



DAV

DEUTSCHE
AKTUARVEREINIGUNG e.V.

Ergebnisbericht des Ausschusses ERM

Klimaszenarien – Phase 1: Die Grundlagen

Köln, 8. Mai 2023

*Wenn sich nicht vieles ganz schnell verändert, wird
nichts so bleiben, wie es mal war.*

Präambel

Der Ausschuss ERM/Solvency II der Deutschen Aktuarvereinigung e. V. hat den vorliegenden Ergebnisbericht erstellt.¹

Zusammenfassung

Der vorliegende Ergebnisbericht der Arbeitsgruppe „Klimaszenarien“ beschäftigt sich mit der Beschreibung der aktuell gängigen Szenarien und Modelle zur Herleitung von Klimawandelszenarien, die für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungsunternehmen aller Sparten angewandt werden können. Dabei werden insbesondere auch die naturwissenschaftlichen Grundlagen erläutert. Der Bericht richtet sich in erster Linie an Aktuare im Risikomanagement (insbesondere in der Rolle als Versicherungsmathematische Funktion und unabhängiger Risikocontrollingfunktion) bei der Ausführung ihrer Aufgaben im Rahmen der Berichterstattung unter Solvency II.

Der Ergebnisbericht ist an die Mitglieder und Gremien der DAV zur Information über den Stand der Diskussion und die erzielten Erkenntnisse gerichtet und stellt keine berufsständisch legitimierte Position der DAV dar.²

Verabschiedung

Der Ergebnisbericht ist durch den Ausschuss ERM/Solvency II am 8. Mai 2023 verabschiedet worden.

¹ Der Ausschuss dankt der Arbeitsgruppe "Klimaszenarien" ausdrücklich für die geleistete Arbeit, namentlich Alexander Krauskopf (Leitung), Dr. Bernd Hirschfeld (stellv. Leitung), Arvid Aegerter, Baris Anul, Ingrid Eckhardt, Sylvia Groß, Shobiga Jeyadevan, Dr. Michael Leitschkis, Xenia Markarov, Dr. Irene Merk, Stephanie Pröhl, Dr. Sebastian Rupprecht, Georg Schalashov, Dr. Marcus Scheffer, Prof. Dr. Michael Schmitt, Daniel Teetz, Andreas Teske, Matthias Wrede.

² Die sachgemäße Anwendung des Ergebnisberichts erfordert aktuarielle Fachkenntnisse. Dieser Ergebnisbericht stellt deshalb keinen Ersatz für entsprechende professionelle aktuarielle Dienstleistungen dar. Aktuarielle Entscheidungen mit Auswirkungen auf persönliche Vorsorge und Absicherung, Kapitalanlage oder geschäftliche Aktivitäten sollten ausschließlich auf Basis der Beurteilung durch eine(n) qualifizierte(n) Aktuar DAV/Aktuarin DAV getroffen werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Naturwissenschaftliche Aspekte	12
2.1. <i>Physikalische Grundlagen der globalen Erwärmung</i>	12
2.2. <i>Kipppunkte des Erdklimas.....</i>	14
2.3. <i>Politik im Klimawandel</i>	16
3. Szenarien (RCP, SSP, NGFS)	18
3.1. <i>Kurze Einführung in Szenarien</i>	18
3.2. <i>Überblick RCP-Szenarien</i>	18
3.3. <i>Überblick SSP-Szenarien</i>	20
3.4. <i>Beschreibung SSP-Szenarien.....</i>	21
3.5. <i>NGFS und Zusammenhang zu RCP/SSP</i>	23
3.6. <i>Überblick NGFS Szenarien</i>	24
3.7. <i>Umfang und Modellierung der NGFS-Szenarien</i>	25
3.8. <i>Aktueller Stand der NGFS-Szenarien</i>	26
4. Verfügbare Modelle	28
4.1. <i>Klimamodelle</i>	28
4.1.1. <i>Energiebilanzmodelle</i>	29
4.1.2. <i>GCM</i>	29
4.2. <i>CMIP6 (IPCC-Modelle).....</i>	30
4.3. <i>IAM in NGFS-Szenarien</i>	33
4.3.1. <i>GCAM</i>	37
4.3.2. <i>MESSAGEix-GLOBIOM</i>	38
4.3.3. <i>REMIND-MAgPIE.....</i>	40
4.4. <i>NiGem (Makro-ökonomisches Modell in NGFS)</i>	43
4.4.1. <i>Allgemeine NiGem-Modellstruktur.....</i>	43
4.4.2. <i>NiGem-Relevanz im Kontext der Klimarisiken bzw. Klimaszenarien.....</i>	44
4.4.3. <i>NiGem und Klimarisiken.....</i>	44
4.4.4. <i>Schlussfolgerungen.....</i>	47

4.5. <i>Climate Impact Explorer</i>	49
4.5.1. Allgemeiner Aufbau.....	49
4.5.2. Methodik zur Ermittlung der Klimaauswirkungen.....	51
5. Beschreibung konkreter NGFS-Szenarien	55
5.1. <i>Energie</i>	56
5.2. <i>Landwirtschaft</i>	60
6. Einordnung / kritische Bewertung.....	64
7. Glossar	70
8. Literaturverzeichnis.....	76

1. Einleitung

Die Wissenschaft lässt keinen Zweifel daran, dass die beobachtete globale Erwärmung vor allem durch einen Anstieg der Konzentration verschiedener Treibhausgase, maßgeblich Kohlendioxid, in der Erdatmosphäre verursacht wurde und wird. Der Anstieg der CO₂-Konzentration ist eindeutig auf die Verbrennung fossiler Energieträger durch die Menschheit zurückzuführen, beispielsweise in der industriellen Produktion, im Verkehrssektor oder bei der Energieerzeugung. Neben den Kohlendioxidemissionen tragen weitere menschliche Aktivitäten wie intensivierte Viehzucht und Änderung der Landnutzung zur Emission zusätzlicher Treibhausgase wie Methan und Stickoxide bei. Der anthropogene Einfluss auf die Zusammensetzung der Atmosphäre lässt sich anschaulich in folgender Grafik zeigen, die den rasanten Anstieg der Kohlendioxid- und Methankonzentration in der Atmosphäre von 1980 bis 2022 zeigt.

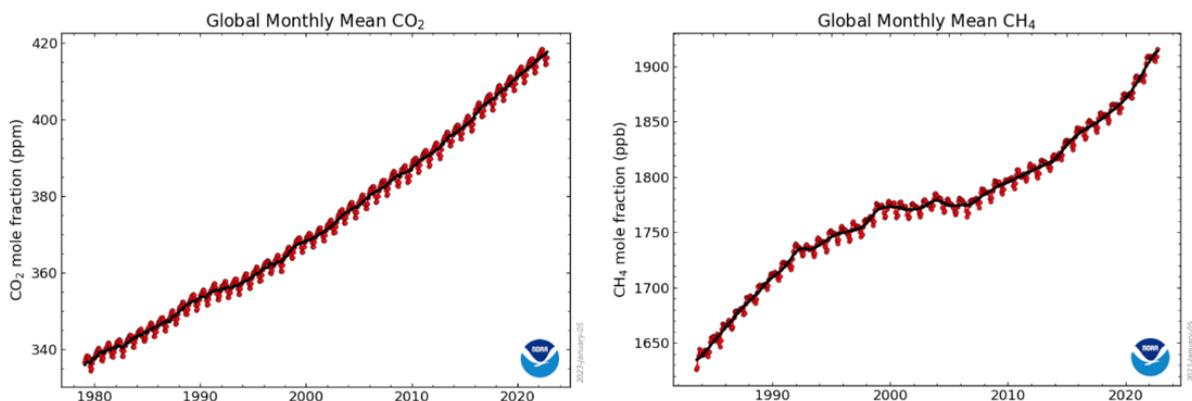


Abbildung 1. Globale Konzentrationen von Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) in der Atmosphäre 1980 – 2022 [2].

