosteneffizientesten Möglichkeiten zur Verringerung der Methanemissionen.¹⁷³ Die Internationale Energieagentur (IEA) kritisierte jüngst, dass der Kampf gegen Methanemissionen zu langsam verläuft. Sie bezifferte die Investitionserfordernisse für eine konsequente Reduzierung des Klimagases bis 2030 – und nannte eine Summe von 75 Milliarden US-Dollar. Die im Verhältnis (überschaubaren) Kosten sollten von den Unternehmen der Öl- und Gasbranche übernommen werden und können auf den Endpreis umgelegt werden.

Um möglichst rasch zu einem effizienten Umgang mit der Problematik technischer Methan Leckagen zu kommen, sollten das regulatorische Umfeld verbessert und die Anreize für private Akteure erhöht werden, Aufwand und Ressourcen in entsprechende Prozesse zu stecken.

Auf der regulatorischen Ebene muss es darum gehen, **durch gute Governance und internationale Absprachen ein Umfeld zu schaffen, in dem private Akteure die Kosten der Beseitigung der verschiedenen Methan-Leckagen tragen**.¹⁷⁴ Dieses sollte so ausgestaltet sein, dass weltweit und insbesondere auch in den Ländern der Challenge-Gruppe entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Auch dort gibt es Öl- und Gasvorkommen. Im Falle ihrer Förderung und Nutzung sollte sichergestellt sein, dass die verfügbaren Technologien zur Sicherstellung von Treibhausgasneutralität Anwendung finden, egal, wo diese stattfindet.

Die Staaten könnten zudem Anreize z. B. auf der steuerlichen Seite schaffen, von denen solche Unternehmen profitieren, die nachweislich ihre Methan-Leckagen beseitigt haben.

6.3 Programme zum Auf- und Umbau des Energiesystems

In diesem Unterkapitel werden zwei Ansätze beschrieben, mit denen der Auf- und Umbau der Energiesysteme in den Ländern der Challenge-Gruppe finanziert werden soll. Es geht zum einen um eine

¹⁷² Vgl. WBCSD (2023b).

¹⁷³ Vgl. IEA (2023b).

¹⁷⁴ Vgl. IEA (2020).

Kofinanzierung von Energieinfrastrukturen sowie andererseits um eine Übernahme von Differenzkosten gegenüber einem „Business as Usual“, die zum Beispiel im Kontext von Carbon Capture anfallen.

6.3.1 Kofinanzierung transnationaler Energieinfrastrukturen

Mit diesem Programm sollen Maßnahmen im Bereich Infrastrukturaufbau finanziert werden, die notwendig sind, wenn das Ziel ein leistungsfähiges Energiesystem ist.

Im Einzelnen geht es um eine finanzielle Unterstützung der Länder der Challenge-Gruppe

(a) beim Aufbau von transnationalen Stromnetzen¹⁷⁵

(b) beim Aufbau von transnationalen Gas-Pipelines (Erdgas und Wasserstoff)

(c) beim Aufbau von transnationalen Pipelinesystemen für CO₂

(d) beim Aufbau von transnationaler Infrastruktur zum Transport und zur Speicherung von CO₂

Es geht also um die Finanzierung kollektiver Vorleistungen, die keinem einzelnen Akteur zuzuordnen sind, sei es einem einzelnen Staat oder einem einzelnen Unternehmen.

Für dieses Programm werden **jährlich 150 Milliarden US-Dollar** veranschlagt.

6.3.2 Differenzkostenübernahme bei Carbon Capture

Der Ansatz der Differenzkostenübernahme geht auf das **Montrealer Protokoll** zurück, mit dem es in den 1980er Jahren gelang, das Ozon-Loch zu schließen. Es handelt sich um ein multilaterales Umweltabkommen, das erfolgreich umgesetzt wurde. Zu seinem Erfolg trug maßgeblich bei, dass sich die Industrieländer bereit erklärten, die Entwicklungsländer bei der Erfüllung der ihnen zugeordneten Vertragspflichten zu unterstützen, und die Differenzkosten gegenüber einem Verharren im Status quo zu übernehmen. In Summe flossen über einen multilateralen Fonds 847 Millionen US-Dollar, die zu 20 % von den Durchführungsorganisationen der Geberländer ausgegeben wurden. In der Umsetzung und Durchsetzung des Protokolls unterstützten die Weltbank, UNDP, UNIDO und UNEP. Heute wird das Protokoll von UNIDO verwaltet.¹⁷⁶

Das Montrealer Protokoll verdeutlicht eindrucksvoll, wie es mit guter Governance und einer gegebenen Bereitschaft der reichen Länder zu einer angemessenen finanziellen Unterstützung gelingen

¹⁷⁵ So beschäftigt sich bspw. die 2016 gegründete Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (GEIDCO) in Peking mit der Thematik.

¹⁷⁶ Vgl. UNIDO (2023).

kann, globale Herausforderungen zu bewältigen, die Kooperation und große internationale Geldflüsse erfordern.

In der Logik des Montrealer Protokolls geht es bei diesem Programm um eine Übernahme der Kosten, die durch das Abfangen von CO₂ oder anderer, CO₂-vermeidenden Maßnahmen im Kontext des Aufbaus zuverlässiger steuerbarer Energie zusätzlich entstehen. **Im Hauptprogramm des Vorschlags übernehmen die OECD-Staaten ab sofort alle entsprechenden Mehrkosten beim Aufbau oder der Erweiterung der Energiesysteme der Challenge-Gruppe.** Zu den wichtigsten geförderten Staaten gehören Länder des afrikanischen Kontinents, Lateinamerikas, Indien und Nachbarstaaten, Indonesien etc. Darunter fallen auch alle Least Developed Countries.

Es wird geschätzt, dass sich der Energiebedarf dieser Länder bis 2050 um einen Faktor 2,5 erhöhen wird, wobei ein nicht unwesentlicher Teil auch zukünftig mit fossilen Energien gedeckt werden wird. Es wird kalkuliert, dass für die Beseitigung von im Mittel 6 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr Kosten von im Mittel 100 US-Dollar pro Tonne anfallen. Damit werden im Wesentlichen finanziert: Carbon Capture, aber auch der vermehrte Gebrauch von Gas statt Kohle zur Stromerzeugung, wo unter regionalen Bedingungen sinnvoll ein stärkerer Ausbau von Nuklearenergie bzw. stärkerer Ausbau der Erneuerbaren über die bei GES üblichen 50 % des Energiesystems hinaus, aber auch in die Aktivierung von Negativemissionen über Natur-basierte Lösungen.

Es fallen also im Mittel Differenzkosten in Höhe von **jährlich im Mittel 600 Milliarden US-Dollar** an. Diese Summe wird für das beschriebene Programm veranschlagt.

Der mittlere Umfang von 6 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr begründet sich wie folgt, vgl. auch Kapitel 6.1:

Herleitung des Umfangs für die Eliminierung von Emissionen in Höhe von 6 Milliarden Tonnen CO₂

Die für das Jahr 2025 in der Challenge-Gruppe angesetzten Emissionen in Höhe von 13 Milliarden Tonnen CO₂ entsprechen einem BIP von 20 Billionen US-Dollar.

Das angestrebte BIP-Wachstum von 6 % führt auf ein BIP in Höhe von 80 Billionen US-Dollar in 2050. Das ist ein BIP-Zuwachs von insgesamt 60 Billionen US-Dollar. Die eine Hälfte dieses BIP-Zuwachses, also 30 Billionen US-Dollar, wird über Effizienzgewinne und Lebensstilveränderungen abgedeckt, was keine Ausweitung der Energiemenge erfordert. Für die zweite Hälfte, also wiederum für ein BIP-Wachstum in Höhe von 30 Billionen US-Dollar, muss weitere, zusätzliche Energie bereitgestellt werden.

Dieses Wachstum entspricht einem Plus von etwa 20 Milliarden Tonnen CO₂, wenn man das Verhältnis von BIP zu entstehenden Emissionen im Ausgangsjahr 2025 zugrunde legt (20 Billionen US-Dollar bei 13 Milliarden Tonnen CO₂).

In Summe sind in der Challenge-Gruppe im Jahr 2050, bei einem strukturell unveränderten Energiemix gegenüber dem Jahr 2025, etwa 33 Milliarden Tonnen CO₂ zu eliminieren.

Wegen der unterschiedlichen Net-Zero-Zeitpunkte, die in Teilen erst in 2060 oder 2070 erreicht werden, verbleiben 2050 noch etwa 3 Milliarden Tonnen CO₂ in der Challenge-Gruppe.

Im Jahr 2050 geht es also in der Challenge-Gruppe final um die Eliminierung von 30 Milliarden Tonnen CO₂, mit einem entsprechenden Hochlauf der jährlichen Werte ausgehend von 2025.

Von den 30 Milliarden Tonnen in 2050 werden 20 % durch einen weiteren Ausbau der alten Erneuerbaren (Wasserkraft, Bioenergie) abgedeckt, womit 24 Milliarden Tonnen CO₂ verbleiben.

Von diesen werden 12 Milliarden Tonnen CO₂ über neue Erneuerbare abgedeckt. Weitere 12 Milliarden Tonnen CO₂ werden im Bereich der fossilen Energien anfallen (soweit sie nicht durch Nuklearenergie ersetzt werden oder durch den verstärkten Einsatz von Gas statt Kohle oder über Natur-basierte Lösungen im Rahmen der NDCs reduziert werden).

Ausgehend von beispielhaft 12 Milliarden Tonnen CO₂, liegt die mittlere Belastung an CO₂ pro Jahr aus den Fossilen über 25 Jahre dann bei etwa 6 Milliarden Tonnen. Von den 12 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr werden in etwa 8 Milliarden Tonnen über Carbon Capture, die restlichen 4 Milliarden über die genannten anderen Maßnahmen reduziert.

In der tatsächlichen Umsetzung wird der Mittelbedarf kontinuierlich von Jahr zu Jahr ansteigen. Diese Kostenkurve kann mit Hilfe von Finanzierungsinstrumenten über die Gesamtfinanzierungsperiode geglättet werden. Mit den genannten Finanzierungsflüssen geht ökonomisch eine massive Stimulierung der Ökonomie der jeweiligen Staaten einher, wenn die Wertschöpfung für die angestoßenen Investitionen im Empfängerland erfolgt und vor allem das zusätzliche Angebot an preiswerter, zuverlässiger Energie das Wirtschaftswachstum positiv beeinflusst.

Dabei ist eine kluge Vorgehensweise erforderlich, um sicherzustellen, dass die Kosten für das Carbon Capture und die anderen Maßnahmen proportional mit dem Umfang an Emissionen verknüpft sind. Man muss an dieser Stelle bedenken, dass die grün-fossile Infrastruktur im Zusammenspiel mit den anderen Komponenten des Energiesystems in der Lage sein muss, als Back-up System in der Zeit zu fungieren, in der die volatilen Erneuerbaren keine Energie erzeugen. Dies muss für jeden spezifischen Einzelfall durch die Gestaltung der zur Verfügung stehenden Infrastruktur gewährleistet sein, in der ein erhöhter Ausbau grün-fossiler Kapazitäten, CO₂-Speicher und die Möglichkeiten eines smarten Energiesystems so miteinander kombiniert werden, dass Treibhausgasemissionen für jeden Betriebsfall vermieden werden. Hierzu können gegebenenfalls Kapazitätsmärkte oder andere steuernde Regulierungen erforderlich werden.

Die Kosten können teilweise über die Jahre umgelegt werden, z. B. für die einmalig anfallende technische Nachrüstung der Carbon Capture Technologie oder für den Neubau eines Gaskraftwerks inklusive Carbon Capture anstelle eines Kohlekraftwerks, wobei hier ggfs. Differenzkosten erstattet werden müssen. Andere Kosten werden kontinuierlich anfallen, z. B. im Kontext des höheren

Energieverbrauchs für Carbon Capture, für den Betrieb und die Wartung des Carbon Capture Systems selbst sowie für Abtransport und Verpressung des CO₂.

Die im Kontext der Differenzkostenübernahme anfallenden Summen können bei Bedarf über finanzpolitische Instrumente auf die Jahre umgelegt werden. Dann wird z. B. am Anfang angespart oder investiert, was sich hier anbietet. In anderen Fällen können Geldmittel über Green Fonds bereitgestellt werden. Die Staaten garantieren die spätere Einlösung der Finanzeinzahlungen. Über die Jahre sinken die Kosten. Je nach wirtschaftlicher Entwicklung können die Entwicklungs- und Schwellenländer nach vielleicht 15 Jahren (2040) beginnen, sich an den Kosten in einem gewissen Umfang zu beteiligen.

Abschließend sei angemerkt, dass nukleare Lösungen in Bezug auf Differenzkosten kaum günstiger sein werden als Carbon Capture bei grün-fossilen Lösungen. Viele Challenge Länder werden die Komplexität der Technologie auf lange Zeit nicht sicher beherrschen. Bei vielen Ländern der Challenge-Gruppe handelt es sich um Spannungsgebiete mit Gefahren von Bürgerkriegen oder kriegesischen Auseinandersetzungen mit den Nachbarstaaten. Dies wird die Lieferanten dieser Technologie daran hindern, diese vor Ort zu installieren. Vor diesem Hintergrund liegt der Schwerpunkt der Referenzlösung auf Carbon Capture, der vermehrten Nutzung von Gas, wo möglich, und auf der Erschließung der Natur-basierten Lösungen, die nicht Teil des Puffers sind.

6.4 Systemische Ansätze

In diesem Unterkapitel werden zwei systemische Ansätze beschrieben, die zu einer realistischen Umsetzbarkeit der NDCs der Entwicklungsländer führen sollen, und es zudem allen beteiligten Akteuren erlauben sollen, effiziente Wege zur Erreichung ihrer Klimaziele zu beschreiten. Es geht um eine Überarbeitung der NDCs der Entwicklungs- und Schwellenländer und um eine anschließende Implementierung eines Cap-and-Trade-Systems, das auf den NDCs der teilnehmenden Staaten basiert.

6.4.1 Überarbeitung der konditionierten NDCs zur Ermöglichung ihrer Umsetzung

Im Kapitel 2.2.2 wurde bereits angedeutet, dass die NDCs der Entwicklungsländer eine Achillesverse des Pariser Klimavertrags darstellen. Nicht nur handelt es sich um Reduktionszusagen, die relativ zum angestrebten Wirtschaftswachstum sind, was bedeutet, dass lediglich die CO₂-Intensität des Wirtschaftswachstums verringert werden soll, nicht aber die absolute Emissionsmenge. Es kommt hinzu, dass die NDCs konditioniert sind: **Es müssen Billionen von US-Dollar aus den Industrieländern in die Entwicklungsländer fließen, um dort eine Zielerreichung zu**

ermöglichen.¹⁷⁷ In der Vergangenheit sind derartige Geldsummen noch nie mobilisiert worden. Sollte es dabei bleiben, werden die NDCs nicht umgesetzt werden und jegliche Klimaziele unerreicht bleiben, denn die nicht konditionierten Anteile sind aus nachvollziehbaren Gründen wenig ambitioniert. Die Entwicklungsländer sind nicht die Verursacher des Klimawandel. Das Emissionsniveau pro Kopf liegt nicht selten im Bereich von (nur) einer Tonne pro Jahr. In den allgemeinen Diskursen zur Erreichbarkeit der Klimaziele wird den großen Schwierigkeiten, die bei den NDCs der Entwicklungsländer bestehen, kaum Raum gegeben, weshalb viele diesbezügliche Aussagen als zu optimistisch eingeschätzt werden müssen.

Nicht selten liegen die angestrebten Net-Zero-Zeiträume außerdem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, zum Beispiel in den Fällen von China (Net Zero 2060) oder Indien (Net Zero 2070). Bei genauer Betrachtung der in den NDCs beschriebenen Maßnahmen fällt zudem immer wieder ins Auge, dass viele Angaben unpräzise oder gar unrealistisch sind. Es besteht z. B. ein sehr großer „Land Gap“: So werden größere Landesflächen für Aufforstungsmaßnahmen vorgesehen als tatsächlich vorhanden sind. Die Menge an CO₂, die über Natur-basierte Lösungen gebunden werden soll, wird vielfach zu hoch geschätzt.¹⁷⁸ Dennoch ist enormes Potenzial in diesem Bereich vorhanden.

Vor diesem Hintergrund ist eine genaue Einschätzung der NDCs der Länder der Challenge-Gruppe und ihrer Tragfähigkeit schwierig. Neben den genannten Punkten hängt dies vor allem damit zusammen, dass (1) die NDCs nicht nach einem einheitlichen Schema erstellt sind, (2) die vorgesehenen Maßnahmen nur unvollständig beschrieben sind und (3) der damit verbundene Aufwand unklar ist. Da die NDCs zugleich das Herzstück des Pariser Klimavertrags bilden, ist das eine sehr ungünstige Ausgangssituation.

Aus den genannten Gründen wird im Rahmen der Referenzlösung mit **250 Milliarden US-Dollar pro Jahr** eine große Summe Geld aufgebracht, **um die NDCs der Entwicklungsländer zu überarbeiten – als Voraussetzung dafür, dass sie erreichbar werden.**

Es geht darum, sie inhaltlich zu prüfen, sie gegebenenfalls anzupassen und realistische Umsetzungszeiträume zu planen. Nicht zuletzt ist eine Ermittlung des tatsächlichen Finanzierungsbedarfs notwendig. Das alles setzt einen hohen Personalaufwand und eine hohe technische Expertise auf „Betreiberseite“ voraus.

Alleine die Herstellung eines gemeinsamen Verständnisses über realistische und umsetzbare NDCs wird eine massive finanzielle Unterstützung der Länder der Challenge-Gruppe erfordern. Die Situation sollte mit allen Ländern der Challenge-Gruppe diskutiert werden. Ähnlich wie bei den Just

¹⁷⁷ Vgl. Pauw et al. (2020).

¹⁷⁸ Vgl. Dooley et al. (2022).

Energy Transition Partnerships sollte geklärt werden, welche Wege gangbar sind, wann Net Zero erreicht werden kann und wieviel Geld benötigt wird. Das sind teure und zeitraubende Beratungs- und Analyseprozesse.

Neben den in Zukunft anfallenden **Umsetzungskosten werden** im Prozess **politische Opportunitäts- bzw. Partizipationskosten anfallen**. Es geht um die Ermöglichung der notwendigen politischen Prozesse in den Entwicklungsländern, um Entschädigungszahlungen für ökonomische Verlierer des Prozesses sowie um den Aufbau der erforderlichen Fähigkeiten (Capacity Building).

Opportunitätskosten sind Kosten, die dafür aufgebracht werden, dass die Challenge-Länder in eine Situation gebracht werden, dass sie sich am Prozess der NDC-Überarbeitung und späteren Umsetzung beteiligen und diesen Jahr für Jahr mittragen. Hier ist zu verstehen, dass es nicht per se selbstverständlich ist, dass man sich als Entwicklungs- und Schwellenland auf einen verbindlichen Weg zur Absenkung seiner CO₂-Emissionen einlässt. Das Recht auf nachholende Entwicklung schließt das Recht ein, seine Emissionen zu erhöhen. Wenn man Net Zero für 2060 zusagt, gibt man Optionen aus der Hand – auch Optionen für weiteres Spekulieren auf Geld und sonstige Unterstützung. Sprichwörtlich bekommt das “Fass ohne Boden” damit einen Boden, was besser ist als gar kein Boden, auch wenn das Fass relativ groß ist. Immerhin kann man seine Größe abschätzen. Seit Jahren verhandeln Globaler Norden und Globaler Süden ohne echte Ergebnisse über internationale Klimafinanzierung und entsprechende Transfers, während das global noch zulässige CO₂-Budget immer weiter schwindet.

Es deutet sich an, dass sich die Verhandlungsposition der Entwicklungs- und Schwellenländer verbessert. Unverändert sehen sich diese Länder finanziellen Pressionen insbesondere des Westens gegenüber, indem dieser finanzielle Unterstützung nur bei Verfolgung bestimmter Wege, z. B. „Renewables Only“, gewährt. Auf der anderen Seite aber bietet sich mehr und mehr die Option der Kooperation mit China an, das ebenfalls finanziell unterstützen kann und dabei weniger restriktiv in der Ausgestaltung der Energiesysteme ist.

Jede Festlegung auf einen Weg bedeutet, dass man Optionen aus der Hand gibt. Es werden bestimmte Umsetzungsprogramme zu verfolgen sein, die für die heimische wirtschaftliche Situation möglicherweise Nachteile bringen. In einem solchen Fall wird es Gegenleistungen geben müssen. Es können enorme Schwierigkeiten im politischen Prozess im eigenen Land entstehen. Wenn die Vorteile des Mitmachens nicht klar überwiegen, wird man keine günstige Verhandlungsposition aufgeben.

Hat man sich einmal verpflichtet, ist man „Gefangener“ der akzeptierten Verpflichtungen und der daraus resultierenden Zwänge. Ist die Mitwirkung bzw. sind die Zusagen an Geldflüsse gekoppelt, kann man dennoch nicht sicher sein, dass die Förderungen tatsächlich Jahr für Jahr zuverlässig erfolgen, und nicht irgendwann gestoppt werden. Letztlich geht es auch hier um Fragen der

Machtverhältnisse. Es besteht eine Pfadabhängigkeit, die dazu führen kann, dass der Umbauprozess infolge eines Stopps der Geldflüsse auf der halben Strecke sehr teuer wird.

Das Umfeld kann sich ändern. Was heute preiswert ist, kann plötzlich sehr teuer werden. Allen diesen Risiken soll mit Opportunitäts- bzw. Partizipationskosten begegnet werden.

Die bisher durchgeführten Analysen zeigen, dass die **Umsetzungskosten hoch, aber tragbar** sind. Wesentliche Kostenbestandteile wurden in den vorherigen Kapiteln beschrieben.

Von großer Bedeutung sind die gegenüber einem Business as Usual anfallenden Differenzkosten zur Erreichung von Klimaneutralität, die über den gesamten Betrachtungszeitraum Jahr für Jahr von der erweiterten OECD zu tragen sind. Solche fallen zum Beispiel im Kontext des Einsatzes von Carbon Capture an. Man kommt damit in die Größenordnung der Summen, die die Entwicklungsländer in den konditionierten NDCs fordern. Sie sind damit nicht unrealistisch.

Ein weiterer wichtiger Kostenblock im Rahmen der Umsetzung sind die Aufwendungen für die Finanzierung transnationaler Energieinfrastrukturen. Dies sind zum Beispiel Stromleitungen oder Pipeline-Systeme.

Zudem werden alle Staaten, in denen umfangreiche Maßnahmen im Bereich der Natur-basierten Lösungen (Aufforstung, Bodenrestaurierung) durchführbar sind, von der Finanzierung dieser Aktivitäten profitieren, die gleichzeitig eine erhebliche Steigerung der Wirtschaftstätigkeit und damit die Schaffung von Arbeitsplätzen und Einkommen zur Folge haben.

Diejenigen Staaten, die über große Regenwaldflächen verfügen, profitieren von enormen Mittelzuflüssen zum Schutz der Regenwälder. Es geht um insgesamt 100 Milliarden US-Dollar pro Jahr.

Ergänzend zu den ohnehin anfallenden Umbaukosten fallen mit Blick auf die konditionierten NDCs also (nur) die politischen Opportunitätskosten für die Einbringung eigener Ambitionen in die NDC-Welt an, die dann konditionslos sind – abgesehen von der Konditionierung, dass die zuvor beschriebenen Programme der Referenzlösung tatsächlich umgesetzt werden.

Im Bereich der **Opportunitätskosten** geht es um **50 US-Dollar pro Person und Jahr für 25 Jahre**, wobei die Auszahlung Jahr für Jahr erfolgt und anteilig auf die Zeit bis zum Erreichen von Net Zero umgelegt wird, orientiert an der Einhaltung der gegebenen Zusagen der Staaten. Bei fünf Milliarden Menschen und 25 Jahren geht es um insgesamt 2,5 Billionen US-Dollar. Wenn ein Land wie Kenia also mit 50 Millionen Menschen Net Zero bis 2050 plant, fließen Jahr für Jahr 2,5 Milliarden US-Dollar unkonditioniert ins Land – 25 Jahre lang, wenn die Zusagen in den NDCs eingehalten werden. Für Indien geht es mit 1,4 Milliarden Menschen und Net Zero 2070 um insgesamt 70 Milliarden US-Dollar pro Jahr.

6.4.2 Implementierung eines Cap-and-Trade-Systems

Aus vielerlei Gründen wäre ein Cap-and-Trade-System für die Bepreisung der CO₂-Emissionen der Staaten nach 2025 wünschenswert. Ein solcher weltweiter Rahmen ist – wenn es gelingt ihn zu etablieren – ein sehr viel effektiverer und effizienterer Weg als Einzelvereinbarungen reicher Länder mit Entwicklungs- und Schwellenländern gemäß der Logik der Just Energy Transition Partnerships (siehe Kapitel 7). So ist der Bürokratieaufwand viel geringer. Hinzu kommen große Vorteile für alle Beteiligten durch die **Trading-Option**. Die geplanten Finanztransfers können der Hebel sein, dass ein solches Cap-and-Trade-System etabliert wird, auch wenn dies in der Vergangenheit nicht gelungen ist.

In der Folge wird ein Ansatz für ein Cap-and-Trade-System beschrieben, dem die NDCs der Staaten der Welt zugrunde liegen.

Aus den Eckdaten der NDCs lässt sich in kanonischer Weise ein Cap-and-Trade-System konstruieren, wie es zuvor von zwei der Autoren dieses Reports vorgeschlagen wurde.¹⁷⁹ Es basiert auf den fixierten Versprechen der Staaten für Zielwerte für einzelne Jahre und benötigt dazu im besten Fall alle Staaten. Aus der Ökonomie und entsprechenden Modellen ist jedoch bekannt, dass der gewünschte Nutzen auch entsteht, wenn weniger als 100 % aller Beteiligten daran teilnehmen.

An dieser Stelle wird die zuvor vorgenommene Einteilung der Staaten in Gruppen relevant, vgl. Kapitel 4. Dort wurden die Staaten der Welt zunächst in drei Gruppen unterteilt, nämlich die erweiterte OECD mit insgesamt 13 Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen und Net Zero-Ziel 2050, den China-Club mit 13 Milliarden Tonnen CO₂ und Net-Zero-Ziel 2060 und die Challenge-Gruppe mit aggregiert ebenfalls etwa 13 Milliarden Tonnen CO₂ und Net-Zero-Zielen bis 2050, 2060 bzw. 2070. Zudem wurden die Länder der Challenge-Gruppe gemäß der Einordnung Ihrer Herausforderung, dem **Challenge-Index** (vgl. Kapitel 4.5), betrachtet. Dabei entfallen in 2030 auf die Untergruppe 1 etwa 4 Milliarden Tonnen CO₂, auf die Untergruppe 2 etwa 5 Milliarden Tonnen CO₂ und auf die Untergruppe 3 etwa 4 Milliarden Tonnen CO₂.

Die jeweiligen Reduktionspfade werden durch ein bis zwei weitere Stützpunkte konkretisiert (in dieser Illustration 2030 oder 2035 bzw. 2050). Zwischen den fixierten Ankerpunkten der Versprechen werden die Emissionen und ihre jährlichen Absenkungen gemäß linearer Interpolation festgelegt. Die erweiterte OECD senkt ihre Emissionen bis 2030 um 40 % ab. Der China-Club senkt seine Emissionen bis 2035 um 35 % ab. In 2050 fallen dort noch 2 Milliarden Tonnen CO₂ an. Für die Untergruppen 2 und 3 der Challenge-Gruppe verbleiben in 2050 noch 1 bzw. 2 Milliarden Tonnen CO₂.

¹⁷⁹ Vgl. Herlyn, Radermacher (2021).

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die **Stützpunkte**, aus denen die Reduktionspfade der fünf Staatengruppen resultieren, die wiederum die **Basis für die Cap-Linie** des Cap-and-Trade-Systems bilden:

Ankerjahr	2025	2030	2035	2050	2060	2070
Erweiterte OECD	13,0	7,8		0		
China Club	13,0		8,45	2,0	0	
Challenge Gruppe - Untergruppe 1	4,0		2,5	0		
Challenge Gruppe - Untergruppe 2	5,0		3,0	1,0	0	
Challenge Gruppe - Untergruppe 3	4,0		2,5	2,0		0
Cap-Werte (Welt gesamt)	39,0	29,025	22,3	5,0	1,0	0

Tabelle 5: Stützpunkte der CO₂-Reduktionspfade der Staatengruppen (in Mrd. Tonnen CO₂)

Für jede der fünf Teilgruppen ist damit für jeden Zeitpunkt bis 2070 festgelegt, wie viele Emissionen in jedem Jahr auf dem Gesamt-Territorium dieser Staaten noch erlaubt sind. Addiert man für jeden Zeitpunkt die noch erlaubten Emissionen auf, ergibt sich die **Cap-Linie für die Welt**. Dabei werden die fünf Gruppen mit ihren anfänglichen Emissionsumfängen gewichtet, also die erweiterte OECD mit 13 Milliarden Tonnen, der China-Club mit 13 Milliarden und die drei Untergruppen der Challenge-Gruppe mit 4 bzw. 5 bzw. 4 Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr (siehe Abbildung).^{180, 181} Bei der Umsetzung sollte man die CO₂-Emissionen individuell auf alle betrachteten 185 Staaten der Welt herunterbrechen und dann alle individuellen Reduktionsverläufe heranziehen, um die jährlichen Gesamt-Cap-Werte abzuleiten.

Die nachfolgende Abbildung 8 visualisiert die CO₂-Reduktionsverläufe der fünf betrachteten Gruppen bei linearer Interpolation zwischen den Stützpunkten. Die Verläufe sind dabei innerhalb der fünf Gruppen jeweils ähnlich, unterscheiden sich also nur durch einen konstanten Faktor, der proportional zu den Gesamtemissionen des jeweiligen Landes in 2025 ist.

¹⁸⁰ Die energiebezogenen CO₂-Emissionen der Challenge-Gruppe lagen im Jahr 2019 bei rund 9,4 Mrd. Tonnen CO₂. Um die Robustheit des Cap-and-Trade-Systems zu erhöhen, wurde dieser Wert auf 13 Mrd. Tonnen erhöht. Dies lässt sich damit begründen, dass weitere Emissionssteigerungen bis zum Jahr 2025 erwartet werden, welches das Startdatum der vorgestellten Referenzlösung bildet. Außerdem entstehen gerade in den Ländern der Challenge-Gruppe hohe Emissionen anderer Treibhausgase, wie z. B. Methan, die nicht energiebedingt, sondern u. a. durch Landnutzungsänderungen hervorgerufen werden. Die Annahme von 13 Mrd. Tonnen CO₂ für die Challenge-Gruppe ist daher ein plausibler und konservativer Wert.

¹⁸¹ Für die Einteilung der Challenge-Gruppe in die drei Untergruppen wurde ein „Challenge-Index“ entwickelt, der die Länder bezüglich der Größe der zu bewältigenden Herausforderungen zur Erreichung von Net-Zero bewertet. In den Challenge-Index fließen Daten zur Verfügbarkeit von fossilen sowie erneuerbaren Energiequellen, die Wirtschaftskraft, das Potenzial für Natur-basierte Lösungen, das Bevölkerungswachstum und der Good Governance ein. Nähere Informationen liefern das Kapitel 4.5 und der Anhang A.3.

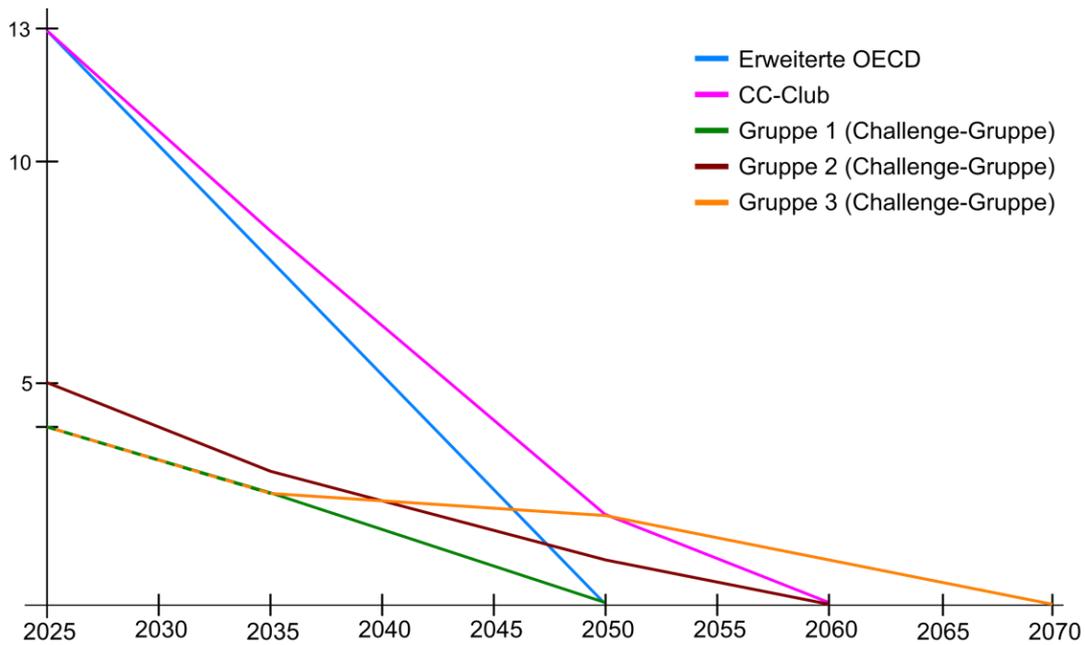


Abbildung 8: CO₂-Reduktionsverläufe 2025-2070

Die nachfolgende Abbildung zeigt auf, wie sich aus den fünf CO₂-Reduktionsverläufen, die addiert werden, die globale Cap-Linie ableiten lässt. Die resultierende Summe ist schließlich die Basis für eine Approximation. Details zur resultierenden Cap-Linie sind für alle Jahre bis 2070 verfügbar und finden sich im Anhang.¹⁸² Die in der Abbildung rot dargestellte Cap-Linie findet sich in der zusammenfassenden Abbildung 9 wieder, in der die CO₂-Wirkungen der ergriffenen Maßnahmen zusammenfassend dargestellt werden.

Mit diesem Ansatz erhält somit jedes Land als Menge an zulässigen Emissionsrechten genau die, die auf seinem Territorium gemäß seinem eigenen NDC zulässig ist – und damit genau seinen Anteil an den Gesamtemissionen. Die Herausforderung ist also für jedes einzelne Land dieselbe, ob es die Trading-Option unter einem Cap-and-Trade-System nutzt oder nicht.

¹⁸² Vgl. Anhang A.3.

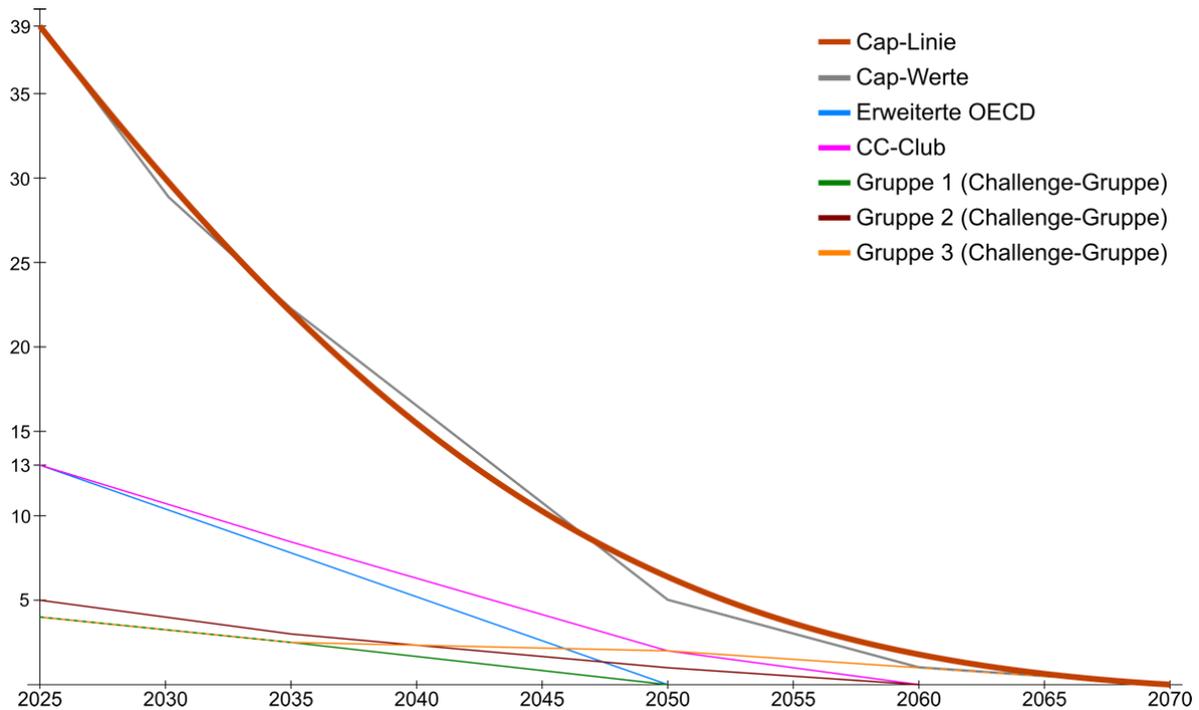


Abbildung 9: Aus den CO₂-Reduktionsverläufen resultierende Cap-Linie

Hinzu kommen zwei Aspekte, die die Vorteilhaftigkeit des vorgeschlagenen Systems untermauern:

1. Die Verlässlichkeit, dass alle Staaten ihre Zusagen einhalten, weil es insbesondere den Entwicklungs- und Schwellenländern ökonomische Nachteile bringt, sich nicht an diese zu halten, weil in diesem Moment die Geldflüsse aus der erweiterten OECD (politische Opportunitätskosten) ganz oder teilweise ausbleiben. Die **Trittbrettfahrer-Problematik entfällt** also weitgehend.
2. Die Möglichkeit des **Tradings**. Diese wirkt für alle teilnehmenden Staaten generell **kostensenkend**. Sie alle profitieren in ökonomischer Hinsicht.