Die aufgrund des Treibhauseffekts erzeugte Erderwärmung und steigende Durchschnittstemperaturen können spätestens seit Mitte des 20. Jahrhunderts festgestellt werden. Die gemittelte Oberflächentemperatur der Erde steigt seit Beginn der Industrialisierung kontinuierlich, und mit einer in der Erdgeschichte nie dagewesenen Geschwindigkeit, an. Die Daten der gemittelten Land-Ozeantemperaturen zeigen für 2022 einen Durchschnittstemperaturanstieg von 1,15 [1,02 bis 1,28] °C über den 1850-1900 vorindustriellen Durchschnitt (Abbildung 2). [7] Damit kommen wir der im Pariser Abkommen von 2015 [45] vereinbarten Ziel zur „Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau und Fortsetzung der Bemühungen zur Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau“ bereits gefährlich nahe.

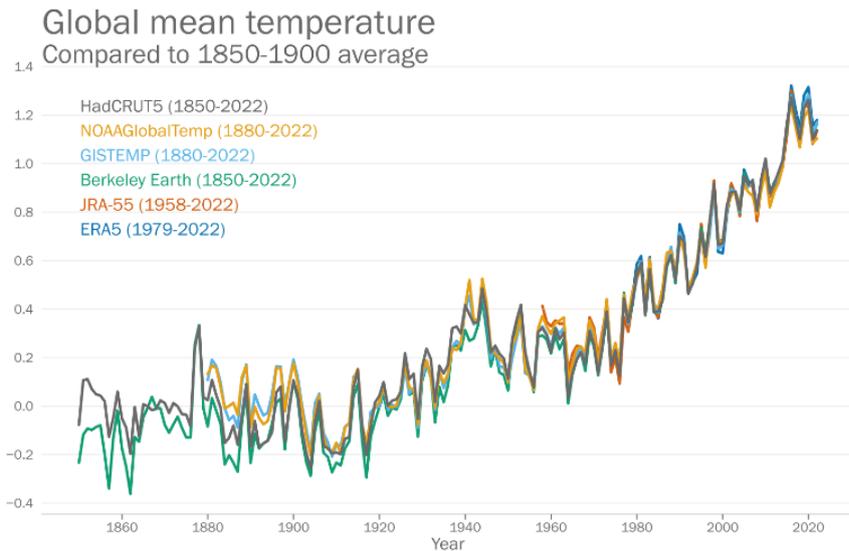


Abbildung 2. Abweichung der globalen Durchschnittstemperatur vom 1850 - 1900 Durchschnitt. Daten für 2022 Januar – September [3]. (WMO, 2022).

Zunahme von Extremen

Weit schwerer als die Zunahme der globalen Mitteltemperatur wiegt die Zunahme von Extremen. Trägt man, wie in Abbildung 3 gezeigt, die Abweichungen vieler Messstationen vom Mittelwert der Temperatur im Zeitintervall von 1951 bis 1980 für die Sommermonate Juni bis August auf der Nordhalbkugel auf, so findet man weitgehend eine Normalverteilung der Temperaturabweichungen vom Mittelwert. Ein Drittel aller Abweichungen liegt in einem Intervall von einer Standardabweichung um den Mittelwert. In den folgenden Dekaden verschiebt sich nicht nur das Maximum der Verteilung zu immer höheren Werten, sondern die Verteilung wird zunehmend unsymmetrischer. In der Dekade 2009 bis 2019 liegen nun bereits über 20% aller Abweichungen zwischen drei und sechs (!) Standardabweichungen über der Mitteltemperatur von 1951 bis 1980, während Abweichungen unterhalb der Mitteltemperatur von einem Drittel auf unter 4% abgenommen haben.

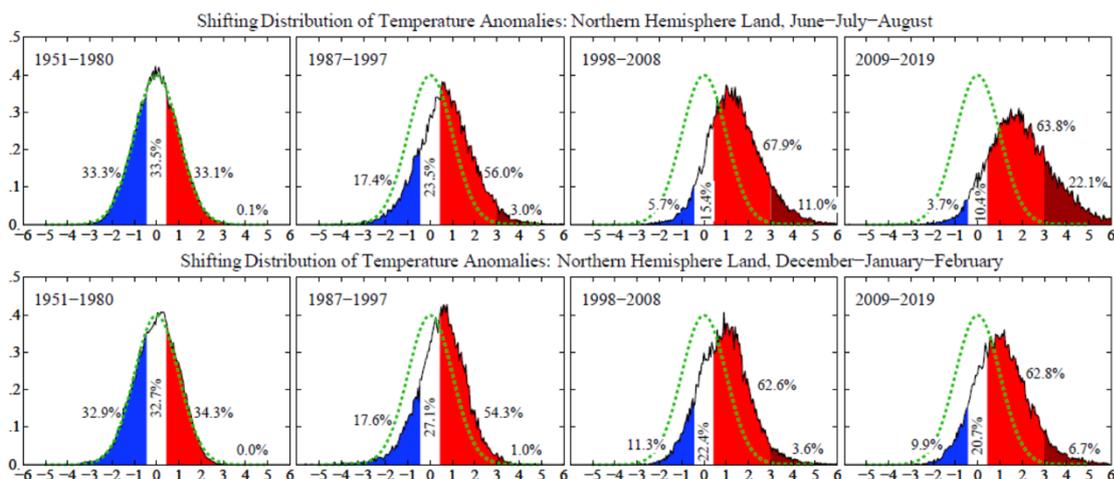
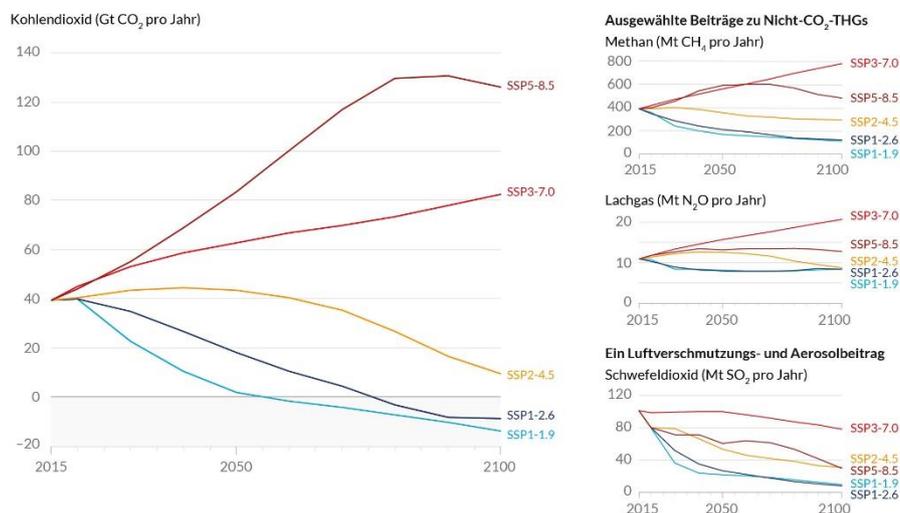


Abbildung 3. Verschiebung der Verteilungen der Temperaturabweichungen auf der Nordhalbkugel. Die Abszissen sind in Einheiten der Standardabweichung für eine Gaussverteilung der Jahre 1951-1980 gegeben. (Daten und Graphen aus [4] und [5].