Es ist also damit zu rechnen, dass alle Staaten sich beteiligen werden. Sobald sich die Staaten über eigene NDCs (ohne Konditionierung) an Versprechen gebunden haben, ergibt sich kein ökonomischer Vorteil mehr daraus, beim Cap-and-Trade-System nicht mitzumachen, wenn von der eigenen Zuverlässigkeit wesentliche Finanzflüsse aus den reichen Ländern abhängen. Angesichts der vielen Vorteile für die Teilnehmer ist Nicht-Beteiligung keine kluge Option. Das gilt insbesondere für die Länder der Challenge-Gruppe.

Die Mitglieder der beiden anderen Gruppen haben sich nach Abwägung der Vor- und Nachteile ohnehin für einen Weg in Richtung Net Zero entschieden. Sie sind leistungsstark genug, diese Ziele zu erreichen und kennen die historischen Ansprüche der anderen Staaten an sie. Allerdings sind die in den NDCs versprochenen Reduktionen dann auch zu liefern. Dabei geht es für Staaten der Challenge-Gruppe bzgl. Compliance um viel Geld, um die beschriebenen jährlichen unkonditionierten

Zuwendungen, die sie dafür erhalten, dass sie mitmachen und sich auf realistische NDCs „committed“ haben, auch tatsächlich zu erhalten. Dies ist ihnen möglich, wegen der in der Referenzlösung vorgesehenen erheblichen finanziellen Unterstützung in diesem Prozess (insbesondere auch politisch) und wegen der ebenfalls zugesagten Finanzierung von Differenzkosten. Hinzu kommen gegebenenfalls diverse Beteiligungsgewinne von Staaten aus den vielen Sonderprogrammen der Referenzlösung. Es gibt also für die Challenge-Gruppe-Staaten nur noch teure Ausstiegsoptionen, wenn sie sich einmal für NDCs ohne Konditionierung (und zugleich mit massiver finanzieller Unterstützung) entschieden haben. **Wenn aber Ausstieg keine Option mehr ist, ist Beteiligung am Cap-and-Trade-System die klügste Lösung.**

Sollte die Referenzlösung implementiert werden, ist eine Beteiligung an der auf realistischen NDCs basierenden Cap-and-Trade-Welt also so attraktiv gestaltet, dass eine Nicht-Beteiligung für Staaten der Challenge-Gruppe eher Nachteile nach sich ziehen würde.

Als Teilnehmer am Cap-and-Trade-System verfügen die Länder frei über ihre CO₂-Kontingente. Sie dürfen diese an andere Teilnehmerländer verkaufen oder dort zusätzliche Rechte einkaufen. Sie dürfen sie auch ihren Unternehmen zur Verfügung stellen. Wenn sie auf ihrem Territorium in einem Jahr mehr Emissionen tätigen wollen, als ihnen Rechte zufallen, müssen sie diese von anderen kaufen. Die Aufgabe besteht ansonsten darin, jedes Jahr dafür Sorge zu tragen, dass auf dem eigenen Territorium nicht mehr CO₂-Emissionen anfallen als Rechte vorhanden sind.

An dieser Stelle lohnt ein **Blick zurück**: Interessanterweise lag bei der Weltklimakonferenz COP15 in Kopenhagen in 2009 eine tragfähige Vereinbarung für eine Lösung des Klimaproblems auf dem Tisch – in Form eines globalen Cap-and-Trade-Systems auf der Basis der Idee der Klimagerechtigkeit. Der Ansatz schloss an das Kyoto-Protokoll an. Leider scheiterte die Konferenz trotz vieler Jahre intensiver Vorarbeit, was insbesondere am Schulterchluss der USA und Chinas gegen den Ansatz lag. Damals wäre das Klimaproblem noch vergleichsweise „sanft“ lösbar gewesen.¹⁸³ Leider kam es anders. Die Idee einer kohärenten, abgestimmten, mit wechselseitigen Verpflichtungen und die Erleichterungen durch die Möglichkeit eines Tradings von Emissionsrechten verbundenen Lösung wurde ad acta gelegt. Sechs Jahre später kam es zum Pariser Klimavertrag, der bei realistischer Betrachtung nicht viel mehr als eine „halbe Miete“ ist: Die Staaten der Welt erklärten individuell, was sie zu tun bereit sind. Es entstanden die NDCs. Diese sind zu wenig ambitioniert und letztlich nicht rechtlich verbindlich – es sei denn, sie wurden in nationale Gesetze bzw. in der EU auch in verbindliche Regulierungen übersetzt. Bei den Entwicklungs- und Schwellenländern sind die NDCs stark an Finanzflüsse aus anderen Staaten gekoppelt. Solche kann ein Staat in seinem NDC zwar fordern, es fehlt dann aber noch immer der Partner, der zahlt. Der Ansatz individueller NDCs stößt hier an seine Grenzen. Fehlen hohe Geldflüsse, gibt es in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern keine

¹⁸³ Vgl. Radermacher (2020).

substantiellen Maßnahmen zum Klimaschutz. Mit dem im Rahmen der Referenzlösung beschriebenen Ansatz eines Cap-and-Trade-Systems auf der Basis realistischer NDCs besteht die Hoffnung einer Rückkehr zum früheren Weg, der leider nach der Kopenhagener Klimakonferenz nicht weiter beschritten wurde.

6.5 Zusammenfassende Betrachtung

Insgesamt sind von der erweiterten OECD Kosten in Höhe von jährlich 1,2 Billionen US-Dollar zu tragen. Diese setzen sich wie folgt zusammen:

	Jährliche Kosten für die erweiterte OECD
Erhalt der verbliebenen Regenwälder	200
Gigaprogramm Natur-basierte Lösungen	
Kurzumtriebsplantagen	
Vermeidung technischer Methan-Leckagen	
Kofinanzierung von Energieinfrastrukturen	150
Differenzkostenübernahme bei Carbon Capture, vermehrter Nutzung von Gas statt Kohle, Natur-basierte Lösungen außerhalb des Gigaprogramms	600
Überarbeitung der konditionierten NDCs und Ermöglichung ihrer Umsetzung	250
Implementierung eines Cap-and-Trade-Systems	0
Gesamt	1.200

Tabelle 6: Jährliche Kosten für die erweiterte OECD (in Mrd. US-Dollar)

Dies entspricht Kosten in Höhe von jährlich **800 US-Dollar pro Bürger der erweiterten OECD**.

Für jeden Menschen in der Challenge-Gruppe, in der etwa viermal so viele Menschen leben wie in der erweiterten OECD, werden damit finanzielle Mittel im Umfang von im Mittel **200 US-Dollar pro Jahr** aufgebracht, was einer im Verhältnis zu europäischen Verhältnissen preiswerten Vermeidung von CO₂ entspricht. Bei den aufzubringenden Mittel geht es also um ein Vielfaches von dem, was seit Jahren unter dem Begriff Klimafinanzausgleich im Kontext des Green Climate Fund diskutiert wird.

Im Rahmen der zuvor beschriebenen Governance und Finanzierungsbeiträge wurden Mittel, die aus dem Green Climate Fund in die Entwicklungsländer fließen sollen, deshalb nicht gesondert betrachtet, geht es doch lediglich um eine zugesagte Unterstützung in Höhe von jährlich 100 Milliarden US-Dollar ab 2020. Diese Unterstützungssumme wurde bisher nie erreicht. Zudem handelt es sich bei einem Großteil der Mittel um Kredite und Bürgschaften. Die Thematik Klimafinanzausgleich in dem beschriebenen Sinne wird in der Referenzlösung nicht explizit verfolgt. Diverse, zielgenaue und

besser finanzierte Programme übernehmen die Aufgaben. Oftmals geht es dabei um direkte Transfers sozialer Art. Insgesamt geht es um etwa die zehnfache Summe dessen, was bisher in diesem Bereich diskutiert wird, nämlich um viel mehr als 1 Billion US-Dollar. Die Mittel liegen in ihrer Höhe damit im Bereich der Beträge, die die Staaten der Challenge-Gruppe im Bereich der konditionierten NDCs fordern.

Die nachfolgende Abbildung fasst zentrale Elemente der Governance und Finanzierung zusammen und stellt sie in den größeren Kontext der zwingend notwendigen Kooperation zwischen den drei Ländergruppen:

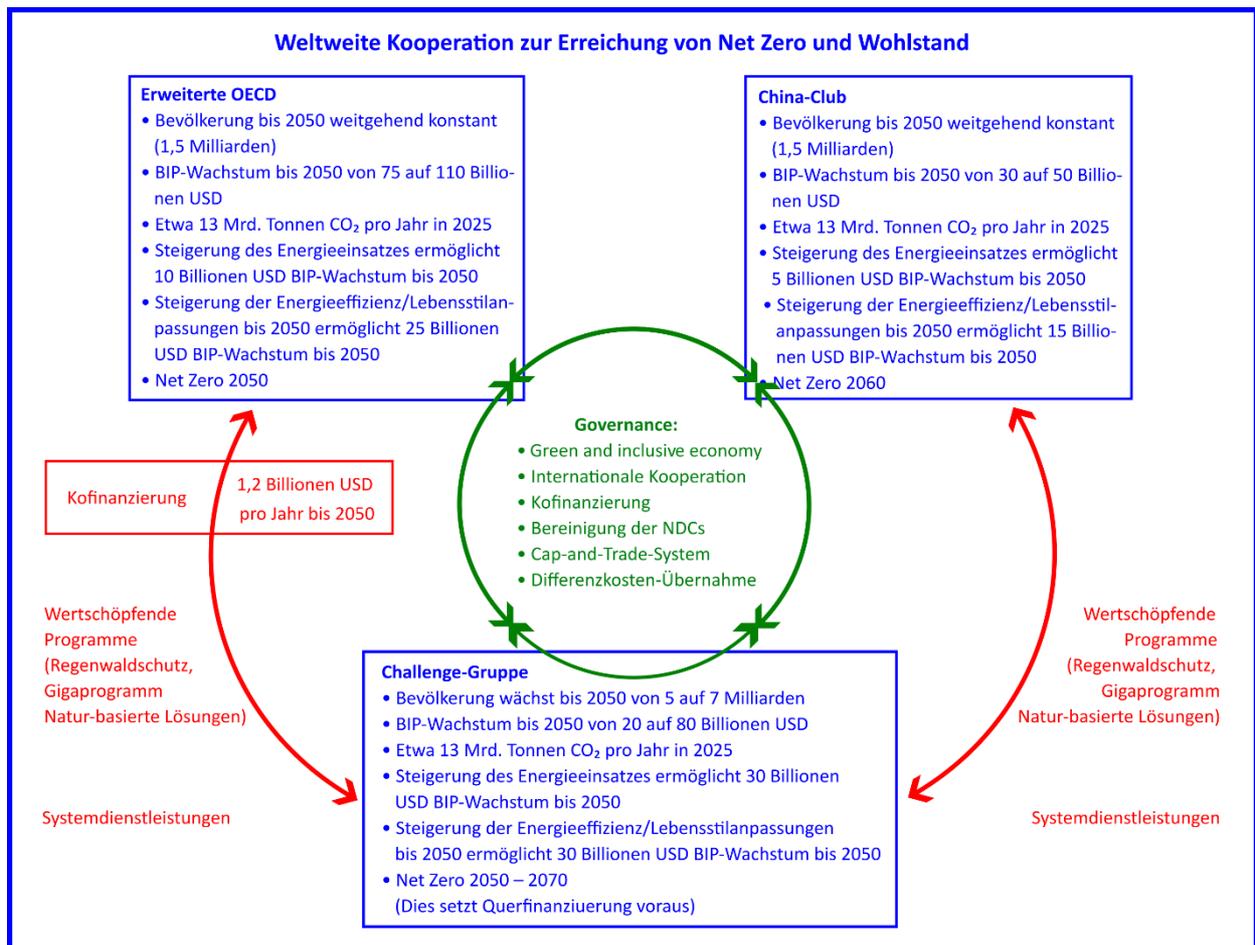


Abbildung 10: Weltweite Kooperation zur Stabilisierung des Klimasystems und zur Förderung von Entwicklung

Quelle: Eigene Darstellung

7 Bezüge zu anderen Ansätzen und Studien

In diesem Kapitel werden Bezüge zu anderen Ansätzen und Studien beschrieben, die darauf abzielen, das Energiesystem in Richtung von Net Zero zu transformieren. Es fällt dabei auf, dass eine parallele Betrachtung der Wachstumserwartungen in den Entwicklungs- und Schwellenländern häufig nicht in der Weise Berücksichtigung findet, wie es in der GES-Referenzlösung der Fall ist. Im Umfeld des BMZ sind die sog. Just Energy Transition Partnerships ein relevanter Bezug, verfolgen doch auch sie das Ziel, einzelne Staaten in ihrem Umbau hin zu einem klimaneutralen Energiesystem zu unterstützen.¹⁸⁴ Auch Local-Grid-Programme finden hier Beachtung, geht es doch darum, Menschen, die bisher keinen Zugang zu Energie haben, aus dieser Situation herauszuhelfen – inhaltlich und finanziell.

7.1 Die Just Energy Transition Partnerships

7.1.1 Finanzierungserfordernisse im Süden

Die Bewältigung der Energie- und Klimaprobleme ist aus Sicht von Global Energy Solutions insbesondere ein **globales Problem**. Die zentrale Dynamik im Klimabereich ist verbunden mit den Ländern, die vergleichsweise arm sind, bei denen sich aber gleichzeitig die Bevölkerung rasant vergrößert, insbesondere in Afrika. Gleichzeitig besteht das Ziel eines großen Wohlstandsaufbaus, dies auch gemäß der Position der Weltgemeinschaft bei Ziel 8 der Sustainable Development Goals. Das motivierende Beispiel ist China, wobei der Unterschied zu China insbesondere darin liegt, dass es in den Challenge-Ländern weltweit schon heute um eine etwa drei- bis viermal so große Bevölkerung wie die jetzige in China geht. Was heißt das für die CO₂-Emissionen, die heute in den betroffenen Ländern teilweise nur bei 1 Tonne pro Kopf und Jahr liegen? Vierfache Bevölkerung heißt – einfach gesagt – eine viermal so große CO₂-Emissionsmenge, wenn sonst alles gleich bliebe. Damit ist nicht zu rechnen. Dennoch könnte der Emissionsumfang Chinas noch einmal hinzukommen.

Die Politik mancher reichen Länder scheint in dieser Situation darauf hinauszulaufen, die ärmeren Länder möglichst weitgehend in eine „**Renewables only**“-Strategie zu drängen. Dies vor allem mit dem Argument, man müsse dort nicht die Fehler wiederholen, die die reichen Länder und China gemacht haben. Ein weiteres Argument besagt, dass die erneuerbaren Energien die preiswertesten Energien seien und es deshalb am sinnvollsten sei, allein in diese Richtung zu gehen. Dagegen rührt sich allerdings mehr und mehr Widerstand der ärmeren Länder, insbesondere derer, die sich stark industrialisieren wollen, also beispielsweise eine **Stahl- und Zementindustrie** aufbauen

¹⁸⁴ Vgl. BMZ (2023a).

wollen. Sie wissen, dass die Volatilität der erneuerbaren Energien eine Industrialisierung praktisch ausschließt. Sie sprechen deshalb von der „**Heuchelei des Nordens**“.¹⁸⁵

Der Norden nutzt in dieser Situation andere Instrumente, etwa seinen Einfluss auf die Weltbank, auf die internationalen Entwicklungsbanken und den Finanzsektor, und hat damit bewirkt, dass diese im Sinne eines Moratoriums entschieden haben, fossile Energieträgerprojekte im globalen Süden im Allgemeinen nicht mehr zu finanzieren.

7.1.2 Exemplarische Just Energy Transition Partnerships

Eine spezielle Ausprägung der Hilfezusagen des Nordens (im Rahmen des Klimafinanzausgleiches) sind die Just Energy Transition Partnerships (JETPs), dies mit Unterstützung aus Deutschland. Die ersten vorhandenen Beispiele ähneln entfernt dem, was wir bei Global Energy Solutions vorschlagen.

Just Energy Transition Partnerships gehen zurück auf den **G7-Gipfel in Deutschland** (Elmau 2022), bei dem sich die G7-Staaten einerseits einig waren, dass man (1) Kohle, bei der CO₂ nicht abgefangen wird (non abated coal), nicht abschaffen, sondern ausphasen will, dass man (2) saubere und erneuerbare Energien befördern will und (3) dass all das ökologisch und sozial gerecht passieren soll. Dabei sollen (4) Themen wie eine Circular-Economy, also eine Kreislaufwirtschaft, mitbedacht werden.

Bei diesen generellen Überlegungen hat man sich darauf verständigt, dass man **einzelne Staaten** im Rahmen starker Partnerschaften im Sinne von Just Energy Transition Partnerships (JETP) **fördern** will. Der Ansatz besteht darin, dass verschiedene Partner aus den reichen Ländern mit sich entwickelnden Ländern Abkommen vereinbaren, die zwei Seiten haben. Einerseits eine Planung des ärmeren Landes, sich zum Beispiel aus der „non abated coal“ herauszubewegen, erneuerbare Energien zu fördern und zwar mit konkreten Plänen, was zum Beispiel bis 2030 geleistet werden soll. Andererseits soll eine Gruppe der reichen Länder bei der Finanzierung helfen.

Finanzierung bereitstellen

Hier geht es neben direkten Zuwendungen um Kredite, um Sicherheiten und auch um Beiträge des Privatsektors im Sinne von Fördermaßnahmen. Die Beiträge des Finanzsektors können darin bestehen, dass Kredite besonders günstig gewährt werden, oder dass zum Beispiel intertemporäre Lösungen gesucht werden, wenn Geld sofort gebraucht wird, aber erst später zur Verfügung steht.

¹⁸⁵ Vgl. Herlyn, Radermacher (2022).

Das erste derartige Abkommen wurde mit **Südafrika** geschlossen.¹⁸⁶ Südafrika hat **höhere CO₂-Emissionen als Großbritannien**, und das bei einer kleineren Bevölkerung und deutlich geringerem BIP pro Kopf als das Vereinigte Königreich. Das hängt mit der speziellen Struktur des Energiesektors in Südafrika zusammen, der massiv auf Kohle basiert. Wegen der früheren Öl-Boykotts gegen Südafrika im Kontext der Apartheid produziert das Land alle seine Kraftstoffe selbst aus Kohle.

Die Partnerships beinhalten im Falle von Südafrika, dass man sich auch um grünen Wasserstoff kümmert. Man hofft, über die nächsten 20 Jahre 1 - 1,5 Milliarden Tonnen CO₂ durch die Partnerschaft zu vermeiden. Die vorgesehenen Mittel bestehen zunächst darin, dass die Geberländer 8,5 Milliarden US-Dollar für diese erste Phase bis 2030 bereitstellen. Es ist eigentlich ein kleiner Betrag für die Ambitionen, die mit diesem Vorhaben verbunden sind. Dafür wäre eher der zehnfache Betrag notwendig. Die Mittel werden aufgebracht durch die Regierungen von Frankreich, Deutschland, Großbritannien, der Vereinigten Staaten von Amerika und der Europäischen Union.

Als großer Erfolg gilt das Abkommen mit **Indonesien**, ein großes Land mit einer Bevölkerung von mehr als 270 Millionen Menschen.¹⁸⁷ Indonesien hat einen **hohen Anteil an Kohle** bei der Stromerzeugung. Trotz entsprechender Pläne in den letzten 20 Jahren, diesen Anteil zu senken, ist genau das Gegenteil passiert, die Nutzung von Kohle hat weiter zugenommen. Zu den JETP-Zielen gehört, dass Indonesien bis 2030 nicht mehr als 290 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr im Bereich der Energieerzeugung emittieren soll. Ab 2030 will man sich ambitioniert in Richtung Zero-Emission im Kraftwerksektor bis 2050 bewegen. Dazu gehört ein beschleunigtes Außer-Dienst-Nehmen von Kohlekraftwerken, wiederum abhängig vom internationalen Unterstützungsgrad. Der Aufbau erneuerbarer Energien soll forciert werden. Man möchte in 2030, dass mindestens 34 % der Stromproduktion aus Erneuerbaren kommen. In diesem Kontext hat Indonesien sein **Net-Zero-Ziel 2060 auf 2050 vorgezogen**. Die bereitgestellten Mittel betreffen 20 Milliarden US-Dollar über die nächsten drei bis fünf Jahre der Partnerschaft. Wobei die Hälfte (10 Milliarden US-Dollar) durch die staatlichen Mitglieder der Partnerschaft aufgebracht werden sollen. Der Finanzsektor, die sog. GFANZ (Glasgow Financial Alliance for Net Zero), soll weitere 10 Milliarden aufbringen.

Auch mit **Vietnam** wurde eine entsprechende Partnerschaft aufgebaut.¹⁸⁸ Auf der Finanzierungsseite sind die Europäische Union, Großbritannien, Nordirland, die Vereinigten Staaten von Amerika, Japan, Deutschland, Frankreich, Italien, Kanada, Dänemark und Norwegen beteiligt. Es könnte sein, dass die zur Verfügung gestellten Mittel aus Sicht von Vietnam nicht ausreichend sind. Finanziell

¹⁸⁶ "Multilaterale JETP zielen darauf ab, soziale Risiken der ökologischen Wende abzufedern und so die gesellschaftliche Akzeptanz zu erhöhen. Mit Südafrika, das den Großteil seines Energiebedarfs mit Kohle abdeckt, haben Deutschland, die EU, Frankreich Großbritannien und die USA eine JETP vereinbart, die den Ausbau der erneuerbaren Energien fördern und in Kooperation mit der Privatwirtschaft vom Kohleausstieg betroffene Arbeitnehmer im Bergbau unterstützt." BMZ (2023a).

¹⁸⁷ Vgl. Van Reybrouck (2022).

¹⁸⁸ Vgl. BMZ (2022).

sind **15,5 Milliarden US-Dollar** im Gespräch, wobei die Finanzierungs-Partnergruppe die Hälfte der Mittel von der öffentlichen Seite her aktivieren würde, die andere Hälfte sollen Partner aus dem Finanzsektor aufbringen. Auf jeden Fall sollten Kohlekraftwerke ohne Abfangen von CO₂ möglichst rasch aus dem Betrieb gehen. Bei den Erneuerbaren stehen Wind, Solar und Wasserkraft im Vordergrund.

Eine weitere Just Energy Transition Partnership mit dem **Senegal** kam 2023 zustande.¹⁸⁹

In der Zwischenzeit wurde auch mit weiteren Ländern verhandelt. Vor allem mit **Indien**, das mit Abstand interessanteste Land in diesem Kontext. Mit Indien konnte bisher jedoch noch keine Einigung erzielt werden. Die angebotenen Mittel sind aus indischer Sicht viel zu gering.

Der Unterschied der Just Energy Transition Partnerships zur **GES-Referenzlösung** liegt vor allem im Bereich der Finanzierung. In ihrer heutigen Form zielen JETPs durchaus in die richtige Richtung, sind aber letztlich nur ein Baustein unter mehreren und bislang finanziell unterdimensioniert. In der Referenzlösung ist der **Mittleinsatz** um einen Faktor 5 bis 10 **höher**. Das ist wesentlich realistischer, wenn man Net Zero erreichen will. Zudem zielen die Partnerships in der Regel auf 2030. Der Zeithorizont ist also deutlich kürzer. Dies mag für einzelne Projekte sinnvoll sein, weil so z. B. die Chance auf politische Stabilität über diese Zeitspanne besteht. Für eine Gesamtlösung der Energie- und Klimafragen ist die Zeit bis 2030 jedoch zu kurz. Bis zu diesem Zeitpunkt den Ausbau der Erneuerbaren Energien zu forcieren ist sicher richtig. Die Fragen, wie langfristig ein stabiles Energiesystem entstehen und wie der steigende Energiebedarf gedeckt werden soll, sind jedoch alleine mit Maßnahmen im Bereich der Erneuerbaren Energien noch nicht beantwortet. Außerdem gehen die Planungs-, Realisierungs- und Finanzierungszyklen solch groß angelegter Projekte meist über die Zeit bis 2030 hinaus.

7.2 Local-Grid-Programme

Die Local-Grid-Programme – vielfach unter deutscher Beteiligung – fallen in den Rahmen einer Vielzahl von Bemühungen, insbesondere auch der Entwicklungspolitik, **erneuerbare Energie in ärmeren Ländern** zum Einsatz zu bringen. Solche Programme sind ein erheblicher Fortschritt für arme Bevölkerungen im Süden – ein erster Schritt in der Umsetzung von SDG 7 „Bezahlbare und saubere Energie“ für alle. Da sich Deutschland finanziell engagiert, ist es auch ein Beitrag zur internationalen Kooperation und Kofinanzierung.

¹⁸⁹ Vgl. BMZ (2023b).

Es ist dies eine Low-Cost-Lösung, wie sie z. B. durch Muhammad Yunus mit der Grameen Family von Unternehmen schon seit zwei Jahrzehnten in Bangladesch erfolgreich umgesetzt wird.^{190,191} Heute ist Grameenphone Pionier und Marktführer der Mobiltelefonie in Bangladesch. Grameen Shakti ist Pionier und Marktführer beim Vertrieb von Solar Home Systems und versorgte schon vor Jahren fünf Millionen Dorfbewohner mit Strom. **Basis** für die Verbreitung der Technologien, die auch einen wichtigen Beitrag zum Schutz bei den jährlichen Hochwassern (über Meldungen auf das Telefon) bieten, **sind Mikrokredite**, das Basisangebot der Grameen Bank. Tatsächlich verbessert jeder Zugang zu elektrischer Energie die Lebenssituation der Menschen, wobei der Grenznutzen der ersten Kilowattstunden am größten ist.

Local Grids adressieren die Energiearmut von hunderten von Millionen Menschen, etwa in Subsahara-Afrika. Sie beziehen sich vor allem auf das SDG-Ziel 7 „Bezahlbare und saubere Energie“. Dies geschieht von deutscher Seite z. B. im Rahmen der Initiative „Grüne Bürgerenergie für Afrika“. Im Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) setzten gemäß der Webseite der Initiative die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH und die KfW Entwicklungsbank gemeinsam die Initiative Grüne Bürgerenergie für Afrika um.

An dem Projekt „Local Grids“ war auch der frühere Afrika-Beauftragte des BMZ, der verstorbene Politiker Josef Göppel beteiligt. So wichtig die Programme sind, sie sind nur ein erster Schritt. Sie fallen in den Rahmen einer Renewable-Only-Philosophie. Aus Sicht der Referenzlösung ist das zu wenig.

Local Grids sind ein substanzieller Fortschritt im Sinne der Ziele der Agenda 2030. Auch wenn die Unterschiede zur GES-Referenzlösung massiv sind, vor allem, was die Industrialisierungs- und Finanzierungsanliegen anbelangt. Stromzugang für alle in einem begrenzten Umfang ist hier das Ziel, was noch lange nicht erreicht und bis heute wesentlich unterfinanziert ist.

Klar ist zugleich, dass **auf der Basis von Local Grids keine Industrialisierung** realisiert werden kann. Dafür werden große Mengen Energie benötigt – stabil und ohne Volatilität. Aus Sicht der Referenzlösung kommt dann z. B. ein Anteil fossiler Energieträger ins Spiel, der mit Carbon Capture in eine low carbon-Energiebereitstellung transformiert wird.

In diesem Kontext lohnt ein vergleichender Blick auf die sog. NDC-Partnerschaften. Hier manifestieren sich die Anliegen der internationalen Zusammenarbeit im Sinne des SDG-Ziels 17 „Partnerschaften zur Erreichung der Ziele“. Aber dies ohne Einsatz von Finanzierung als Teil der Zusammenarbeit – das immer gleiche Manko in derartigen Programmen. Es gibt insofern enorme Unterschiede

¹⁹⁰ Vgl. Yunus (1998).

¹⁹¹ Radermacher; Solte (2014).

zwischen der GES-Referenzlösung und den NDC-Partnerschaften. Hier wird viel Unterstützung insbesondere durch Beratung geleistet – was wichtig ist. Aber es fehlt an materiellen Beiträgen.

7.3 Unterschiede zu anderen Net-Zero-Studien

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Datenmodells, welches Global Energy Solutions bei der Erarbeitung seiner Referenzlösungen verwendet hat, mit den Aussagen wesentlicher Net-Zero-Studien der vergangenen zwei Jahre verglichen:

Betrachtet wurden:

- IEA (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector¹⁹²
- IRENA (2021): World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway¹⁹³
- bp (2022): bp Energy Outlook – 2022 Edition¹⁹⁴
- Shell (2021): The Energy Transformation Scenarios¹⁹⁵

Interessant ist ein Blick auf die Verfasser der vier Studien. Die **International Energy Agency (IEA)** wurde aus der Erfahrung der Ölkrise 1974 gegründet, sie hat 31 Mitgliedsländer (u. a. Deutschland, USA, Frankreich, Japan), weitere elf Länder sind assoziiert (u. a. China und Brasilien), davon drei Beitrittskandidaten (u. a. Israel). Weder Russland noch Länder des Nahen Ostens noch Mitglieder der OPEC gehören dazu. **International Renewable Energy Agency (IRENA)** ist eine in Abu Dhabi beheimatete Organisation, deren Ziel die Förderung erneuerbarer Energien ist. Derzeit führt sie 168 Länder als Mitglieder und hat weitere 16 Länder als Beitrittskandidaten.

Sie repräsentiert also das breite Meinungsspektrum sehr vieler Länder in Bezug auf den Ausbau erneuerbarer Energien. Schließlich haben wir die Studien der beiden großen börsennotierten **Ölkonzerne BP und Shell** ausgewählt, bei denen jeweils BlackRock ein großer Einzelaktionär ist. Die darin enthaltenen Angaben wurden, wo immer sinnvoll möglich, auf die Energieeinheit Terrawattstunde umgerechnet und werden in diesem Text der besseren Übersichtlichkeit halber in PWh (eine Petawattstunde (10 hoch 15) entspricht 1.000 Terrawattstunden, TWh) kommentiert.

¹⁹² Vgl. IEA (2021b).

¹⁹³ Vgl. IRENA (2021).

¹⁹⁴ Vgl. bp (2022).

¹⁹⁵ Vgl. Shell (2021).

	Total energy supply 2019 / PWh	Total final energy consumption 2019 / PWh	Total energy supply 2050 (Net Zero) / PWh	Total final energy consumption 2050 (Net Zero) / PWh	GDP 2019 / trillion US-\$	GDP 2050 (Net Zero) / trillion US-\$	CO2 emissions 2050 (reference) / Gt CO2	CO2 emissions 2050 (Net Zero) / Gt CO2
IEA	170	121	151	96	134,7	316,4	36	0
IRENA	167	105	167	97		N.N.	36,5	0
BP	174	133	181	98	127	283	31,1	2,4
Shell	169	116	230	153	134,1	292,6	/	14,2 Net zero: 2058
GES	164	110	210	172	93,3	240	51,1	5 Net zero: 2070

Tabelle 7: Wesentliche Energiedaten im Überblick

Quelle: Eigene Darstellung

Zunächst sieht man in Tabelle 7, dass der **Primärenergieeinsatz**, den GES als Ausgangspunkt 2019 auf Basis von Daten der IEA verwendet hat, in derselben Größenordnung liegt, wie die Daten, die die anderen Studien benutzt haben. Der Primärenergieeinsatz 2050 erreicht nicht ganz das Niveau der Studie von Shell, liegt aber insgesamt deutlich über den Werten in den drei anderen Studien. Im Endenergieverbrauch liegt die GES-Prognose über Shell und hat dementsprechend weniger Umwandlungsverluste.

Nicht überraschend ist, dass das auf Wohlstand und Wachstum ausgerichtete Programm von GES eine größere Wachstumsrate für das **Bruttoinlandsprodukt** über den Betrachtungszeitraum ergibt als die anderen Untersuchungen: Bei GES wird über den Zeitraum ein um den Faktor 2,6 erzielt, während alle anderen Untersuchungen nur bei 2,2 - 2,3 liegen. Zudem ist die GES-Untersuchung die einzige, die einen besonderen Fokus auf die Wachstumsimpulse für die Challenge-Länder legt und damit die Brücke zu den Sustainable Development Goals schlägt.

Ähnlich wie Shell kommt GES zu dem Ergebnis, dass Klimaneutralität 2050 noch nicht erreicht sein wird, unsere Perspektive ist 2070.

Bei den möglichen Wirkhebeln der zur Erreichung von Net Zero zusätzlich erforderlichen Maßnahmenprogramme benutzen die Studien teilweise vergleichbare Ansätze, kommen aber zu unterschiedlicher Gewichtung der Erfordernisse. Zudem ist die **GES-Arbeit die einzige, die die wichtige Rolle von Natur-basierten Lösungen explizit beschreibt und berücksichtigt**. Die in den Studien dargestellten Ansätze werden im Folgenden mit den Überlegungen von GES verglichen.

	Global electricity demand 2019 / PWh	Share of total final energy consumption 2019 / %	Global electricity demand 2050 / PWh (net zero)	Share of total final energy consumption 2050 / % (net zero)
IEA	22,8	ca. 20	46,9	49
IRENA			50,0	51
BP			49,6	51
Shell			65,6	43
GES			73 (59 + 14 for electrolysis)	38 (electrons only)

Tabelle 8: Prognostizierter Anteil der Elektrifizierung am Endenergieverbrauch.

Quelle: Eigene Darstellung

Während 2019 nur rund 20 % des Endenergiebedarfs in Form von Strom verbraucht wurde, erwarten die Studien eine deutliche **Steigerung des Stromanteils am Endenergieverbrauch**. Die Arbeit von GES weist hierbei einige Besonderheiten auf: Das Potenzial der Elektrolysetechnologie wird nach unseren Erkenntnissen über die möglichen Zubauraten voll ausgereizt und erfordert 14 PWh Stromerzeugung. Der mit der Elektrolyse erzeugte Wasserstoff wird aber in unserem Modell vollumfänglich als Molekül genutzt und nicht rückverstromt. Um den Strombedarf darzustellen, ist ähnlich wie bei Shell ein höherer Einsatz fossiler Energieträger erforderlich.

Dennoch ist der Elektrifizierungsanteil am Endenergieverbrauch bei GES vergleichsweise am niedrigsten: Wir halten die hohen Elektrifizierungsanteile der anderen Studien praktisch im Zeitraum bis 2050 für nicht erreichbar, insbesondere nicht im Mobilitätssektor.

Renewable Energy Forecast 2050		Solar / PWh	Wind / PWh	Hydro / PWh	Bioenergy / PWh	Other / PWh	Total share of Total energy supply / %	Total share of electricity generation / %
IEA	Energy supply	30,3	24,8	8,5	28,3	8,8	68	
	Electricity generation	24,9	24,8	8,5	3,3	0,9		88
IRENA	Energy supply	N.N.					74	
	Electricity generation	51,0		21,9				90
BP	Energy supply	116,1		17,9	inkludiert in 116,1	/	74	
	Electricity generation	43,3		„low carbon“ (incl. nuclear): 16				94
Shell	Energy supply	35,3	24,4	5,3	30,3	8,1	44	
	Electricity generation	20,6	22,8	4,7	22,2			60
GES	Energy Supply	34	11	6	36 (Bioenergy + Geothermal)		42	
	Electricity Generation	34	11	6	6			56

Tabelle 9: Die prognostizierte Bedeutung der Erneuerbaren Energien im Vergleich.

Quelle: Eigene Darstellung

Bezüglich der prognostizierten **Bedeutung der erneuerbaren Energien** zeigt sich ein Gleichklang zwischen Shell und GES auf der einen Seite und den Studien von IEA, IRENA und BP auf der anderen Seite: In der Bedeutung der erneuerbaren Stromerzeugung sind GES und Shell ähnlich mit 56 bzw. 60 % des erzeugten Stromes auf Basis erneuerbarer Energie während die drei Studien von IEA, IRENA und BP, erwarten, dass ca. 90 % der elektrischen Energie auf Basis von Erneuerbaren hergestellt wird. GES und Shell erwarten einen Anteil der Erneuerbaren von 42 bzw. 44 % an der Primärenergie, die drei anderen Studien sehen diese Anteile eher bei 70 %.

Role of Hydrogen	Global hydrogen demand 2019 / Mt	Global hydrogen demand 2050 / Mt	Energy content / PWh	Share of final energy consumption 2050 / %
IEA	91	530	20,9	21
IRENA		613	24,2	12
BP		446	17,6	15
Shell		138	5,6	3
GES		631 (40% grün + 60% blau)	25	14,5

Tabelle 10: Der prognostizierte Ausbau der Wasserstoffherzeugung.

Quelle: Eigene Darstellung

Bezüglich der **Wasserstoffproduktion** erwartet GES das größte Wachstum unter den Vergleichsstudien, allerdings gehen wir davon aus, dass gut 60 % des Wasserstoffs auf Erdgasbasis mit CCS erzeugt wird, sog. blauer Wasserstoff.

Hydrogen & Biofuels	Global hydrogen demand 2019 / Mt	Global Hydrogen demand 2050 / Mt	Energy / PWh	Share of final energy consumption 2050 / %	Biofuels / PWh	Share of final energy consumption 2050 / %
IEA	91	530	20,9	21	13,3	14
Shell		138	5,6	3	17,8	11
GES		631	25	14,5	30	7

Tabelle 11: Prognosen für Wasserstoff und Biofuels im Vergleich.

Quelle: Eigene Darstellung

Hinsichtlich der Bedeutung der **Bioenergie** treten unterschiedliche Bewertungen auf. Während die IEA Wasserstoff und seine Derivate als wichtiger ansieht als die Bioenergie, ist dies bei Shell umgekehrt: Hier wird die Rolle der Bioenergie 2050 dreimal so hoch gesehen wie diejenige von Wasserstoff – der höchste Wert aller Studien. IRENA und BP machen im Hinblick auf die erwartete Bedeutung der Bio-Fuels keine expliziten Angaben. GES ist bzgl. des Endenergie-Potenzials von Bio-Fuels ebenfalls eher zurückhaltend: die Erträge pro Fläche sind vergleichsweise niedrig und die

Verluste bei der Umwandlung hoch, auch wenn das Potenzial aus Kurzumtriebsplantagen durchaus einen sinnvoll zu erschließenden Ansatz zeigt. Darüber hinaus sollten Land- und Forstwirtschaftsabfälle genutzt werden für Biotreibstoffanlagen der zweiten Generation.