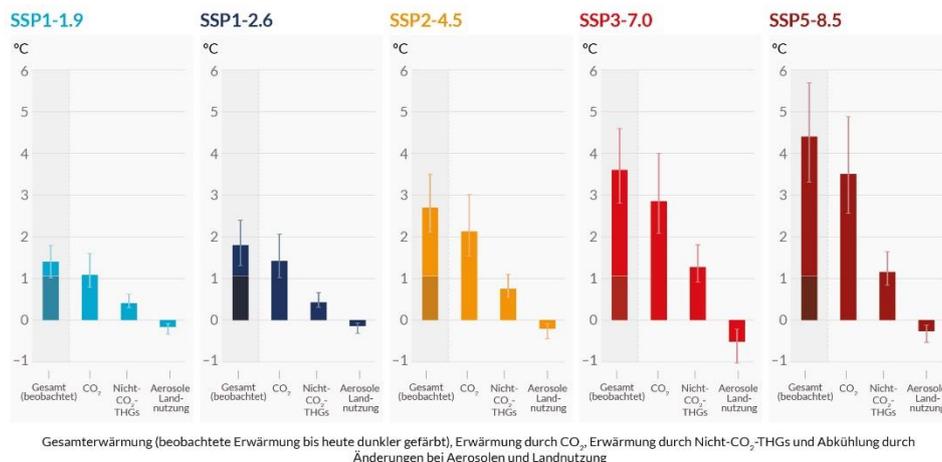
Zukünftige Emissionen verursachen zukünftige zusätzliche Erwärmung, wobei die Gesamterwärmung von vergangenen und zukünftigen CO₂-Emissionen dominiert wird

(a) zukünftige jährliche CO₂-Emissionen (links) und Emissionen wichtiger Nicht-CO₂-Antriebsfaktoren (rechts) über fünf illustrative Szenarien



(b) Beitrag unterschiedlicher Emissionen zum Anstieg der globalen Oberflächentemperatur, wobei CO₂-Emissionen dominieren

Änderung der globalen Oberflächentemperatur 2081–2100 gegenüber 1850–1900 (°C)



Gesamterwärmung (beobachtete Erwärmung bis heute dunkler gefärbt), Erwärmung durch CO₂, Erwärmung durch Nicht-CO₂-THGs und Abkühlung durch Änderungen bei Aerosolen und Landnutzung

AR6-WGI Abbildung SPM.4

Abbildung 4. (a) Jährliche anthropogene Emissionen im Zeitraum 2015–2100. Dargestellt sind Emissionsverläufe für Kohlendioxid (CO₂) aus allen Sektoren (Gt CO₂/Jahr) (linkes Diagramm) und für eine Auswahl von drei wichtigen Nicht-CO₂-Antriebsfaktoren, die in den Szenarien berücksichtigt werden: Methan (CH₄, Mt CH₄/Jahr, oberes rechtes Diagramm), Lachgas (N₂O, Mt N₂O/Jahr, mittleres rechtes Diagramm) und Schwefeldioxid (SO₂, Mt SO₂/Jahr, unteres rechtes Diagramm, trägt zu anthropogenen Aerosolen in Tafel (b) bei. (b) Beiträge zur Erwärmung nach Gruppen von anthropogenen Antriebsfaktoren und nach Szenario dargestellt als Änderung der globalen Oberflächentemperatur (°C) im Zeitraum 2081–2100 gegenüber 1850–1900, mit Angabe der bisher beobachteten Erwärmung. Balken und Antennen stellen den Medianwert beziehungsweise die sehr wahrscheinliche Bandbreite dar.

Klimaszenarien

Klimaszenarien werden verwendet, um die potenziellen zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels zu bewerten und Handlungsentscheidungen zur Abschwächung der Auswirkungen oder Anpassungsmaßnahmen zu treffen, indem hypothetische zukünftige Bedingungen angenommen werden.

Die Annahmen, die den unterschiedlichen Klimaszenarien zugrunde liegen, unterscheiden sich vor allem in künftigen Treibhausgasemissionen und andere Faktoren, die das Klima der Erde beeinflussen (z.B. Bevölkerungswachstum und wirtschaftliche Entwicklung). Die Realisierung der Annahmen hängt von menschlichen Entscheidungen ab, insbesondere politischen Entscheidungsprozessen auf nationaler und globaler Ebene (siehe weiter unten den Begriff der transitorischen Risiken). In diesem Sinne sind die Klimaszenarien nicht als Vorhersage zu verstehen, sondern als Illustrationen der Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen und Zustände (s. Kapitel 0). Innerhalb eines einzelnen Szenarios sind die grundlegenden physikalischen Effekte, vor allem die globale Erwärmung, aber sehr gut modelliert.

Treibende Größe in Klimaszenarien ist die atmosphärische Konzentration von Treibhausgasen bzw. die daraus resultierende Erderwärmung. Die Bezeichnung der Szenarien des IPCC (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change) ergibt sich aus den angenommenen Änderungen des Strahlungsantriebs bis zum Jahr 2100. Bei den, dem 5. Sachstandsbericht (AR5) [6] des IPCC zugrunde liegenden, repräsentativen Konzentrationspfaden (engl. representative concentration pathway = RCP) werden Strahlungsantriebe zwischen 2,6 und 8,5 W/m² angenommen, was zu den Bezeichnungen RCP2.6, RCP8.5 etc. führte (s. Kapitel 3.2). Der 6. Sachstandsbericht (AR6) [7] führt die gemeinsam genutzten sozioökonomischen Pfade ein (engl. Shared Socio-economic Pathway (SSP)), welche die zugrundeliegenden sozioökonomischen Trends in fünf verschiedenen Szenarien beschreiben (s. Kapitel 3.3). Die zugrunde liegenden Narrative reichen im SSP1 von einem nachhaltigen und grünen Weg in einer zunehmend nachhaltigen Welt, in der globale Gemeinschaftsgüter wie etwa Atmosphäre und Ozeane bewahrt und die Grenzen der Natur respektiert werden bis hin zu den Annahmen im SSP5, in dem die soziale und ökonomische Entwicklung auf der verstärkten Ausbeutung fossiler Brennstoffressourcen mit einem hohen Kohleanteil und einem weltweit energieintensiven Lebensstil basiert. Die Nummer des sozioökonomischen Pfads wird, wie bei den RCP, durch die angenommenen Änderungen des Strahlungsantriebs bis zum Jahr 2100 ergänzt. Die Bezeichnungen der Szenarien lauten dann SSP1-1.9, SSP5-8.5, etc. Die aus dem Klimawandel resultierenden Risiken werden als Klimarisiken bezeichnet. Mit Hilfe von Klimaszenarien können Unternehmen die Chancen und Risiken im Zusammenhang mit dem Klimawandel bewerten und systematisch die Einflussfaktoren untersuchen, beispielsweise:

- Widerstandsfähigkeit des Geschäftsmodells gegenüber Klimarisiken,
- Bewertung der Auswirkungen möglicher Maßnahmen, die ein Unternehmen ergreifen kann,
- Stresstest des Geschäftsmodells unter adversen Bedingungen.

Transitorische und physikalische Risiken

Bei den Klimarisiken wird zwischen zwei Arten von Risiken unterscheiden, den transitorischen (engl. transitional risk) und den physischen Risiken (engl. physical risk):

Die transitorischen Klimarisiken sind die Risiken, die den Übergang zu einer kohlenstoffärmeren Wirtschaft und den Bemühungen zur Bewältigung der mit dem Klimawandel verbundenen Abschwächungs- und Anpassungsmaßnahmen betreffen. Dazu gehören auch Risiken im Zusammenhang mit der Einführung neuer Technologien. Haupttreiber der Transitionsrisiken ist aber die Unsicherheit über Zeitpunkt, Art und Intensität der politischen Maßnahmen, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren³. Versicherungsunternehmen können von Transitionsrisiken vor allem im Bereich der Kapitalanlagen betroffen sein (Vermögenswerte verlieren an Wert), aber auch durch Rechtsstreitigkeiten in den Bereichen Umwelthaftung, Produkthaftung und Berufshaftung im Zusammenhang mit Treibhausgasemissionen [8].

Die physischen Klimarisiken beziehen sich auf die Risiken, die mit den direkten physischen Auswirkungen des Klimawandels und physischen Schäden an Gesundheit und Vermögenswerten verbunden sind, wie etwa extreme Wetterereignisse oder längerfristige Veränderungen (z.B. Anstieg des Meeresspiegels). Unterschieden wird bei den physischen Klimarisiken zwischen akuten und chronischen Risiken. Zu den akuten physischen Risiken gehören die Veränderungen in der Intensität und Frequenz extremer Wetterereignisse. So werden extreme Niederschläge und Überschwemmungen voraussichtlich zunehmen und Hitzewellen wahrscheinlich häufiger auftreten und länger andauern. Dies führt unter anderem zu höheren Schäden an Gebäuden, vermehrten Ernteaufschlägen aufgrund von Dürren und Waldbränden sowie beispielsweise erhöhter Mortalität in Hitzewellen. Demgegenüber beziehen sich chronische physische Klimarisiken längerfristige Klimaveränderungen wie der Anstieg des Meeresspiegels und Veränderung von Temperatur- und Niederschlagsmustern, die sich unter anderem auf die Verfügbarkeit von Wasser, die landwirtschaftliche Produktivität sowie die Ausbreitung von Krankheiten auswirken können. Diese Risiken können erhebliche negative Auswirkungen auf die Infrastruktur, die Wirtschaft und die menschliche Gesundheit haben. Da das Klimasystem in hohem Maße nichtlinear ist, kann das Überschreiten von Kipppunkten die beobachtbaren Trends drastisch beschleunigen und weitreichende Folgen für Klima und Ökosysteme haben. Dieser Bericht liefert Einblicke, wie im Anschluss an qualitative "What if"-Analysen quantitative

³ Hierbei wirken starke gesellschaftliche und wirtschaftliche Kräfte. Auf der einen Seite gibt es die Wissenschaft, die Klimaschutzbewegung und die Dekarbonisierungswirtschaft. Auf der anderen Seite wollen vor allem die großen Konzerne, die viel in ihre Geschäftsmodelle auf Basis fossiler Brennstoffe investiert haben, weiterhin eine möglichst hohe Rendite erzielen. Die Intensität des Lobbyismus wird vielleicht am deutlichsten im Fall von ExxonMobil: Obwohl bereits in den 1970er Jahren die eigenen Analysen zu den klimatischen Auswirkungen des Treibhauseffekts eine sehr große Güte hatten, säte die Öffentlichkeitsarbeit von ExxonMobil aktiv Zweifel am menschengemachten Klimawandel [1].

Analysen zur Bewertung von Klimarisiken durchgeführt werden können, und beleuchtet gängige Klimaszenarien [9].

2. Naturwissenschaftliche Aspekte

2.1. Physikalische Grundlagen der globalen Erwärmung

Die physikalischen Grundlagen der globalen Erwärmung und der Zusammenhang zwischen Temperatur und Zusammensetzung der Atmosphäre sind seit langem bekannt. Eine frühe Arbeit von Eunice Foote aus dem Jahr 1856 zeigte bereits kurz nach Beginn der systematischen atmosphärischen Temperaturmessungen in den 1840er Jahren einen Zusammenhang zwischen atmosphärischer Temperatur und CO_2 auf [10]. Die erste quantitative Bestimmung dieses Zusammenhangs geht auf den schwedischen Chemiker Svante Arrhenius zurück [11].

Die Oberflächentemperatur der Erde ist durch die Strahlungsbilanz von kurzwelliger Energieeinstrahlung aus der Sonne und langwelliger Abstrahlung der Erde bestimmt. Berechnet man eine Temperatur ohne Berücksichtigung der Atmosphäre, bei der die Bilanz aus Einstrahlung aus der Energie der Sonne und der Abstrahlung der Erde mit der gesuchten Temperatur gebildet wird, ergibt sich eine mittlere Oberflächentemperatur von 255K (-18°C). In dieser Bilanz werden die Flächen von Ein- und Ausstrahlung im thermischen Gleichgewicht gleichgesetzt und Erde und Sonne als schwarze Strahler approximiert (vgl. Abbildung 5).

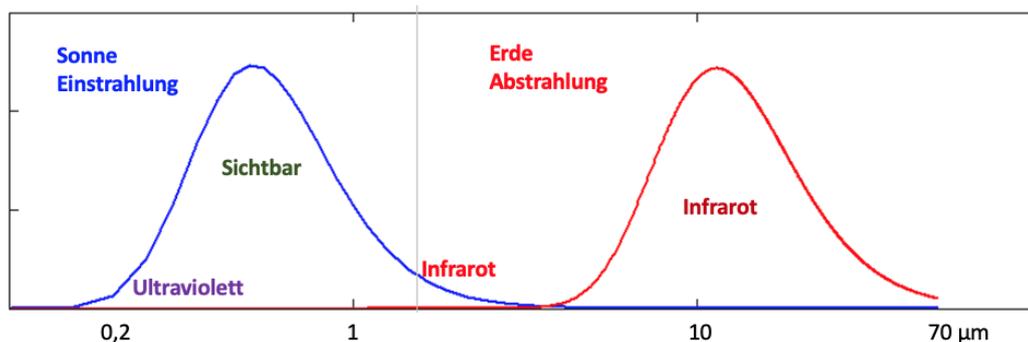


Abbildung 5. Strahlungsbilanz durch Einstrahlung von der Sonne (Ultraviolett bis Infrarot) und Abstrahlung der Erde (vollständig im Infraroten)

Die Differenz zur tatsächlichen heutigen Oberflächentemperatur von 288K ($+15^\circ\text{C}$) von 33K bezeichnet man als den natürlichen Treibhauseffekt (THE). Er ist eine Folge der Existenz einer Atmosphäre, welche die Ein- und Abstrahlungsbilanz der Energie verändert. Gase in der Atmosphäre, welche in der Lage sind, die Strahlungsbilanz zu verändern, bezeichnet man als Treibhausgase (THG). Diese Eigenschaft besitzen ausschließlich Moleküle, die in der Lage sind, infrarote Strahlung zu absorbieren und zu emittieren.

Physikalische Voraussetzung für die Absorption und Emission von IR Photonen ist eine Änderung des molekularen Dipolmoments bei der Schwingung. Zweiatomige Gase die aus zwei gleichen Atomen zusammengesetzt sind, wie Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2), sowie atomare Gase wie Argon (Ar) haben diese Eigenschaft nicht, sind also keine treibhausaktiven Substanzen. Die häufigsten Bestandteile Stickstoff (78,1 Vol. %), Sauerstoff (20,9 Vol. %) und Ar (0,9 Vol. %), die zusammen bereits 99,9 % aller Gase in unserer Atmosphäre ausmachen, sind also keine Treibhausgase. Das nächsthäufigere Gas in unserer Atmosphäre, das CO_2

(0,04 Vol %, bzw. 400 ppmV⁴), besitzt zwei infrarotaktive Schwingungen (bei 4,3 und 14,9 μm) und ist, im Hinblick auf anthropogene Änderungen der Zusammensetzung unserer Atmosphäre, das wichtigste Treibhausgas. Von einem vorindustriellen Wert von 280 ppmV wurde der CO₂-Anteil durch menschliche Aktivitäten auf über 400 ppm erhöht (vgl. Abbildung 1), was einer Zunahme um 43 Volumen % entspricht.