Role of Carbon Capture	CO2 captured per year / Mt (2019)	CO2 captured per year / Mt (2050)	CO2 captured from fossil fuels and processes / Mt (2050)	CO2 captured from bioenergy (BECCS) / Mt (2050)	Direct air capture / Mt (2050)
IEA	40	7.602	5.245	1.380	985
IRENA		8.100	3.400	4.700	N.N.
BP		6.000	4.700	1.300	N.N.
Shell		5.200	5.200	N.N.	N.N.
GES		14.200	N.N.	N.N.	N.N.

Tabelle 12: Erwartete Entwicklung der Nutzung von Carbon Capture.

Quelle: Eigene Darstellung

In allen Studien ist zur Erreichung der Klimaneutralität Carbon Capture von erheblicher Bedeutung. Gegenüber dem Basisjahr 2019 wird sich weltweit die Menge des abgefangenen Kohlendioxids mehr als verundertfachen (!). GES geht noch einen Schritt weiter: Um in einer Welt mit berechtigtem Wachstumsbestrebungen der Challenge-Gruppe und angesichts signifikanter Reserven an fossilen Energieträgern die Ziele auch für die Sustainable Development Goals (SDG) erreichen zu können, ist Carbon Capture neben dem Ausbau der Erneuerbaren Energien die entscheidende Technologie. GES stellt daher eine nochmals höhere Wachstumsprognose als die vier Vergleichsstudien. Der genannte Wert von 14.200 Millionen Tonnen CO₂ (14,2 Milliarden Tonnen CO₂) könnte auch noch überschritten werden.

Role of fossil fuels and nuclear 2050		Oil / PWh	Natural Gas / PWh	Coal / PWh	Nuclear / PWh	Share of total energy supply / %	Share of electricity generation / %
IEA	Energy supply	11,7	16,7	4,8	16,9	34	
	Electricity generation	0,006	0,7	0,7	5,5		10
IRENA	Energy supply	N.N.				26 (excl. nuclear)	
	Electricity generation	0	4,9	0	3,2		10
BP	Energy supply	12,2	16,9	4,7	13,6	24	
	Electricity generation	0	2,2	0,5	16		29
Shell	Energy supply	44,4	31,9	27,8	22,2	54	
	Electricity generation	0,6	16,1	7,5	21,9		39
GES	Energy Supply	22	70	11	15	56	
	Electricity Generation	0	24	6	15		44

Tabelle 13: Verbleibende Rolle der fossilen Energieträger und Bedeutung der Nuklearenergie.

Quelle: Eigene Darstellung

Der Anteil verbleibender **Nutzung fossiler Energieträger** geht gegenüber dem Ausgangspunkt 2019 von über 80 % in allen Studien signifikant zurück. BP erwartet noch die Nutzung von ca. 34 PWh, anteilig 17 %, und liegt damit deutlich unter IRENA, die 26 % an der Primärenergieerzeugung angeben, ohne eine weitere Differenzierung der einzelnen Energieträger. Shell publiziert einen verbleibenden Anteil von 45 % der Primärenergie auf fossiler Basis, dabei spielt Öl (19 %) unverändert die größte Rolle, gefolgt von Erdgas (14 %) und Kohle (12 %). Ebenso ist bei Shell der absolute Rückgang gegenüber 2019 am geringsten: bei Öl um fünf PWh (-10 %), Erdgas um neun PWh (-22 %) und Kohle um 16 PWh (-39 %). Die Prognose von GES ähnelt im Ansatz der von Shell, wir sehen einen deutlichen Rückgang von Erdöl, verbleibend primär für mobile Anwendungen und einen starken Rückgang von Kohle, die aus unserer Sicht wo immer möglich durch Erdgas ersetzt werden sollte, auch um die Anforderungen an die Logistik der über Carbon Capture abgeschiedenen CO₂-Mengen nicht zu stark ausbauen zu müssen. Insofern sehen wir einen signifikanten Anstieg der Nutzung von Erdgas bei rückläufiger Nutzung der fossilen Energieträger in Summe.

Ohne als Wirkhebel zur Erreichung der Klimaneutralität explizit argumentiert zu werden, spielt die **Nuklearenergie** bei den Vorhersagen 2050 eine gewichtige Rolle. Gegenüber 2019 (2,7 PWh) erwarten alle Studien eine Zunahme der Nuklearenergiebasierten Stromerzeugung, IEA und BP um ein Vielfaches, Shell sogar um den Faktor 8 auf 22 PWh, wohl auch um dem signifikant steigenden Energiebedarf gerecht zu werden. Auch GES sieht in der Nuklearenergie einen wichtigen Beitrag,

insbesondere um in den stärker entwickelten Ländern für einen Beitrag zum Ausgleich der Schwankungen der neuen Erneuerbaren zu leisten.

Fazit des Vergleichs der Referenzlösung mit den vier Studien

Ein wichtiger Punkt ist die Frage nach der weiteren Nutzung von fossilen Energieträgern. Erdöl-, Erdgas- und Kohlevorkommen sind im Wesentlichen auf 25 Länder konzentriert, die über mehr als 80 % der bekannten Reserven verfügen. Wie wird die Nutzung regenerativer Energieträger dort gefördert? Welche alternativen Geschäftsmodelle sichern möglicherweise Staatshaushalt und wirtschaftliche Entwicklung? Die von allen Studien dargestellte Nutzung von **Carbon Capture** ist als unmittelbare Kompensationsmöglichkeit für die zukünftigen fossilen CO₂-Emissionen ein strategisch bedeutsames Lösungselement der Net-Zero-Herausforderung und damit **von größter Relevanz**.

Die umfangreiche Nutzung regenerativer Energieträger wird neben den Fragen der Verfügbarkeit von Rohstoffen und Bezahlbarkeit auch wesentlich von einer kosteneffizienten Beherrschbarkeit der Volatilitätsfragen bei der Erzeugung von Strom beeinflusst. Ein hoher Anteil von Solar- und Windenergie erscheint überall dort möglich, wo im großen Umfang kostengünstige Strategien gegen Dunkelflauten genutzt werden können, z. B. über fossil betriebene (Gas-)Kraftwerke mit Carbon Capture oder kostengünstige Speicherstrategien.

Offensichtlich spielt auch der Ausbau wasserstoffbasierter Energieträger eine bedeutsame Rolle. Das setzt allerdings voraus, dass die zahlreichen Skalierungshemmnisse für den umfassenden Aufbau entsprechender Kapazitäten zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten zeitnah überwunden werden können.¹⁹⁶

Effizienzgewinne und Verhaltensänderungen werden perspektivisch ebenfalls bedeutend beitragen können, sind allerdings in ihrer Planbarkeit mit großen Unsicherheiten verbunden. Der technische Fortschritt ist ebenfalls ein bedeutsamer Hoffnungsträger. Auf der einen Seite sind alle wesentlichen denkbaren Lösungen (Kernfusion, Gezeitenkraftwerke, etc.) bekannt, andererseits meist noch zu ungewiss in ihrer praktischen Anwendung, um konkret in einen Ausblick eingepreist werden zu können.

¹⁹⁶ Vgl. Berks (2022).

8 Implikationen

In diesem Kapitel wird dargelegt, welche zuvor formulierten Zielsetzungen mit der Referenzlösung erreicht werden können.

Beschrieben werden die Ziele im Klimabereich, also die Erreichung von Net Zero sowie der Weg zur Erreichung des 2°C-Ziels. Außerdem werden Umsetzungsperspektiven für die 17 Sustainable Development Goals in ihrer sozialen, ökonomischen und ökologischen Dimension skizziert. Es werden zudem die Entwicklungswirkungen der Referenzlösung mit Bezug zum Modell China dargelegt. Schließlich wird aufgezeigt, wie es hoffentlich über den Ansatz der Systemdienstleistungen gelingen kann, der seit Langem im Bereich der Finanzierung im Raum stehenden Forderung der Entwicklungsländer „From Billions to Trillions“ zu entsprechen. Die Arbeiten zur Referenzlösung gehen dabei auf jahrelange Vorarbeit in den Bereich „Entwicklung und Klima“ zurück.¹⁹⁷

Alle eingangs formulierten Ziele im Bereich Klima, Energie und Wohlstand erweisen sich letztlich als prinzipiell erreichbar, weil die Referenzlösung für alle drei Ländergruppen – erweiterte OECD, China-Club und Challenge-Gruppe – zustimmungsfähig ist und Kooperation möglich macht. Ein entscheidender Grund ist, dass sie sich für alle als wohlstandskompatibel erweist. Zudem entfallen prinzipielle Konflikte um die Nutzung von fossilen Energieträgern. Eine Industrialisierung der Entwicklungs- und Schwellenländer, im Wesentlichen der Challenge-Gruppe, wird damit möglich.

Den Abschluss des Kapitels bilden Sensitivitätsanalysen, auf deren Basis Aussagen zur Robustheit der Referenzlösung möglich werden. Es geht um die Frage, wie einflussreich Veränderungen entscheidender Lösungsparameter auf das Gesamtergebnis sind.

8.1 Net Zero und die Erreichung des 2°C-Ziels

Die Referenzlösung ermöglicht es, bis 2070 Net Zero weltweit zu erreichen. Eine weitgehende Annäherung an Net Zero gelingt bereits bis 2050. Nach vorübergehender Überschreitung könnte auch das 2°C-Ziel im Jahr 2070 noch rückwirkend erreicht werden. Das Jahr 2070 ist dabei konform mit der Formulierung im Pariser Klimaschutzabkommen, dass Net Zero in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts erreicht werden soll. Eine Ursache für die Zielerreichung erst in 2070 ist, dass viele wichtige Schwellenländer, wie z. B. Indien, in ihrem NDC Net Zero erst für diesen Zeitpunkt zusagen.

Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass die Zielsetzung, wie sie im **Paris-Abkommen** formuliert ist, bisher **nicht mit Maßnahmen unterlegt** ist. Ein wichtiger Mehrwert der Referenzlösung besteht

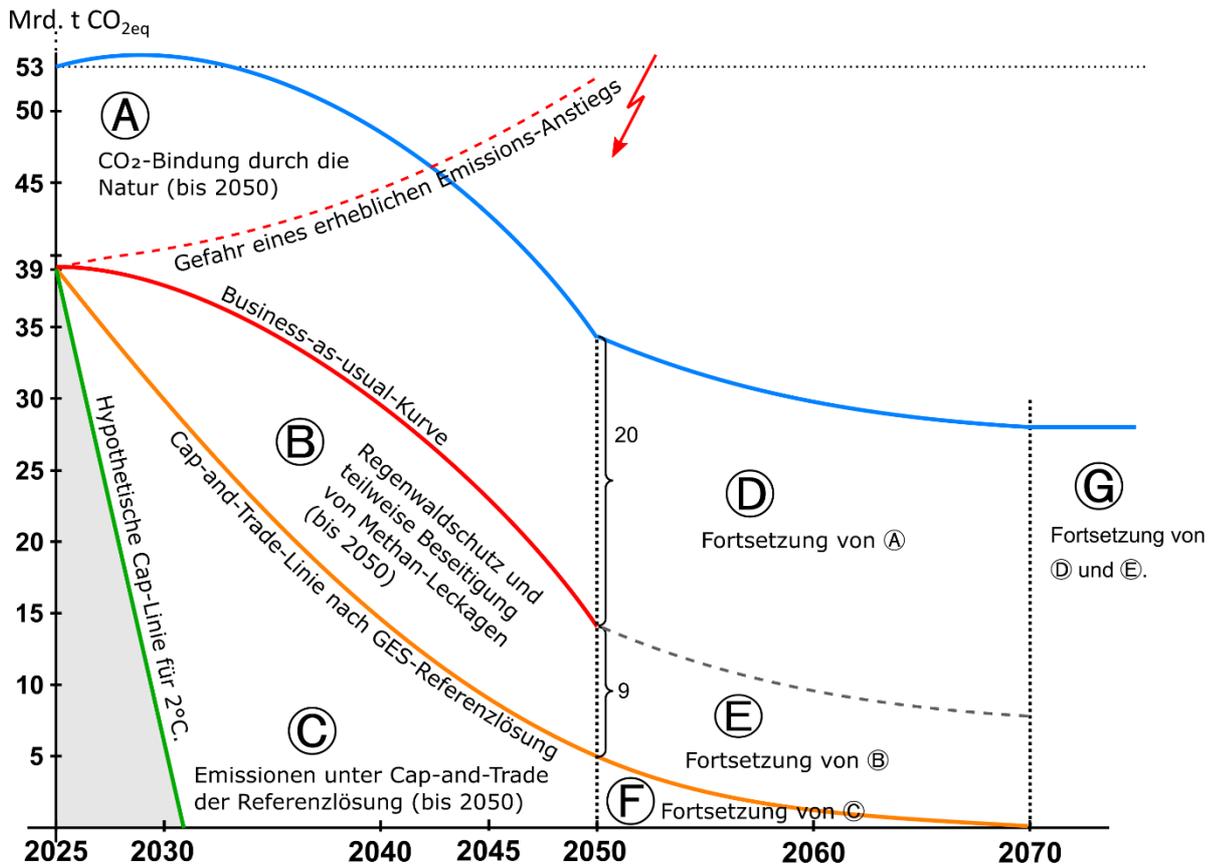
¹⁹⁷ Vgl. z. B. Radermacher (2011, 2018, 2020)

darin, dass die anspruchsvollen Zielsetzungen mit einem prinzipiell umsetzbaren Maßnahmenpaket hinterlegt werden.

Bei der Entwicklung der **Referenzlösung** werden die globalen Emissionen als CO₂-Äquivalente netto betrachtet. Der Ansatz betrachtet das Ziel, zwischen 2050 – 2070 weltweit Net Zero zu erreichen, von der Seite der Lösungsbausteine her. In diesem Sinne werden **keine Reduktionsmöglichkeiten explizit für einzelne Sektoren**, z. B. die Landwirtschaft oder die Stahlindustrie, entwickelt. Stattdessen wird analysiert, welche Maßnahmen existieren, um netto Emissionen zu senken und wie hoch ihr jeweiliger Beitrag sein kann. Dadurch werden Möglichkeiten für sektorübergreifende Netto-Reduktionen unterstützt, weil nicht vorgeschrieben wird, wie groß der Anteil neuer Erneuerbarer oder der Einsatz von Carbon-Capture-Technologien in einzelnen Sektoren sein soll, um die Emissionen zu senken. Die am einfachsten zu realisierenden und günstigsten Lösungen werden so in den Bereichen bevorzugt, in denen es sinnvoll ist.

Natürlich lässt sich jedoch häufig leicht eine Verbindung zwischen den Maßnahmen der Referenzlösung und den emittierenden Sektoren herstellen. Beispielsweise haben die naturbasieren Lösungen Auswirkungen auf die Landwirtschaft, wenn es um Bodenverbesserung geht. Aber auch die vorgeschlagenen Kurzumtriebsplantagen und klimaneutralen Kraftstoffe betreffen den Landwirtschaftssektor sowie die Mobilität und wirken insofern sektorübergreifend. Wie groß der Anteil der Emissionen nun ist, der über die Lösungsbausteine in den einzelnen verursachenden Sektoren aufgefangen wird, ist im Sinne der beschriebenen Logik nicht Teil der Aussagen, die im Rahmen der Referenzlösung entwickelt werden.

In der nachfolgenden Abbildung 11 werden zentrale, in den vorherigen Kapiteln erläuterte Bausteine zur Erreichung von Net Zero und ihr Zusammenspiel dargestellt, die insgesamt zu den für Net Zero erforderlichen erheblichen CO₂-Reduktionen führen.



Erläuterungen

Ⓐ **CO₂-Bindung durch die Natur (bis 2050):** 480 Mrd. Tonnen CO₂ Aufnahme/Kompensation von CO₂ durch die Natur (zunehmend auch Ozeane, 130 Mrd. Tonnen CO₂).

Ⓑ: **Regenwaldschutz und Teilweise Beseitigung von Methan-Leckagen (bis 2050):**

Einsparung von 200 Mrd. Tonnen CO₂ zur Ergänzung des Cap-and-Trade-Systems durch Sonderprogramme (720 = 520 + 200).

Ⓒ/Ⓕ: **Emissionen unter Cap-and-Trade der Referenzlösung (bis 2050):**

Noch etwa 520 Mrd. Tonnen CO₂-Emissionen unter der Cap-and-Trade-Linie bis 2050, Net Zero wird 2070 erreicht. In 2050-2070 noch 33 Mrd. Tonnen CO₂ unter Cap-and-Trade zulässig Ⓔ (orange Linie). In 2050 wird das 2 °C-Ziel geschätzt um 290 Mrd. Tonnen CO₂ überschritten (520 statt 230 Mrd. Tonnen CO₂-Emissionen). Ⓔ: Folge von NDCs, die Net Zero erst für 2060/2070 vorsehen.

Ⓓ **Fortsetzung von Ⓐ:** 384 Mrd. Tonnen CO₂ Einsparung als Folge von Aufnahme/Kompensation von CO₂ durch die Natur, inklusive Ozeane. Darin enthalten sind 104 Mrd. Tonnen CO₂ Sonderentlastung durch Ozeane.

Ⓔ: **Fortsetzung von Ⓑ:** Fortführung der ergänzenden Sonderprogramme mit 160 Mrd. Tonnen CO₂ Einsparung. Davon 33 Mrd. Tonnen bis 2070 für auslaufendes Cap-and-Trade-System. Hinzu kommen Sonderentlastungen von 104 Mrd. Tonnen CO₂ vom Typ Negativemissionen durch die Berücksichtigung von Entlastungen durch die Ozeane. Damit Negativemissionen von etwa 230 Mrd. Tonnen CO₂. 2 °C-Level kann 2070 erreicht werden durch 230 Mrd. Tonnen Negativemissionen in Ⓔ und Nichtverwendung von 60 Mrd. erlaubten Tonnen CO₂ aus einem geeigneten Gigaprogramm „Natur-basierte Lösungen“ (insgesamt 230 + 60 = 290 Mrd. Tonnen CO₂). Hinweis: Das Gigaprogramm ist als Puffer konzipiert und ist ansonsten nicht in der Abbildung enthalten.

Ⓖ: **Fortsetzung von Ⓓ und Ⓔ**

--- **Gefahr eines erheblichen Anstiegs der CO₂-Emissionen:** Dies insbesondere als Folge von erheblichen Wachstumsprozessen in den Entwicklungs- und Schwellenländern (Challenge-Gruppe).

— **Business-as-usual-Kurve:** In der Grafik werden unter der Business-as-usual-Kurve 720 Mrd. Tonnen CO₂ angenommen.

— **Cap-and-Trade-Linie nach GES-Referenzlösung**

— **Hypothetische Cap-Linie für 2°C:** Vollkommen unrealistisch, lediglich zur Plausibilisierung der Situation dargestellt.

Abbildung 11: Bausteine zur Erreichung von Net Zero

Quelle: Eigene Darstellung

In der Folge wird beschrieben, wie es gelingt, Net Zero bis auf 5 Milliarden Tonnen CO_{2eq} in 2050 und vollständig bis 2070 zu erreichen.

Im Jahr **2025** fallen **39 Milliarden Tonnen CO_{2eq}** hauptsächlich im Bereich der Energieerzeugung (etwa 34 Milliarden Tonnen CO_{2eq}) und im Bereich Forstwirtschaft und Land Use Change (etwa 5 Milliarden Tonnen CO_{2eq}) an, vgl. Kapitel 2.2, 2.3 und 5.1. In der Referenzlösung wird unterstellt, dass sich diese Zahl durch das erhebliche Wachstum im Energiesektor der Entwicklungs- und Schwellenländer (Challenge-Gruppe) bis **2050** um weitere 20 Milliarden Tonnen erhöht, vgl. Kapitel 5.1. In Summe geht es dann um **59 Milliarden Tonnen CO_{2eq}**.

Von diesen können bis 2050 54 Milliarden Tonnen CO_{2eq} eliminiert werden. Die verbleibenden 5 Milliarden Tonnen CO_{2eq}, die erst bis 2070 eliminiert werden, resultieren einerseits aus den NDCs von China und Russland, andererseits aus den bereinigten NDCs der Länder in der Challenge-Gruppe. Die Werte für die Entwicklungs- und Schwellenländer ergeben sich aus den unterstellten Annahmen im Kontext der Überarbeitung der konditionierten NDCs dieser Länder. Dazu wurde in Kapitel 4.5 der Challenge-Index für die Unterteilung der Länder der Challenge-Gruppe entwickelt. Zielerreichung ist hier nur durch enorme Finanztransfers vorstellbar, wie sie im Zentrum der Referenzlösung vorgesehen sind, vgl. Kapitel 6. Die praktische Umsetzung der vielfältigen Anforderungen in insgesamt fast 200 Staaten geschieht effizient über das vorgesehene Cap-and-Trade-System, das kanonisch aus den nicht mehr konditionierten NDCs hergeleitet wurde, vgl. Kapitel 6.4.2.

Die **Eliminierung der 54 Milliarden Tonnen CO_{2eq} bis 2050** geschieht über Maßnahmen, die teilweise erhebliche Querfinanzierung voraussetzen.

Der Um- und Aufbau der Energiesysteme erfolgt gemäß Kapitel 5.3 nach der Logik der zwei Säulen. Der erhebliche **Ausbau der neuen Erneuerbaren reduziert** bis 2050 die CO₂-Emissionen um **24 Milliarden Tonnen CO_{2eq}** pro Jahr (die 2020 installierten Kapazitäten der neuen Erneuerbaren sparen etwa 1 Milliarde Tonnen CO_{2eq} pro Jahr). Dies ist die Summe der Kapazitäten der neuen Erneuerbaren über alle drei betrachteten Gruppen, die erweiterte OECD, den China-Club und die Challenge-Gruppe. Wie in 6.3.2 hergeleitet, entfallen davon 12 Milliarden Tonnen CO_{2eq} alleine auf die Challenge-Gruppe.

Der Einsatz von fossilen Energieträgern mit **Carbon Capture** bewirkt bis 2050 **15 Milliarden Tonnen CO₂-Einsparung**. Bei alten Erneuerbaren ist zum heutigen Status quo nur wenig Veränderung zu erwarten (für die Challenge-Gruppe kalkulieren wir mit 6 Milliarden Tonnen CO₂), Nuklearenergie wird vergleichbar zu anderen Ansätzen ausgebaut.

Den Schutz und Erhalt der tropischen **Regenwälder** kalkulieren wir mit rund **3 Milliarden Tonnen CO₂** Emissionsvermeidung, vgl. Kapitel 5.7.1. Im Kontext der Beseitigung **technischer Methan-Leckagen** setzen wir **5 Milliarden Tonnen CO_{2eq}**-Einsparung an (bei einem Gesamtpotenzial von rund 8 Milliarden Tonnen CO_{2eq}, vgl. Kapitel 5.6).

Als Beitrag aus den **bereinigten NDCs** der Challenge-Gruppe erwarten wir in der Größenordnung von etwa **5 Milliarden Tonnen CO₂-Entlastung** durch eine **Kombination aus Natur-basierten Lösungen**, vgl. Kapitel 5.7.4, und einem **verstärkten Einsatz von Gas statt Kohle**, vor allem bei der Stromerzeugung.

Als weiteren Baustein für Negativemissionen sieht die Referenzlösung das Programm der **Kurzumtriebsplantagen** mit einem Potenzial von jährlich **3 Milliarden Tonnen CO₂** bis 2050 auf Grundlage der Berechnungen der UN, vgl. Kapitel 5.7.5.

In Summe bewirken die genannten Maßnahmen eine Eliminierung von (sogar) **55 Milliarden Tonnen CO_{2eq}** im Hochlauf von 2025 – 2050. Je nach Erfolg bei der Umsetzung der einzelnen Bausteine besteht damit eine gute Chance, die anfallenden 54 Milliarden Tonnen CO_{2eq} aus den energienahen Bereichen bis 2050 vollständig zu reduzieren. Der Anteil der durch Carbon Capture abgesenkten Emissionen sollte durch einen verstärkten Einsatz von Gas statt Kohle möglichst 15 Milliarden Tonnen CO₂ nicht überschreiten müssen, da (ähnlich wie bei dem notwendigen Hochlauf der Elektrolyseure für die Produktion von grünem Wasserstoff, vgl. Kapitel 5.3.3) Grenzen beim Hochlauf der Carbon-Capture-Technologien zu erwarten sind. Je mehr Kapazitäten durch die Länder der erweiterten OECD und den China-Club eingesetzt werden, desto weniger Kapazität bleibt für die weniger zahlungskräftigen Länder der Challenge-Gruppe. Hier sollte auf eine weltweit klug organisierte Verteilung der Kapazitäten geachtet werden.

Bei Bedarf an weiteren Negativemissionen kann zusätzlich das **Puffer** gedachte Gigaprogramm Natur-basierte Lösungen genutzt werden, das in der Referenzlösung als Puffer fungiert, vgl. Kapitel 5.7.2 und 5.7.3. Dieses Gigaprogramm beinhaltet bei erfolgreicher Umsetzung wie beschrieben weitere Negativemissionen im Umfang von insgesamt 10 Milliarden Tonnen CO₂ (jeweils 5 Milliarden Tonnen CO₂ durch Aufforstung auf 1 Milliarde Hektar sowie Humusbildung auf weiteren 1 Milliarde Hektar Fläche).

Es fällt ins Auge, dass entgegen der landläufigen Erwartung, low-carbon Wasserstoff keinen expliziten Beitrag zur Erreichung von Net Zero leistet. Das liegt daran, dass Wasserstoff (nur) eine Transformationsfunktion besitzt. Einen Beitrag zu Net Zero müssen die Energieträger leisten, über die der low-carbon Wasserstoff erzeugt wird, also neue Erneuerbare, Gas mit Carbon Capture oder Nuklearenergie.

Hinsichtlich des 2°C-Ziels sei abschließend angemerkt, dass dieses nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erreicht werden kann. Der IPCC bezifferte diese auf etwa 67 % bei einem Budget an Restemissionen von 1.150 Milliarden Tonnen CO_{2eq} ausgehend von 2020.¹⁹⁸ Ein entscheidender Faktor für seine Erreichung ist die Erzeugung massiver Negativemissionen von 2050 – 2070. Ihre

¹⁹⁸ Vgl. IPCC (2021).

Wirkung auf den Treibhausgasgehalt wird umso größer, je weniger Neuemissionen „gegengerechnet“ werden müssen. Durch die verspätete Zielerreichung können allerdings im Bereich „Loss and Damage“ erhebliche weitere Kosten entstehen. Ferner können sich zwischenzeitlich auch sich selbst verstärkende Effekte einstellen, die zu weiteren Klimabelastungen führen, z. B. durch die Kipp-Elemente des Klimasystems. Dann ist eine rückwirkende Erreichung des 2°C-Ziels nicht mehr möglich. Auch bleibt die Frage, inwieweit der Rückbau der CO₂-Konzentration tatsächlich wie erwartet erfolgen wird. Das betrifft vor allem die zeitliche Dimension des Wirksamwerdens von CO₂-Vermeidung und -Belastung in der Atmosphäre.

8.2 Entwicklungswirkungen der Referenzlösung

Entwicklung ist ein anspruchsvolles Programm, das darauf abzielt, dass sich die Lebenssituation von Menschen in Entwicklungs- und Schwellenländern deutlich verbessert. Es fällt in den Rahmen der Diskussionen über nachhaltige Entwicklung. In der Regel ist das weltweit angestrebte Ziel eine Entwicklung in Richtung des Wohlstands der Industriestaaten.

In der Geschichte gibt es seit dem Zweiten Weltkrieg eine Reihe beeindruckender Entwicklungsprozesse von Staaten, wie z. B. das Wiedererstarken Europas, insbesondere Deutschlands, der Wiederaufstieg Japans, die Aufbauprozesse in Korea und Taiwan, die Situation in Singapur oder beispielsweise der industrielle Aufstieg von China.

Für die Entwicklung Europas nach dem Zweiten Weltkrieg steht der Marshallplan als eine zentrale Möglichkeitsmetapher. Allerdings muss man auf wesentliche Unterschiede zu den heute diskutierten Entwicklungsnotwendigkeiten hinweisen. Deutschland befand sich 1944 – trotz Krieg – in Bezug auf seine industrielle Produktionskapazität auf dem Höhepunkt seiner Möglichkeiten und war dabei – bezogen auf die Bevölkerungsgrößen – an der Weltspitze; das war bei Japan ähnlich. Andere Staaten wie Korea oder Taiwan waren schon lange in die japanische Einflussphäre integriert und hatten schon viele Entwicklungsschritte erlebt. Was ihnen nach dem Krieg fehlte, war vor allem Kapital. Die Erfahrung mit den industriellen Prozessen war vorhanden, ebenso eine rudimentäre Infrastruktur; es war relativ klar, welche Ausbauprozesse notwendig waren.

Insofern sind die **großen Erfolge nach dem Zweiten Weltkrieg** nicht so überraschend, wie sie manchmal erscheinen. Sie sind andererseits nicht so ohne Weiteres auf andere Länder übertragbar, bei denen viele elementare Voraussetzungen fehlen, z. B. hoher Ausbildungsstand der Bevölkerung oder ein funktionierendes Rechtssystem, eine wirkungsvolle Governance etc.

In einem Beitrag eines der Autoren über die Frage „**Was macht ein Land reich?**“ werden acht, in diesem Kontext relevante Dimensionen aufgelistet:¹⁹⁹

1. Ein gut funktionierendes, leistungsfähiges Governance-System
2. Exzellente ausgebildete und geeignet orientierte und motivierte Menschen (insbesondere: Bildung, Gesundheit und Alter als Kernfrage des Sozialen)
3. Hervorragende Infrastrukturen auf internationalem Niveau
4. Ein hervorragender Kapitalstock
5. Zugriff auf benötigte Ressourcen
6. Eine leistungsfähige Forschung und international konkurrenzfähige Innovationsprozesse
7. Ein leistungsfähiges Geld- und Finanzsystem
8. Eine enge Einbettung der Unternehmen und Menschen in weltweite Wertschöpfungsnetzwerke

Dazu kommt, wie oben bereits erwähnt, eine **effiziente/ balancierte Einkommenssituation**, beschrieben durch einen Gini-Index zwischen 0,25 - 0,35. Allerdings existiert aktuell empirisch kein Staat, der die genannten 8 Faktoren erfüllt und dessen Gini-Index außerhalb des genannten Bereichs liegt. Blicken wir heute auf die Situation vieler sich entwickelnder Länder, stehen sie vor enormen Schwierigkeiten in Bezug auf praktisch alle genannten acht Dimensionen – und das vor dem Hintergrund einer rasch wachsenden Bevölkerung. Deshalb ist es nicht möglich, an die genannten Erfolge nach dem Zweiten Weltkrieg anzuknüpfen. Was bleibt, ist möglicherweise das Studium des Erfolgs Chinas. Allerdings ist auch dabei zu beachten, dass das Land eine besondere Rolle spielen konnte, nämlich als Fabrik der Welt, die in dieser Form andere jetzt nicht wahrnehmen können, weil China diese Rolle bereits innehat. China hat eine sehr große Bevölkerung, kann auf diese wirkungsvoll (diktatorisch) einwirken. Viel wirkungsvoller als z. B. Indien (als Demokratie) oder Afrika als Kontinent mit 54 Staaten, die teilweise mehr gegeneinander als miteinander agieren. Außerdem hat **China eine lange historische Tradition in effizienter gesellschaftlicher Organisation, und zwar als Einheit**. China war lange das reichste und erfolgreichste Land der Welt und verfügte über ein Ausbildungssystem, das die klügsten Köpfe des Landes (aus allen Schichten) in administrative Positionen brachte.

China ist ethnisch betrachtet relativ homogen. Es gibt eine gemeinsame (Schrift-) Sprache, eine konfuzianische Tradition. Insbesondere war und ist der Zugriff der kommunistischen Partei massiv. Es ließ sich deshalb im Rahmen der Industrialisierung Chinas ein zentraler Wille durchsetzen, z. B.

¹⁹⁹ Vgl. Radermacher (2014).

in der Entwicklung des Landes über Sonderzonen – von der Küste kommend langsam ins Landesinnere übergehend.

Eigentumsfragen wurden bei Bedarf schnell durch Enteignung geklärt. Das von der Partei formulierte Allgemeininteresse ging und geht vor und wurde durchgesetzt. Planungsprozesse wurden rigoros umgesetzt, wirtschaftlicher Erfolg stand und steht über allem – natürlich immer unter dem Primat der Sicherung der Macht der Kommunistischen Partei. Dabei war das kommunistische System bestrebt, die erfolgreichsten Unternehmen, insbesondere aus den Industrieländern, ins Land zu holen, und dabei auch sicherzustellen, dass sie substanziell von ihrem Engagement in China profitieren konnten.

So holte sich China z. B. europäische und amerikanische Automobilfirmen ins Land. Diese wussten, wie das Business geht und brachten die moderne Produktion ins Land. So wurde **substanziell in die Ausbildung der Arbeiterschaft in China investiert**, Infrastruktur wurde gebaut und letztlich eine massive Mehrung des Wohlstands in China erreicht, gleichzeitig wurden große Gewinne ins Ausland transferiert. Das alles war auch deshalb möglich, weil das Wachstum der Löhne in China zwar Teil des Programms war, aber auch kontrolliert verlief; Gewerkschaften waren nicht zugelassen. Im Gegenzug hat China seine Marktmacht dazu genutzt, sich einen Zugriff auf intellektuelle Eigentumsrechte der ausländischen Unternehmen zu sichern.

Was heißt das nun alles für die GES-Referenzlösung? Hier ist zunächst festzuhalten, dass einer der **wesentlichen Indikatoren für Entwicklung das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf** ist. Die Betrachtung des BIP erlaubt es, über die Jahre abzuleiten, wie viel im Mittel bei den Menschen an Wachstum dazukommt. Dies trifft übrigens auch dann zu, wenn das BIP als Messgröße für den Wohlstand eines Landes Defizite aufweist. Im Vergleich der Jahreswerte gleicht sich dies nämlich aus. Wichtig ist dann die Beobachtung, dass arme Länder ein großes Potenzial haben, Jahr für Jahr prozentual sehr schnell zu wachsen. Das macht sie für Kapital und ausländische Investoren attraktiv. Die hohen Wachstumsraten sind absolut betrachtet vielleicht ein kleinerer absoluter Zuwachs, verglichen mit (bescheideneren) Wachstumsraten in reichen Ländern. Nach dem Motto „viel von wenig kann weniger sein als wenig von viel“. Wenn andererseits ein solcher Prozess über Jahre und Jahrzehnte läuft, wie in China, dann wird irgendwann der Wohlstand in dem ärmeren Teil substanziell größer, auch im absoluten Sinn: Es entsteht ein Mittelstand. China hat in den letzten Jahrzehnten fast eine Milliarde Menschen aus der Armut holen können (nachdem die Kommunistische Partei während des gescheiterten „großen Sprungs nach vorne“ und der „Kulturrevolution“ unter Mao zuvor viele Menschen in unvorstellbare Armut und Not geführt hatte), die wahrscheinlich größte Entwicklungsleistung der letzten Jahrzehnte – an der die Industriestaaten natürlich wesentlich beteiligt waren.

Eine Art kommunistische Gleichverteilung ist keine gute Lösung für Entwicklung. **Für Entwicklung und Wohlstandsmehrung braucht man Kapital**. Kapitalkonzentration ist erforderlich für hohe

Investitionen und die Übernahme von Risiken. Außerdem muss sich **Leistung sichtbar lohnen**. Damit kommt man zu einer differenzierten Einkommensverteilung. Wobei aber klar ist, dass eine Zwei-Klassen-Gesellschaft ebenfalls kein Weg zu allgemeinem Wohlstand ist. Konsens ist heute, dass man einen „**efficient inequality**“-Zustand anstreben sollte.

Weltweit ist es heute so, dass die entscheidenden Differenzen im Wohlstand noch zwischen den Ländern liegen – und weniger innerhalb der Staaten. Interessant zu beobachten ist allerdings über die letzten Jahrzehnte, dass der Abstand zwischen den Ländern abnimmt. Teilweise parallel dazu hat aber der Abstand innerhalb der Länder wieder zugenommen – vor allem in einigen reichen Ländern. Typische Beispiele sind die USA (mit dem wahrscheinlich daraus resultierenden Rust-Belt-Problem) und auch Großbritannien (mit dem wahrscheinlich daraus resultierenden Brexit). Es sind dies Beispiele, in denen Globalisierung enorme Globalisierungsgewinne in Ländern wie China erzeugte, von denen natürlich die Reichen in China wie die Reichen überall auf der Welt profitiert haben, aber gerade die Industriearbeiter der reichen Länder ein Teil ihres Wohlstands verloren haben, weil ihre Jobs „ausgewandert“ sind und in den jeweiligen Ländern kein ausreichender Ausgleich organisiert wurde.

Wichtig ist, dass hier vom BIP die Rede ist und nicht von anderen Wohlstandsmaßen, obwohl sehr viel gegen das BIP argumentiert wird. Es wurden deshalb viele Versuche unternommen, auch nach der großen Finanzkrise 2008/ 2009, um zu prüfen, ob man nicht einen anderen Wohlstandsbegriff einführen sollte. Nobelpreisträger für Wirtschaftswissenschaften wie Professor Joseph E. Stiglitz, waren involviert – weit ist man damit allerdings nicht gekommen. Eine Alternative zum BIP ist z. B. der **Human Development Index**, der neben dem BIP gleichberechtigt auch das Bildungsniveau der Länder und in die Gesundheitsversorgung berücksichtigt. Festzustellen ist aber, dass – nicht überraschend – eine enge Korrelation zwischen BIP und dem Human Development Index besteht. Das liegt natürlich daran, dass ein reiches Land eine gut ausgebildete Bevölkerung haben muss, und zwar in Breite. Wobei die Investitionen in diese Ausbildung auch Investitionen in ein gutes Gesundheitssystem ökonomisch fast erzwingen. Aus diesen Größen besteht der Human Development Index.

Schaut man vertieft in die zu erfüllenden Voraussetzungen, ist im Kontext der oben genannten acht Punkte ein Punkt besonders wichtig, nämlich die **Kofinanzierung ärmerer Teile des Gesamtsystems durch die reicheren Teile**. Das ist dringend notwendig, um Kannibalisierungen unterschiedlicher Art zu vermeiden. Es gibt in allen reichen Ländern Varianten eines **Länderfinanzausgleichs**. Dies z. B. schon dadurch, dass die reicheren Teile größere Finanzierungsanteile, relativ zur Bevölkerungsgröße, übernehmen. Dies betrifft dann die Finanzierung allgemeiner staatlicher Aufgaben wie den Staatsapparat, den Militärapparat, die zentralen Forschungsprogramme des Landes etc. Es sind aber auch Mechanismen des Transfers nötig. In Deutschland ist das der Länderfinanzausgleich, in Europa sind das die sog. Strukturfonds. Das ist allgemein ein Aufwand in der Größenordnung von

einigen Promille bis einigen Prozent des Gesamtsteueraufkommens. Und diese Voraussetzung muss erfüllt sein, wenn man eine Chance auf eine parallel laufende Entwicklung der Teilbereiche haben will.

Wichtig ist auch die **Beachtung bestimmter Standards**, etwa bei der Situation der Arbeitnehmer, auch für Streik und Mitbestimmung. Besonders geht es um die materielle und rechtliche Situation der Frauen, die Ausbildungsmöglichkeiten, die Mitsprachemöglichkeiten usw. Man muss außerdem viele Überlegungen anstellen hinsichtlich des Verhältnisses von Zentren und Peripherie. Je mehr Wohlstand die Familien haben, je mehr in die Ausbildung der Kinder investiert wird, vor allem auch in die Ausbildung der Mädchen, umso eher kommt es zu einer Stabilisierung im reproduktiven Bereich, neben dem allgemein angestrebten gerechten Verhältnis zwischen den Geschlechtern.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen führen in ihrer Gesamtheit zu einem beträchtlichen Wohlfahrtsaufbau in den Ländern des Globalen Südens – ganz im Sinne eines **Marshall Plans mit Afrika**.²⁰⁰

So ist alleine für Afrika unter anderem eine Verdreifachung der eigenen Lebensmittelproduktion in den nächsten 30 Jahren möglich. Afrika soll sich selber ernähren und Nahrung exportieren können. Die Vorschläge beinhalten vielfältige Überlegungen zum Wassermanagement, zur Entwicklung der Nahrungsmittelindustrie, der Rolle der Kühlketten und insbesondere auch der eigenen Verarbeitung seiner Ressourcen, genauso wie eine stark aufgestellte Holzwirtschaft. Auch hier ist das Wachstumsprogramm wieder mit einem Industrialisierungsprozess verbunden. In Afrika steht über die nächsten 30 Jahre mindestens eine Verdopplung des Immobilienbestandes sowie der vorhandenen Infrastrukturen aller Art an. Alles in einer Weise, dass das Klima zugleich geschützt wird.

Die Produktion erneuerbarer Energien wird in Teilen Afrikas ein großes Geschäft werden. Mittels Infrastrukturen kann die Elektrizität über den Kontinent, vielleicht auch nach Europa verteilt werden. Die Produktion von grünem Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen wird ein großes Thema sein. Hier sind noch viele Innovationen möglich.

8.3 „From Billions to Trillions“ durch Systemdienstleistungen

In der Referenzlösung wird auf einen Ansatz jenseits klassischer ODA-Mittel gesetzt: Die Mittel der internationalen Entwicklungszusammenarbeit könnten sich bis 2050 zwar von heute 200 auf 300 Milliarden US-Dollar vergrößern. Letztlich „gelang“ der Anstieg auf über 200 Milliarden US-Dollar ODA-Mittel aufgrund des Ukraine-Kriegs. ODA-Mittel sind ein wichtiges Instrument der Nord-Süd-

²⁰⁰ Vgl. CoR & Senat der Wirtschaft (2016).

Zusammenarbeit, sie können jedoch nicht beliebig erhöht werden. Die Bevölkerung der reichen Länder tut sich oftmals schwer. Populisten finden hier immer wieder ein Agitationsumfeld.

Ein zentrales Element der Referenzlösung ist daher der Ansatz der **Systemdienstleistungen**. Sie sind ein entscheidender Finanzierungshebel und ergänzen die Idee der klassischen Entwicklungsfinanzierung. Sie eröffnen eine Chance, dass es endlich gelingt, die im Kontext der Agenda 2030 seit 2015 im Raum befindliche Forderung des Globalen Südens „From Billions to Trillions“ Wirklichkeit werden zu lassen. Im Kern geht es um die Erkenntnis, dass die weltweiten ökologischen und sozialen Systeme nur dann zum Vorteil aller stabilisiert werden können, wenn entsprechende Summen für eine Querfinanzierung des Globalen Südens aufgebracht werden.

Die Mittel für Systemdienstleistungen fließen zudem nach einer ex post-Logik, also erst nachdem Projekte umgesetzt, Maßnahmen erbracht und Ziele erreicht wurden. Damit setzt man dem in der klassischen Entwicklungszusammenarbeit häufig anzutreffenden Phänomen „sterbender Projekte“ etwas entgegen, weil finanzielle Anreize gesetzt werden, um ihren Fortgang sicherzustellen. Verhandelt wird nach der Logik „I will, if you will“, was in der ökonomischen Theorie die meisten Benefits für beide Verhandlungsparteien erwarten lässt.

Mit dem Ansatz der Systemdienstleistungen geht es nicht um Hilfe für andere Länder, die als Wohltätigkeit zu verstehen ist. Auch ungeklärte Gerechtigkeitsfragen sind nicht das Argument für die Geldflüsse in den Globalen Süden. Es geht nicht einmal um Entwicklung im klassischen Sinne. **Der Ansatz der Systemdienstleistungen speist sich einzig aus der Motivationslage eines einsichtsvollen Egoismus**, der dazu führt, dass man die notwendigen Maßnahmen ergreift, um im eigenen Interesse die ökologischen und sozialen Systeme stabil zu halten. Auch die Reichen dieser Welt können nur deswegen in dem Ausmaß vom globalen wirtschaftlichen System profitieren, weil es über existierende, wenn auch auszubauende funktionierende Systeme getragen wird. Destabilisiert sich das System, sinkt der Wohlstand. Und bei steigender Bevölkerung bedeutet das zusätzlich, dass nicht etwa die Ökosysteme dann gerettet wären. Vielmehr würden sie schneller zerstört, weil z. B. die Abholzung des Regenwaldes schnelle Gewinne bedeutet. Daher muss das globale System über die beschriebenen Dienstleistungen weiter ausgebaut und da gestützt werden, wo es aktuell zu erodieren droht.

Bisher gelingt das nicht und diese Tatsache bringt die Welt zunehmend in vielerlei Hinsicht in einen Zustand der Instabilität, den immer mehr Menschen beginnen wahrzunehmen.

Erfolge beim Klimaschutz bleiben aus. Die aktuelle Herangehensweise an die Energiewende stellt sich mehr und mehr als sehr teuer heraus. Über drohende Wohlstandsverluste wird immer offener gesprochen.

Trotz dieser Zwischenbilanz bleibt die Klimapolitik bisher dennoch fast ausschließlich auf Maßnahmen im eigenen Land ausgerichtet. Politik und Bürger müssen zur Kenntnis nehmen, dass die

Emissionen weltweit dennoch weiter zunehmen, und sich in der Folge die Klimabedrohungen weiter verschärfen. Die negativen Konsequenzen dieser Verschärfungen betreffen alle. Dies sind einerseits die direkten Folgen der Klimaveränderungen vor Ort wie Extremwetterereignisse und Dürren. Noch bedrohlicher aber werden die indirekten Folgen sein, wenn Teile der Welt unbewohnbar werden. Es drohen Flüchtlingsströme bisher ungekannter Größe. Es geschieht aktuell wenig, um diesen Entwicklungen zu verhindern oder zumindest zu lindern.

Auch ist aktuell eine Zunahme an kriegerischen Konflikten und eine neue Spaltung der Welt zu beobachten, die sich durch Uneinigkeit beim Vorgehen beim Klimaschutz weiter zu verschärfen droht („Ausstieg aus fossilen Energien“ vs. „Ausstieg aus fossilen Emissionen“). Auch dies sind Elemente der Destabilisierung, die die Zukunft bedrohen. In einer Zeit, in der Geopolitik sehr an Bedeutung gewinnt, wachsen die Ausgaben für Militär weltweit massiv. In Folge der Konflikte geraten viele Märkte ins Stocken und die resultierende Verknappung treibt die Kosten nach oben – mit besonders tragischen Folgen für die weltweite Ernährungssituation.

Die im eigenen Land bestehende Verunsicherung führt in Kombination mit den weltweiten Turbulenzen zunehmend dazu, dass das Vertrauen in die Politik schwindet. In der Folge gewinnen in zahlreichen Ländern der erweiterten OECD-Parteien des rechten Rands mehr und mehr Zustimmung, was die politische Situation zu destabilisieren droht.

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Lage, die durch multiple destabilisierende Entwicklungen gekennzeichnet ist, **ist zu erwarten, dass die OECD-Staaten erkennen werden, dass sie die wenigen Optionen nutzen sollten, mit denen es gelingen könnte, eine Stabilisierung der ökologischen und sozialen Systeme herbeizuführen.** Wenn es einen Weg gibt, mit im Mittel 800 US-Dollar pro Kopf und Jahr je OECD-Bürger die schlimmsten Bedrohungen zu eliminieren, ist eine Kehrtwende bei der Ausgestaltung internationaler Finanzierung nicht chancenlos. Wenn in diesem Kontext – wenn auch verspätet – die SDGs und Klimaneutralität erreicht werden können und Frieden gesichert werden kann, sollten dies weitere motivierende Argumente sein.

Wie auch bei der erfolgreichen Umsetzung des Montrealer Protokolls stehen beim Ansatz der Systemdienstleistungen die eigenen Vorteile im Zentrum. Bezahlt wird für wertvolle Beiträge des Globalen Südens zur Stabilisierung der ökologischen und sozialen Systeme. Eine strikte Kopplung zwischen der Leistungserbringung des Globalen Südens und den Geldtransfers des Globalen Nordens garantiert Konstanz und Zuverlässigkeit der Maßnahmen über lange Zeiträume.

Im Rahmen der Referenzlösung wurde bewusst der Ansatz gewählt, dass **Geldtransfers Jahr für Jahr nur für erbrachte Systemdienstleistungen** gewährt werden. So fließt beim Schutz der Regenwälder das Geld für einen Hektar Regenwald nur dann für ein weiteres Jahr, wenn der Wald nach einem Jahr noch in derselben Qualität erhalten ist. Auch die Mittel für die Umsetzung der NDCs sollen jährlich ausgezahlt und daran orientiert werden, dass die gemachten Versprechen

eingehalten wurden. Auf diese Weise kann man die Compliance stärken, was wiederum die Finanzierungsbereitschaft des Globalen Nordens verbessern sollte.

Die Realisierung dieses Ansatzes ist eine große Chance für die Zukunft. **Die Zeit für neue Dimensionen bei der Kofinanzierung des Globalen Südens drängt.** Mit dem Ansatz von Systemdienstleistungen, die der Globalen Süden für die Welt erbringt, liegt eine Idee vor, mit der es hoffentlich gelingen wird, die Bereitschaft der Akteure der erweiterten OECD zur Leistung finanzieller Beiträge im Globalen Süden massiv zu erhöhen. Wichtig ist dabei, dass die Referenzlösung über entschiedene Anstrengung im Bereich der Challenge-Länder gute Chancen eröffnet, international den CO₂-Vermeidungspreis unter 100 US-Dollar pro Tonne CO₂ zu halten. Das vorgeschlagene Cap-and-Trade-System ist dabei hilfreich.

8.4 Umsetzungsperspektiven für die SDGs

Die Sustainable Development Goals (SDGs) bilden ein ambitioniertes Zielsystem der Staatenwelt auf UN-Ebene zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsvorstellungen für den Globus. Man spricht auch von der **Agenda 2030**. Sie wurde 2015 parallel zum Paris-Vertrag zum Klima verabschiedet. Das ehrgeizige Programm hat praktisch keine Aussichten, bis 2030 umgesetzt zu werden. Das ist auf der Ebene der Vereinten Nationen allerdings das Normale. Der frühere UN-Generalsekretär Kofi Annan sagte einmal dazu: „*What is needed now is not more declarations or promises, but action to fulfil the promises already made*“.²⁰¹ Ein interessanter Bezug sind die Millennium Development Goals, die Vorläufer der Sustainable Development Goals. Sie sollten im Zeitraum 2000 – 2015 umgesetzt werden, was allerdings bei weitem nicht gelang.²⁰²

Die **Millennium Development Goals** hatten damals einen Fokus auf die sich entwickelnden Länder. Die reichen Länder waren eingebunden, um die Entwicklung der ärmeren Länder zu fördern und insbesondere mitzufinanzieren. Das hat letztlich zu wenig geführt. Es fehlt an dieser Stelle grundsätzlich die Bereitschaft, substanzielle Transfers zu finanzieren. Bei den SDGs hat man es sich in einem gewissen Sinne noch einfacher gemacht. Hier wird primär jedes Land einzeln aufgefordert, bei sich die Ziele umzusetzen, so, wie das der Paris-Vertrag beim Klima tut. Das führt vor Ort zu viel Zustimmung: Denn das eigene Geld bleibt im Lande. Es führt auch zu sehr viel Zustimmung bei einschlägigen NGOs, die bei dieser Philosophie in ihrem eigenen Land die eigene Agenda umsetzen können, mit dem Geld des eigenen Landes. Das Geld fließt also nicht in den Globalen Süden. Von

²⁰¹ Annan (2005).

²⁰² Vgl. Radermacher (2015).

daher sind vor allem für die Nachhaltigkeit in ärmeren Ländern die Chancen für die SDGs von vornherein schlecht – schlechter noch, als es die Chancen für die Millennium Development Goals waren. Hinzu kommt bei so wichtigen Themen wie Hunger (SDG 2) die traurige Lage, dass durch die Covid-Pandemie und nachfolgend die Verwerfungen infolge des Ukraine Konflikts sich die Ernährungssituation weltweit sogar wieder dramatisch verschlechtert hat. Wir sind von der Erreichung von Ziel 2 weiter entfernt als im Jahr 2015.

Im Folgenden diskutieren wir die Chancen für Zielerreichung bei den SDGs im Kontext der Referenzlösung. Dabei ist unser Anspruch von vornherein nicht die Umsetzung der SDGs bis zu dem aus unserer Sicht unrealistischen Zeitpunkt 2030, sondern eine Zielerreichung zwischen 2050 und 2070. Das erscheint uns als möglich. Hier ist die Referenzlösung als Ansatz mit erheblicher internationaler Kofinanzierung („**From Billions to Trillions**“) natürlich sehr viel geeigneter, diese Ziele zu erreichen, als die Ausgangssituation mit klassischer Entwicklungszusammenarbeit und einer bescheidenen internationalen Klimafinanzierung, was ja die heutige Basis ist. Wir beschreiben diese Gegebenheiten im Weiteren für die 17 Ziele im Detail. Es sei darauf hingewiesen, dass diese 17 Ziele in 169 Unterziele ausdifferenziert sind. Wir beschäftigen uns aber hier nicht mit diesen Unterzielen, sondern schauen uns die einzelnen Ziele (nur) summarisch an.

Ziel 1: Keine Armut

Dieses Ziel zu erreichen, bedeutet eine deutliche Verbesserung der Wohlsituation für eine sehr große Zahl an Menschen überall auf der Welt. Armut ist heute für hunderte Millionen Menschen die Realität. Jeder Mensch sollte abhängig von der konkreten Wohlsituation eines Landes **zumindest** über **das Minimum** verfügen, das nach internationalen Grundsätzen, zu erreichen ist, um nicht mehr als arm zu gelten. Das Bestreben einer Vervierfachung des BIP-Wachstums in der Challenge-Gruppe ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass weltweit ein Mindestlohn gezahlt werden kann. Tatsächlich geht die Zielsetzung der Referenzlösung deutlich über dieses Minimum hinaus.

Ziel 2: Kein Hunger

Aktuell nimmt der Hunger auf der Welt wieder zu. Dies ist eine Folge von Covid und dem Krieg in der Ukraine, aber auch Dürren infolge des Klimawandels verschärfen die Situation. Hunger hat immer zwei Seiten: Auf der einen Seite geht es darum, wieviel Nahrung zur Verfügung steht, auf der anderen Seite geht es um Kaufkraft. **Hat jeder Mensch genügend Kaufkraft**, um sich die Nahrung zu kaufen, derer er bedarf, **um nicht zu verhungern?**

Wie bereits zu Ziel 1 beschrieben, zielt der ökologisch-soziale Ansatz, auf dem die Referenzlösung basiert, darauf ab, über das Garantieren von Mindeststandards, wie z. B. einem Mindestlohn, die Armut zu überwinden. Auf diese Weise wird Kaufkraft geschaffen, die oftmals die Ursache für Hunger ist – nicht die Knappheit an Nahrungsmitteln. Das gelingt insbesondere durch die angestrebte massive wirtschaftliche Entwicklung, die durch substanzielle Mittelzuflüsse der reichen Länder „angefeuert“ wird. Hinzu kommt, dass die Lösung die Nahrungsmittelproduktion in großem Umfang zu steigern erlaubt, insbesondere weil die Ertragskraft landwirtschaftlicher Flächen durch großflächige Restaurierung von Böden gesteigert wird. Länder der Challenge-Gruppe könnten sich so zunehmend selbst mit Nahrungsmitteln versorgen, während aktuell häufig ein großer Teil, z. B. aus der Ukraine, Russland oder den USA importiert werden muss.

Ziele 3: Gesundheit und Wohlergehen

Es gehört zum ökologisch-sozialen Paradigma, dass die Förderung von Wohlstand im Wesentlichen auch darauf setzen muss, dass Bevölkerungen gut ausgebildet sind, dass sie sich gesund halten können und deshalb auch tendenziell alt werden. Das zeichnet Länder mit Wohlstand aus. Wohlstand ist ein zentrales Thema der Referenzlösung, wobei die Nutzung digitaler Ansätze eine große Rolle spielt, um eine **angemessene Versorgung** einer immer größer werdenden Menschheit mit modernen Möglichkeiten der Medizin zu ermöglichen, ohne den Ressourcenverbrauch und die Kosten in nicht tragfähige Dimensionen zu treiben. Indem gleichzeitig der Klimawandel bekämpft, eine Situation für ein stabiles Klima herbeigeführt wird und enorme Anstrengungen zur Sicherung der Biodiversität und der Resilienz wichtige Teile der Programmatik sind, verbessern sich die Voraussetzungen für Gesundheit und Wohlergehen weiter.

Ziel 4: Hochwertige Bildung

Wie schon unter 3. erwähnt, ist hochwertige Bildung eine wesentliche Voraussetzung dafür, Gesellschaften wertschöpfungsfähig zu machen. Es gehört zu einem weltweiten ökosozialen Programm, dass überall auf der Welt der Wohlstand wächst, in den ärmeren Ländern am schnellsten, also die **Balance** auf der Welt auch **im Sinne des Gini-Koeffizienten** zunimmt, innerhalb der ärmeren Staaten, wie auch zwischen den Staaten. Hochwertige Bildung ist ein wesentliches Element für diesen Prozess.

Ziel 5: Geschlechtergleichheit

Es geht unter anderem darum, wie sich Familien aufstellen, wie die Arbeitsteilung innerhalb der Familie aussieht, wie die Rechtesituation ist, etwa bei Eigentum oder Landtiteln. Wichtig ist in jedem Fall, **vergleichbare Situationen und Optionen für beide Geschlechter** herbeizuführen. Das ist ein wesentliches Element der ökosozialen Logik. Dies auch unter Wertschöpfungsaspekten. Es werden entsprechende Kapazitäten an Fähigkeiten bei den Menschen gebraucht. Diese lassen sich nur voll erschließen, wenn sie bei Männern *und* Frauen entwickelt werden.

Ein Anspruch der Lösung besteht darin, dass sich das Bevölkerungswachstum bis 2050 stabilisiert. Auch das hängt wesentlich an der Situation der Frauenrechte, insbesondere bei Bildung und Gesundheit. Eigentumsfragen spielen ebenfalls eine große Rolle, z. B. bei Erbschaften oder anderen Besitztiteln.

Ziel 6: Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen

Das Programm der Referenzlösung bedeutet eine deutliche Verbesserung des Lebensstandards für alle Menschen. Es beinhaltet große Anstrengungen zur **Stabilisierung des Wasserhaushalts**. Das gilt im Besonderen für den Bereich der Regenwälder, aber auch – über die Förderung von Humusbildung – für die landwirtschaftlichen Böden, z. B. durch die Steigerung der Wasserbindungsfähigkeit mittels Biokohle in landwirtschaftlich genutzten Böden. Generell ist mit wachsendem Wohlstand immer auch eine Verbesserung des Zugangs zu sauberem Wasser und zu Sanitäreinrichtungen verbunden.

Ziel 7: Bezahlbare und saubere Energie

Dieses Thema steht im Zentrum der Referenzlösung. Gegenüber anderen Zukunftsentwürfen, die heute diskutiert werden, beinhaltet sie ein erhebliches wirtschaftliches Wachstum in den Entwicklungs- und Schwellenländern als explizites Ziel. Hierzu korrespondierend ein erhebliches Wachstum bei der Energieversorgung. Es geht um **Energiewohlstand für alle**. Es ist eine klar andere Strategie als bspw. „Renewables only“ für die Entwicklungs- und Schwellenländer. Zentrale Element der Lösung ist eine umfangreiche Kofinanzierung, um bezahlbare und saubere Energie für alle bereitzustellen, dazu zählt – als zweite Säule – auch fossile Energie mit Carbon Capture.

Die Referenzlösung beinhaltet die Differenzkostenübernahme für alle Maßnahmen im Energiebereich der Entwicklungs- und Schwellenländer, die sich um den Schutz des Klimas bemühen. Mit der Übernahme der Kosten bei den Conditional NDCs werden entscheidende Leistungen aus der

reichen Welt für bezahlbare und saubere Energie in den Entwicklungs- und Schwellenländern aufgebracht. Das gilt ebenso für den vorgesehenen transkontinentalen Infrastrukturausbau im Energiesektor und im Kontext des beschriebenen Cap-and-Trade-Systems.

Ziel 8: Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum

Das Referenzmodell zielt auf eine deutliche **Erhöhung der sozialen Balance weltweit**. Dies insbesondere durch ein hohes Wirtschaftswachstum in den Entwicklungs- und Schwellenländern, wofür unter anderem die benötigte Energie bereitgestellt wird. Die Ansätze, um all das zu ermöglichen, beinhalten den Aus- und Umbau der Energiesysteme, den Bau interkontinentaler (Energie-) Infrastrukturen, Programme zur Bindung von CO₂ im Bereich Natur-basierte Lösungen und große Sonderprogramme, etwa zur Vermeidung von Methan-Leckagen bei der Öl- und Gasförderung. Dadurch werden zugleich viele neue Arbeitsplätze geschaffen: z. B. infolge des Gigaprogramms Natur-basierte Lösungen, beim konsequenten Regenwaldschutz, aber auch bei der Herstellung und dem Einbringen von Biokohle in landwirtschaftlich genutzte Böden. Die Schaffung von attraktiven Arbeitsplätzen führt schließlich zu hohem Wirtschaftswachstum in den Entwicklungs- und Schwellenländern.

Ziel 9: Industrie, Innovation- und Infrastruktur

Mit der vorgeschlagenen Lösung sollen die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass die Entwicklungs- und Schwellenländer gute Chancen haben, sich zu industrialisieren. Dabei dient China als Beispiel. Große Industrialisierungsprogramme werden kofinanziert. Das gilt auch für viele Aktivitäten im Bereich der Land- und Forstwirtschaft. Dies alles sind Themenfelder, in denen Innovationen eine zentrale Rolle spielen, aber auch bereits vorhandene Innovationen ihre Umsetzung finden – weltweit. Die GES-Referenzlösung ist damit auch ein weltweites Programm zum **Technologietransfer**. Die Referenzlösung ist stark auf die **Mission von UNIDO** ausgerichtet.

Ziel 10: Weniger Ungleichheiten

Die Referenzlösung wurde vor dem Hintergrund einer langjährigen wissenschaftlichen Beschäftigung mit dem Thema Ungleichheit entwickelt.²⁰³ Dabei geht es einerseits um Ungleichheiten zwischen den Staaten und andererseits um Ungleichheiten innerhalb der Staaten. Bei Letzterem spielt die **Einkommensverteilung** eine wesentliche Rolle. Hier gibt es tiefe Einsichten über die Bedeutung

²⁰³ Vgl. Herlyn (2012); Radermacher, Kämpke (2015).

des Gini-Koeffizienten.²⁰⁴ Er ist eine Schlüsselkennzahl, in der sich der Umfang der Förderung der Menschen in Breite manifestiert, insbesondere bei Bildung, Gesundheit, Altersversorgung etc.

Ein zentrales Anliegen, das mit der Referenzlösung adressiert wird, ist die Reduzierung unverhältnismäßig großer Ungleichheiten, und zwar sowohl innerhalb der Staaten als auch zwischen den Staaten. Damit ist nicht gemeint, dass sich die Welt in Richtung eines utopischen kommunistischen oder sozialistischen Gesellschaftsmodells bewegt. Vielmehr geht es um eine Orientierung an der ökonomischen Theorie der sogenannten effizienten/ balancierten Ungleichheit, in deren Kern es um das Erreichen der sog. efficient inequality range geht, der zufolge der Gini-Koeffizient etwa zwischen 0,25 und 0,35 liegen sollte. Empirisch gesehen befinden sich aktuell reiche Staaten in diesem Bereich. Daher entspricht es etwa dem Ausgleichsniveau, wie es heute zwischen den und innerhalb der europäischen Staaten besteht. Wie vielfältige Untersuchungen von Wilkinson und Pickett in diesem Bereich zeigen, hat ein balanciertes Ausgleichsniveau viele weitere Vorteile für anderen Indikatoren einer funktionierenden Gesellschaft und gesunder Menschen, die in ihr leben. Hieraus lässt sich ableiten, was mit der Referenzlösung weltweit erreicht werden soll.

Ziel 11: Nachhaltige Städte und Gemeinden

Die Frage der Bevölkerungsentwicklung, wie der parallel weiter zunehmenden **Verstädterung**, ist ein zentrales Thema der Referenzlösung. Die Tatsache, dass bis 2050 noch zwei Milliarden Menschen auf der Welt hinzukommen – vor allem in der Challenge-Gruppe –, ist ein zentrales Anliegen. Insbesondere geht es um die Verdoppelung der Bevölkerung in Afrika bis zum Jahr 2050, aber auch um das weitere Bevölkerungswachstum in Indien. Die Referenzlösung zielt darauf ab, diese Wachstumsprozesse zu brechen und somit den Peak der Weltbevölkerung bei zehn Milliarden im Jahr 2050 zu erreichen. Der Ausbau von Städten und Gemeinden, gerade mit Blick auf diese enormen Wachstumsprozesse, ist ein zentrales Anliegen der Referenzlösung. Viele Städte werden gigantisch wachsen, dabei muss so viel **Nachhaltigkeitskompatibilität** wie möglich gesichert werden. Die Welt wird erleben, dass sich immer mehr der größten Städte in Afrika befinden werden, aber auch in Indien. Die Referenzlösung ist darauf ausgelegt, gerade diesen Ländern eine Chance zu geben, um ihren Städten und Gemeinden eine gute Zukunft zu sichern. Das betrifft Energieverfügbarkeit, Mobilität etc.

²⁰⁴ Vgl. Herlyn, Radermacher (2018).

Ziel 12: Nachhaltiger Konsum und Produktion

Die gesamte Programmatik der Referenzlösung ist so angelegt, dass die Welt Net Zero – nach temporärer Überschreitung des 2°C-Ziels – bis 2070 tatsächlich erreicht. Verbunden mit der Kofinanzierung auf der sozialen Seite ist dies ein Programm für Nachhaltigkeit, das Konsum und Produktion umschließt. Alle diese Prozesse werden letzten Endes klimaneutral. Da, wo sie es übergangsweise nicht sind, bietet das Gigaprogramm Natur-basierte Lösungen einen biologischen Puffer. Er eröffnet eine Chance von 10 Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen für die Menschheit pro Jahr. Unterm Strich wird **Klimaneutralität** so erreicht, wenn auch **erst 2070**. Dieser Weg in die Zukunft führt zu Arbeitsplätzen und mehr Wohlstand überall. Er ist von der Gesamtanlage her auf nachhaltigen Konsum und nachhaltige Produktion ausgelegt. Auch deshalb, weil er auf die volle Umsetzung der SDGs zuläuft.

Ziel 13: Klimaschutz

Das ist das zentrale Thema der Referenzlösung mit Net Zero bis 2070. Bis zu diesem Zeitpunkt soll rückwirkend auch die Umsetzung des 2°C-Ziels gelingen.

Ziel 14: Leben unter Wasser

Die Situation wird so sein, dass der Druck auf mehr CO₂-Aufnahme im Wasser abnimmt, also die Versauerung der Meere abgemildert wird. Gleichzeitig wird auch der Druck auf die Küstenregionen, die Mangrovenwälder, die Korallenriffe reduziert. Kläranlagen werden zu Selbstverständlichkeiten. Zusätzlich werden die Meere, insbesondere in den Küstenregionen, für die Generierung für mehr Wohlstand aktiviert. Das betrifft z. B. die Aufforstung von Mangrovenwäldern oder das großflächige Anpflanzen von Algenfarmen ("maritime Aufforstung"), um einerseits CO₂ zu binden, aber durch die einhergehende Bewirtschaftung Wertschöpfung zu generieren, ob für synthetische Kraftstoffe oder Pflanzenkohle aus Algen bis hin zur Verarbeitung zu Nahrungsmitteln auf Algenbasis.

Ziel 15: Leben an Land

Das Referenzprogramm beinhaltet zahlreiche Programme, die zu einer positiven Entwicklung in diesem Bereich führen. Das gilt besonders für den **Regenwaldschutz**. Das gilt natürlich auch für das **Gigaprogramm** im Bereich **Natur-basierte Lösungen**, was sich sowohl auf die Forstwirtschaft (insbesondere auf degradierten Böden in den Tropen) als auch auf die Nahrungsmittelproduktion (vor allem auf semi-ariden Böden mit schlechter Humusbilanz) bezieht. Weitere Natur-basierte Lösungen sind wichtiger Teil der Referenzlösung, um die globalen Emissionen bis 2050 auf nur noch 5

Milliarden Tonnen zu mindern. Angesprochen wurden Mangroven, boreale Wälder, Humusbildung auf landwirtschaftlichen Flächen allgemein, Algen etc.

Ziel 16: Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen

Endlich wird das Anliegen von Indira Gandhi, Stockholm 1972, umgesetzt. Darin ist Wohlstand überall auf der Welt das Ziel. Indem **mehr soziale Balance zwischen Staaten in den Entwicklungsländern** gefördert wird, **verbessert sich die Ausgangssituation für Frieden**. Der ökosoziale Charakter bedeutet eine Stärkung der WTO, die Nord und Süd in Bezug auf Handelsfragen fair miteinander verbindet, wobei die reichen Länder sich zunehmend nicht mehr an die WTO-Logik gebunden fühlen, vor allem bei Energie und Klima, und sich offensichtlich darauf verlassen, sich ggf. mit ihrer ökonomischen Stärke gegen Positionen der Entwicklungs- und Schwellenländer durchsetzen zu können. Die Philosophie der Referenzlösung ist eine andere. Mit einem entsprechenden Vorgehen kann – in Koppelung mit den ILO-Standards – ein **ökologisch-sozialer Rahmen** der Weltwirtschaft etabliert werden, der **WTO-konform ausgestaltet werden kann**. Die Anwendung der im Kontext des Freihandels wichtigen „same product“-Regel der WTO bleibt der „Anker“ des Systems. Es wird aber zukünftig vorausgesetzt, dass ein Staat sich im Rahmen des vorgeschlagenen Cap-and-Trade-Systems (vgl. Kapitel 5.3) bewegt und die weiteren Vorgaben der vorgeschlagenen Programme sowie die ILO-Standards beachtet.

Ziel 17: Partnerschaften zur Erreichung der Ziele

Im Rahmen der Referenzlösung wird eine weltweite Partnerschaft zur Umsetzung der SDG-Ziele etabliert, der alle drei Ländergruppen angehören. Insbesondere ist der **Vorschlag der Referenzlösung friedensfähig**, weil er die ökonomischen Interessen aller Staaten in der Logik der drei Ländergruppen mitberücksichtigt. Das ist wichtig, weil vermutlich jedes Land seine ökonomischen Interessen im Zweifel mit Gewalt verteidigen wird, statt sie dem internationalen Klimaschutz „zu opfern“. Die Referenzlösung überbrückt die Gegensätze, die häufig zwischen den drei Säulen der Nachhaltigkeit – Ökonomie, Ökologie, Soziales – bestehen.

8.5 Sensitivitätsanalysen

Bei Modelluntersuchungen, wie sie in diesem Text vorgenommen werden, ist es wichtig, Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Es geht darum zu prüfen, was passiert, wenn Annahmen nicht genau zutreffen. Das Ziel des Referenzmodells ist es, eine wohlstandsverträgliche Klimaneutralität für zehn Milliarden Menschen bis in die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts hinein sicherzustellen. Dabei ist

für die Wohlstandsverträglichkeit der Lösung zunächst wesentlich, dass in der Ländergruppe der Challenge-Länder über die kommenden 25 Jahre eine Wachstumsrate von 6 % pro Jahr im Durchschnitt sichergestellt wird. Damit steuert diese Ländergruppe 2050 ein Drittel des Welt-BIP bei, während es 2020 erst ca. 10 % sind. Aufgrund der Vielzahl der Länder, die diese Gruppe umfasst, steigt der BIP-Anteil aber auch bei nur halbem Wachstum auf deutlich über 20 % des Welt-BIP. Das zeigt die Robustheit des Modells im Hinblick auf die Bedeutung der Länder der Challenge-Gruppe.

Im Hinblick auf das Ziel, die Emissionen weltweit auf Netto-Null zu reduzieren, wird natürlich die Konsequenz der hier nicht untersuchten **Ländergruppen "erweiterte OECD" und "China-Club"** in der Umsetzung ihrer NDCs **von entscheidendem Einfluss** darauf sein, ob das Ziel für die Weltgemeinschaft erreicht wird. Wie diese Ländergruppen ihre Versprechungen in Bezug auf Net Zero umsetzen bestimmt außerdem, inwiefern und in welchem Umfang nachgefragte technische Lösungen für die Challenge-Gruppe zur Verfügung stehen. Das liegt daran, dass auch für die Zukunft die erweiterte OECD und noch für viele Jahre der China-Club über eine höhere Kaufkraft verfügen als die Challenge-Gruppe. Im schlechtesten Fall kaufen diese Ländergruppen einen großen Teil der verfügbaren Optionen im Bereich der Elektrolyseure zur Wasserstoffproduktion, aber insbesondere einen Großteil der verfügbaren Kapazitäten für Carbon Capture einfach auf. Damit verbleiben weniger Kapazitäten für die Challenge-Gruppe, die vermehrt auf andere Bausteine zur Erreichung von Net Zero setzen müsste. In einem solchen Szenario ist zu erwarten, dass sich die Kosten erhöhen und Net Zero deutlich später erreicht würde.

Unter den technischen Maßnahmen sind zunächst das unterstellte **überproportionale Wachstum der erneuerbaren Energien** und damit einhergehend die deutlich steigende Rolle von Strom als Endenergieträger von wesentlicher Bedeutung: In beidem liegt ein wesentlicher Hebel zur Reduktion der Klimagasemissionen. Da aber fossile Energieträger ihren hohen Anteil an der Primärenergieversorgung behalten werden, wird der **Einführungsgrad von Carbon-Capture-Technologien** neben der Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien von entscheidender Bedeutung für die Annäherung an Klimaneutralität. Fossile Energien werden in den kommenden Jahrzehnten aufgrund der Schwierigkeit umfangreicher Elektrifizierung nicht aus den Mobilitätsanwendungen zu verdrängen sein und aufgrund des deutlich begrenzten Wachstumspotenzials der Elektrolyseure auch in vielen Anwendungen die einzige Quelle von Molekülen bleiben. Darum ist der Einführungsgrad von Carbon Capture neben dem Wachstum der neuen Erneuerbaren die entscheidende Stellgröße für die Annäherung an Net Zero.

Unter den technischen Themen spielt weiterhin das Sonderprogramm zur **Reduktion der Methan-Leckagen** eine wesentliche Rolle: Aufgrund der hohen negativen Klimawirksamkeit dieses Gases sind die angestrebte Vermeidung von Leckagen im Zusammenhang von Erschließung und Transport sowie die Maßnahmen zur Vermeidung von Methanverlusten an Fackeln wesentlich.

Der nächste Programmteil, dessen Wachstumsraten das Erreichen von Net Zero entscheidend prägen, ist der Umfang und der Erfolg der Durchführung der **Aufforstungen**. Mehr als 40 Millionen Hektar pro Jahr über einen Zeitraum von 25 Jahren ist ein sehr anspruchsvoller Weg. Das gilt ebenso für die umfangreichen Maßnahmen zur Humusbildung bzw. **Bodenverbesserung**.

Zusammengefasst zeigt die Betrachtung der wesentlichen Parameter, begleitet von der anspruchsvollen Arbeit zur Wandlung der heutigen, konditionierten NDCs in umsetzbare Programme und deren Kofinanzierung und Schaffung einer Cap-and-Trade-Lösung, wie schwierig und anspruchsvoll der vorgeschlagene Weg für die Weltgemeinschaft ist.

Das Referenzmodell adressiert die entscheidenden Parameter und zeigt zudem einen Weg auf, wie die Klimaneutralität im Zeitraum 2050 bis 2070 erreicht werden kann. Die meisten relevanten Zusammenhänge sind dabei von einem linearen Typ, d. h. dass die entsprechende **Modellierung sehr robust** ist. Kleinere Veränderungen – z. B. an der Wachstumsrate – beeinflussen die resultierenden Ergebnisse nur am Rande. Der große Einfluss der hier zusammenfassend beurteilten Parameter und die Robustheit ihres Einflusses stärkt die Validität der gezogenen Schlüsse. Scheitern werden die Überlegungen in der Realität daher eher an der Kraft von Partikularinteressen zur Verhinderung tragfähiger Lösungen als an inhärenten Instabilitäten der vorgeschlagenen Programme.

Je eher die wesentlichen Entscheidungsträger bereit sind, sich im Gleichklang den wesentlichen Elementen des hier vorgestellten Modells zu stellen, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung.