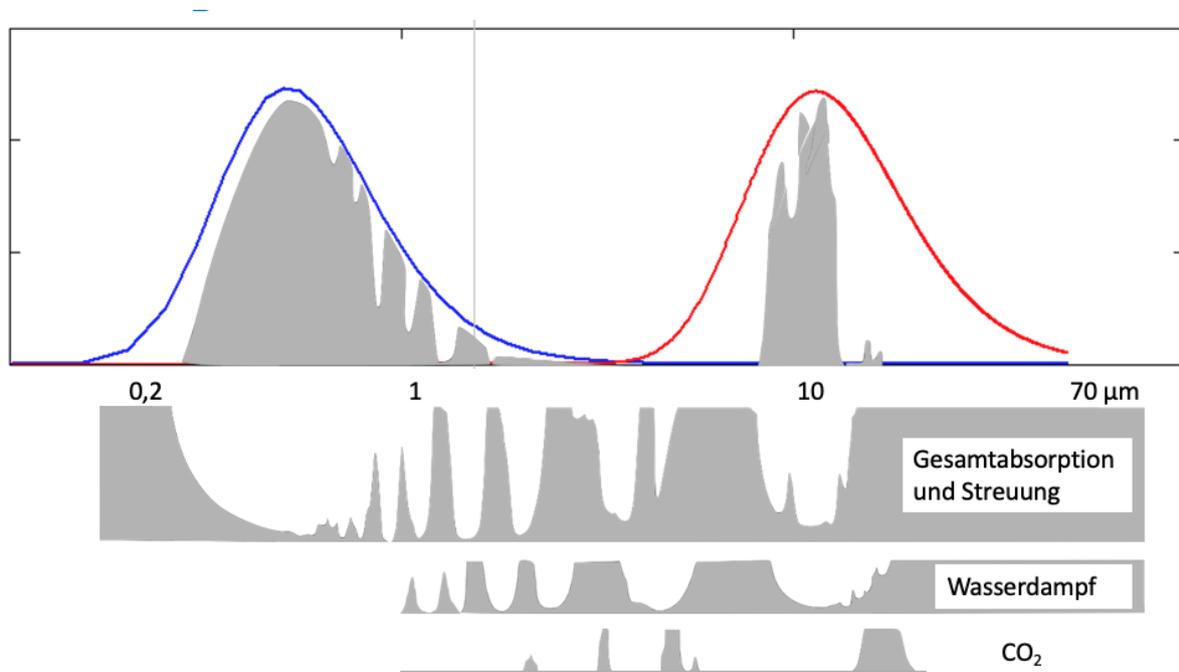


Abbildung 6. Einfluss der wichtigsten atmosphärischen THG auf die Strahlungsbilanz der Erde.

Während die atmosphärischen Gase im Bereich der Einstrahlung nur wenig absorbieren, ist die Ausstrahlung, mit Ausnahme eines Fensters um 10 μm , fast völlig unterbunden. Abbildung 6 zeigt die Transmission der Atmosphäre in den jeweiligen Bereichen (Ein- und Ausstrahlung), die Gesamtabsorption der Atmosphäre und die beiden wichtigsten Bestandteile der Absorption, die des Wasserdampfs und des Kohlendioxids. Die starke Absorption im kurzwelligen Bereich unterhalb von 300 nm (0,3 μm) ist auf Sauerstoff, Ozon und Rayleighstreuung zurückzuführen.

Üblicherweise unterteilt man den THE in einen natürlichen und einen anthropogenen Anteil. Den absolut größten Anteil am natürlichen THE hat gasförmiges Wasser in der Atmosphäre. Sein Anteil wird aber durch menschliche Aktivitäten nur unwesentlich verändert, sodass der Anteil des Wassers am anthropogenen THE klein ist. Trotzdem hat das Wasser auch beim anthropogenen THE eine wichtige Funktion. Erhöht sich die Oberflächentemperatur durch eine Steigerung des CO₂-Gehalts, so wird auch mehr Oberflächenwasser verdampft, was eine weitere Erhöhung der Temperatur mit sich bringt. Auch der Anstieg anderer, in der Atmosphäre enthaltener Moleküle (Ozon (O₃), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), und

⁴ ppmV = Volumenanteil in Anteilen in einer Million (parts per million), 0.1 Volumenprozent entspricht also 1000 ppmV.

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)), tragen in steigendem Maße zum anthropogenen THE und zu einer Steigerung der Temperatur bei.

Die Abstrahlung von infraroter Strahlung der THG in der Atmosphäre ist nicht isotrop, der aus der Atmosphäre nach unten (zum Boden) abgestrahlte Anteil ist größer als der nach oben (ins Weltall) abgestrahlte Anteil. Dies ist eine Folge des negativen Temperaturgradienten der Troposphäre mit etwa $10^\circ/\text{km}$. Kalte Moleküle emittieren weniger Strahlung als warme Moleküle (Stefan-Boltzmann-Gesetz), so dass Emission von infraroten Photonen nach oben von kälteren Molekülen reabsorbiert wird, die dann schwächer emittieren als tiefer gelegene wärmere Moleküle. Die auf diese Weise entstehende, nach unten gerichtete, zusätzliche Wärmestrahlung der Atmosphäre, wird auch als Gegenstrahlung bezeichnet. Die am Erdboden ankommende Gegenstrahlung beträgt etwa 300 W/m^2 , während die direkt auf dem Erdboden auftreffende Sonnenstrahlung nur eine Leistungsdichte von 170 W/m^2 hat. Dies belegt die enorme Auswirkung, die die Anwesenheit einer Atmosphäre mit THG auf die Temperatur der Erde hat.

Der Begriff Strahlungsantrieb (engl. radiative forcing) beschreibt den Einfluss externer Faktoren auf die Strahlungsbilanz bzw. das Klimasystem der Erde. Der Strahlungsantrieb entspricht der Nettostrahlungsflussdichte von der Stratosphäre in die Troposphäre durch externe Faktoren und ist ein Maß für die Veränderung der Energiebilanz der Erde zum Beispiel durch die Zunahme der Konzentration der THG und wird in W/m^2 angegeben. Der gegenwärtige Strahlungsantrieb von CO_2 alleine beträgt $1,7 \text{ W/m}^2$, der aller THG kombiniert liegt bei etwa 3 W/m^2 .⁵ Die Stratosphäre kann sich den geänderten Verhältnissen schneller anpassen als die Troposphäre, wodurch es zum Strahlungsfluss von der Stratosphäre in die Troposphäre kommt. Hierdurch kühlt sich die höher gelegene Stratosphäre ab und die darunter liegende Troposphäre erwärmt sich in Übereinstimmung mit den Beobachtungen [12]. Die durch Wetterballone, Satelliten, Mikrowellenstrahlung und LIDAR (engl. Light Detection And Ranging) messbare Abkühlung der Stratosphäre in Übereinstimmung mit dem Modell, stellt einen der überzeugendsten Beweise für die Richtigkeit der zugrundeliegenden Modellannahmen dar. Andere Komponenten unseres Klimasystems haben einen negativen Strahlungsantrieb und kühlen die Troposphäre. Hierzu zählen in erster Linie die Aerosole, die in großer Menge bei Vulkanausbrüchen freigesetzt werden und durch verminderte Sonneneinstrahlung zu einer temporären Abkühlung führen. Da die Aerosole recht kurzlebig sind, ist diese Abkühlung auf den Zeitraum von etwa einem Jahr beschränkt.

2.2. Kipppunkte des Erdklimas

Der Begriff Kipppunkt (engl. tipping point) bezeichnet in der Klimawissenschaft eine kritische Grenze, jenseits derer, durch Rückkopplungen und nichtlineare Wechselwirkungen, große und irreversible Änderungen im Erdklima auftreten [13]. Das Konzept von irreversiblen Änderungen im Erdklimasystem wurde zuerst von Schellnhuber im 3. Sachstandsbericht des IPCC eingeführt [14]. Diese Änderungen können, müssen aber nicht, abrupt auftreten, bringen aber das

⁵ Es gibt einen direkten Zusammenhang zwischen Strahlungsantrieb und globaler Erwärmung. Der aktuelle Strahlungsantrieb von $1,7 \text{ W/m}^2$ entspricht einer globalen Erwärmung von $1,2^\circ\text{C}$.

Klimasystem von einem stabilen Zustand in einen neuen, ebenfalls stabilen Gleichgewichtszustand, von dem aus das ursprüngliche Gleichgewicht nicht mehr erreicht werden kann. Die Forderung des Pariser Abkommens, die globale Temperaturerhöhung auf 1,5°C zu begrenzen, ergibt sich unter anderem aus der Notwendigkeit, das Auslösen von Kippunkten zu vermeiden [15]. Selbst bei Einhaltung des strengeren 1,5°C Ziels, liegen bereits 6 Kippunkte im Bereich hoher Wahrscheinlichkeit (Abbildung 7).