9 Hindernisse und Limitationen

Auch wenn eine Umsetzung der Referenzlösung prinzipiell möglich ist, werden in der Praxis viele zu lösende Herausforderungen, vielleicht sogar unüberwindbare Hindernisse auftauchen. Es wäre ein Wunder, wenn dies nicht der Fall wäre, ist doch das mit einer nachhaltigen Entwicklung einhergehende Versprechen der gleichzeitigen Realisierung von nachholender Entwicklung und Energiewohlstand UND Umwelt- und Klimaschutz bis heute nicht erfüllt worden. Alleine wegen des engen Zeitrahmens wird die Referenzlösung in ihrer praktischen Umsetzung auf viele Probleme stoßen, die eine erfolgreiche Realisierung der Lösung beeinträchtigen oder gar verhindern können.

Hierzu werden zunächst grundsätzliche Restriktionen beschrieben. In der Folge werden bestehende konkrete Themenfelder beleuchtet, die eine erfolgreiche Implementierung der Referenzlösung verhindern können.

Eine **beispielhafte Analyse der Wirksamkeit regulatorischer Restriktionen** wurde für den Auftraggeber durchgeführt. Betrachtet wurde zum einen ein Szenario, in dem die Regulierung einerseits das Abfangen von CO₂ an Kohlekraftwerken untersagt und andererseits keine synthetischen Kraftstoffe für Pkw verwendet werden dürfen. Zum anderen wurde ein Szenario beleuchtet, in dem ein Komplettausstieg aus den fossilen Energien (und nicht etwa aus den fossilen Emissionen) regulatorisch vorgegeben ist. Beide Szenarien sind **in einem separaten Dokument** beschrieben.²⁰⁵

9.1 Restriktionen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Energiesystem

Betrachtet man die Energieversorgung von Ländern, aber auch ihre Möglichkeiten Net Zero zu erreichen, wird beides von vielfältigen Faktoren beeinflusst. Diese Faktoren können in verschiedenen Staaten sehr unterschiedlich ausgeprägt sein und unterschiedlich förderlich oder hinderlich sein. Das gilt in gleicher Weise für den Auf- und Umbau von Energiesystemen. Dies wird schnell klar, wenn man sich vor Augen führt, dass das Land Bhutan das bisher einzige Land der Welt ist, das Net Zero erreicht hat. Es ist sogar klimapositiv: Entscheidende Voraussetzungen hierfür sind der hohe Anteil an Wasserkraft bei der Energieerzeugung und die sehr großen Waldflächen des Landes.²⁰⁶ Das recht niedrige Wohlstandsniveau trägt sein Übriges bei.

Welchen Weg ein Land zum Auf- oder Umbau des Energiesystems und zum Erreichen von Net Zero einschlägt bzw. einschlagen kann, ist von einer Vielzahl von Bedingungen und Gegebenheiten

²⁰⁵ Vgl. Global Energy Solutions (2023b)

²⁰⁶ Vgl. Mayer (2023).

abhängig. Im Weiteren werden einige der relevanten Punkte diskutiert, die Restriktionen für die Ausgestaltung des Energiesystems und die Erreichung von Net Zero haben. Diese Restriktionen werden für Entwicklungs- und Schwellenländer weiter ausdifferenziert.²⁰⁷

9.1.1 Geografie

Die Geografie und die geografischen Voraussetzungen eines Landes stellen nicht oder kaum beeinflussbare Größen dar, die seit jeher eine starke Determinante für die Entwicklung von Völkern und Regionen darstellen. Es geht um Klima, Vegetation und Tierwelt, Landschaftstyp und -ökologie, Oberflächenformen, Wasser und Biosphäre.

So ist die Frage, welche Formen der Energiegewinnung in einer bestimmten Region möglich und sinnvoll sind, stark von den geografischen Gegebenheiten abhängig. Dasselbe gilt für die Frage, welche Rolle Natur-basierte Lösungen spielen können.

Bei der Energieversorgung stellt sich die Lage für Länder mit Bergen anders dar als für Länder ohne Berge. Man denke exemplarisch an die Pumpspeicherkraftwerke in der Schweiz. Mit Wasserkraft kann man Strom produzieren. Das kann auch derjenige, der günstige geologische Möglichkeiten hat – wie z. B. Island mit seinem Vulkanismus. Auch natürliche Speichermöglichkeiten für Gas und Wasserstoff spielen eine Rolle, ebenso Möglichkeiten zur Verpressung von CO₂ in alten Öl- und Gasförderstätten.

Im Kontext der Geografie ist außerdem wichtig, wie viele Menschen in einem Land leben, relativ zu dem, was an biologischen Ressourcen zur Verfügung steht. So hat Österreich mit seinen enormen Biomassekapazitäten als sehr bergiges Land mit sehr viel Wald eine vergleichsweise kleine Bevölkerung. Es ist dann verhältnismäßig einfach, ein klimaneutrales Energiesystem zu schaffen. Das gilt ähnlich für Norwegen, Schweden und Finnland.

Natürlich ist die Geografie auch ein entscheidender Faktor dafür, wie aufwendig und kompliziert es ist, Überlandleitungen für Strom aufzubauen. So hat Österreich ungefähr 30 Jahre gebraucht, um eine Hochleistungsstromverbindung über die Alpen zu realisieren.

In den aktuellen Ansätzen zur Energiewende ist Offshore-Windkraft ein großes Thema. Das wiederum setzt einen Zugang zu Meeren voraus, am besten zu Standorten mit geringer Wassertiefe und sehr viel Wind, der zuverlässig weht. Gibt es sehr viel Wind, wie im Süden Chiles, sind auch Onshore-Standorte interessant. Die Effizienz der Gewinnung von Solarenergie ist stark abhängig von der Sonneneinstrahlung. So sind die Standortfaktoren für den Einsatz von erneuerbarer Energie auf der Welt offenbar sehr unterschiedlich.

²⁰⁷ Vgl. Stappen (2023).

9.1.2 Technologischer Entwicklungsstand

Der technologische Entwicklungsstand von Staaten ist für ihre Handlungsfähigkeit generell von großer Bedeutung. Er ist aber auch in Bezug auf ihre Attraktivität für Unternehmen, Führungskräfte und Arbeitnehmer im Allgemeinen relevant. Es ist in vielerlei Hinsicht ein großer Unterschied, ob man sich in einem Entwicklungsland oder in einem Hochtechnologieland befindet. Der technologische Status quo hat einen entscheidenden Einfluss darauf, wie ein Weg in Richtung eines klimaneutralen Energiesystems aussehen kann und welche in Frage kommenden Technologien unter Abwägung aller Einflussfaktoren letztlich zum Einsatz kommen.

Natürlich macht es einen großen Unterschied, ob es im Status quo eine ausgebaute Strominfrastruktur gibt oder nicht, ob es ein funktionierendes Stromsystem gibt, auf das man zurückgreifen kann. In Entwicklungsländern, in denen die Hälfte der Bevölkerung noch mit Holzkohle kocht, wird eine Einführung von Elektromobilität unter völlig anderen Vorzeichen stehen als in einem Industrieland.

Der technologische Status quo bestimmt wesentlich die realistischen Möglichkeiten der Weiterentwicklung. In diesem Kontext bekommt der **Technologietransfer** eine wichtige Bedeutung. Im Einzelfall ist zu analysieren, wie aus einem gegebenen Status quo heraus die technologische Weiterentwicklung gestaltet werden kann. Eine Frage ist, wie es am besten gelingen kann, technologische Entwicklungsstufen zu überspringen (Leap Frogging). Dies erscheint im Kontext von Local-Grid-Anwendungen einfacher als im Falle von Technologien, die an hohe und weit verteilte technologische Voraussetzungen gebunden sind, z. B. intelligente Stromnetze.

Sehr einflussreich ist immer der **Ausbildungsstand der Bevölkerung**, etwa um Technologien zu implementieren und diese anschließend eigenverantwortlich zu betreiben. Zentral sind aber auch Kenntnisse im Bereich der Ökonomie und des Managements, um effiziente unternehmerische Prozesse zu etablieren.

9.1.3 Infrastruktur

Das Vorhandensein von Infrastruktur ist seit je her eine entscheidende Basis für das Entstehen von Wohlstand. Unter dem Begriff Infrastruktur werden alle Anlagen, Institutionen, Strukturen, Systeme und nicht-materiellen Gegebenheiten, die der Daseinsvorsorge und der Wirtschaftsstruktur eines Staates oder seiner Regionen dienen, zusammengefasst. Im Kontext der Referenzlösung liegt der Schwerpunkt der Auseinandersetzung mit Infrastruktur auf der technologischen Seite, die im Kontext der Energieversorgung relevant wird. Anwendungsbereiche sind u. a. die Elektroenergie, Gasversorgung, Fernwärme und das Tankstellennetz. Sie sind in der Regel eng mit dem technologischen Entwicklungsstand eines Landes verknüpft, aber auch mit seiner finanziellen und ökonomischen

Leistungsfähigkeit. Zunehmend kommt der digitalen Infrastruktur eine wichtige Bedeutung zu, insbesondere in Hinblick auf Möglichkeiten des Leap Froggings.

Einzelfragen, die im Kontext einer Transformation des Energiesystems relevant werden, betreffen den Status quo der Infrastruktur im Bereich der Erneuerbaren Energie, die Strominfrastruktur im Allgemeinen oder auch die Wasser- und Pipelineinfrastruktur. Von diesem Status quo ist abhängig, in welchem zeitlichen Rahmen Veränderungen der Energieversorgung realistischerweise möglich sind. Aus dem Status quo heraus gilt es etwa zu beachten, wie die Situation in Bezug auf Pipelines ist, ob ein Land über eigene Raffinerien verfügt, wie die Hafen- und Schifffahrtsinfrastruktur aussieht oder auch, wie die infrastrukturellen Voraussetzungen zum Transportieren und Verpressen von CO₂ sind.

9.1.4 Finanzielle und ökonomische Gegebenheiten

Die finanzielle Ausstattung eines Landes und die Stärke seiner Ökonomie sind immer zentrale Themen. Es sind bedeutende Einflussfaktoren auf seine Handlungs- und Durchsetzungsfähigkeit im internationalen Wettbewerb um Kapital, Investoren sowie Zugänge zu Märkten und Rohstoffen. All das ist von entscheidender Relevanz für die Frage, mit wieviel Nachdruck ein Land das Verfolgen eines Net-Zero-Pfades verfolgen kann.

In diesem Kontext spielen Länderratings eine wichtige Rolle. Sie werden von verschiedenen Kredit-Ratingagenturen vergeben und geben Auskunft über die Kreditwürdigkeit der Länder. Diese wiederum nimmt großen Einfluss auf die im Land herrschenden Finanzierungsbedingungen.

Für Entwicklungsländer ergibt sich oftmals eine **Dilemma-Situation**: Aufgrund schlechter Ratings, schon alleine wegen der ungünstigen Weltregion, können sie bei einem hohen Geldbedarf nur geringe Sicherheiten bieten. Geld von Gläubigern erhalten sie nur, wenn sie hohe Renditen versprechen können. Die Staatsverschuldung steigt in immer größere Höhen. Der IWF warnte jüngst vor einem sich immer weiter auftürmenden „Schuldenwall“.²⁰⁸ Die Schulden, die die Entwicklungsländer alleine in 2024 refinanzieren müssen, belaufen sich auf 30 Milliarden Dollar.

Die Finanzierungsbedingungen spielen also eine zentrale Rolle. Während sich aussichtsreiche Projekte in den Heimatstaaten der großen internationalen Währungen gut finanzieren lassen, müssen ärmere Länder **Risikozuschläge** zahlen, wenn sie sich Geld leihen – mittlerweile sogar Risikozuschläge für Klimarisiken, die sie zwar nicht verursacht haben, deren Opfer sie aber sind. Dies ist eine zutiefst unfaire Situation.

²⁰⁸ Vgl. Winkelhahn (2023).

Dass ein Um- oder gar Aufbau eines klimaneutralen Energiesystems unter derartigen Voraussetzungen massiv erschwert wird, erklärt sich von selbst.

Hinzu kommt ein weiteres Phänomen: Vermehrt ist zu beobachten, dass reiche europäische Länder im Kontext der **Lieferkettensorgfaltspflicht** den ärmeren Ländern die eigenen, oftmals sehr teuren Vorstellungen aufzwingen, die zu Hause in großem Umfang staatlich subventioniert werden, z. B. die Erzeugung von grünem Wasserstoff. Auch gibt es immer wieder Fälle, in denen reiche Länder ihren Einfluss auf die Weltbank, die Europäische Investitionsbank etc. nutzen, um ärmeren Ländern Kredite vorzuenthalten, wenn diese zum Beispiel ihre eigene Gasinfrastruktur ausbauen wollen.

Sehr kritisch wird die Situation, wenn die großen Energiekonzerne der Öffentlichkeit gehören, wie etwa in Indien und Südafrika. Teilweise gehören sie dem Staat, teilweise der Region. In einer Lage, in der hohe Verschuldung herrscht und der Staat in der Haftungsverantwortung ist, ist zu erwarten, dass kostspielige Umbaumaßnahmen kaum Chance auf Umsetzung haben.

9.1.5 Regulierung

Die Regulierung, sprich die „Spielregeln“, unter denen die Transformation zur Klimaneutralität stattfindet, ist von entscheidendem Einfluss auf das, was letztlich passiert. **Was ist verboten? Was ist geboten? Was wird mit öffentlichen Geldern gefördert? Was wird verteuert?** Die Antworten auf diese Fragen können je nach Land unterschiedlich ausfallen und damit zu unterschiedlichen Herangehensweisen führen. Ein eindrucksvolles Beispiel ist an dieser Stelle die massive Nutzung der Kernkraft in Frankreich und die Ablehnung einer solchen Nutzung in Deutschland. Beide Länder sind Nachbarn, in vielen relevanten Dimensionen ähnlich, zudem befreundet und teil eines gemeinsamen Stromnetzes. Solche Unterschiede in der Regulierung haben zur Folge, dass international tätige Unternehmen in verschiedenen Märkten völlig unterschiedliche Technologiepfade verfolgen. Ein Beispiel hierfür ist RWE, das in Deutschland alleine auf erneuerbare Energien setzt, während es in den Niederlanden ein Kohlekraftwerk in ein Biomassekraftwerk umgebaut hat, an dem es das CO₂ mittels Carbon Capture abfängt.²⁰⁹

Der Politik stehen verschiedene regulatorische Instrumentarien zur Verfügung, mit denen sie Einfluss auf das Handeln der Akteure in den Märkten nehmen kann. Hinter sog. ordnungsrechtlichen Instrumenten verbergen sich Gebote und Verbote, deren Nichteinhaltung mit Sanktionen einhergehen. Ein Beispiel ist das seit langem auf EU-Ebene in Diskussion befindliche Verbot von Pkw mit Verbrennungsmotor. Mit marktwirtschaftlichen Instrumenten setzt die Politik finanzielle Anreize, die das Verhalten der Akteure in eine bestimmte Richtung lenken soll. Lösungen, die die Politik befördern möchte, werden subventioniert. Andere Dinge werden verteuert, um sie ökonomisch weniger

²⁰⁹ Vgl. Industry & Energy (2023).

attraktiv zu machen. Ein Beispiel ist die umfangreiche staatliche Förderung der Elektromobilität in Deutschland in den vergangenen Jahren.²¹⁰

In der Regel ist der **Nationalstaat** die Ebene der Regulierung. Eine Ausnahme bildet die Europäische Union, die in zunehmend mehr Politikbereichen Regulierungen für die 27 Mitgliedsstaaten schafft. Ein im Energiebereich relevantes Beispiel ist die (hoch umstrittene) **EU-Taxonomie**. Die Tatsache, dass die Reichweite der Regulierung begrenzt ist, hat Folgen für ihre tatsächliche Wirksamkeit, insbesondere wenn es um Themengebiete geht, die eine globale Dimension haben. Der Klimaschutz ist ein solches Thema. Wenn infolge einer strengen nationalen Regulierung wirtschaftliche Akteure, die natürlich gemäß dem ökonomischen Prinzip operieren, das Land verlassen und ihre Standorte verlagern, tritt häufig das Problem des **Carbon Leakage** auf: Emissionen werden nicht aus der Welt geschaffen, sondern lediglich aus dem Land verlagert. Bisher wird dieses Phänomen viel zu wenig berücksichtigt. Wegen der bei der Schaffung globaler Rahmenbedingungen bestehenden prinzipiellen Schwierigkeiten („Trilemma der Globalisierung“) ist damit zu rechnen, dass diese Herausforderung auf lange Zeit, wenn nicht sogar für immer weiterbestehen wird.²¹¹

Das Thema Regulierung ist immer eine **Gratwanderung**. Mit zu wenig Regulierung drohen ökologische und soziale Anliegen auf der Strecke zu bleiben, was in weltweiter Perspektive dem Status quo entspricht. Märkte mit zu viel Regulierung sind statisch und hemmen die Innovationsfähigkeit. Ohne kluge Regulierung wird die vorgeschlagene Referenzlösung ein Wunschtraum bleiben.

Um die Wirkmacht der Regulierung zu erkennen, reicht im Energiebereich eine Betrachtung des zuvor erwähnten Unterschieds zwischen Deutschland und Frankreich in Bezug auf Nuklearenergie. Finnland ist ein Land, in dem die grüne Partei für Nuklearenergie votiert. Norwegen, das als besonders umweltfreundlich gilt, hat die Führung in Bezug auf Carbon Capture and Storage übernommen.

Politische Regulierung ist auch ein großes Thema bei der Frage, ob man CO₂ im Boden verpressen darf. In Deutschland ist es nach wie vor nicht erlaubt. Der Export ist ebenfalls noch verboten, auch wenn die Politik sich aktuell zu verändern scheint. Wirtschaftliche Akteure können ausgebremst und in andere Märkte getrieben werden, wenn man Technologien nicht will. Ob man Fracking-Gas fördern darf, ist ebenfalls eine Regulierungsfrage. Ob man gefracktes Gas importieren darf, ist eine andere Frage. In Deutschland dürfen wir das erstere nicht, das letztere sehr wohl – und tun es im großen Umfang.

Es ist interessant, dass die **USA** mit dem **Inflation Reduction Act** sehr großzügig sind, wenn es darum geht, was unter den Begriff low carbon-Wasserstoff fällt. So fällt blauer Wasserstoff darunter, der aus Gas entsteht, wobei in dem Reformingprozess von Gas zu Wasserstoff das CO₂ abgefangen

²¹⁰ Vgl. Dyckhoff, Souren (2008).

²¹¹ Vgl. Rodrik (2011).

wird. Eine zentrale Frage ist dann das Carbon Capture. Auch daran scheiden sich oftmals die Geister. Immerhin hat die **EU** im Februar 2023 zwei **Delegierte Rechtsakte** verabschiedet, die festlegen, was erneuerbarer Wasserstoff gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU bedeutet und was nicht. Sie soll sicherstellen, dass entsprechende Brennstoffe (z. B. Wasserstoff oder Ammoniak) als erneuerbare Brennstoffe nicht-biologischen Ursprungs (RFNBO) betrachtet werden können.

Das Regulierungsthema ist zentral, so auch bei der noch nicht abschließend beantworteten Frage, **welches CO₂ zur Herstellung von klimaneutralen Kraftstoffen** genutzt werden darf. Wenn man aus einem low carbon-Wasserstoff einen synthetischen Kraftstoff herstellt, muss nach deutscher Vorgehensweise das CO₂ aus Direct Air Capture kommen – so wie es im Haru Oni Projekt in Chile geschieht. Das CO₂ an einem Kohlekraftwerk abzufangen, wo es ohnehin anfällt, ist hingegen untersagt, obwohl der Prozess deutlich weniger Kosten verursachen würde.

Abschließend sei der Umgang mit Biomasse und in diesem Kontext anfallenden CO₂ thematisiert. Hier bestehen Fragen, wie CO₂ zu bewerten ist, das bei der Verbrennung von Biomasse entsteht, abgefangen wird und als biogenes CO₂ genutzt wird. Dieses CO₂ findet vielleicht Akzeptanz, so wie CO₂ aus Direct Air Capture. Die vielen offenen Fragen führen letztlich dazu, dass der Hochlauf von Technologie massiv verzögert wird. Eine der Folgen der Debatten zur Herkunft des CO₂ ist, dass man heute im Markt sehr stark auf **Ammoniak** setzt. Die beschriebene CO₂-Problematik taucht dort nicht auf. Zudem kann man Ammoniak besser transportieren als Wasserstoff, wenn auch sehr viel schlechter als beispielsweise Methanol.

9.1.6 Politisches System und Gesellschaft

Das politische System und die gesellschaftlichen Verhältnisse spielen überall auf der Welt eine gewichtige Rolle für das Gelingen von Transformation und für das Erreichen von Net Zero.

So nimmt die Staatsform entscheidenden Einfluss auf das „Wie“ von Veränderung. Müssen im demokratischen Prozess Mehrheiten gewonnen werden? Hat ein zentralistisches System die Möglichkeit, Veränderungen durchzusetzen? Gibt es eine politische Instanz, die in der Lage ist, die benötigten Veränderungen herbeizuführen?

Nicht wenige Stimmen trauen es der Demokratie nicht zu, dass sie globale Probleme wie den Klimawandel rechtzeitig lösen kann, u. a. wegen langwieriger Prozesse der Mehrheitsbildung. Zugleich betonen sie die wesentliche größere Handlungsfähigkeit autoritärer Systeme.²¹² In vielen westlichen Demokratien ist zudem das Phänomen zu beobachten, dass veränderungsmüde Wähler nationalistisch orientierte Parteien des rechten oder linken Rands stärken, die in der Bewältigung der

²¹² Vgl. Stehr, Machin (2019).

bestehenden Herausforderungen gerade nicht auf internationale Kooperation setzen und internationale Geldtransfers strikt ablehnen.

Somit hat also auch der Zustand der Gesellschaft einen großen Einfluss auf das Gelingen von Veränderungsprozessen. Von großer Bedeutung sind die weithin verbreiteten Narrative, die in Zeiten einer immer undurchschaubarer werdenden Realität die Menschen leiten. Wenn diese nicht im Sinne eines internationalen und kooperativen Herangehens sind, sondern einfache Lösungen transportieren, ist es schwer, diese zu verändern und die Gesellschaft von der Notwendigkeit ganzheitlicher Lösungen zu überzeugen.

9.1.7 Rohstoffverfügbarkeit

Jede Form der Energiegewinnung erfordert Rohstoffe. Es ist offensichtlich, dass ein steigender Energiebedarf einen steigenden Rohstoffbedarf nach sich zieht. Verändert sich der Energiemix zum Beispiel in Richtung eines Ausbaus der Erneuerbaren Energien, geht damit einher, dass der Bedarf an Rohstoffen, die im Bereich der Erneuerbaren Energien benötigt werden, vermehrt ansteigt. Steigt der Bedarf an Batteriespeichern, steigt auch der Bedarf an Rohstoffen, die bei der Batterieproduktion zum Einsatz kommen.

Nicht nur der global steigende Energiebedarf, sondern auch das weltweite BIP-Wachstum der letzten Jahrzehnte hat dazu geführt, dass die Nachfrage nach Rohstoffen, die allesamt nicht erneuerbare Ressourcen darstellen, stetig angestiegen ist. Der schon seit vielen Jahren etablierte Begriff der „Seltenen Erden“, zu denen Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutetium und Yttrium zählen, deutet an, dass Rohstoffknappheiten kein neues Phänomen sind.

Produzierende Unternehmen wissen, dass das Fehlen nur eines einzigen Bauteils die gesamte Produktion zum Stillstand bringen kann. In ähnlicher Weise kann eine Nichtverfügbarkeit von Rohstoffen, die für die Energieerzeugung zwingend erforderlich sind, den Umbau des Energiesystems zum Erliegen bringen.

Die Nichtverfügbarkeit von Rohstoffen kann unterschiedliche Ursachen haben:

- eine tatsächliche weltweite Nichtverfügbarkeit
- eine lokale Nichtverfügbarkeit (wegen Eigennutzung in den Abbauländern)
- (geo-)politische Konflikte, die eine Beschaffung verhindern
- hohe Rohstoffpreise, die eine Beschaffung verhindern

Die nachfolgend genannten Fakten machen deutlich, dass das Phänomen Rohstoffknappheit tatsächlich eine ernstzunehmende Restriktion der weltweiten Energietransformation darstellt.²¹³

1. Eine große und ständig wachsende Anzahl von Mineralien und chemischen Elementen kann als kritische Rohstoffe eingestuft werden.
2. Im Fall von Lithium, Kobalt und den Seltenen Erden kontrollieren die drei größten Produzenten der Welt, allen voran China, drei Viertel des globalen Marktes.

Insbesondere Lithium stellt im Bereich der Erneuerbaren Energien und der Erzeugung grünen Wasserstoffs eine Schlüsselressource dar, weil das Element im Bereich der Batteriespeicher und der PEM-Elektrolyse unersetzbar ist.²¹⁴

3. Die zunehmende Nachfrage nach Rohstoffen, die für die Energietransformation benötigt werden, steht Problemen bei der Bereitstellung der Rohstoffe gegenüber, die einerseits durch die Corona-Pandemie verursacht wurden und andererseits auch durch die notwendige Vorlaufzeit für Exploration und Aufbau der Produktions- und Logistikkapazitäten bedingt sind.
4. Die Beschaffungskosten der Rohstoffe explodieren wegen des Missverhältnisses von Angebot und Nachfrage einerseits und durch die gestiegenen Produktionskosten von Rohstoffen mit Vorkommen in geringen Konzentrationen wie z. B. im Fall der Seltenen Erden andererseits.
5. Die Abhängigkeit der Industrienationen von kritischen Rohstoffen kann bei Konflikten zu ihrer politischen Erpressung genutzt werden.
6. Auch wenn die globalen Probleme nur durch die Kooperation zwischen den Produzenten und Anwendern der kritischen Rohstoffe gelöst werden können, wird die Kontrollmöglichkeit über die kritischen Rohstoffe in einigen Ländern dazu genutzt werden, die eigene Position als Produktions- und Handelsmacht zum Nachteil anderer zu stärken.
7. Wenn es nicht gelingt, die Abhängigkeit von den kritischen Rohstoffen zu verringern, z. B. durch die Entwicklung von Substituten oder Verbessern des Recyclings und dessen Ausweitung auf „Urban Mining“, ist die Erreichung von Net Zero ernsthaft in Gefahr.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die ökonomisch und politisch schwächeren Entwicklungsländer weitaus mehr von den Rohstoffknappheiten betroffen sein werden als andere, weil sie in Zeiten steigender Preise nicht mehr zum Zuge kommen und die reichen Länder ihnen die knappen Güter vorenthalten werden. Dasselbe Phänomen war im Jahr 2022 in Folge der steigenden LNG-Nachfrage aus den europäischen Ländern zu beobachten: Entwicklungsländer wie Pakistan und

²¹³ Vgl. IEA (2021c).

²¹⁴ Vgl. Palitza et al. (2023).

Bangladesch waren gezwungen, wieder vermehrt auf Kohle zu setzen, weil sie das teure Flüssiggas nicht mehr bezahlen konnten.²¹⁵

9.2 Aktuelle Hindernisse

In diesem Unterkapitel werden bisherige Verhaltensweisen und aktuelle Entwicklungen beschrieben, die Hindernisse für eine erfolgreiche Realisierung der beschriebenen Referenzlösung darstellen. Sie alle stehen in engem Bezug zu den zuvor beschriebenen grundsätzlichen Restriktionen, die Einfluss nehmen auf die Implementierung der Referenzlösung in der Praxis.

9.2.1 Mangelnde Kofinanzierungsbereitschaft seitens der erweiterten OECD

Das Thema der Kofinanzierung der Länder der Challenge-Gruppe, also der Entwicklungs- und Schwellenländer, durch die erweiterte OECD ist eine Schlüsselfrage der Referenzlösung. Es geht um Billionen von US-Dollar, die aus dem Globalen Norden in den Globalen Süden zu transferieren sind. Entsprechende Summen wurden noch niemals in der Geschichte aufgebracht. Hier ist ein **Paradigmenwechsel** notwendig. Gelingt er nicht, wird die Referenzlösung nicht umgesetzt werden können. Die Vergangenheit zeigt, dass klassische öffentliche Mittel für die Entwicklungszusammenarbeit in der notwendigen Höhe nicht aufzubringen sind. Sie sind politisch nicht durchsetzbar.

In der Folge werden bisherige Erfahrungen mit **öffentlichen Mitteln für Entwicklungsleistungen** (Official Development Assistance, ODA) beschrieben, aus denen zu lernen ist, wenn die Referenzlösung eine Chance auf Umsetzung haben soll.

Es lässt sich leicht gegen Mittel für Entwicklungszusammenarbeit argumentieren – mit Verweis auf korrupte Potentaten in Entwicklungsländern oder aber mit Argumenten, dass es im eigenen Land genug zu tun gibt, was ebenfalls öffentliche Finanzierung erfordert. Das politische Umfeld ist objektiv schwierig.

Nicht überraschend beschäftigt die Frage der Finanzierung der Entwicklungszusammenarbeit die Weltgemeinschaft seit Jahrzehnten. Im Raum sind seit Jahren Beiträge in Höhe von 0,7 % des BIP eines (reichen) Landes. Der erzielte Durchschnittswert liegt bis heute aber nur bei etwa der Hälfte. Vereinzelt erreichten skandinavische Länder Werte über 1 %.

Betrachtet man die Situation aus Sicht der Hauptgeber, also der OECD-Länder, geht es bei einem Gesamt-BIP von etwa 75 Billionen US-Dollar um immerhin gut 200 Milliarden US-Dollar pro Jahr.

²¹⁵ Vgl. Peer et al. (2022).

Dabei entfallen gut 35 Milliarden US-Dollar auf Deutschland. Bezogen auf das BIP der Empfängerländer geht es um etwa 1 %. Das jüngste Wachstum der ODA-Mittel resultiert aus umfangreichen Hilfeleistungen für die Ukraine, die als ODA-Mittel gezählt werden.

Zu beachten ist, dass es sich größtenteils nicht um freie Mittel handelt. So geht es oftmals um Beiträge zu Programmen der UN, z. B. Hilfe bei Hungersnöten oder anderen Katastrophen. Es geht um Förderung der Gesundheit oder um Ausbildungsprogramme. Jedes Land wacht sehr genau darüber, was mit seinen bereitgestellten Geldmitteln passiert. Oft gibt es Verpflichtungen, einen Teil der Mittel im Geberland selbst auszugeben. Die Finanzierung von Beratern aus dem Geberland, inklusive einer naturgemäß ausgiebigen Reisetätigkeit, erfordert hohe Summen. Geld fließt in den Entwicklungsländern z. T. in den Aufbau sogenannter sicherer Zonen, vor allem in die wichtigen Flughäfen und deren Umfeld, die wiederum Voraussetzung für umfangreiche politische Reisetätigkeiten und das Abhalten von Konferenzen sind. Die Geberländer senden viele Beobachtermissionen in die geförderten Länder. So nehmen Parlamente ihre Kontrollfunktion wahr.

27 EU-Staaten verfolgen 27 nationale Programme nach je spezifischer Logik. Hochrangige Besucher wollen die zuständigen Minister der Entwicklungsländer sehen. Diese investieren einen substanziellen Teil ihrer Arbeitszeit in derartige Besucherprogramme. In Summe steht die Erkenntnis, dass die ODA-Mittel wesentlich höher erscheinen als sie tatsächlich sind, weil ein nicht unwesentlicher Teil letztlich nicht dem eigentlichen Thema Entwicklung zugutekommt, sondern in begleitende Maßnahmen unterschiedlicher Art fließt.

Hinzu kommt, dass viele Länder mit einem Teil ihrer Hilfe der eigenen Wirtschaft helfen und z. B. neue Absatz- oder Beschaffungsmärkte für sie erschließen wollen. Viele derart motivierte Projekte „sterben“, sobald die Förderung endet, z. B. weil sich die Prioritäten der Entwicklungspolitik in einem Land verändern. Es fehlt an Konstanz.

Die politischen und gesellschaftlichen Verhältnisse sind in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern schwierig. Häufig liegt die Macht bei Clans und Potentaten, denen daran gelegen ist, ihr Umfeld zu versorgen. Aufstände und kriegsähnliche Auseinandersetzungen führen immer wieder zu unklaren Machtverhältnissen. Teilweise werden ideologische Kreuzzüge geführt und Stellvertreterkriege ausgefochten. In jüngster Zeit haben sich Staaten abgespalten. China und Russland sind in mehreren Ländern aktiv, Russland auch mit Militärhilfe. Es werden Stützpunkte etabliert, z. B. an den Küsten. Die Ressourcen der Länder, seit jeher Gold und Diamanten, wecken Begehrlichkeiten. Mit dem Rohstoff-Run infolge der Energiewende kommen vermehrt Metalle und Seltene Erden wie z. B. Cobalt, Iridium, Indium, Germanium ins Spiel.

Die politischen Verhältnisse sind gerade in armen Ländern oft instabil. Sie sind mit großen politischen Problemen konfrontiert. Armut trifft auf eine wachsende Bevölkerung und große Wohlstandserwartungen. Teile der Länder werden hart durch den Klimawandel getroffen. Es fehlt an

Infrastruktur. Für eine Milliarde Menschen in Subsahara-Afrika gibt es lediglich eine Stromproduktion in der Größe der Produktion von Belgien. Hunderte Millionen Menschen haben keinen Zugang zu Strom und kochen mit Holzkohle.

Es sollte niemanden verwundern, dass es bei derartigen Gegebenheiten in den Empfängerländern schwierig ist, in den Geberländern Mehrheiten für die so dringend erforderliche Erhöhung der Mittel für Entwicklungszusammenarbeit zu finden. Die Politik in den Industrieländern wird dies der eigenen Bevölkerung kaum vermitteln können. Dies wird besonders klar, wenn man sich vor Augen führt, dass diese sich schon innerhalb von Deutschland mit dem Länderfinanzausgleich und innerhalb der EU mit der Kohäsions- und Strukturpolitik schwertut. Hinzu kommen aktuell große finanzielle Belastungen durch den Ukraine-Konflikt, die vorausgegangene Pandemie sowie die Energiewende. Die Mittel reichen selbst in einem so reichen Land wie Deutschland nicht. Die Inflation verschärft die Situation weiter. Zudem muss Deutschland sich zugleich für große Transfers innerhalb Europas bereithalten, wenn der Euro wieder unter Druck geraten sollte.

Würden in dieser Lage größere Summen für klassische Entwicklungszusammenarbeit gefordert, wäre es für populistische Parteien leicht möglich, massiv dagegen zu opponieren und Stimmenverschiebungen zu bewirken. Darauf wird sich niemand einlassen.

Wenn es also nicht gelingt, **grundlegende Veränderungen im Bereich der internationalen Geldflüsse aus dem Globalen Norden in den Globalen Süden** herbeizuführen und **neue Ansätze** zu entwickeln, die die Chance bergen, dass große Summen bewegt werden, ist es illusorisch anzunehmen, dass die erforderlichen Mittel in Billionenhöhe fließen werden.

Der im Rahmen der Referenzlösung zentrale Gedanke der **Systemdienstleistungen** stellt einen substantiell neuartigen Ansatz dar.

9.2.2 Nicht gelingende Einbindung privater Geldgeber

Wenn es eine Lösung für die aktuellen Herausforderungen im Energie- und Klimabereich geben soll, ist ein **erhebliches finanzielles Engagement nichtstaatlicher Akteure unbedingt notwendig**. Auch die GES-Referenzlösung setzt an verschiedenen Stellen auf Beiträge des Privatsektors, insbesondere im Kontext der Natur-basierten Lösungen. Wenn es gelingen soll, den erforderlichen Sprung „von Milliarden zu Billionen“ zu schaffen, müssen Unternehmen, Stiftungen, Privatpersonen etc. in wesentlich größerem Umfang beitragen, als das heute der Fall ist. Sonst hat auch diese Lösung keine Chance auf Umsetzung.

Eine bisherige Möglichkeit der Generierung entsprechender Mittel ist der **freiwillige CO₂-Markt**, der in den letzten Jahren stark gewachsen ist, jedoch nicht ansatzweise im notwendigen Umfang. Im Jahr 2021 entwickelte sich sein Umfang weltweit in Richtung von 2 Milliarden US-Dollar.²¹⁶

In Deutschland wurde im Jahr 2018 die **Allianz für Entwicklung und Klima** unter Beteiligung von zwei Autoren dieses Berichts ins Leben gerufen. Die Multi-Akteurs-Partnerschaft verfolgt das Ziel, nichtstaatliche Akteure für die finanzielle Unterstützung von Projekten in Entwicklungs- und Schwellenländern zu mobilisieren, die zugleich Entwicklung und internationalen Klimaschutz fördern. Mitte des Jahres 2023 hat die Allianz gut 1.400 Unterstützer. Im Jahr 2021 unterstützten diese Partner Projekte im Umfang einer Klimawirkung von knapp 10 Millionen Tonnen CO₂, was etwa der Hälfte des Volumens des deutschen freiwilligen CO₂-Markts entspricht.

Der bisher in diesem Kontext dominierende Denkraum ist die **CO₂-Kompensation**. Zu Hause nicht vermeid- und reduzierbare Emissionen werden in internationalen Projekten kompensiert. In Gesamtbetrachtung resultiert (bilanzielle) Klimaneutralität. Dieser „Frame“ führt immer wieder zu Kritik – Behauptungen eines „Freikaufs“, Vorwürfe wegen „Ablasshandel“ und „Greenwashing“ bis hin zur „Irreführung von Verbrauchern“. Anfang 2023 wurden mit großer internationaler Öffentlichkeitswirksamkeit mit dem Standard VCS zertifizierte „REDD+“-Projekte für ihre Methodik der Messung der CO₂-Wirkung der Projekte kritisiert.^{217, 218} Dass derartige Vorkommnisse einer Skalierung der unbedingt notwendigen Maßnahmen zum Regenwalderhalt schaden, bedarf keiner Erklärung.

Wenn es also nicht gelingt, neue pragmatische Ansätze für die Einbindung des Privatsektors zu entwickeln und diese in ein positives Licht zu stellen, erscheint es illusorisch, die in diesem Bereich dringend notwendigen Quantensprünge zu erreichen.

Die Politik und insbesondere die internationale Politik sollte entsprechende **nichtstaatliche Maßnahmen und Finanzierungen vor jeglicher Diskreditierung schützen und Reputationssicherheit bieten**. Das Engagement sollte im Gegenteil aktiv bekannt gemacht und von politischer Seite gewürdigt werden.

Dass der Begriff der CO₂-Kompensation in einem solchen Kontext wenig hilfreich ist, ist offensichtlich. Die Zukunft erfordert einen besseren Denkraum und neue Rahmenbedingungen, unter denen nichtstaatliche Akteure für ihre unbedingt notwendigen Beiträge („Contributions“) die Anerkennung erhalten, die sie verdienen.

Dass die GES-Referenzlösung einen konsistenten und zusammenhängenden Rahmen darstellt, der einen realistischen Weg beschreibt, zumindest bis 2070 ein Net Zero und das 2°C-Ziel (wieder) zu

²¹⁶ Vgl. Ecosystem Marketplace (2022).

²¹⁷ Vgl. Fischer, Knuth (2023).

²¹⁸ Vgl. The Guardian (2023).

erreichen, sollte den nichtstaatlichen Akteuren zudem das Gefühl nehmen, dass sie ohne Aussicht auf Zielerreichung ein „Fass ohne Boden“ füllen sollen.

9.2.3 Uneinigkeit und Unstetigkeit im Bereich Regulierung

Vielerorts zeigt sich heute, dass auf regulatorischer Ebene große **Uneinigkeit** darüber besteht, was als „nachhaltig“ anzusehen ist und was nicht. In diesem Kontext geschieht es immer wieder, dass Unternehmen des Greenwashings bezichtigt werden. Es ist offensichtlich, dass ein solches Umfeld die Akteure verunsichert und sie sich letztlich aus **Angst vor Reputationsschäden** zurückziehen und aus Vorsicht ihr Engagement für eine nachhaltige Entwicklung einstellen. Zugleich ist nachvollziehbar, dass im Kontext der Gestaltung von Regulierung unterschiedliche Interessenlagen aufeinanderstoßen, geht es doch darum festzulegen, wohin die umfangreichen öffentlichen Fördermittel für die grüne Transformation fließen und wohin nicht.

Exemplarisch sei an den Streit innerhalb der Europäischen Union darüber erinnert, was im Kontext der EU-Taxonomie als „nachhaltig“ zu bezeichnen ist und was nicht. Insbesondere ging es um die Frage, wie mit Erdgas und Atomenergie umzugehen ist. Hinsichtlich der Atomenergie gab es deshalb eine große Kontroverse, weil einerseits die bekannten Risiken der Energie im Raum waren, es aber andererseits schwer war, dagegen zu argumentieren, dass diese klimaneutral ist. Mit dem Argument des Klimaschutzes einigte man sich schließlich darauf, Atomenergie als grün anzusehen. Inzwischen streitet man sich darüber, ob der nun als nachhaltig anerkannte Strom aus Atomenergie zulässig ist, um grünen Wasserstoff im Sinne der europäischen Regulierung herzustellen. Man kann durchaus Zweifel daran haben, ob es sinnvoll ist, auf diese Weise grünen Wasserstoff herzustellen. Wenn man aber diesen Weg einschlägt, ist nicht einzusehen, warum der aus Atomenergie erzeugte Strom nicht geeignet sein sollte, geht es doch nun um „Low Carbon“ und nicht um eine grundsätzliche Auseinandersetzung über die Nutzung von Atomenergie.

Derartige Uneinigkeiten bekommen schnell eine noch größere geografische Reichweite, wenn man bedenkt, dass über Lieferkettengesetze gesetzliche Anforderungen, die im Sitzland des beschaffenden Unternehmens bestehen, in die gesamte Wertschöpfungskette übertragen werden. Dies führt nicht selten dazu, dass auch Entwicklungsländer, die zum Beispiel grünen Wasserstoff in die EU liefern möchten, die Anforderungen erfüllen müssen, die innerhalb der EU gelten.

Hinzu kommt, dass die aktuelle Zeit durch Unsicherheit im politischen Raum geprägt ist. Regierungswechsel und ein Erstarken der Parteien der politischen Ränder führen dazu, dass das regulatorische Umfeld insbesondere in mittel- und langfristiger Perspektive wenig verlässlich ist. Diese **Unstetigkeit** ist gerade im Kontext des Um- und Aufbaus von Energiesystemen höchst problematisch, weil es vieler langfristiger Investitionen bedarf. Wenn aber die Investitionsbedingungen derart

unsicher sind, wie es sich aktuell darstellt, wird dies viele private Akteure davon abhalten, die dringend benötigten langfristigen Investitionen zu tätigen.

Eine weitere grundsätzliche Schwierigkeit besteht im Bereich des **Carbon- bzw. CO₂-Accountings**, einer zentralen Fragestellung, wenn es um die nachweisliche Erreichung von Klimaneutralität bzw. Net Zero geht. Es bestehen viele inhaltliche und methodische Differenzen über die Ausgestaltung des Accountings und die Kommunikation der durchgeführten Klimaschutzmaßnahmen. So arbeitet die EU aktuell an einer Richtlinie zur Unterbindung (angeblich) irreführender Umweltaussagen (green claims), in der es maßgeblich auch um die Nutzung des Begriffs der Klimaneutralität geht. Die Differenzen und immer wieder auftauchenden Verunsicherungen resultieren aus der objektiv komplexen Thematik, geht es inhaltlich z. B. um Fragen von Permanenz (der CO₂-Bindung) und Doppelzählungen. Auch in diesem Kontext kommt es nachvollziehbarerweise zu einer Verunsicherung der Akteure, die eigentlich bereit sind, Beiträge zum Klimaschutz zu leisten, sich jedoch ob der Komplexität des Themas und der drohenden Reputationsschäden zurückziehen und ihr Engagement einstellen.²¹⁹

Es sollte in diesem Zusammenhang nicht übersehen werden, dass unzählige Experten im politischen Bereich, aber z. B. auch in Forschung, Stiftungen und NGOs in diesem Umfeld finanziert werden. Hier sind viele Eigeninteressen im Spiel. Es ist offensichtlich, dass eine Vereinfachung des Accountings das Arbeitsaufkommen reduzieren würde. Im Sinne der im Kontext der Agenda 2030 ausgelobten Decade of Action wäre es allerdings zu begrüßen, dass endlich mehr Ressourcen in den tatsächlichen Klimaschutz fließen und weniger in die begleitenden bürokratischen Prozesse.

In diese Logik fügt sich auch der im Rahmen der Referenzlösung vorgeschlagene innovative Ansatz zum Schutz des verbliebenen Regenwalds. Es wird keine Permanenz gefordert, sondern ex post am Ende eines Jahres finanziert, wenn nachgewiesen wird, dass der Regenwald im Laufe des abgelaufenen Jahres in unveränderter Qualität erhalten wurde. Dabei wird darauf gesetzt, dass bei ausreichender Bezahlung pro Hektar ausreichend Motivation vorhanden ist, den Regenwald zu erhalten. Auch sollte es gelingen, auf diese Weise die indigene Bevölkerung in ihrer Funktion als Wächter des Waldes zu stärken.

9.2.4 Ablehnung von Compliance-Anforderungen

Die vorgeschlagene **Referenzlösung** stellt nichts anderes als einen in sich **geschlossenen Ansatz zur Bewältigung der Herausforderungen im Energie- und Klimabereich** dar. Er erfordert es, dass gemeinsam an den formulierten Zielen gearbeitet wird und dass alle beteiligten Akteure sich

²¹⁹ Vgl. n-tv (2023).

an die gemachten Zusagen halten. Dies gilt im Besonderen im Kontext des Cap-and-Trade-Systems, das wiederum auf den bereinigten NDCs der Staaten aufsetzt.

Dem Thema **Compliance kommt dabei eine sehr hohe Bedeutung** zu, geht es doch darum, dass alle Staaten über einen langen Zeitraum in Übereinstimmung bzw. „in Compliance“ mit ihren Zusagen handeln und dies durch Dritte überprüfen lassen.

Bis zum heutigen Zeitpunkt ist es im Allgemeinen so, dass Staaten in Bezug auf den Klimaschutz möglichst keine Verpflichtungen eingehen möchten, aufgrund derer sie in irgendeiner Weise haftbar gemacht werden können. Ein solches Bestreben ist nachvollziehbar und zugleich problematisch. In diesem Kontext stellt man oft fest, dass man sich nicht einmal auf Messmethoden zur Bestimmung von CO₂-Bilanzen einigen kann. Wie werden Systemgrenzen definiert? Wem sind Emissionen zuzuordnen? Welcher Detaillierungsgrad ist erforderlich? Sind Überprüfungen durch Dritte zulässig? Da man sich sowohl im staatlichen wie auch im nicht-staatlichen Bereich im weitesten Sinne in einem freiwilligen und rechtlich nicht verbindlichen Umfeld befindet, sind derartige Fragen schwer zu beantworten.

Die **Situation** wird im Rahmen der Referenzlösung dadurch **vereinfacht, dass ex post sehr umfangreiche Finanzmittel fließen, also erst nach der Erbringung einer Maßnahme bzw. nach der Erreichung eines gesteckten Ziels**. Diese zeitliche Abfolge, die Geldzuflüsse erst nach Erfüllung der Compliance-Anforderungen vorsieht, sollte als Hebel genutzt werden und den Staaten als Motivation dienen, sich Compliance-kompatibel zu verhalten.

Dabei sollte auch hier nicht vergessen werden, dass es um eine fundamentale Veränderung des bisherigen Verhaltens geht, für das mit überzeugenden Argumenten geworben werden muss. Es ist zu hoffen, dass sich das Argument, dass eine Erfüllung der Compliance-Anforderungen finanzielle Vorteile bringt, als stark genug herausstellt.

9.2.5 Unklare internationale Zuständigkeitsfragen

Die Themen Energie und Klima tangieren zahlreiche Bereiche des Lebens und der Gesellschaft. Dies führt dazu, dass nicht per se klar ist, wer zuständig ist. Im Bereich des Politischen übersetzt sich dies in verteilte Zuständigkeiten, die auf allen politischen Ebenen bestehen. **Sind Zuständigkeiten unklar und strittig, besteht immer die Gefahr, dass das Ringen um Zuständigkeit wirkungsvolles Handeln verhindert und an unterschiedlichen Stellen nicht kohärente Maßnahmen und Programme entwickelt werden**. Weiterhin ist in einem solchen Umfeld immer wieder zu beobachten, dass einzelne Themen letztlich von niemandem bearbeitet werden und „durch das Raster fallen“.

Entsprechende Phänomene finden sich auf ministerieller Ebene. Exemplarisch genannt sei das Themengebiet des Klimaschutzes im Bereich der Landwirtschaft in Entwicklungsländern. Hier findet man sich im „Bermuda-Dreieck“ zwischen den drei Ministerien für Entwicklung, Landwirtschaft und Umweltschutz wieder, in dem es immer wieder zu Reibungsverlusten kommt.²²⁰

Für die Referenzlösung ist die internationale Ebene von zentraler Bedeutung und damit die Welt der Vereinten Nationen mit ihren zahlreichen Unterorganisationen.²²¹ Auch hier kommt es sehr häufig zu einer Überlappung von Zuständigkeitsbereichen, durch die nicht klar ist, wer in der Verantwortung ist und wer berechtigterweise einen Anspruch auf Einbindung hat.

Exemplarisch genannt seien die Natur-basierten Lösungen als kaum zu überschätzender Baustein für die Bekämpfung des Klimawandels. Dieses Themenfeld lässt sich mit guten Argumenten inhaltlich gleich mehreren UN-Organisationen zuordnen: Zu nennen ist neben dem UN-Klimasekretariat (UNFCCC - UN Framework Convention on Climate Change) das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP – UN Environment Programme). An der Schnittstelle zur Ernährung findet sich die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO – Food and Agriculture Organization). Hinsichtlich der in diesem Kontext wichtigen Rolle der Böden gibt es das Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (UNCCD – UN Convention to Combat Desertification). Hinzu kommt im Kontext der Hungerbekämpfung das Welternährungsprogramm der Vereinten Nationen (WFP – World Food Programme) und im Bereich der industriellen Entwicklung die Organisation der Vereinten Nationen für industrielle Entwicklung (UNIDO – UN Industrial Development Organization).

Diese Auflistung involvierter UN-Organisationen zeigt trotz ihrer Unvollständigkeit die bestehende Problematik auf. Hinzu kommt, dass die Vereinten Nationen immer wieder und zu Recht als „zahnloser Tiger“ bezeichnet werden, was mit dem Trilemma der Globalisierung begründet werden kann.²²² In der Auseinandersetzung mit den Nationalstaaten, die weit überwiegend die Ebene der Rechtsprechung sind, sind den Vereinten Nationen trotz guter Absichten immer wieder die Hände gebunden, rechtlich Verbindliches auf den Weg zu bringen.

Wenn aber eine zentrale Herausforderung darin besteht, private Akteure einzubinden und ihnen ein stabiles und reputationssicheres Umfeld mit verlässlichen Rahmenbedingungen zu garantieren, ist die beschriebene Situation bei realistischer Betrachtung wenig hoffnungsvoll. Dies betrifft die Zuständigkeitsfragen innerhalb der Vereinten Nationen, aber genauso auch die Situation zwischen den Vereinten Nationen und den Nationalstaaten. **Wenn es diesen beiden Ebenen nicht gelingt zu**

²²⁰ Das „Bermuda-Dreieck“ geht auf eine nicht namentlich genannte Person mit langjähriger Erfahrung im Bereich des beschriebenen Themengebiets zurück.

²²¹ Vgl. UN (2023b).

²²² Vgl. Rodrik (2011).

kooperieren, Zuständigkeiten einvernehmlich zu regeln und kohärente Regulierungen und Anreize zu schaffen, dürfte das unbedingt erforderliche zielorientierte und abgestimmte Handeln aller benötigter Akteure kaum zu erreichen sein.

9.2.6 Mangelnde Kooperationsbereitschaft

Die Welt ist in einer Situation, in der sie dringend koordiniertes und kooperatives Handeln braucht. Zugleich aber verfügt keine Instanz über die Macht, die anderen zur Kooperation zu zwingen. Im Besonderen kann der Westen Atommächte wie China und Russland nicht dazu zwingen, die eigene Position aufzugeben und der Strategie des Westens zu folgen. Aktuell deutet leider wenig darauf hin, dass sich an der aktuellen Situation, die durch Kriege und sich abzeichnende neue Blockbildungen gekennzeichnet ist, in absehbarer Zeit etwas ändern wird.

Wenn man Kooperation befördern möchte, sind konsensfähige Lösungen ein Muss, die allen Beteiligten Vorteile bringen.²²³ Natürlich wollen alle eine Klimakatastrophe vermeiden, zugleich sind jedoch immer auch (kurzfristige) ökonomische Interessen und Geschäftsmodelle im Spiel. Aus dieser Situation heraus gilt es, kluge Lösungen zu finden.

Das ist aktuell nicht der Fall. Der Petersberger Dialog brachte in aller Klarheit zutage, worin der zentrale weltweite Streit im Bereich des Klimaschutzes besteht, der die nahende Klimakonferenz COP28 bestimmen wird: Es geht um einen **Ausstieg aus den fossilen Energien vs. einen Ausstieg aus den fossilen Emissionen**.²²⁴ Für Letzteres argumentieren die Ölstaaten, aber auch China und Russland, wohingegen sich Europa und Deutschland für einen Komplettausstieg aus den fossilen Energien aussprechen und diesen Weg auch in den Entwicklungsländern verfolgt sehen wollen.

In einer solchen Situation ist es mehr als unwahrscheinlich, dass die dringend benötigte globale Kooperation gelingen wird. Eher droht die sich abzeichnende neue Blockbildung weiter zu verschärfen und in den unterschiedlichen Herangehensweisen an die Themen Energie und Klima einen weiteren Kristallisationspunkt zu finden.

Der in der Referenzlösung beschriebene **Vorschlag der „zwei Säulen“**, hinter denen sich nichts anderes verbirgt als ein Ausstieg aus den fossilen Emissionen, nicht aber aus den fossilen Energien, wurde unter anderem mit dem Ziel entwickelt, einen **weltweit konsensfähigen Ansatz** zu präsentieren, der allen Staaten ökonomische Vorteile bringt.

Dabei spielen natürlich die erneuerbaren Energien eine große Rolle. In diesem Bereich haben viele ihr Geschäft, viele Maßnahmen werden durch die Staaten gefördert. Der Ausbau wird richtigerweise

²²³ Vgl. Radermacher (2023).

²²⁴ Vgl. AA (2023).

weiterlaufen. Gleichzeitig behält mit der Logik der „zweiten Säule“ jedoch auch das fossile Potenzial seinen Wert, in jedem Fall für dieses Jahrhundert. Damit ist verbunden, dass **Umbau** das Bild bestimmt, **nicht Abriss**. Angesichts der Größe der Aufgaben und angesichts der großen Materialvolumina und hohen Kosten eines Abrisses, wird man auf Umbau und eine langsame, gleitende Veränderung hin zu alternativen Lösungen setzen, wann immer das möglich ist. Industriell gibt es beim „Zwei-Säulen“-Weg viel zu tun, etwa dadurch, dass Carbon Capture etabliert werden muss. Damit sind viele infrastrukturelle Anforderungen und Verdienstchancen verbunden. Geschäftsmodelle müssen nicht aufgegeben werden. Außerdem ist dies ein Weg, der zu stabilen Energiesystemen führt. Die Volatilität der erneuerbaren Energien kann so in den Griff bekommen werden, was die Kosten massiv senkt. Man muss z. B. nicht das Gesamtenergiesystem mit einer flächendeckenden Metering-Infrastruktur auf Reaktionsfähigkeit hinsichtlich Sonnenstrom- und/ oder Wind-Verfügbarkeit hin ausbauen. Das spart Multi-Milliarden-Beträge. Es hat außerdem den großen Vorteil, dass nicht so viele Daten und Informationen gesammelt werden müssen. Denn bei allem Zuspruch zu IT-Lösungen und KI sollte auch klar sein, dass viele der zu erhebenden Daten nah am Leben der Menschen sind. Sie können enorme Kontrollmöglichkeiten, etwa für den Staat, eröffnen. **Die aktuell zu beobachtenden Trends erweisen sich letztlich als freiheitsbedrohend.**

10 Policy Empfehlungen

In diesem Kapitel werden abschließend Policy Empfehlungen formuliert. In einem ersten Teil finden sich Empfehlungen, die abstrakt formuliert sind, und sich nicht auf einzelne politische Fragestellungen beziehen, die aktuell im Raum sind. Vor diesem Hintergrund sind diese auch nicht empfängerspezifisch, etwa für das BMZ, die Bundesregierung oder die Europäische Union, sondern übergreifend. Wenn die Referenzlösung umgesetzt werden soll, muss es darum gehen, auf den verschiedenen politischen Ebenen – national und global – und in den verschiedenen Politikbereichen kohärente Policies zu etablieren, die eine möglichst effiziente Zielerreichung unterstützen. In einem zweiten Teil sind Empfehlungen zu finden, die für die deutsche Entwicklungspolitik, aber auch für die breitere deutsche Politik formuliert sind. Es geht darin um die Zusammenarbeit mit den Entwicklungs- und Schwellenländern.

10.1 Allgemeine Empfehlungen

Die nachfolgenden Empfehlungen sind abstrakt formuliert und beziehen sich nicht auf einzelne politische Fragestellungen. Auch sind sie nicht empfängerspezifisch, sondern übergreifend in Richtung unterschiedlicher Politikbereiche und -ebenen gerichtet.

1. Denkraum, Narrative und Kommunikation verändern

Es herrscht heute eine große Verwirrung um den Begriff der Nachhaltigkeit. Einem viel zu kleinen Teil der Gesellschaft ist klar, worum es tatsächlich geht, und was der Kern der Agenda 2030 und einer nachhaltigen Entwicklung ist.²²⁵ Wenn aber den Menschen das Verständnis fehlt, dass es jenseits aller Einzelfragen um eine weltweite nachholende wirtschaftliche Entwicklung bei gleichzeitigem Umwelt- und Klimaschutz geht, ist nicht davon auszugehen, dass entsprechende politische Programme Mehrheiten finden und die richtigen Maßnahmen ergriffen werden. **Der Zustand der Nachhaltigkeit kann letztlich nur global erreicht werden.**

Selbst im Kontext des Klimaschutzes trifft man erschreckenderweise an vielen Stellen, selbst in der Politik, eine rein nationale Sichtweise an. Akteuren, die sich auch international für den Klimaschutz einsetzen, werden immer wieder Greenwashing und ein Vernachlässigen der heimischen Verantwortung vorgeworfen. Ein weiteres Manko des aktuellen Denkraums ist das viel zu häufige Ausblenden der engen Verknüpfung von Klima, Energie und damit Wohlstand.

Wenn es noch gelingen soll, der in diesen Themengebieten bestehenden Herausforderungen Herr zu werden, **ist dringend eine Veränderung des Denkraums, der Narrative und der**

²²⁵ Vgl. Fröndhoff (2021).

Kommunikation von Nöten. Dies betrifft natürlich nicht nur die politische Kommunikation. Diese ist aber von zentraler Bedeutung.

Der **Klimaschutz** sollte – wie auch die Umsetzung der gesamten Agenda 2030 – **als eine globale Herausforderung** positioniert werden, die nur in globaler Kooperation erfolgreich bewältigt werden kann. Bereits heute erbrachte Beiträge privater Akteure zum internationalen Klimaschutz sollten seitens der Politik endlich auf positive Resonanz stoßen und durch eine angemessene Kommunikation befördert werden.

2. Technologieoffenheit und Pragmatismus

Deutschland und Europa sind heute die Teile der Welt, in denen im Kontext der Energiewende nur sehr enge technologische Pfade zugelassen werden (z. B. „Renewables Only“). In der Welt ist ein solches Vorgehen einmalig. Für einen neutralen Beobachter ist kaum nachvollziehbar, warum man in einer derart herausfordernden Lage den Raum möglicher Lösungen kleiner macht, als er sein könnte. Die negativen Folgen sind beträchtlich: Es fließen Milliarden in eine überbeuerte Energiewende, die Energiekosten sind die höchsten in der Welt, die Wirkung auf den CO₂-Gehalt der Atmosphäre ist gering und der heimischen Industrie drohen erhebliche Nachteile im internationalen Wettbewerb. Die mittels Regulatorik erzwungene Enge in der Auswahl einsetzbarer Technologien verhindert kosteneffiziente und rasch wirksame Lösungen.

Vor diesem Hintergrund sollte die Politik dringend mehr Technologieoffenheit walten lassen, insbesondere im Kontext einer weiteren Nutzung der fossilen Energieträger mit Carbon Capture. Zudem sollte sie **ob der Dinglichkeit zu handeln mehr Pragmatismus** an den Tag legen. Bürokratische Hürden im Kontext des Umbaus des Energiesystems sollten wo immer möglich abgebaut werden.

3. Mehr Realpolitik

Die Politik sollte sich viel mehr als bisher an den objektiv gegebenen Bedingungen und Möglichkeiten der Realität ausrichten. Sie sollte auf das rasche Treffen von wirkungsorientierten Entscheidungen ausgerichtet sein und nicht aus ideengeschichtlichen Gründen in Denk- und Lösungsstrukturen verharren, die offensichtlich nicht zu einer Verbesserung der Verhältnisse führen.

Dies gilt insbesondere auch für den Bereich der Energiepolitik: Derzeit stammt die globale Primärenergie zu über 80 % aus fossiler Energie. Nur 5 % kommen aus neuen Erneuerbaren. Kohle, Gas und Öl sind tief in eine Fülle von Wertschöpfungsketten eingebunden, etwa bei Zement und Stahl. Die Menschheit wird also noch Jahrzehnte auf fossile Energieträger

angewiesen sein. Die neuen Erneuerbaren zu entwickeln ist ein wichtiger Schritt hin zu einem Energiesystem der Zukunft, der aber nicht von heute auf morgen zu realisieren sein wird. Förderländer fossiler Energieträger wie Saudi-Arabien, Russland, der Iran, Venezuela oder die USA werden ihre Geschäftsmodelle verteidigen, im Zweifelsfall militärisch.

Auf absehbare Zeit ist deshalb eine Politik der **“Dekarbonisierung” nicht nur illusionär, sondern friedensgefährdend**. Empfohlen wird die Entwicklung einer realpolitischen und friedensfähigen Politik, die sich an den globalen Gegebenheiten und unterschiedlichen Interessen der Staaten orientiert. Klimaneutralität kann auch unter Nutzung fossiler Energieträger erreicht werden – **Carbon Capture ist der Game Changer**.

4. CO₂-Vermeidungskosten als zentrale Entscheidungsgröße

Insbesondere in Deutschland entsteht immer wieder der Eindruck, dass die Kosten des Klimaschutzes eine untergeordnete Rolle, vielleicht sogar keine Rolle spielen. Noch scheint es möglich, immer neue milliardenschwere Förderprogramme aufzusetzen. Die anhaltende Inflation aber deutet an, dass die Möglichkeiten der immer weitergehenden Schöpfung neuen Geldes bald ein Ende haben werden. In Zeiten knapper Kassen sollten CO₂-Vermeidungskosten eine zentrale Entscheidungsgröße werden, wenn über Investitionen für den Klimaschutz entschieden wird. Dies gilt für Deutschland, Europa und natürlich für die ganze Welt. Selbst wenn für die globale Energietransformation und den globalen Klimaschutz ein kostenoptimaler Weg eingeschlagen wird, werden die Kosten beträchtlich sein („Trillions“). In Anbetracht der Tatsache, dass es eine Herausforderung sein wird, diese zu tragen, sollte alles daran gesetzt werden, dass die aufzubringenden Geldmittel so überschaubar bleiben wie möglich.

5. Wirkungsorientierung hinsichtlich Entwicklung und Klima

Die Frage einer stärkeren Wirkungsorientierung stellt sich im Kontext des Themas Nachhaltigkeit an vielen Stellen. Sie sollte nicht nur im Kontext Energie und Klima viel mehr Beachtung finden. Dass man in der ausgelobten „Decade of Action“ vielerorts eher den Eindruck einer „Decade of Reporting and Certification“ bekommt und parallel keine nennenswerten Erfolge, wenn nicht sogar Rückschritte in Bezug auf alle Ziele der Agenda 2030 zu verzeichnen sind, sollte nachdenklich stimmen.

Es ist ein weit verbreitetes Phänomen, dass die Anforderungen an Berichterstattung und Zertifizierung gerade im Nachhaltigkeitsbereich stetig zunehmen. Dies ist eine Folge der Regulierung, die zahlreiche Akteure mit aller Wucht trifft, und ihr Engagement schmälert. Die Menge an zeitlichen, personellen und finanziellen Ressourcen, die in nicht-wirkungsorientierte Prozesse fließt, ist beträchtlich. Gerade für das Thema Nachhaltigkeit, bei dem es an der Zeit ist zu

handeln, ist das eine fatale Entwicklung. Dass aktuell Beratungen in Breite ein neues Geschäftsfeld erobern, das Milliarden verschlingen wird, zeigt, dass die aktuellen Entwicklungen nicht in die richtige Richtung laufen.²²⁶

Für die Sache bzw. die „Decade of Action“ wird auf diese Weise nichts gewonnen. Die Politik ist **dringend** aufgerufen, Rahmenbedingungen zu schaffen, die Unternehmen und anderen ein **wirkungsorientiertes Handeln ermöglichen, das nicht in Bürokratie erstickt**.

6. Treibhausgasgehalt der Atmosphäre als zentrale Steuerungsgröße

Die entscheidende Größe für die Eindämmung des Klimawandels ist der Treibhausgasgehalt der Atmosphäre. Nationale Reduktionsziele sind es nicht. Es ist ein Irrglaube, das Erreichen eines bestimmten Temperaturziels an das Erreichen eines nationalen Klimaziels koppeln zu können. Dennoch wird es an sehr vielen Stellen so gehandhabt und auch entsprechend kommuniziert.

Die **Wirkung einer Maßnahme auf den Klimagasgehalt der Atmosphäre sollte zu einer zentralen Steuerungsgröße im Klimaschutz** werden. In dem Moment, in dem das geschieht, werden z. B. internationale Klimaschutzbeiträge in einem viel positiveren Licht dastehen, haben doch auch sie einen direkten positiven Einfluss auf den Klimagasgehalt der Atmosphäre – und das oftmals zu sehr viel geringeren Kosten als es bei heimischen Maßnahmen der Fall ist. Es ist offensichtlich, dass in großen Mengen an Punktquellen abgefangenes CO₂ dazu beiträgt, dass die CO₂-Menge in der Atmosphäre nicht weiter ansteigt. Entsprechend sollte eine entsprechende Maßnahme bewertet werden. Dass sie von großem Wert ist, zeigt insbesondere ein Blick auf die – in Übereinstimmung mit dem Pariser Klimavertrag – weltweit weiter ansteigenden CO₂-Emissionen. Dies mittels effizienter Carbon-Capture-Prozesse zu verhindern, würde einen substantziellen Beitrag zur Stabilisierung des Klimasystems leisten.

7. Zügige Implementierung von Carbon Capture und entsprechender Infrastruktur

Vor dem Hintergrund der gegebenen „Climate Emergency“²²⁷ sollten zügig Rahmenbedingungen geschaffen werden, die verhindern, dass weiteres CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Das Handling von CO₂ sollte dringend vereinfacht und beschleunigt werden. Es muss darum gehen, sowohl CCU (Carbon Capture and Usage) als auch CCS (Carbon Capture and Storage) regulatorisch so zu flankieren, dass ein **Hochlauf der Technologien befördert** wird. Dabei sollte

²²⁶ Vgl. Kewes (2022).

²²⁷ Vgl. WBCSD (2021).

die notwendige Transportinfrastruktur von Anfang an mit bedacht werden. Es wird in den seltensten Fällen so sein, dass der Ort des Abscheidens von CO₂ identisch ist mit dem Ort seiner Nutzung oder Speicherung. Es ist zu erwarten, dass die CO₂-Infrastruktur ähnliche Dimensionen erreichen wird wie die heutige Gasinfrastruktur in Industrieländern.

8. Beimischungsquoten für klimaneutrale Kraftstoffe

Eine weitere Notwendigkeit im Sinne der gegebenen „Climate Emergency“ aktiv zu werden, ist die **regulatorische Verankerung von Beimischungsquoten für klimaneutrale Kraftstoffe**. Sie eröffnen die Chance, im Bereich des Verkehrssektors schnell beträchtliche CO₂-Emissionsminderungen zu erzielen. Auf diese Weise wird eine Möglichkeit geschaffen, die **Situation der Bestandsflotte**, die noch auf Jahre auf den Straßen verbleiben wird, zu **verbessern**. Natürlich wird man auf diese Weise keine emissionsfreien Verbrennungsmotoren erhalten. Aufgrund der Dimensionen des Verkehrs und des prognostizierten weiteren Wachstums des Sektors sind die Wirkungen dennoch beträchtlich. Hinzu kommt, dass Beimischungen sofort weltweit eingesetzt werden können. Es geht in globaler Perspektive um mehr als eine Milliarde Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

9. Fokus auf Natur-basierte Lösungen

Ein im öffentlichen Diskurs bis heute viel zu wenig präsent Thema sind die Natur-basierten Lösungen, die ein essentielles Element jedes Weges zu Net Zero sein müssen. Die Natur ist eine bedeutende CO₂-Senke, die es zu erhalten, auszubauen und zu entlasten gilt. Es geht um viele Milliarden Tonnen CO₂. Nicht nur geht es auch hier um einen klugen Umgang mit der gegebenen „Climate Emergency“. Hinzu kommt, dass mit „Nature in Crisis“ eine weitere Dringlichkeit tangiert ist, der begegnet werden sollte.²²⁸

Es ist offensichtlich, dass der Erhalt der verbliebenen Regenwälder – und natürlich auch der borealen Wälder – der am schnellsten umsetzbare Klimaschutz ist, geht es doch um eine negative Pflicht, also darum, etwas zu unterlassen. Dass dies bis heute nicht gelingt, hängt entscheidend damit zusammen, dass die notwendigen finanziellen Mittel nicht aufgebracht werden. Dies wiederum ist unter anderem eine Folge davon, dass nicht-staatliche Akteure bisher nicht das regulatorische Umfeld vorfinden, das es ihnen auf unkomplizierte und reputationssichernde Weise ermöglichen würde, beizutragen. Inzwischen haben viele Unternehmen verstanden, dass

²²⁸ Vgl. WBCSD (2021).

sie hier entscheidende Beiträge leisten können und müssen. Es ist zu wünschen, dass es seitens der Politik endlich gelingt, diese Bereitschaft regulativ geeignet zu flankieren.

Für andere Natur-basierte Lösungen wie etwa Aufforstung und Restaurierung von Böden gilt Ähnliches: Die Bereitschaft des Privatsektors sollte aufgegriffen und durch kluge Kommunikation erhöht werden. Dabei sollte ein weiteres Argument hilfreich sein: Projekte im Bereich der Land- und Forstwirtschaft tragen in bedeutender Weise zu Wertschöpfung bei und verbessern das Leben der Menschen vor Ort. Es wird Entwicklung gefördert. Im Sinne der Agenda 2030 können die Projekte als wirkungsvoll hinsichtlich vieler Ziele bezeichnet werden. Die Politik sollte sich kommunikativ für ein entsprechendes positives Storytelling einsetzen und zugleich auch hier ein regulatorisches Umfeld schaffen, das nicht-staatliches Engagement befördert.

10.2 Empfehlungen für die Zusammenarbeit mit den Entwicklungs- und Schwellenländern

Die folgenden Punkte richten sich an die deutsche Entwicklungspolitik, aber auch an die breitere deutsche Politik. Sie zielen primär auf die zukünftige Zusammenarbeit mit den Entwicklungs- und Schwellenländern, die eine sehr viel größere Bedeutung als bisher bekommen sollte, geht es doch um eine Schlüsselfrage für eine gute Zukunft des Planeten.

1. Die Entwicklungsanliegen der Entwicklungs- und Schwellenländer sollten ein **zentrales Anliegen der Politik** sein, auch wenn die Agenda 2030 bei realistischer Betrachtung wohl bestenfalls bis 2050 umgesetzt werden kann. Entwicklung ist dabei prioritär gegenüber Klimaschutzbeiträgen dieser Länder zu behandeln. Die Klimaschutzbeiträge müssen durch reiche Länder querfinanziert werden.
2. Die zentralen Klimaschutzanliegen wie das 2°C-Ziel oder Net Zero verlangen **internationale Kooperation** – zunächst zwischen der erweiterten OECD und dem China-Club, aber auch zwischen diesen und den Entwicklungs- und Schwellenländern. Das 1,5°C-Ziel ist chancenlos. Net Zero ist schon wegen der NDCs wichtiger Länder (China 2060, Indien 2070) bestenfalls nach 2070 zu erreichen. Diese Wahrheiten sollten Gegenstand ehrlicher politischer Kommunikation sein.
3. Die heutigen, meist konditionierten, NDCs der meisten Entwicklungs- und Schwellenländer sind wenig hilfreich, weil sie kaum belastbar und realistisch sind. Sie werden so nicht umgesetzt werden können. Die enthaltenen Maßnahmenpakete sind zudem häufig inhaltlich unzureichend. In der heutigen Qualität stellen die NDCs keine Basis für eine hohe finanzielle Förderung aus dem Globalen Norden dar. Dennoch ist es richtig, dass die Entwicklungs- und Schwellenländer entsprechende Geldforderungen stellen. Es muss kurzfristig darum gehen, dass die

Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass Mittel fließen können. Die Politik sollte einen Prozess zur **Überarbeitung der konditionierten NDCs** initiieren.

4. Nach der Überarbeitung der NDCs der Entwicklungs- und Schwellenländer muss viel Geld in die Umsetzung derselben fließen. Das Gewinnen von politischer Zustimmung dieser Länder erfordert erhebliche Finanzierungsbeiträge in die Gestaltung der erforderlichen **politischen Prozesse**. Querfinanzierungsbeiträge, vor allem die **Differenzkostenübernahme** für Maßnahmen zur CO₂-Neutralität in Anlehnung an das Montrealer Protokoll, sind zu leisten. Dafür sollte sich Deutschland stark machen – in der EU, aber auch darüber hinaus.
5. Die Entwicklungs- und Schwellenländer haben nach UN-Logik das Recht auf **nachholende wirtschaftliche Entwicklung** und dürfen ihre CO₂-Emissionen weiter erhöhen. Ein hohes BIP-Wachstum ist auch mit Blick auf die Agenda 2030 erforderlich (SDG 8), unter anderem wegen des erwarteten Wachstums der Bevölkerungen dieser Länder von insgesamt fünf auf sieben Milliarden Menschen bis 2050. Diese Entwicklung gilt es zu ermöglichen und zu unterstützen.
6. Für die Entwicklungs- und Schwellenländer sollten mittlere Wachstumsraten um 6 % für die nächsten Jahrzehnte angestrebt werden. Für die Welt sollte daraus ein (klimaneutrales) **Weltwirtschaftswunder** resultieren. Deutschland sollte ordnungspolitisch, technologisch und wirtschaftlich zum Vorteil der Welt und zum eigenen Vorteil viel beitragen.
7. Wie auch für andere Länder lautet die Empfehlung in Bezug auf die **Stromversorgung** der Entwicklungs- und Schwellenländer, dass diese – zumindest für die nächsten Jahrzehnte – zuverlässig **auf zwei Säulen** aufbauen sollte, damit industrielle Entwicklung möglich wird. Die beiden Säulen sind:
 - Alte und neue Erneuerbare, die klimaneutral, aber meist volatil sind.
 - Zuverlässig steuerbare Energie, insbesondere fossile Energie mit Carbon Capture, alternativ Nuklearenergie, die ebenfalls klimaneutral, aber nicht volatil sind.
8. Carbon Capture sollte als Schlüsselthema behandelt werden: Es sollten **fossile Emissionen ausgephast werden, nicht fossile Energieträger. Carbon Capture** kann ein **Frieden stiftendes Thema** sein. Deutschland sollte eine Führungsrolle übernehmen, auch weil die heimische Industrie weltweit viel beitragen kann. Versucht man, Carbon Capture zu verhindern, drohen Konflikte mit China und vielen anderen Ländern der arabischen Welt sowie den OPEC-Staaten. Auch werden viele Entwicklungs- und Schwellenländer aus guten Gründen ihre eigenen fossilen Energieträger nutzen wollen.
9. Das Einbinden der Entwicklungs- und Schwellenländer in den erforderlichen weltweiten Umbauprozess ist die große Herausforderung. Wieder kann Deutschland viel beitragen. Vor allem sind große finanzielle Transfers aus der OECD-Welt erforderlich. Diese sind nicht als Wohltätigkeit oder „Good-Will für Entwicklung“ zu verstehen. Stattdessen geht es um

Systemdienstleistungen des Südens für eine gute Zukunft der Welt, vor allem auch der reichen Länder. Die erforderlichen Mittel (mehr als 1 Billion US-Dollar pro Jahr) sollten die reichen Länder aus Eigennutz aufbringen. Tun sie das nicht, sind die resultierenden Kosten für den Umgang mit Schäden viel höher. Auch das gilt es zu kommunizieren.