Zu den Kippunkten, deren Auslösen bereits bei einer Temperaturanomalie <2°C wahrscheinlich wird, gehören der Verlust des grönländischen Eisschildes, das abrupte Auftauen der borealen Permafrostböden, der Zusammenbruch des Westantarktischen Eisschildes, der abrupte Verlust des Barentssee Meereises und das Absterben der äquatornahen Korallenriffe. Am Beispiel der borealen Permafrostböden, des grönländischen Eisschildes und des Barentssee Meereises lässt sich der Rückkopplungsmechanismus, der zu einem irreversiblen Kollaps führt, im Folgenden aufzeigen. Eine Erhöhung der Temperatur führt zu einem beschleunigten Auftauen von Permafrostböden, wobei eine große Menge der im Boden gespeicherten THG Methan und Kohlendioxid freigesetzt werden.

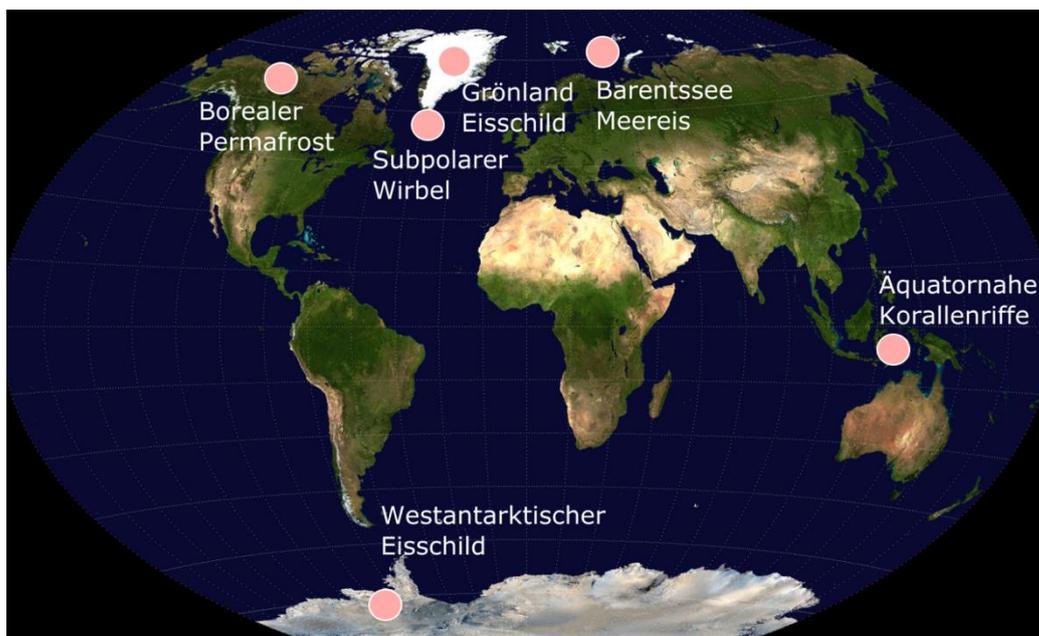


Abbildung 7. Sechs Kippunkte des Klimas, deren Auslösetemperatur mit großer Wahrscheinlichkeit unter 2°C liegt [**Fehler! Textmarke nicht definiert.**], s. Abb. 49 aus [42].

Durch die erhöhte Konzentration der THG, speziell des stark klimawirksamen Methans, wird die weitere Erwärmung forciert und so ein Rückkopplungsmechanismus der zu einem kompletten Auftauen der Permafrostböden führt, eingeleitet. Die Menge an im Permafrostboden gespeicherten organischen Kohlenstoffs beträgt etwa 1670 Gigatonnen (Gt) [16]. Das gesamte, in der Atmosphäre, vorhandene Kohlendioxid entspricht nur etwa 800 Gt, was die enorme Tragweite des Auftauens von Permafrostböden aufzeigt. Beim irreversiblen Verlust des Wintereises der Barentssee (engl. Barents Sea winter ice = BARI) kommt ein anderer Rückkopplungsmechanismus zum Tragen. Die Erhöhung der globalen Temperatur führt zu einem Abschmelzen an den Rändern des Meereises. Da Eisflächen ein großes Rückstrahlvermögen im Wellenlängenbereich der solaren Einstrahlung besitzen (Albedo), während das dunkle Meerwasser die eingestrahlte Energie gut

absorbiert, kommt es zu einer Temperaturerhöhung des umgebenden Meeres, was durch Rückkopplung zu einem weiteren Abschmelzen von Eisfläche führt. Der Kipppunkt für den Verlust des BARI liegt bei 1,6°C auf einer Zeitskala von etwa 25 Jahren [**Fehler! Textmarke nicht definiert.**]. Beim grönländischen Eisschild, der etwa 3 km mächtig ist, schmilzt durch Temperaturerhöhung der Eisschild in tiefen (wärmeren) Lagen ab, was bislang höhere Lagen in einen Bereich bringt, in dem ihr Abschmelzen beginnt. Ab einer gewissen Mächtigkeit des Eisschilds ist dieser Prozess nicht mehr zu stoppen und führt zum kompletten Verlust des Eisschilds. Der komplette Verlust des Eisschilds würde den Meeresspiegel um über 7m anheben [17]. Der Verlust des grönländischen Eisschilds stellt ein Beispiel dar, bei dem der Übergang von einem stabilen in einen instabilen Zustand, der dann in ein neues stabiles Gleichgewicht (eisfreies Grönland) führt, keineswegs schnell ablaufen muss. Modellsimulationen sagen den kritischen Punkt zwischen 0,8 und 3,2°C voraus, mit einem wahrscheinlichsten Wert von 1.6°C. Selbst unter Annahme des pessimistischen Szenarios (SSP5-8.5) wird das vollständige Abschmelzen aber erst im Jahr 3000 erreicht sein [18].

2.3. Politik im Klimawandel

Die wohl wichtigsten Informationsquellen zum Klimawandel sind die Sachstandsberichte des 1988 gegründeten Weltklimarats (IPCC). Sie bringt Wissenschaftler aus der ganzen Welt zusammen, die den wissenschaftlichen Stand zum Klimawandel aus wissenschaftlichen Arbeiten und Veröffentlichungen prüft und eine umfassende Zusammenfassung liefert. Hierbei stellt der IPCC den wissenschaftlichen Konsens heraus und zeigt auf, in welchen Gebieten weitere Forschung für robuste Aussagen notwendig sind. Damit leistet der IPCC einen wichtigen Beitrag in politischen Diskussionen und Verhandlungen über den Klimawandel. Der aktuelle Stand zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen über den Klimawandel sind im sechsten Sachstandsbericht (AR6) dargelegt, der vom IPCC zwischen 2021 und 2023 veröffentlicht wurde, beziehungsweise wird. Dieser umfasst einen Synthesebericht und eine Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger sowie Berichte von drei Arbeitsgruppen. Wie bereits im vorangegangenen Report "Global Warming of 1,5°C" von 2018 warnt der IPCC auch hier vor den fatalen Konsequenzen, falls die globale Erderwärmung nicht unter einem Wert von 1,5°C gehalten werden kann [19].

Im Kampf gegen den Klimawandel wurde 1997 vom UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) das Kyoto-Protokoll verabschiedet, das erste internationale und völkerrechtlich bindende Abkommen über Treibhausgasemissionen. Nachdem vorangegangene UN-Klimakonferenzen in der Zwischenzeit ohne allgemeine Vereinbarung zur verbindlichen Emissionssenkungen endeten, dauerte es bis ins Jahr 2015, in dem mit dem Pariser Abkommen (engl. Paris Agreement) ein neues, globales Klimaschutzabkommen verabschiedet wurde. Das Pariser Abkommen folgte der Veröffentlichung des fünften Sachstandsbericht des IPCC im Vorjahr und dem UN-Klimagipfel in New York an dem über 100 Staats- und Regierungschefs teilnahmen. Im 2016 in Kraft getretenen Pariser Abkommen verpflichten sich 195 Länder, den Anstieg der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, möglichst sogar auf 1,5°C. In den Folgejahren wurde mit Regeln, Richtlinien und Gesetze ein gesetzlicher Rahmen für den Klimaschutz entworfen. Während

für die im Jahr 2022 im ägyptischen Sharm El-Sheikh stattfindenden COP27 mit dem Motto „Together for implementation“ der Fokus auf der Umsetzung des Pariser Abkommens liegen sollte, wurde jedoch deutlich, dass die Lücke zwischen dem notwendigen Klimaschutz zur Begrenzung der globalen Erderwärmung auf 1,5°C und der tatsächlichen Umsetzung des Pariser Abkommens weiterhin enorm ist. Trotz dringlicher Appelle zum Klimaschutz wie von UN-Generalsekretär Antonio Guterres, der erklärte „Wir sind auf dem Highway zur Klimahölle – mit dem Fuß auf dem Gaspedal“, ist es neben einem Bekenntnis zum schrittweisen Ausstieg aus der Kohleenergie nicht gelungen, einen Ausstieg aus allen fossilen Brennstoffen wie Öl und Gas zu beschließen. Ohne damit die Ursachen des Klimawandels entschlossen zu bekämpfen, haben die Vertragsstaaten mit Schaffung eines Ausgleichsfonds zur Finanzierung von klimabedingten Verlusten und Schäden Fortschritte bei der finanziellen Hilfe der vom Klimawandel am stärksten betroffenen Ländern erzielt.

3. Szenarien (RCP, SSP, NGFS)

3.1. Kurze Einführung in Szenarien

Eine Möglichkeit, die Auswirkungen von Klima- und Umweltveränderungen unter anderem auf die Finanzwirtschaft zu verstehen und zu quantifizieren, ist die Entwicklung von Szenarien. Je nach Szenario werden ungewisse Zustände der Zukunft (wie politische Entscheidungen oder Änderung der Treibhausgaskonzentrationen) in Form von Annahmen beschrieben. In Abhängigkeit von diesen Annahmen können dann Auswirkungsanalysen durchgeführt werden. Hierbei ist es insbesondere wichtig, gemeinsame Szenarien festzulegen, da die Ergebnisse von Klimamodellierern dadurch vergleichbar werden.

Auch für die Versicherungswirtschaft sind solche Szenarien von großem Interesse, da sie wichtige Informationen liefern, um die künftigen Risiken und Chancen von Klima- und Umweltveränderungen adäquat in die Risikomodellierung einfließen zu lassen.

Hinweisen möchten wir an dieser Stelle auch auf den Ergebnisbericht der DAV-AG „Klimaszenarien – praktische Anwendung in der Kapitalanlage“ des Ausschuss Investment [47].

3.2. Überblick RCP-Szenarien

Ein sehr wichtiges Set von Szenarien wurde vom IPCC festgelegt. So wurden in 2014 vier beispielhafte Pfade für die Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen beschrieben, sogenannte „**representative concentration pathway**“ (**RCP**). Inhaltlich beschreiben diese Pfade verschiedene Klimazukunftsszenarien, je nachdem, welche Mengen an Treibhausgasen bis 2100 emittiert werden. Unterschieden werden die vier RCPs nach ihrer jeweiligen Veränderung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 im Vergleich zu vorindustriellen Werten in Watt pro Quadratmeter (z.B. +2,6 W/m² für RCP2.6).

Die vier RCPs beinhalten einen Pfad mit einer ehrgeizigen Verringerung der Treibhausgasemissionen, die in den nächsten Jahren linear abnehmen und vor 2100 netto negativ werden (RCP2.6). In diesem Szenario gelingt es, die globale Erwärmung auf unter 2°C zu begrenzen.

Den Gegensatz dazu bildet der sehr emissionsintensive Pfad **RCP 8.5**. Er ist gekennzeichnet von einer Zukunft ohne Reduzierung der Emissionen, was zu hohen Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre führt. Die Pfade **RCP 4.5** und **RCP 6.0** bilden mittlere Szenarien. Der Höhepunkt der Treibhausgasemissionen ist hier 2040 (RCP4.5) bzw. 2060 (RCP6.0) erreicht, ehe die Emissionen bis Ende des Jahrhunderts zurückgehen. In Abbildung 8 wird die angenommene Entwicklung der CO₂-Konzentration bis zum Jahr 2100 in den unterschiedlichen Szenarien dargestellt.

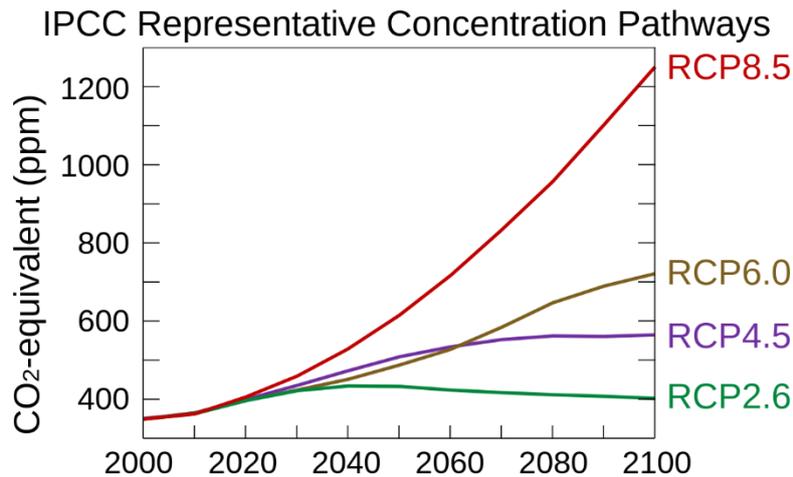


Abbildung 8. Entwicklung der CO₂-Konzentration bis zum Jahr 2100

Neben den Treibhausgaskonzentrationen sind auch Faktoren wie Wiederaufforstung oder Maßnahmen gegen Smog enthalten. Die RCPs wurden unabhängig von konkreten sozialen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Szenarien formuliert, da verschiedene sozioökonomische Entwicklungen zur gleichen Treibhausgaskonzentration führen können. Im Vergleich der RCPs untereinander ist zu beachten, dass sich die physikalischen Auswirkungen in den nächsten 10-20 Jahren kaum unterscheiden, da die kurzfristige Erwärmung größtenteils durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen bedingt ist, der sich in der Historie bereits aufgebaut hat. Längerfristig (2050-2100) ergeben sich jedoch deutlich unterschiedliche physikalische Auswirkungen wie die Veränderung von Extremwetterereignissen [20, 21].

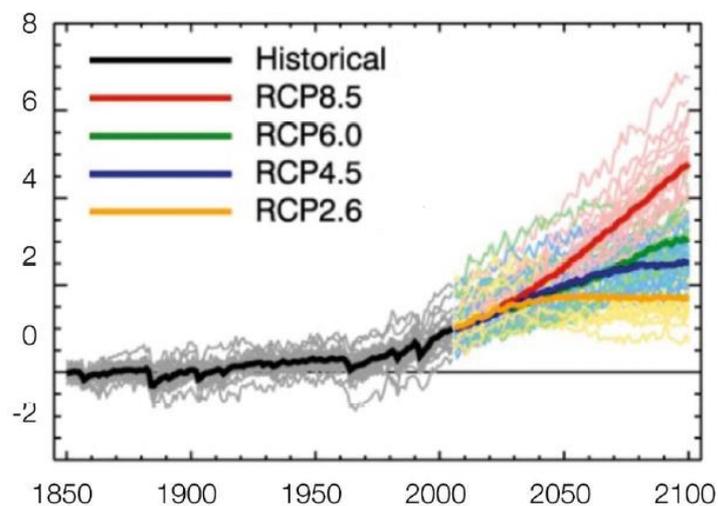


Abbildung 9. Bandbreite der Erwärmung in °C für die verschiedenen RCP [20]

3.3. Überblick SSP-Szenarien

Um die RCP um sozioökonomische Faktoren zu ergänzen, wurden 2016 die „**gemeinsam genutzten sozioökonomischen Pfade**“ (Shared Socioeconomic Pathway = **SSP**) entwickelt. Diese vervollständigen das Bild, indem sie die Auswirkungen sozialer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Faktoren einbeziehen und damit zeigen, ob und wie die in den RCPs aufgezeigten Pfade von der Gesellschaft erreicht werden können.