10. Empfohlen wird eine Beteiligung **Deutschlands**, besser noch die **Übernahme einer globalen Führungsrolle in internationalen Prozessen, die zur Umsetzung der vorgeschlagenen Referenzlösung für eine bessere Zukunft beitragen**. Dazu zählen der konsequente Regenwaldschutz, große weltweite Projekte zur Aufforstung degradierter Böden in den Tropen und zur Verbesserung degradierter Böden für eine verbesserte landwirtschaftliche Nutzung, weitere Erschließung Natur-basierter Lösungen, beispielsweise bei Mangroven, der landwirtschaftlichen Flächen allgemein oder maritimer Aufforstung mit Algen, die Schaffung reputationssicherer Rahmenbedingungen für Kurzumtriebsplantagen, der Kampf gegen (technische) Methan-Leckagen sowie die Etablierung eines weltweiten Cap-and-Trade-Systems zur Umsetzung der NDCs. Dies wird wesentlich einfacher, sobald für die Entwicklungs- und Schwellenländer machbare NDCs (mit Zieldaten 2050 bzw. 2060 bzw. 2070) erarbeitet sind, die bei erfolgreicher Umsetzung mit hohen jährlichen Förderungen aus der reichen Welt verknüpft sind. Ein solches Cap-and-Trade-System ist für alle teilnehmenden Staaten von Vorteil.

11 Fazit und Ausblick

Mit der Vorlage der beschriebenen Referenzlösung eröffnen sich erheblich verbesserte Chancen in den Bereichen Entwicklung und Klima, denn es war nicht a priori klar, dass eine **Referenzlösung existiert**, die es tatsächlich erlaubt, dass perspektivisch zehn Milliarden Menschen ein Leben in Freiheit mit angemessenem Wohlstand in sozialer Balance, intakter Umwelt und stabilem Klimasystem führen können. Nun aber existiert ein ganzheitlicher Ansatz, den man in globaler Kooperation verfolgen und natürlich weiter optimieren kann.

Die **gleichzeitige Erreichung der SDGs** – auch wenn dieser Prozess erst ab 2050 abgeschlossen werden wird – und die Sicherstellung vielfältiger Anliegen des Biodiversitätserhalts und des Umweltschutzes, insbesondere der Weg hin zu einem stabilen Klimasystem bis 2070, sind extrem ambitioniert. Bisher ist Entsprechendes international noch nie gelungen. Erschwerend kommen in den nächsten Jahren das Bevölkerungswachstum um weitere zwei Milliarden Menschen bis 2050 und berechnete große Wohlstandserwartungen im Globalen Süden hinzu – eine scheinbar unlösbare Aufgabe.

Eine kluge **Kombination von Lösungsbausteinen** eröffnet jedoch einen hoffnungsvollen Weg in die Zukunft. Es bieten sich viele neue Chancen und Möglichkeiten – durch einen neuen Blick auf das Ganze, nämlich auf die Welt als Ort eines kooperativen Zusammenspiels zur gemeinsamen Lösung der bestehenden Herausforderungen. Hierzu bedarf es der Erweiterung gedanklicher und politischer Horizonte. Toleranz und Offenheit für unterschiedliche Herangehensweisen und Technologien sind wichtig – und in diesem Sinne z. B. eine Abkehr von Pauschalisierungen wie „Erneuerbare gut, Fossile schlecht“.

Eine große Aufgabe für die Zukunft liegt für alle gesellschaftlichen Akteure im Bereich der **Kommunikation**. Geht es doch darum, in vielerlei Hinsicht das heutige Narrativ im Energie- und Klimabereich zu verändern, das fest in weiten Teilen der Gesellschaft verankert ist. Seine Kernelemente sind ein nationaler Denkraum, eine Fokussierung auf erneuerbare Energien und eine weitgehende Elektrifizierung aller Wirtschaftsbereiche. Die erneuerbaren Energien werden als ausschließliche Lösung für die Errichtung eines klimaneutralen Energiesystems dargestellt. Eine Veränderung des Denkraums könnte gelingen, da immer mehr Menschen klar wird, dass der aktuell eingeschlagene Weg nicht zum Ziel führt, und ein rein nationaler Fokus beim Klimaschutz offensichtlich dem globalen Problem Klimawandel nicht angemessen ist.

Stattdessen gilt es zu verstehen, dass Maßnahmen überall auf der Welt notwendig sind, um der Herausforderung Klimawandel Herr zu werden. In diesem Sinne benötigen die reichen Länder gigantische „**Systemdienstleistungen**“ der Entwicklung- und Schwellenländer, mit denen es gelingt, gemeinsam das Klimasystem zu stabilisieren. Diese Leistungen müssen zum eigenen Wohl von den reichen Ländern finanziert werden.

Die beschriebene Referenzlösung umfasst eine Vielzahl an Bausteinen, die neben verschiedenen Elementen aus dem Bereich der Energieerzeugung und -wandlung vom konsequenten Regenwaldschutz über umfangreiche Aufforstungsmaßnahmen in den Tropen, massive Anstrengungen zur Bodenverbesserung bis hin zu Aktivitäten zur Verhinderung von Methanleckagen reicht, und mit vielfältigen Anstrengungen im Bereich der Governance und Finanzierung verknüpft ist.

Um stabile **Stromsysteme** zu garantieren, was unbedingte Voraussetzung für wirtschaftliche Entwicklung ist, sollten diese **auf zwei Säulen** stehen: **Volatile Erneuerbare** sollten **mit zuverlässig steuerbarer Energie kombiniert** werden. Dies können Fossile mit Carbon Capture oder Nuklearenergie sein. Grüner Wasserstoff spielt im Kontext der erneuerbaren Energie eine Rolle, ist aber nicht der Game Changer, für den er oft gehalten wird. Gründe sind die sehr hohen Kosten, aber auch die perspektivisch begrenzt bleibenden Elektrolyseurkapazitäten.

Carbon Capture wird als Joker für die nächsten Jahrzehnte gesehen. Bis 2050 könnten jährlich bis zu 15, mit viel Erfolg der Ingenieurwissenschaften und des Hochlaufs unter Umständen bis zu 20 Milliarden Tonnen CO₂, abgefangen werden. Es geht also in Richtung eines „Ausstiegs aus fossilen Emissionen“, das einen „Ausstieg aus fossilen Energien“ ersetzt. **Dieser Ansatz ist in weltweiter Perspektive konsens- und damit friedensstiftend.** Es geht einerseits um wirtschaftliche Interessen zentraler Akteure wie China, Russland sowie zahlreicher Staaten der arabischen Welt, der OPEC etc. und andererseits um das Schaffen der energetischen Voraussetzungen für einen Wohlstandsaufbau in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Alle genannten Staaten können die Herausforderungen in den Bereichen Entwicklung und Klima nur gemeinsam bewältigen und werden dies nur tun, wenn aus ihrer jeweiligen Sicht Vorteile erkennbar sind.

Von zentraler Bedeutung ist endlich eine **ernsthafte Beschäftigung mit den legitimen Entwicklungsanliegen des Globalen Südens.** Seit 50 Jahren fehlt an dieser Stelle ein starker Wille der Industrieländer. Die Referenzlösung zielt für die nächsten 25 Jahre auf ein BIP-Wachstum von jährlich 6 % als Zielgröße für die Entwicklungs- und Schwellenländer (bei 7 % für die Least Developed Countries). Das BIP dieser Länder könnte so von heute 20 Billionen auf 80 Billionen US-Dollar in 2050 anwachsen. Die Folge wäre ein **Weltwirtschaftswunder.** Eine Mitwirkung an der Umsetzung eröffnet ökonomische Vorteile.

Die große Herausforderung ist die Bewältigung des resultierenden Wachstums des Energiebedarfs der Entwicklungs- und Schwellenländer, der von heute etwa 20 auf 50 PWh in diesem Prozess ansteigen wird – trotz erheblicher Anstrengungen im Bereich der Energieeffizienz und bei Lebensstilen.

Um ein solides Fundament für eine gemeinsame Bewältigung der erforderlichen Maßnahmen zu schaffen, müssen die heutigen **konditionierten NDCs** der Entwicklungs- und Schwellenländer **auf eine realistische Basis** gestellt werden. Sie bilden heute die Achillesferse des Pariser Klimaschutzabkommens. Diese Überarbeitung ist eine gigantische intellektuelle, fachliche und finanzielle

Aufgabe, die zwingend zu erfüllen ist, wenn die NDCs die Basis für ein weltweites Cap-and-Trade-System werden sollen, wie im Rahmen der Referenzlösung vorgeschlagen wird.

Neben den Kosten, die zur Bewältigung der notwendigen politischen Prozesse anfallen, sind der eigentliche Auf- bzw. Umbau des Energiesystems zu finanzieren sowie die Maßnahmen im Bereich der Natur-basierten Lösungen zu flankieren. All das erfordert massive Investitionen aus den OECD-Staaten, z. B. für den Aufbau transnationaler Energieinfrastrukturen und im Kontext anfallender Differenzkosten für die Erreichung von Klimaneutralität (s. Montrealer Protokoll).

Politisch werden die Transfervolumina von der OECD in die Entwicklungs- und Schwellenländer eine Schlüsselfrage sein: Es geht um **1.200 Milliarden US-Dollar pro Jahr für die Durchführung einer Vielzahl von Programmen, womit es endlich in Richtung der seit 2015 bestehenden Forderung „From Billions to Trillions“ geht**. Zu beachten ist dabei, dass die Unterstützung pro Kopf im Globalen Süden dennoch nur 200 US-Dollar pro Jahr beträgt, was gerade einmal den Kosten der Vermeidung von etwa 2 Tonnen CO₂ entspricht – wenn diese niedrig sind. An so mancher Stelle werden nicht nur in Deutschland weit höhere Summen für die Vermeidung 1 Tonne CO₂ aufgebracht.

Wenn es im Klimabereich eine historische Schuld abzulösen gilt, weist die Referenzlösung einen Weg, wie dies gelingen kann. Aus Sicht der Industrieländer ist die erhaltene Gegenleistung in Form stabilisierender „Systemdienstleistungen“, die zum Vorteil aller wirken, für sehr überschaubare Summen zu haben. Das gilt es zu erkennen, zu verstehen und zu kommunizieren.

Nicht nur deshalb sollten die Anliegen der Entwicklungs- und Schwellenländer nun endlich aufgegriffen werden – in unser aller Interesse. Der Klimaschutz ist gerade kein Argument, die Wohlfahrtsversprechen erneut zu brechen, sondern die große gemeinsame Herausforderung anzugehen, die nur in Kooperation zu bewältigen ist. Um die Kosten beherrschbar zu halten, müssen kluge kosteneffiziente Lösungen verfolgt werden. Nicht hilfreich sind dabei Pauschalisierungen wie etwa „all electric“. Es sollten keine technischen Lösungen vorgegeben werden, vielmehr sollte Technologieoffenheit herrschen. Die Kräfte der Märkte sollten wirksam werden und weltweite Vielfalt auf Basis von lokalem Wissen sollte zugelassen werden. Realismus, Pragmatismus, Tempo und eine faire Lastenverteilung sollten die nächsten Jahrzehnte bestimmen, denn die Zeit rennt.

Nicht zuletzt muss es gelingen, dass Menschen überall auf der Welt gewonnen werden, um sich zu beteiligen – dies in einer Situation, in der mancherorts Frustration und Resignation im Einsatz für eine nachhaltige Entwicklung zu beobachten sind. Es ist zu erwarten, dass so mancher Akteur seinen Beitrag wieder motivierter leisten wird, wenn er das Gefühl verliert, ein „Fass ohne Boden“ füllen zu müssen. An dessen Stelle tritt die Erkenntnis, dass man einen Beitrag zu einem konsistenten Gesamtansatz leisten kann, der in Summe dazu führt, dass – wenn auch erst nach 2050 – Net Zero erreicht und die Agenda 2030 umgesetzt werden kann. Es eröffnet sich also ein Weg, mit dem es

letztlich doch noch gelingen kann, dass alle Menschen innerhalb der Grenzen des Planeten gut leben können.²²⁹

Es stimmt hoffnungsvoll, dass es eine wohlstandskompatible Lösung für die weltweiten Herausforderungen im Energie- und Klimabereich gibt, die geschlossen beschrieben werden kann, und bei der zumindest keine prinzipiellen Gründe dagegensprechen, dass sie umgesetzt werden kann.

²²⁹ Vgl. WBCSD (2021).

Literaturverzeichnis

- AA – Auswärtiges Amt (2023). Petersberg Climate Dialogue – Co Chairs Summary. Im Internet unter: <https://www.auswaertiges-amt.de/blob/2595566/5324a0a6dcaa4c989e13eb3618560c09/230504-pcd-co-chairs-summary-data.pdf>. Aufgerufen am: 11. Mai 2023.
- Annan, A. (2005). Kofi Annan's statement to the General Assembly. Im Internet unter: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2005-03-21/kofi-annans-statement-general-assembly>. Aufgerufen am: 1. Juli 2023.
- Aurora Energy Research (2021). Hydrogen Market Attractiveness Report. Im Internet unter: https://auroraer.com/wp-content/uploads/2021/11/Aurora_Oct21_HydrogenMarketAttractivenessReport-freeREPORT-1.pdf. Aufgerufen am: 19. November 2022.
- Berks, L. (2022). Elektrolyse: Status quo: Technik, Kosten und Herausforderungen. Im Internet unter: https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/04/220224_LB_Elektrolyse_Status-Quo.pdf. Aufgerufen am: 10. Juli 2023.
- Betzwieser, M. (2016). El Hierro: Enttäuschende Bilanz des Energieprojekt Gorona. La Palma News. Im Internet unter: <https://lapalma1.net/2016/01/09/el-hierro-regenerative-energie-bilanz/>. Aufgerufen am: 30. Juli 2023.
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023). Das deutsche Strom-Verteilernetz. Im Internet unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/verteiler-netz.html>. Aufgerufen am: 30. Juli 2023.
- BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit (2017). EINEWELT braucht Wald – Das Waldaktionsplan der deutschen Entwicklungszusammenarbeit. Im Internet unter: <https://www.bmz.de/resource/blob/23396/0f74ec8afbb9fdbbc19a4ef374925b3a7/materialie317-waldaktionsplan-data.pdf>. Aufgerufen am: 1. Mai 2023.
- BMZ - Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit (2022). Energiewende-Partnerschaft (JETP) mit Vietnam. Im Internet unter: <https://www.bmz.de/de/aktuelles/aktuelle-meldungen/energiewende-partnerschaft-mit-vietnam-135468>. Aufgerufen am: 4. August 2023.
- BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit (2023a). GEMEINSAM mit Afrika Zukunft gestalten. Die Afrika-Strategie des BMZ. Im Internet unter: <https://www.bmz.de/resource/blob/137600/bmz-afrika-strategie-de.pdf>. Aufgerufen am: 13. Juli 2023.
- BMZ – Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit (2023b). Neue Energiewende-Partnerschaft mit Senegal beschlossen. Im Internet unter: <https://www.bmz.de/de/aktuelles/aktuelle-meldungen/neue-energiewende-partnerschaft-mit-senegal-beschlossen-157496>. Aufgerufen am: 13. Juli 2023.
- Borenstein, S. (2022). Cement carbon dioxide emissions quietly double in 20 years. Im Internet unter: <https://apnews.com/article/climate-science-china-pollution-3d97642acbb07fca7540edca38448266>. Aufgerufen am: 10.10.2022.
- bp (2022). bp Energy Outlook – 2022 Edition. Im Internet unter: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf>. Aufgerufen am: 3. Juli 2023.
- Brandes, J.; Haun, M.; Wrede, D.; Jürgens, P.; Kost, C. & Henning, H.-M. (2021). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Im Internet unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem-Update-Klimaneutralitaet-2045.pdf>. Aufgerufen am: 30. Juli 2023.

- Castellum.AI (2023). Russia Sanctions Dashboard. Im Internet unter: <https://www.castellum.ai/russia-sanctions-dashboard>. Aufgerufen am: 14. April 2023.
- Climate Action Tracker (2023): Climate Target Update Tracker. Im Internet unter: <https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker-2022/>. Aufgerufen am: 4. Mai 2023.
- Climate Transparency (2020). G20 – Need for urgent climate action. Im Internet unter: <https://www.climate-transparency.org/g20-summit-need-for-urgent-climate-action>. Aufgerufen am: 11. Mai 2023.
- Climate Watch (2023). Historical GHG Emissions. Im Internet unter: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?source=Climate%20Watch>. Aufgerufen am: 23. Mai 2023.
- Copernicus Climate Change Service (C3S, 2022). Globally, the seven hottest years on record were the last seven; carbon dioxide and methane concentrations continue to rise. European Union, Press Release, 10. Januar 2022.
- COP26 (2021). UN-Klimakonferenz in Glasgow, 2. November 2021.
- CoR - Club of Rome (2022). Earth for all – Ein Survivalguide für unseren Planeten, der neue Bericht an den Club of Rome, 50 Jahre nach „Die Grenzen des Wachstums“. oekom Verlag.
- CoR – Club of Rome, Senat der Wirtschaft (2016). Migration, Sustainability and a Marshall Plan with Africa – A Memorandum for the Federal Government. Im Internet unter: https://www.fawn-uhl.de/wp-content/uploads/2018/07/Denkschrift_EN_MP_Afrika.pdf. Aufgerufen am: 1. Juli 2023.
- Cornia, G. A., Court, J. (2001). Inequality, Growth and Poverty in the Era of Liberalization and Globalization. Im Internet unter: <https://www.wider.unu.edu/publication/inequality-growth-and-poverty-era-liberalization-and-globalization>. Aufgerufen am: 4. Mai 2023.
- DENA – Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) (2021). dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Im Internet unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/abschlussbericht-dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>. Aufgerufen am: 27. Juli 2023.
- Dooley, K., Keith, H., Larson, A. et al. (2022). The Land Gap Report 2022. Im Internet unter: <https://www.landgap.org/>. Aufgerufen am: 1. Juli 2023.
- Dyckhoff, H., Souren, R. (2008). Nachhaltige Unternehmensführung – Grundzüge eines industriellen Umweltmanagements. Berlin: Springer.
- Earth Ranger (2023). Protecting wildlife with real-time data. Im Internet unter: <https://www.earthranger.com/>. Aufgerufen am: 13. Juli 2023.
- Ecosystem Marketplace (2022). State of the Voluntary Carbon Markets 2022 Q3. Im Internet unter: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2022/>. Aufgerufen am: 22. Januar 2023.
- European Federation for Transport and Environment (2022). Addressing the heavy-duty climate problem. Im Internet unter: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/09/2022_09_Addressing_heavy-duty_climate_problem_final.pdf. Aufgerufen am: 27. Juli 2023.
- 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>. Zugegriffen: 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>. Aufgerufen am: 21. Mai 2023.

- Fischer, T., Knuth, H. (2023). CO₂-Zertifikate: Grün getarnt. *DIE ZEIT* 04/2023. Im Internet unter: <https://www.zeit.de/2023/04/co2-zertifikate-betrug-emissionshandel-klimaschutz>. Aufgerufen am: 22. Januar 2023.
- FÖS – Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (2023). Positionen des Forums Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft. Im Internet unter: <https://foes.de/de-de/unsere-aufgaben/unsere-positionen>. Aufgerufen am: 5. Mai 2023
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., 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/>. Aufgerufen am: 27. April 2023.
- Fraunhofer IEE (2023). Global PtX Atlas. Im Internet unter: <https://maps.iee.fraunhofer.de/ptx-atlas/>. Aufgerufen am: 3. Juli 2023.
- Fröndhoff, B. (2021). Unkenntnis über UN-Ziele: Die nachhaltigen Wissenslücken der Manager. *Handelsblatt* 8. September 2021. Im Internet unter: <https://amp2.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/studie-der-wertekommission-unkenntnis-ueber-un-ziele-die-nachhaltigen-wissensluecken-der-manager/27592560.html>. Aufgerufen am: 1. August 2023.
- Fuest, C. (2023). Das Energieeffizienzgesetz bedroht das Wirtschaftswachstum. *Handelsblatt* 11. Mai 2023. Im Internet unter: <https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-das-energieeffizienzgesetz-bedroht-das-wirtschaftswachstum-/29142748.html>. Aufgerufen am: 23. Mai 2023.
- Garcin, Y. (2022). Hydroclimatic vulnerability of peat carbon in the central Congo Basin. *Nature* 612, 277–282. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05389-3>.
- Gates, M. (2023). Melinda Gates fordert drei Reformen für eine gerechtere Welt. *Handelsblatt* 21. Juni 2023. Im Internet unter: <https://www.handelsblatt.com/meinung/gastbeitraege/gastkommentar-melinda-gates-fordert-drei-reformen-fuer-eine-gerechtere-welt/29218542.html>. Aufgerufen am: 30. Juni 2023.
- GCCA – Global Cement and Concrete Association (2021). Global Cement and Concrete Industry announces Roadmap to achieve groundbreaking 'Net Zero' CO₂ emissions by 2050. Im Internet unter: <https://gccassociation.org/news/global-cement-and-concrete-industry-announces-roadmap-to-achieve-groundbreaking-net-zero-co2-emissions-by-2050/>. Aufgerufen am: 5. Mai 2023.
- GCCA – Global Cement and Concrete Association (2022). Key Facts. Global Cement and Concrete Association.
- Gelinsky, K. (2022). Verantwortung der Unternehmen. Ein Preisschild für die Natur. *FAZ* 30.11.2022. Im Internet unter: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/verantwortung-der-unternehmen-ein-preisschild-fuer-die-natur-18497365.html>. Aufgerufen am: 21. Mai 2023.
- Ghosh, I. (2020). How China Overtook the U.S. as the World's Major Trading Partner. *Visual Capitalist*. Im Internet unter: <https://www.visualcapitalist.com/china-u-s-worlds-trading-partner/>. Aufgerufen am: 28. April 2023.
- Girardin, C., Jenkins, S., Seddon, N. et al. (2021). Nature-based solutions can help cool the planet — if we act now. *Nature* 593, 191–194.
- Global Energy Solutions (2022). *Nachhaltiges Bauen und Holz*. [Interne Publikation].
- Global Energy Solutions (2023a). *Betrachtung verschiedener Antriebsformen für schwere Lkw*. [Interne Publikation].
- Global Energy Solutions (2023b). *Restriktionsanliegen des BMZ*. [Interne Publikation].
- Global Methan Pledge (2023). Fast action on methane to keep a 1.5°C future within reach. Im Internet unter: <https://www.globalmethanepledge.org/>. Agerufen am: 3. August 2023.

- Global Solar Atlas (2018). Global Photovoltaic Power Potential by Country. Im Internet unter: <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W. et al. (2017). Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 201710465. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1710465114>.
- Grunwald, A. (2022). Technikfolgenabschätzung – Einführung. 3. Auflage. Baden-Baden: Nomos.
- Grytz, M. (2021). Löst Transmutation das Atommüll-Problem? Im Internet unter: <https://www.tageschau.de/wissen/forschung/belgien-forschungsreaktor-myrrha-101.html>. Aufgerufen am: 23. März 2023.
- H2Accelerate (2022). Analysis of cost of ownership and the policy support required to enable industrialisation of fuel cell trucks. Im Internet unter: <https://h2accelerate.eu/wp-content/uploads/2022/09/H2A-Truck-TCO-and-Policy-Support-Analysis-VFinal.pdf>. Aufgerufen am: 27. Juli 2023.
- Herlyn, E. (2019). Die Agenda 2030 als systemische Herausforderung – Zielkonflikte und weitere Umsetzungsherausforderungen, in: Herlyn, E., Lévy-Tödter, M. (Hrsg.): *Die Agenda 2030 als Magisches Vieleck der Nachhaltigkeit: Systemische Perspektiven*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 43-58.
- Herlyn, E., Lévy-Tödter, M., Fischer, K. et al. (Hrsg.) (2023): *Multi-Akteurs-Netzwerke: Kooperation als Chance für die Umsetzung der Agenda 2030*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Herlyn, E., Radermacher, F. J. (2014). Nachhaltig wirtschaften – Eine weltweite Ökosoziale Marktwirtschaft als Zukunftsstrategie. *Schriftenreihe der Schwäbischen Gesellschaft 75*, Stuttgart.
- Herlyn, E., Radermacher, F. J. (2018). A 1-1-1 relationship for World Bank Income Data and the Gini. In: ECINEQ Working Paper 2018 – 473. Im Internet unter: <http://www.ecineq.org/milano/WP/ECINEQ2018-473.pdf>. Aufgerufen am: 1. Juli 2023.
- Herlyn, E., Radermacher, F. J. (2021). Ein Club-Modell für ein Cap-and-Trade-System auf der Basis der NDCs, FAW/n Report. Im Internet unter: <https://www.fawn-ulm.de/publikationen>. Aufgerufen am: 26. Juni 2023.
- Herlyn, E., Radermacher, F. J. (2022). Die „Heuchelei“ der reichen Länder. Einblicke in die aktuelle internationale Debatte um den richtigen Weg zur Transformation des globalen Energiesystems. Im Internet unter: <https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/08/heuchelei.pdf>. Aufgerufen am: 1. Juli 2023.
- Hydrogen Council/McKinsey & Company (2021). Hydrogen Insights Brüssel. Im Internet unter: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>. Aufgerufen am: 03. März 2023.
- IEA – International Energy Agency (2020): Methan Tracker. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020>. Aufgerufen am: 23. Mai 2023
- IEA (2020a). Share of government/SOE ownership in global energy investment by sector, 2015 compared to 2019. Im Internet unter: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-government-soe-ownership-in-global-energy-investment-by-sector-2015-compared-to-2019>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- IEA – International Energy Agency (2020). World Energy Outlook 2020. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>. Aufgerufen am: 23. Mai 2023
- IEA – International Energy Agency (2021b). Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Aufgerufen am: 3. Juli 2023.
- IEA – International Energy Agency (2021c). The Role of Critical Minerals in the Energy Transition. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Aufgerufen am: 3. März 2023.

- IEA – International Energy Agency (2021d). Hydrogen: More efforts needed. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>. Aufgerufen am: 25. November 2021.
- IEA – International Energy Agency (2021e). Hydrogen Projects Database. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>. Aufgerufen am: 19. November 2021.
- IEA – International Energy Agency (2021f). World Energy Outlook 2021: IEA Publications. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/World-EnergyOutlook2021.pdf>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- IEA – International Energy Agency (2022a). World Energy Outlook 2022. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Aufgerufen am: 23. Mai 2023
- IEA – International Energy Agency (2022b). Cement: tracking report. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/cement>. Aufgerufen am: 10. Oktober 2022.
- IEA – International Energy Agency (2023a). Global Methane Tracker 2023. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2023>. Aufgerufen am: 3. August 2023.
- IEA – International Energy Agency (2023b). Financing reductions in oil and gas methane emissions. Im Internet unter: <https://www.iea.org/reports/financing-reductions-in-oil-and-gas-methane-emissions>. Aufgerufen am: 15. Juli 2023
- IEA und Cement Sustainability Initiative (2018). Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- ILO – International Labour Organization, UNEP – United Nations Environment Programme, IUCN - International Union for Conservation of Nature (2022). Decent Work in Nature-based Solutions 2022. Im Internet unter: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/documents/publication/wcms_863035.pdf. Aufgerufen am: 12. Mai 2023.
- Industry & Energy (2023). RWE's BECCUS project to drive negative CO₂ emissions. Im Internet unter: <https://www.industryandenergy.eu/ccus/rwes-beccus-project-to-drive-negative-co2-emissions/>. Aufgerufen am: 2. Juli 2023.
- International Transport Forum (2022). Decarbonising Europe's Trucks: How to Minimise Cost Uncertainty", International Transport Forum Policy Papers, No. 107, OECD Publishing. Im Internet unter: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-europes-trucks-minimise-cost-uncertainty.pdf>. Aufgerufen am: 15. Mai 2023.
- IPBES – Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://ipbes.net/global-assessment>. Aufgerufen am: 14. Mai 2023
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* – updated Feb 15, 2023.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Im Internet unter: https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf. Aufgerufen am: 23. Mai 2023
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). AR6 Synthesis Report – Climate Change 2023. Im Internet unter: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Aufgerufen am: 23. Mai 2023
- IRENA – International Renewable Energy Agency (2021). World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. Im Internet unter: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook> . Aufgerufen am: 3. Juli 2023.

- IRENA – International Renewable Energy Agency (2022b). Geopolitics of the Energy Transformation – The Hydrogen Factor. Im Internet unter: <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>. Aufgerufen am: 10. März 2023.
- Kapitza, S. (2014). Der göttliche Ingenieur: Die Evolution der Technik. 8. Auflage. Tübingen: expert.
- Kewes, T. (2023). Das neue Milliardengeschäft der Berater: die Dekarbonisierung der deutschen Wirtschaft. Handelsblatt 31. Oktober 2022. Im Internet unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/management/mckinsey-boston-consulting-bain-das-neue-milliardengeschaeft-der-berater-die-dekarbonisierung-der-deutschen-wirtschaft/28768532.html>. Aufgerufen am: 1. August 2023.
- Lazard (2021). Lazard's Levelised Cost of Storage Analysis – Version 7.0. Im Internet unter: <https://www.lazard.com/media/451882/lazards-levelized-cost-of-storage-version-70-vf.pdf>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- LDES Council/ McKinsey & Company (2021). Net-zero power: Long duration energy storage for a renewable grid.
- Lenton, T. (2014). The Global Potential for Carbon Dioxide Removal. In: Environmental Science and Technology, 38, S. 52 – 79. Im Internet unter: <https://www.rifs-potsdam.de/sites/default/files/2018-04/The%20Global%20Potential%20for%20Carbon%20Dioxide%20Removal.pdf>. Aufgerufen am: 15. Juli 2023
- Luick, R. (2021). Urwälder, Natur- und Wirtschaftswälder im Kontext von Biodiversitäts- und Klimaschutz. *Naturschutz und Landschaftsplanung – Zeitschrift für angewandte Ökologie* 12/2021, DOI: 10.1399/NuL.2021.12.01.
- Mahnke, E. (2015). CO₂-Verpressung: Probleme aus der Tiefe. Heinrich Böll Stiftung. Im Internet unter: <https://www.boell.de/de/2015/06/02/co2-verpressung-probleme-aus-der-tiefe>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- Massey, J. (2021). Carbon Capture, Utilisation & Storage (CCUS). A Green power Global event Dec 7th-9th.
- Mattingly, D., Incerti, T., Ju, C. et al. (2022). Chinese State Media Persuades a Global Audience That the “China Model” Is Superior: Evidence from A 19-country Experiment. Im Internet unter: <https://doi.org/10.31219/osf.io/5cafd>. Aufgerufen am: 27. Juli 2023.
- Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (2022). Ein Gespräch mit Max-Planck-Direktor Robert Schlögl über die Gaskrise und die Energiewende. Im Internet unter: <https://www.mpg.de/19042600/energiewende-gaskrise-schloegl> Aufgerufen am: 27. Juli 2023.
- Mayer, O. (2023). Himalaya-Kleinstaat Bhutan – Wo mehr Kohlendioxid gebunden wird als produziert. *tagesschau* 23. Juni 2023. Im Internet unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/bhutan-klimaschutz-100.html>. Aufgerufen am: 1. Juli 2023.
- McKinsey (2020). Laying the foundation for zero-carbon cement. Im Internet unter: <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/laying-the-foundation-for-zero-carbon-cement>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- Mills, M., Malhi, Y., Ewers, R. et al. (2023). Tropical forests post-logging are a persistent net carbon source to the atmosphere- *PNAS* 120(3). Im Internet unter: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2214462120>. Aufgerufen am: 12. Januar 2023.
- Modell Ökoregion Kaindorf (2023). Vorteile von Humusaufbau. Im Internet unter: <https://www.humusplus.at/humus-wissen/vorteile-von-humusaufbau>. Aufgerufen am: 21. Mai 2023.
- Mongird, K., Viswanathan, V., Alam, J., et al. (2020). 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. Im Internet unter: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>. Aufgerufen am: 3. März 2023.

- Nagler, A., Gerace, S. (2020). First and Second Generation Biofuels. Im Internet unter: https://waferx.montana.edu/documents/fact_sheets/1st%20v%202nd.pdf. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- Nasa (2019). Technology Readiness Level. Im Internet unter: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- NDC Partnership Support Unit (2022). Powering Collective Action. Im Internet unter: <https://ndcpartnership.org/sites/default/files/NDC%20Partnership%20Empowering%20Collective%20Action.pdf>. Aufgerufen am: 14. April 2023.
- NETL National Energy Techn. Lab (2021). Carbon Capture and Storage Database. Im Internet unter: <http://netl.doe.gov>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- n-tv (2023). CO₂-Zertifikate wertlos? Rossmann stoppt seine "Klimaneutral"-Werbung. Im Internet unter: <https://www.n-tv.de/wirtschaft/Rossmann-stoppt-seine-Klimaneutral-Werbung-article23870274.html>. Aufgerufen am: 30. Juli 2023
- OBRIST Group (2023). Im Internet unter: <https://www.obrist.at/powertrain/>. Aufgerufen am: 7. April 2023.
- OECD – Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Official Development Assistance (ODA) in 2022. Im Internet unter: <https://www.oecd.org/dac/financing-sustainable-development/development-finance-standards/official-development-assistance.htm>. Aufgerufen am: 25. April 2023.
- Ocko, I. (2022). Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmos.Che.Phys.* 22, 9349. Aufgerufen am: 25.3.2023.
- Our World in Data (2022a). Sector by Sector: Where do global greenhouse gas emissions come from? Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>, Aufgerufen am: 01.06.2023.
- Our World in Data (2022b). Nuclear Energy. Im Internet unter: <https://ourworldindata.org/nuclear-energy#citation>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- OXFAM (2023). G7 owes huge \$13 trillion debt to Global South. Im Internet unter: <https://www.oxfam.org/en/press-releases/g7-owes-huge-13-trillion-debt-global-south>. Aufgerufen am: 30. Juni 2023.
- Palitza, K., Düttmann, D., Landwehr, A. (2023). China sichert sich weltweit die Kontrolle über den Batterie-Rohstoff Lithium — Deutschlands Abhängigkeit wächst. Im Internet unter: <https://www.businessinsider.de/wirtschaft/china-sichert-sich-weltweit-kontrolle-ueber-batterie-rohstoff-lithium/>. Aufgerufen am: 3. Juli 2023.
- Pauw, W. P., Castro, P., Pickering, J. et al. (2020). Conditional nationally determined contributions in the Paris Agreement: foothold for equity or Achilles heel? *Climate Policy* 20(4), 468-484. Im Internet unter: <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1635874>. Aufgerufen am: 30. Juni 2023.
- Peer, M., Ehringfeld, K., Drechsler, W. (2022). Europa kauft gigantische Mengen Flüssiggas – „Das stürzt Millionen Menschen in die Dunkelheit. *Handelsblatt* 30.7.2022. Im Internet unter: <https://www.handelsblatt.com/politik/international/energiekrise-europa-kauft-gigantische-mengen-fluessiggas-das-stuerzt-millionen-menschen-in-die-dunkelheit/28556708.html>. Aufgerufen am: 3. Juli 2023.
- Prognos (2020). *Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe“*.
- Radermacher, F. J., Beyers, B. (2011). *Welt mit Zukunft – Die ökosoziale Perspektive*. Hamburg: Murmann.

- Radermacher, F. J., Dollinger, J. (2021). Energiewende 2050-2070 – Die PV-Modulseite, GES-Report. Im Internet unter: <https://global-energy-solutions.org/publikationen/>. Aufgerufen am: 3. Juli 2023.
- Radermacher, F. J., Riegler, J., Weiger, H. (2011). *Ökosoziale Marktwirtschaft – Historie, Programm und Perspektive eines zukunftsfähigen globalen Wirtschaftssystems*. München: oekom.
- Radermacher, F. J.; Solte, D. (2014). Microcredit – Adressing an Ongoing Debate. FAW/n Report. Im Internet unter: <https://www.fawn-ulm.de/publikationen>. Aufgerufen am: 3. August 2023.
- Radermacher, F. J. (2014). Was macht Gesellschaften reich? – Eine systemische Betrachtung, FAW/n Report. Im Internet unter: <https://www.fawn-ulm.de/publikationen>. Aufgerufen am: 1. Juli 2023.
- Radermacher, F. J. (2015). Globale Entwicklungsagenden, Nachhaltigkeit, Zukunft – Navigieren in schwierigem Gelände, in: Bruns, P. (Hrsg.): *Die Post 2015-Agenda für nachhaltige Entwicklung – Eine kritisch-rationale Reflexion über ihre Auswirkungen auf die Entwicklungspolitik, Reihe Weltwirtschaft und Internationale Zusammenarbeit 17*. Baden-Baden: Nomos, S. 71-107.
- Radermacher, F. J. (2018). *Der Milliarden-Joker – Wie Deutschland und Europa den globalen Klimaschutz revolutionieren können*. Hamburg: Murmann.
- Radermacher, F. J. (2020). Das Rio/Kyoto/Paris-Dilemma – Eine klimapolitische Rekonstruktion verpasster Chancen, in: *Kursbuch 202 Donner. Wetter. Klima*, Kursbuch Kulturstiftung gGmbH.
- Radermacher, F. J. (2023). Zur Bedeutung der Kooperation in menschlichen Gruppen und Gesellschaften – Von den Anfängen bis zur Frage der Klimagerechtigkeit in einer globalisierten Welt, in: Herlyn, E., Lévy-Tödter, M., Fischer, K. et al. (Hrsg.) (2023): *Multi-Akteurs-Netzwerke: Kooperation als Chance für die Umsetzung der Agenda 2030*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 15-45.
- Righetti, T. (2017). Siting Carbon Dioxide Pipelines. *Oil and Gas, Natural Resources, and Energy Journal* 3(4). Im Internet unter: <https://digitalcommons.law.ou.edu/onej/vol3/iss4/3>. Aufgerufen am: 5. Juli 2023.
- Rhodium Group (2021). China's Greenhouse Gas Emissions Exceeded the Developed World for the First Time in 2019. Im Internet unter: <https://rhg.com/research/chinas-emissions-surpass-developed-countries/>. Aufgerufen am: 9. Juli 2023.
- RNE – Rat für nachhaltige Entwicklung (2023). Finanzierung der Transformation und nachhaltigen Entwicklung - Reform der internationalen Finanzarchitektur. Im Internet unter: https://www.nachhaltigkeitsrat.de/wp-content/uploads/2023/06/2023_06_21_RNE_Stellungnahme_Finanzierung_Transformation_und_nachhaltige_Entwicklung.pdf. Aufgerufen am: 1. Juni 2023.
- Rodrik, D. (2011). *Das Globalisierungsparadox – Die Demokratie und die Zukunft der Weltwirtschaft*. München: C.H.Beck.
- Schneider, C. et al. (2019). *Klimaneutrale Industrie: Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Analyse im Auftrag von Agora Energiewende*. Berlin.
- Science Media Center (2021). Auf der Suche nach Stromdellen und Stromtälern – Preppen für die Dunkelflaute I. Fact Sheet. Im Internet unter: <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/fact-sheet/details/news/auf-der-suche-nach-stromdellen-und-stromtaelern-preppen-fuer-die-dunkelflaute-i/>. Aufgerufen am: 21. März 2023.
- Shell (2021). The Energy Transformation Scenarios. Im Internet unter: https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/what-are-the-previous-shell-scenarios/the-energy-transformation-scenarios/jcr_content/root/main/section_524990089/simple/promo_copy/links/item0.stream/1652119830834/fba2959d9759c5ae806a03acfb187f1c33409a91/energy-transformation-scenarios.pdf. Aufgerufen am: 23. Mai 2023.

- Skea, J., Shukla, P., Reisinger, A. (2022). Climate Change – Impacts, Adaptation and Vulnerability – Summary for Policymakers released. Im Internet unter: <https://doi.org/doi:10.1017/9781009157926.001>. Aufgerufen am: 27. Juli 2023.
- Smil, V. (2023). *Wie die Welt wirklich funktioniert – Die fossilen Grundlagen unserer Zivilisation und die Zukunft der Menschheit*. München: C.H.Beck.
- Smith, P., Adams, J., Beerling, D. et al. (2019). Impacts of Land-Based Greenhouse Gas Removal Options on Ecosystem Services and the United Nations Sustainable Development Goals. *Annual Review of Environment and Resources*. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033129>. Aufgerufen am: 14. Oktober 2022
- Snoebjörnsdóttir, S. O., Sigfusson, B., Marieni, C. et al. (2020). Carbon Dioxide storage through mineral carbonization. *Nature Reviews* 1, 90?102. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>.
- Stappen, R. K. (2023). Analyse von Restriktionen und Randbedingungen von Entwicklungs- und Schwellenländern auf dem Weg zur Klimaneutralität. GES- und FAW/n-Report.
- statista (2022). Verlust der globalen tropischen Regenwaldfläche im Zeitraum 2002 bis 2021. Im Internet unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1184901/umfrage/verlust-der-globalen-regenwaldflaeche/>. Aufgerufen am: 28. April 2023.
- statista (2023a). China: Wachstum des realen Bruttoinlandsprodukts (BIP) von 1981 bis 2022 und Prognosen bis 2028. Im Internet unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/14560/umfrage/wachstum-des-bruttoinlandsprodukts-in-china/>. Aufgerufen am: 5. Mai 2023.
- statista (2023b). Nettogewinn von Saudi Aramco weltweit in den Geschäftsjahren 2017 bis 2022. Im Internet unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/990694/umfrage/nettogewinn-von-saudi-aramco-weltweit/>. Aufgerufen am: 11. Mai 2023.
- Stehr, N., Machin, A. (2019). *Gesellschaft und Klima – Entwicklungen, Umbrüche, Herausforderungen*. Weilerswist-Metternich: Velbrück Wissenschaft.
- Stelter, D. (2023). Der absolute Wirtschaftskrieg. *Handelsblatt* 2. April 2023. Im Internet unter: <https://www.handelsblatt.com/audio/bto/bto-2-0-der-oekonomie-podcast-mit-dr-daniel-stelter-der-absolute-wirtschaftskrieg/29073842.html>. Aufgerufen am: 28. April 2023.
- Stölzel, T., Martin, S. (2022): Batterie ist nicht genug. *Wirtschaftswoche* 04.11.2022.
- The Economist (2023a). Hard truths about green growth. Im Internet unter: <https://www.economist.com/leaders/2023/06/29/how-misfiring-environmentalism-risks-harming-the-worlds-poor>. Aufgerufen am 8. August 2023.
- The Economist (2023b). Development v Climate. Im Internet unter: <https://www.economist.com/finance-and-economics/2023/06/27/the-choice-between-a-poorer-today-and-a-hotter-tomorrow>. Aufgerufen am: 8. August 2023.
- The Guardian (2023). Revealed: more than 90% of rainforest carbon offsets by biggest provider are worthless, analysis shows. Im Internet unter: <https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoe>. Aufgerufen am: 22. Januar 2023.
- TREC - Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation (2008). The clean power from the deserts: The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security. Im Internet unter: https://www.earthpolicy.org/downloads/articles/trec_white_paper.pdf. Abgerufen am: 3. Juli 2023.
- UN – United Nations (2023a). The Sustainable Development Goals. Department of Economic and Social Affairs. Im Internet unter: <https://sdgs.un.org/goals>. Aufgerufen am: 28. April 2023.
- UN - United Nations (2023b). Das System der Vereinten Nationen. Im Internet unter: https://www.un.org/depts/german/orgastruktur/vn-organigramm_oktober2011.pdf. Aufgerufen am: 30. Juli 2023

- UNEP – United Nations Environment Programme (2022a). Emissions Gap Report 2022. Im Internet unter: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022>. Aufgerufen am: 14. April 2023.
- UNEP – United Nations Environmental Programme (2022b). State of Finance for Nature – Time to act: Doubling investment by 2025 and eliminating nature-negative finance flows. Im Internet unter: <https://www.unep.org/resources/report/state-finance-nature-2022>. Aufgerufen am: 1. Januar 2023.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2023). What is an Inclusive Green Economy? Im Internet unter: <https://www.unep.org/explore-topics/green-economy/why-does-green-economy-matter/what-inclusive-green-economy>. Aufgerufen am: 2. Mai 2023.
- UNFPA – United Nations Population Fund (2023). State of World Population 2023 – 8 Billion Lives, Infinite Possibilities, The Case for Right Choices. Im Internet unter: <https://www.unfpa.org/sites/default/files/swop23/SWOP2023-ENGLISH-230329-web.pdf>. Aufgerufen am: 26. April 2023.
- UNIDO – United Nations Industrial Development Organization (2023): Montreal Protocol. Im Internet unter: <https://www.unido.org/climate-action/multilateral-agreements/montreal-protocol>. Aufgerufen am: 13. Juli 2023.
- Vahrenholt, F. (2023). *Die große Energiekrise und wie wir sie bewältigen können*. Rottenburg: Kopp.
- Van Reybrouck, D. (2022): *Revolusi. Indonesien und die Entstehung der modernen Welt*. Berlin: Suhrkamp.
- Vistra (2022). Vistra Announces Expansion of World's Largest Battery Energy Storage Facility. Im Internet unter: <https://investor.vistracorp.com/2022-01-24-Vistra-Announces-Expansion-of-Worlds-Largest-Battery-Energy-Storage-Facility>. Aufgerufen am: 27. Juli 2023.
- Von Weizsäcker, E. U. (1994). *Erdpolitik. Ökologische Realpolitik an der Schwelle zum Jahrhundert der Umwelt*, 4. Auflage. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Warwick et al. (2022). Atmospheric implications of increased Hydrogen use. *UK Government Policy Paper, Dept for Energy Security and Dept for Business, Energy & Industrial Strategy*. 8. April 2022.
- WBCSD - World Business Council for Sustainable Development (2021). Vision 2050 – Time to Transform. Im Internet unter: <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/11765/177145/1>. Aufgerufen am: 3. August 2023.
- WBCSD - World Business Council for Sustainable Development (2023). PETRONAS collaborates with Partners to Accelerate Methane Emissions Reduction. Im Internet unter: <https://www.wbcsd.org/Overview/News-Insights/Member-spotlight/PETRONAS-collaborates-with-Partners-to-Accelerate-Methane-Emissions-Reduction>. Aufgerufen am: 3. August 2023
- WEF – World Economic Forum (2020). 395 Million New Jobs by 2030 if Businesses Prioritize Nature, Says World Economic Forum. Im Internet unter: <https://www.weforum.org/press/2020/07/395-million-new-jobs-by-2030-if-businesses-prioritize-nature-says-world-economic-forum/>. Aufgerufen am: 2. Mai 2023.
- Wind Energy: The Facts (2022). Growth of Wind Turbine Size. Im Internet unter: <https://www.wind-energy-the-facts.org/growth-of-wind-turbine-size.html>. Aufgerufen am: 3. März 2023.
- Winkelhahn, R. (2023). Schwellen- und Entwicklungsländern droht „Schuldenwall“ von 39 Milliarden Dollar. *Handelsblatt* 31.5.2023. Im Internet unter: <https://www.handelsblatt.com/finanzen/geldpolitik/staatsanleihen-schwellen-und-entwicklungslaendern-droht-schuldenwall-von-39-milliarden-dollar/29111424.html>. Aufgerufen am: 4. Juli 2023.

- Wernicke, H.-J. (2022). Potential von hydrierten Pflanzenölen und pflanzlichen Altölen als „grüner“ Treibstoff. Im Internet unter: https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/11/HVO-Papier_final_HJW_17.9.22_update-3.10..pdf. Aufgerufen am: 2. August 2022.
- World Bank (2023). World Development Indicators. Im Internet unter: <https://databank.world-bank.org/source/world-development-indicators>. Aufgerufen am: 16. Mai 2023.

- World Bank & IMF – International Monetary Fund (2015). From billions to trillions: Transforming development finance post-2015 financing for development: Multilateral development finance. Development committee discussion note. Im Internet unter: <https://sitere-sources.worldbank.org/DEVCOMMINT/Documentation/23659446/DC2015-0002%28E%29FinancingforDevelopment.pdf>. Aufgerufen am: 25. April 2023.
- World Commission on Environment and Development (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- World Nuclear Association (2022). Plans For New Reactors Worldwide. Im Internet unter: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>. Aufgerufen am: 27. Juli 2023.
- WRI – World Resource Institute (2014). Atlas Forest and Landscape Restoration Opportunities. Im Internet unter: <https://www.wri.org/data/atlas-forest-and-landscape-restoration-opportunities>. . Aufgerufen am: 24. Mai 2023.
- WVI – World Vision International (2022). Restore Land, Restore Climate. Im Internet unter: <https://www.wvi.org/publications/report/hunger-crisis/restore-land-restore-climate>. Aufgerufen am: 24. Mai 2023.
- Yunus, M. (1998). *Grameen: Eine Bank für die Armen der Welt*, Köln: Lübbe Verlag
- Zheng, B. (2023). Record-high CO₂ emissions from boreal fires in 2021. *Science* 379(6635), 912-917. Im Internet unter: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.ade0805>. Aufgerufen am: 18. Mai 2023.
- Ziltener, P., Suter, C. (Hrsg.) (2022). African-Asian Relations: Past, Present, Future. Volume 2022 der World Society Foundation. Im Internet unter: https://www.world-society.ch/lib/exe/fetch.php?media=wss_2022_preprint.pdf. Aufgerufen am: 14. April 2023.

Anhang

A Ergänzende Informationen zur Unterteilung der Staaten

A.1 Einteilung der Ländergruppen

Die Informationen in diesem Anhang sind zusammenfassende Ergebnisse. Eine detaillierte Excel-Datei mit allen Rechnungen befindet sich in einem digitalen Anhang. Sie kann über die Email-Adresse mail@global-energy-solutions.org angefragt werden.

Datenquelle: World Development Indicators der Weltbank

(<https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>)

Die berücksichtigten Länder in den drei Kategorien „erweiterte OECD“, „China-Club“ und „Challenge-Gruppe“ decken mehr als 99 % der Weltbevölkerung und mehr als 98 % des weltweiten BIPs ab.

Bevölkerungszahlen der drei Ländergruppen und ihre Entwicklung

	2025	2050
Erweiterte OECD	1,5 (1,40)	1,5 (1,40)
China Club	1,5 (1,56)	1,5 (1,44)
Challenge Gruppe	5 (5,1)	7 (6,7)
Welt gesamt	8 (8,06)	10 (9,53)

Tabelle 14: Bevölkerungszahlen in 2025 und 2050 (in Milliarden)

Erweiterte OECD (38 + 9 Staaten):

OECD-Staaten:

Australia, Austria, Belgium, Canada, Chile, Colombia, Costa Rica, Czechia, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Israel, Italy, Japan, Korea Rep., Latvia, Lithuania, Luxembourg, Mexico, Netherlands, New Zealand, Norway, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkiye, United Kingdom, United States

Weitere Staaten:

Bahamas, Bermuda, Cyprus, Greenland, Liechtenstein, Malta, Monaco, Puerto Rico, Singapore

China-Club (10 Staaten):

Bahrain, China (CN), Hong Kong (CN), Kuwait, Macao (CN), Oman, Qatar, Russian Fed., Saudia Arabia, UAE

Challenge-Gruppe (128 Staaten):

Afghanistan, Albania, Algeria, **Angola**, Argentina, **Bangladesh**, Brazil, Bosnia and Herzegovina, Brunei Darussalam, Bulgaria, **Burkina Faso**, **Burundi**, **Cambodia**, Cameroon, **Central African Rep.**, **Chad**, **Comoros**, **Congo (Dem. Rep.)**, Congo (Rep.), Cote d'Ivoire, Croatia, Cuba, **Djibouti**, Dominican Republic, Ecuador, Egypt (Arab Rep.), El Salvador, Equatorial Guinea, **Eritrea**, Eswatini, **Ethiopia**, Fiji, French Polynesia, Gabon, **Gambia (The)**, Georgia, Ghana, Guatemala, **Guinea**, **Guinea-Bissau**, Guyana, **Haiti**, Honduras, India, Indonesia, Iran (Islamic Rep.), Iraq, Jamaica, Jordan, Kazakhstan, Kenya, Korea (Dem. People's Rep.), Kosovo, Kyrgyz Republic, **Lao PDR**, Lebanon, **Lesotho**, **Liberia**, Libya, **Madagascar**, **Malawi**, Malaysia, **Mali**, **Mauritania**, Mauritius, Moldova, Mongolia, Montenegro, Morocco, **Mozambique**, **Myanmar**, Namibia, **Nepal**, New Caledonia, Nicaragua, **Niger**, Nigeria, North Macedonia, Pakistan, Panama, Papua New Guinea, Paraguay, Peru, Philippines, Romania, **Rwanda**, Samoa, **Sao Tome and Principe**, **Senegal**, Serbia, **Sierra Leone**, **Solomon Islands**, **Somalia**, South Africa, **South Sudan**, Sri Lanka, **Sudan**, Suriname, Syrian Arab Republic, Tajikistan, **Tanzania**, Thailand, **Timor-Leste**, **Togo**, Tonga, Trinidad and Tobago, Tunisia, Turkmenistan, **Tuvalu**, **Uganda**, Ukraine, Uruguay, Uzbekistan, Vanuatu, Venezuela (RB), Vietnam, West Bank and Gaza, **Yemen (Rep.)**, **Zambia**, Zimbabwe

Least Developed Countries (LDCs) sind in Rot dargestellt. Hier besteht nicht selten das Problem, dass Staaten in einer Armutsfalle stecken (Bürgerkrieg, kein Meereszugang etc.)

Zur Definition der Least Developed Countries

Since 1971, the United Nations has recognized least developed countries (LDCs) as a category of States that are deemed highly disadvantaged in their development process, for structural, historical and also geographical reasons. LDCs face more than other countries the risk of deeper poverty and remaining in a situation of underdevelopment. More than 75 per cent of the LDCs' population still live in poverty. These countries are also characterized by their vulnerability to external economic shocks, natural and man-made disasters and communicable diseases. As such, the LDCs are in need of the highest degree of attention from the international community.

Currently, the 46 LDCs comprise around 880 million people, 12 percent of the world population, which face severe structural impediments to growth. However, the LDCs account for less than 2 percent of world GDP and around 1 percent of world trade.

[The list of LDCs](#) is reviewed every three years by the United Nations Economic and Social Council, in the light of recommendations by the Committee for Development Policy (CDP). The following three criteria are used by the CDP to determine LDC status:

- **Per capita income** (gross national income per capita)
- **Human assets** (indicators of nutrition, health, school enrolment and literacy)
- **Economic vulnerability** (indicators of natural and trade-related shocks, physical and economic exposure to shocks, and smallness and remoteness).

By periodically identifying LDCs and highlighting their structural problems, the United Nations gives a strong signal to the international community to the need of special concessions in support of LDCs. Concessions associated with LDC status include benefits in the areas of:

- **Development financing**, notably grants and loans from donors and financial institutions.
- **Multilateral trading system**, such as preferential market access and special treatments.
- **Technical assistance**, notably, toward trade mainstreaming (Enhanced Integrated Framework)

Six countries have so far graduated from LDC status: Botswana in 1994, Cape Verde in 2007, Maldives in 2011, Samoa in 2014, Equatorial Guinea in 2017, and Vanuatu in 2020.

UNCTAD extends to all graduating countries a range of services aimed at supporting their progress toward graduation from LDC status. These include preparing vulnerability profiles of countries with the challenges of graduation, supporting them in their preparation for a smooth transition to post-LDC life. UNCTAD also assists ex-LDC in their quest for continued socio-economic progress, notably, toward enhanced economic specialization.

Quelle: <https://unctad.org/topic/least-developed-countries/recognition>

A.2 Wirtschaftliche Entwicklung in der Referenzlösung

Zusammenfassend finden sich in den folgenden Tabellen die Eckdaten zur Untersuchung der wirtschaftlichen Entwicklungen in der Referenzlösung, die in Kapitel 4.4 behandelt werden. Dabei geht es um den Zeitraum 2025 – 2050. Zugrunde gelegt werden Annahmen zur Entwicklung des BIPs der einzelnen Staaten, die dann auf Ebene der Ländergruppen aggregiert werden.

BIP-Entwicklungen im Rahmen der Referenzlösung

In Tabelle 15 ist dargestellt, welche BIP-Entwicklungen die Referenzlösung in den kommenden Jahren von 2025 – 2050 in den betrachteten drei Gruppen ermöglichen soll.

	2025	BIP-Zuwachs durch Bev.- wachstum	BIP-Zuwachs durch andere Faktoren	2050
Erweiterte OECD	75 (72,8)	3 (2,6)	35 (33,8)	110 (109,1) ¹
China Club	30 (28,7)	-4 (-3,8)	25 (26,3)	50 (51,1) ²
Challenge Gruppe	20 (18,5)	10 (11,2)	50 (51,0)	80 (80,7) ³
Welt gesamt	120 (120)	10 (9,6)	110 (110)	240 (241,1)

Tabelle 15: BIP-Entwicklungen von 2025 bis 2050 (in Billionen US-Dollar)

Den kalkulierten BIP-Werten in 2050 liegen die folgenden Projektionen zugrunde:

- ¹ Erweiterte OECD: 25 Jahre á 1,6 % Wachstum pro Jahr; Faktor 1,5; pro Kopf 1,6 %
² China-Club: 25 Jahre á 2,3 % Wachstum pro Jahr; Faktor 1,8; pro Kopf 2,6 %
³ Challenge-Gruppe: 25 Jahre 6 % Wachstum; LDCs 7 % pro Jahr; Faktor 4,4; pro Kopf 4,9 %

Energiesituation aufgrund der BIP-Zuwächse

Tabelle 16 zeigt die Aufteilung der BIP-Zuwächse auf einerseits Mengen-Effekte und andererseits auf Effizienz-Effekte im Bereich der Energieerzeugung.

	2025	Mengen- effekt	Effizienz- effekt	2050
Erweiterte OECD	75 (72,8)	10 (11,5)	25 (24,9)	110 (109,1)
China Club	30 (28,7)	5 (5,3)	15 (17,1)	50 (51,1)
Challenge Gruppe	20 (18,5)	30 (30,8)	30 (31,3)	80 (80,7)
Welt gesamt	120 (120)	10 (9,6)	110 (110)	240 (241,1)

Tabelle 16: BIP-Zuwächse auf Basis von Energie-Mengen und -Effizienz-Effekten (in Billionen US-Dollar)

A.3 Cap-and-Trade-System und Challenge-Index

Challenge-Index zur Ableitung eines Cap-and-Trade-Systems

Insbesondere innerhalb der Challenge-Gruppe sind die Gegebenheiten zur Erreichung von Net Zero sehr unterschiedlich. Mithilfe eines „Challenge-Index“ werden die Staaten der Challenge-Gruppe in drei Untergruppen eingeteilt, je nach Größe der „Challenge“, Net Zero zu erreichen. Der Index wird aus Daten zu unterschiedlichen Größen abgeleitet, die die zu bewältigenden Herausforderungen beeinflussen.

Der Challenge-Index baut sich durch Addition von sechs Einzelwerten auf, ist also ein sog. Composite Indicator. Dazu zählen das BIP pro Kopf, das absolute Bevölkerungswachstum, die Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern, das Potenzial von Solarenergie, das Potenzial für Natur-basierte Lösungen und ein Wert mit Aussage zur Good Governance.

Kriterium 1: BIP pro Kopf

Quelle: Daten der Weltbank (World Development Indicators); <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>

Wertung	BIP pro Kopf
10	>10.000
9	>9.000
8	>8.000
7	>7.000
6	>6.000
5	>5.000
4	>4.000
3	>3.000
2	>2.000
1	Sonst

Bei diesem Kriterium kann diskutiert werden, ob ein hohes Einkommen eine große Challenge darstellt oder nicht. Allerdings besteht die Gefahr, dass Staaten mit bereits hohem Einkommen den Weg Chinas gehen, weil bereits ein Maß an fossilen Energiekapazitäten besteht und dieses ausgebaut werden wird, wenn keine Querfinanzierung kommt.

Daher: Je größer das Einkommen, desto höher die Wertung.

Kriterium 2: Absolutes Bevölkerungswachstum

Quelle: Daten der Weltbank (World Development Indicators); <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>

Wertung	Anzahl Menschen pro Jahr
10	> 4.000.000
9	< 4.000.000
8	< 3.500.000
7	< 3.000.000
6	< 2.500.000
5	< 2.000.000
4	< 1.500.000
3	< 1.000.000
2	< 500.000
1	< 0

Es wird die absolute Anzahl an Menschen pro Jahr gewählt, weil dies direkte Konsequenzen auf die Emissionen hat und den Materialeinsatz, den man braucht, um ihnen ein adäquates Leben zu ermöglichen. Prozentuales Wachstum spiegelt diesen Punkt nicht in der Form wider. Bei diesem Kriterium herrscht eine große Variabilität zwischen den einzelnen Staaten. Diskutiert werden kann die Art, wie man mit Ausreißern umgeht, wie Indien (rund 11.000.000 Menschen pro Jahr) oder Nigeria (rund 5.000.000 Menschen pro Jahr) oder Pakistan (rund 4.000.000 Menschen pro Jahr).

Daher: Je mehr Menschen pro Jahr dazukommen, desto höher der Wert.

Kriterium 3: Good Governance

Quelle: Daten der Weltbank (Worldwide Governance Indicators) <https://info.worldbank.org/governance/wgi/Home/Reports>

Wertung	Governance Indikator, gemittelt
10	< 0,4
9	< 0,8
8	< 1,2
7	< 1,6
6	< 2,0
5	< 2,4
4	< 2,8
3	< 3,2
2	< 3,6
1	Sonst

Für dieses Kriterium werden sechs Indikatoren zur Good Governance der Weltbank kombiniert. Alle sechs Werte sind für jedes Land jeweils im Wertebereich von -2,5 bis 2,5 verfügbar. Es wird der Mittelwert über alle sechs Einzelwerte gebildet. Zur besseren Übersicht werden alle Werte mit 2,5 addiert, um in den Bereich > 0 zu gelangen. Die sechs Einzelindikatoren sind:

- (1.) Voice and Accountability,
- (2.) Political Stability and Absence of Terrorism/Violence, (3.) Government Effectiveness, (4.) Regulatory Quality, (5.) Rule of Law, (6.) Control of Corruption

Je geringer der gemittelte Wert über alle sechs Indikatoren eines Landes ist, desto größer ist der Wert für dieses Kriterium.

Kriterium 4: Potenzial für Natur-basierte Lösungen

Quelle: Global Footprint Network (Biokapazität pro Kopf); Weltbank für Bevölkerung (s.o.)

<https://www.footprintnetwork.org/>

Wertung	Biokapazität pro Kopf (gha)
10	< 0,25
9	< 0,5
8	< 0,75
7	< 1,5
6	< 3,0
5	< 4,5
4	< 6,0
3	< 7,5
2	< 9
1	Sonst

Nach der Methodik des Global Footprint Network ist die Einheit „Globale Hektar“. Das ist eine etablierte Größe, die der biologischen Qualität einzelner Flächen eine Kennziffer gibt (z. B. Regenwald höher als Agrarland, höher als Wüste). Dieser Wert wurde durch die Anzahl an Menschen geteilt, um globale Hektar pro Kopf für die Einzelstaaten zu bekommen. Dies ist relevant für die möglichen Profite, die Staaten im Cap-and-Trade-System erzielen könnten.

Manche Staaten haben weniger als einen globalen Hektar pro Person, die Werte liegen unter eins. Daher gibt es hier keine lineare Verteilung der Punkte.

Daher: Je geringer die Kapazität, desto höher die Wertung für dieses Kriterium.

Kriterium 5: Reserven an fossilen Energieträgern

Quelle: BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2022): BGR-Energiestudie 2021 – Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung.

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2021.html

Dieses Kriterium beschreibt das Potenzial der fossilen Energiereserven. Betrachtet werden die Energieträger Erdgas, Erdöl und Steinkohle. Für jedes Land wird für jeden der drei Energieträger eine Wertung von 1-10 vorgenommen. Im Anschluss wird der Mittelwert berechnet, um einen Wert pro Land für dieses Kriterium zu erhalten. Die Tabelle zeigt die Grenzwerte, nach denen die Wertung für die einzelnen Energieträger vorgenommen wird. Zu diskutieren ist hier, ab welcher Reservemenge es für das jeweilige Land attraktiv ist, in eine nennenswerte Förderung einzusteigen bzw. die bestehende weiter auszubauen. Eine solche Einschätzung geht jedoch weit über das hinaus, was in diesem Report leistbar ist. Die Einteilung kann dennoch eine grobe Orientierung liefern.

Wertung	Erdgas (Mrd. m ³)	Wertung	Erdöl (Mt)	Wertung	Kohle (Mt)
10	>= 4.500	10	>= 18.000	10	>= 20.000
9	< 4.500	9	< 18.000	9	< 20.000
8	< 4.000	8	< 16.000	8	< 17.500
7	< 3.500	7	< 14.000	7	< 15.000
6	< 3.000	6	< 12.000	6	< 12.500
5	< 2.500	5	< 10.000	5	< 10.000
4	< 2.000	4	< 8.000	4	< 7.500
3	< 1.500	3	< 6.000	3	< 5.000
2	< 1.000	2	< 4.000	2	< 2.500
1	< 500	1	< 2.000	1	< 500

Je höher die vorhandenen Reserven fossiler Energieträger sind, desto größer ist die Wertung dieses Kriteriums.

Kriterium 6: Potenzial für Erneuerbare Energie

Quelle: Global Solar Atlas (Average Practical Potential, PVOUT)

<https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study/>

Wertung	Potenzial Solarenergie (kWh/kWp/day)
10	< 3.250
9	< 3.500
8	< 3.750
7	< 4.000
6	< 4.250
5	< 4.500
4	< 4.750
3	< 5.000
2	< 5.250
1	Sonst

Dieses Kriterium beschreibt, wie viel Potenzial für Solarenergie in einem Land durchschnittlich vorhanden ist. Es wird gemessen in der Energiemenge (kWh), die pro Leistung einer Photovoltaikanlage pro Tag erwartet werden kann. Für Deutschland liegt dieser Wert beispielsweise bei 2.960 kWh/kWp. Standorte mit hoher Sonneneinstrahlung haben in Zukunft einen Vorteil dabei, ihren Energiebedarf über erneuerbare Energien zu decken. Wir orientieren uns an aktuellen Preisen, die mit rund 1ct/kWh Strom über PV-Anlagen erzeugen können. Diese werden z. B. in Nordafrika erreicht. Leider sind unseres Wissens keine vergleichbaren aggregierten Daten auf Länderebene für Windenergie vorhanden.

Für den Umfang dieses Reports ist es daher ausreichend die Solarenergie stellvertretend für die erneuerbaren Energien allgemein zu betrachten. Andernfalls könnte ein kombiniertes Kriterium nach dem Vorgehen des Kriteriums 3 (Good Governance) über Mittelwertbildung erstellt werden.

Daher: Je niedriger das Potenzial für Sonnenenergie, desto höher ist Wert dieses Kriteriums.

Gruppeneinteilung auf Basis des Challenge-Index

Die Länder innerhalb der Gruppen sind absteigend nach der Höhe des jeweiligen Challenge-Index sortiert.

Gruppe 1:

French Polynesia, Egypt (Arab Rep.), Ethiopia, Thailand, Trinidad and Tobago, Croatia, Algeria, Bosnia and Herzegovina, Brunei Darussalam, Ecuador, Korea (Dem. People's Rep.), Mauritius, Montenegro, North Macedonia, Syrian Arab Republic, **Uganda**, **Burundi**, Dominican Republic, **Bahon**, Moldova, **Mozambique**, Sao Tome and Principe, Sri Lanka, Turkmenistan, Vanuatu, Kenya, **Tanzania**, Uzbekistan, Georgia, Guatemala, **Haiti**, Jamaica, Kyrgyz Republic, Lebanon, Papua New Guinea, **Tuvalu**, **Afghanistan**, **Somalia**, Albania, Armenia, Belize, Comoros, Congo (Rep.), Eswatini, **Guinea**, Tajikistan, West Bank and Gaza, **Yemen (Rep.)**, Zimbabwe, **Sudan**, Cameroon, Cote d'Ivoire, **Madagascar**, **Nepal**, Botswana, **Djibouti**, Guyana, **Lao PDR**, Myanmar, Nicaragua, Togo, Tunisia, Angola, Ghana, Cambodia, Chad, El Salvador, Fiji, Liberia, Malawi, Peru, Rwanda, Sierra Leone, Solomon Islands, South Sudan, Tonga, Burkina Faso, Benin, Gambia (The), Guinea-Bissau, Honduras, Jordan, **Mali**, Uruguay, **Eritrea**, Morocco, **Niger**, Paraguay, Samoa, **Timor-Leste**, **Zambia**, **Bhutan**, **Central African Republic**, Cuba, **Mauritania**, **Senegal**, **Lesotho**, Suriname, Bolivia, Mongolia, Namibia

Gruppe 2:

Iran (Islamic Rep.), Iraq, Indonesia, Pakistan, Malaysia, **Congo (Dem. Rep.)**, Ukraine, Equatorial Guinea, Libya, New Caledonia, Kosovo, Venezuela (RB), **Bangladesh**, Brazil, Philippines, Azerbaijan, Belarus, Argentina, Bulgaria, Panama, Romania, South Africa, Vietnam, Serbia

Gruppe 3:

Kazakhstan, India, Nigeria

Entwicklung der CO₂-Emissionen der drei Ländergruppen unter dem Cap-and-Trade-System der Referenzlösung

Datenquelle für die Emissionen der einzelnen Länder: <https://globalcarbonatlas.org/>

Auf der Basis der Emissionsdaten sind die aggregierten Werte für die einzelnen Ländergruppen etwas geringer als die Ausgangsverteilung im Jahr 2025 mit jeweils 4 bzw. 5 Milliarden Tonnen CO₂ für die Gruppen 1, 2 und 3. Das liegt daran, dass die letztverfügbaren Daten aus dem Jahr 2021 stammen und wir eine weitere Steigerung der Emissionen erwarten, insbesondere in der Challenge-Gruppe. Zusätzlich gibt die Quelle lediglich Daten über die CO₂-Emissionen, jedoch nicht über CO₂-

Äquivalente Emissionen, z. B. über den Ausstoß von Methan, an. Für die konservative Ableitung des Cap-and-Trade-Systems werden daher höhere Werte von in der Summe 13 Milliarden Tonnen CO₂ für die Challenge-Gruppe veranschlagt. Die Mehremissionen wurden proportional aufgeschlagen.

Die folgende Tabelle zeigt die Entwicklungen der Emissionen der einzelnen Ländergruppen unter dem Cap-and-Trade-System, aufgeschlüsselt über den Zeitraum 2025 – 2050.

Jahr	Erweiterte OECD	China-Club	Gruppe 1 (Challenge-Gruppe)	Gruppe 2 (Challenge-Gruppe)	Gruppe 3 (Challenge-Gruppe)	Capwerte für alle Jahre
2025	13	13	4	5	4	39
2026	11,96	12,545	3,85	4,8	3,85	37,005
2027	10,92	12,09	3,7	4,6	3,7	35,01
2028	9,88	11,635	3,55	4,4	3,55	33,015
2029	8,84	11,18	3,4	4,2	3,4	31,02
2030	7,8	10,725	3,25	4	3,25	29,025
2031	7,41	10,27	3,1	3,8	3,1	27,68
2032	7,02	9,815	2,95	3,6	2,95	26,335
2033	6,63	9,36	2,8	3,4	2,8	24,99
2034	6,24	8,905	2,65	3,2	2,65	23,645
2035	5,85	8,45	2,5	3	2,5	22,3
2036	5,46	8,02	2,3333	2,8667	2,4667	21,147
2037	5,07	7,59	2,1667	2,7333	2,4333	19,993
2038	4,68	7,16	2	2,6	2,4	18,84
2039	4,29	6,73	1,8333	2,4667	2,3667	17,687
2040	3,9	6,3	1,6667	2,3333	2,3333	16,533
2041	3,51	5,87	1,5	2,2	2,3	15,38
2042	3,12	5,44	1,3333	2,0667	2,2667	14,227
2043	2,73	5,01	1,1667	1,9333	2,2333	13,073
2044	2,34	4,58	1	1,8	2,2	11,92
2045	1,95	4,15	0,8333	1,6667	2,1667	10,767
2046	1,56	3,72	0,6667	1,5333	2,1333	9,6133
2047	1,17	3,29	0,5	1,4	2,1	8,46
2048	0,78	2,86	0,3333	1,2667	2,0667	7,3067
2049	0,39	2,43	0,1667	1,1333	2,0333	6,1533
2050	0	2	0	1	2	5
2051	0	1,8	0	0,9	1,9	4,6
2052	0	1,6	0	0,8	1,8	4,2

2053	0	1,4	0	0,7	1,7	3,8
2054	0	1,2	0	0,6	1,6	3,4
2055	0	1	0	0,5	1,5	3
2056	0	0,8	0	0,4	1,4	2,6
2057	0	0,6	0	0,3	1,3	2,2
2058	0	0,4	0	0,2	1,2	1,8
2059	0	0,2	0	0,1	1,1	1,4
2060	0	0	0	0	1	1
2061	0	0	0	0	0,9	0,9
2062	0	0	0	0	0,8	0,8
2063	0	0	0	0	0,7	0,7
2064	0	0	0	0	0,6	0,6
2065	0	0	0	0	0,5	0,5
2066	0	0	0	0	0,4	0,4
2067	0	0	0	0	0,3	0,3
2068	0	0	0	0	0,2	0,2
2069	0	0	0	0	0,1	0,1
2070	0	0	0	0	0	0

B Inhaltsübersicht Basisdokumentation

B.1 Technischer Werkzeugkasten

Auf der ersten Gliederungsebene finden sich die folgenden Kapitel

- Regenerative Erzeugung von Strom
- Erzeugung von Strom durch Kernkraft
- Speicherung von Strom
- Herstellung von Wasserstoff
- Transport und Speicherung von Wasserstoff
- Herstellung und Nutzung von Wasserstoffderivaten
- Klimaneutrale Kraftstoffe
- Technisches Abfangen und Speicherung von CO₂ (CCS)
- Carbon Capture and Usage (CCS)
- Naturbasierte Lösungen
- Ozeane als Senke für anthropogenes CO₂
- Weitere Treibhausgase neben CO₂
- Kritische Rohstoffe
- Infrastrukturen und Energietransport

B.2 Wesentliche Treibhausgas verursachende Branchen

Auf der ersten Gliederungsebene finden sich die folgenden Kapitel

- Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen
- Wesentliche Prozessindustrien
- Verkehr
- Wohnungswirtschaft und Gebäude

Die einzelnen Kapitel können unter <https://global-energy-solutions.org/basisdokumentation-der-ges-referenzloesung/> abgerufen werden.

Global Energy Solutions e.V. erarbeitet weltweite Lösungen und Geschäftsmodelle zu Energie-, Klima- und Entwicklungsfragen. Unser Ziel ist ein klimaneutrales Energiesystem – mit folgenden Elementen: grüner Strom, grüner Wasserstoff, biologisches sowie technisches CO₂-Recycling, klimaneutrale Energieträger und Treibstoffe – darunter Methanol. Bei der Produktion wird CO₂ materiell genutzt und so zu einem interessanten Wirtschaftsgut. Zusammen mit Industrie- und Wissenschaftspartnern entwickeln wir technische, unternehmerische und administrative Grundlagen für bedeutsame Investitionen in diesem Zukunftsfeld. Investitionen, die sich rechnen.

Kontakt:

Global Energy Solutions e. V., Lise-Meitner-Str. 9, D-89081 Ulm
E-Mail: office@global-energy-solutions.org