Ursprung der SSP war die Identifikation des IPCC von Unsicherheiten als Ursache für Klimarisiken. Neben den physischen Auswirkungen des Klimawandels (abgebildet durch die verschiedenen RCP), zählt dazu auch die Fähigkeit des Menschen, die Folgen des Klimawandels zu bewältigen. Dies ist deshalb entscheidend, da günstige sozioökonomische Bedingungen eher risikomindernd wirken, während ungünstige sozioökonomische Bedingungen hingegen den Klimawandel befeuern können.

Die SSPs wurden von einer Gruppe von Wissenschaftlern unter der Leitung des ICONICS (International Committee On New Integrated Climate Change Assessment Scenarios) mit dem Ziel entwickelt, Klimawandelfolgen in den Kontext der Möglichkeiten zur Anpassung und Minderung des Klimawandels zu setzen. Die Leitfrage dabei war, entlang welcher sozioökonomischen Pfade sich die Weltgemeinschaft grundsätzlich entwickeln kann und welche Konsequenzen diese auf den Klimawandel und die Risiken, die durch ihn entstehen, haben werden [22].

Aus dieser Fragestellung wurden fünf SSPs entwickelt, welche plausible alternative Veränderungen von gesellschaftlichen Aspekten wie demografische, wirtschaftliche, technologische, soziale, Governance- und Umweltfaktoren beschreiben. Sie enthalten sowohl qualitative Beschreibungen (Narrative) der Entwicklungstrends in großen Weltregionen als auch die Quantifizierung von Schlüsselvariablen, die als Input für integrierte Bewertungsmodelle, Wirkungsmodelle und Analysen dienen können.

Die SSPs sollen die Welt beschreiben, in der gesellschaftliche Trends dazu führen, dass die Abschwächung des Klimawandels bzw. die Anpassung an den Klimawandel schwieriger oder einfacher wird, ohne den Klimawandel selbst explizit zu berücksichtigen. Je nach SSP werden Klimaschutzziele und Ziele zur Eindämmung leichter oder schwieriger, unabhängig von der genauen Größenordnung des Ziels [23].

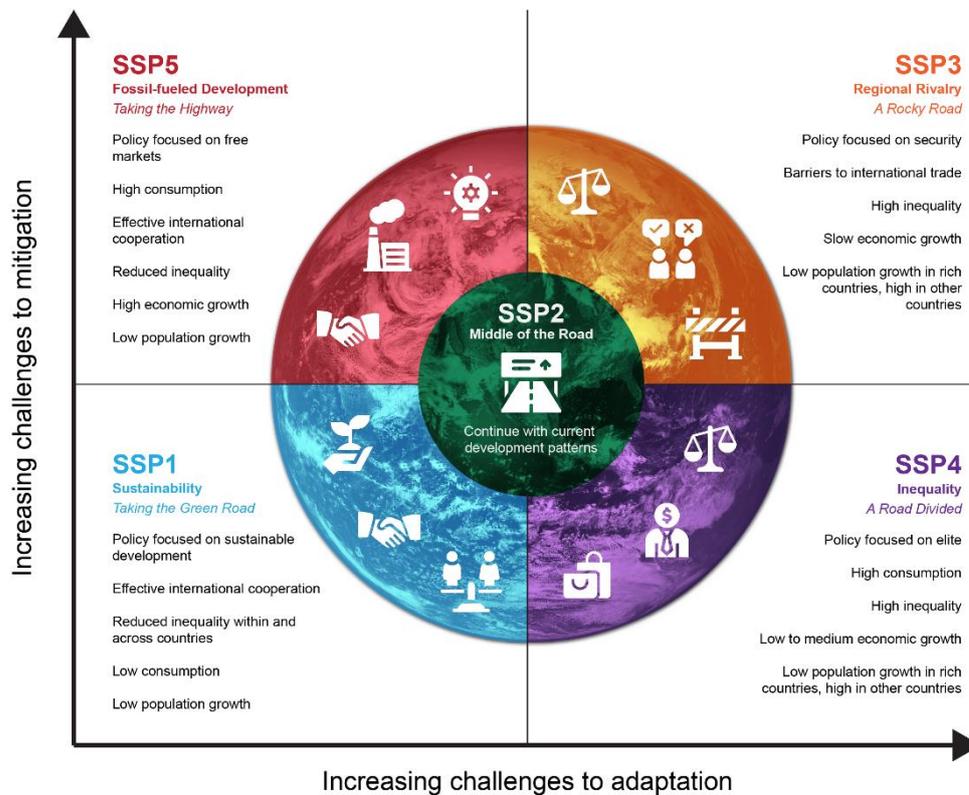


Abbildung 10. Fünf gemeinsame sozioökonomische Pfade (SSPs), die verschiedene Kombinationen von Herausforderungen für die Abschwächung und die Anpassung an den Klimawandel darstellen [40].

3.4. Beschreibung SSP-Szenarien

Im ersten Pfad **SSP1 „Nachhaltigkeit“** (geringe Herausforderungen für Abschwächung und Anpassung) bewegt sich die Weltgemeinschaft auf einen nachhaltigeren Weg zu, weil sie die Bedeutung von nachhaltigen Strukturen für eine gesunde Wirtschaft und eine gesunde Gesellschaft anerkannt hat. Statt Wirtschaftswachstum steht das menschliche Wohlbefinden zukünftig stärker im Vordergrund. Die Zusammenarbeit zwischen lokalen, nationalen und internationalen Organisationen und Institutionen, dem Privatsektor und der Zivilgesellschaft verbessert sich. Angetrieben von einem zunehmenden Engagement für die Erreichung von Entwicklungszielen wird die Ungleichheit sowohl zwischen als auch innerhalb von Ländern verringert. Der Verbrauch ist auf eine geringere Ressourcen- und Energieintensität ausgerichtet.

Die Kombination aus gezielter Entwicklung umweltfreundlicher Technologien mit Institutionen, die die internationale Zusammenarbeit erleichtern können, und einer relativ geringen Energienachfrage führt zu relativ geringen Herausforderungen für die Abschwächung.

Gleichzeitig stellen die Verbesserungen des menschlichen Wohlstandes sowie starke und flexible globale, regionale und nationale Institutionen geringe Anforderungen an die Anpassung dar.

In **SSP2 „Der mittlere Weg“** (mittlere Herausforderungen für Abschwächung und Anpassung) befindet sich die Welt auf einem Weg, auf dem sich die bisherigen sozialen, wirtschaftlichen und technologischen Trends in der Zukunft fortsetzen. Entwicklung und Einkommenswachstum verlaufen ungleichmäßig, wobei einige Länder relativ gute Fortschritte machen, während andere hinter den Erwartungen zurückbleiben. Globale und nationale Institutionen arbeiten auf die Erreichung der Ziele der nachhaltigen Entwicklung hin, kommen dabei aber nur langsam voran. Auch wenn die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen langsam abnimmt, gibt es keine Zurückhaltung bei der Nutzung fossiler Ressourcen. Die Einkommensungleichheit bleibt bestehen oder verbessert sich nur langsam, und die Anfälligkeit für gesellschaftliche und ökologische Veränderungen muss weiterhin verringert werden.

Die anhaltende oder sich nur langsam verbessernde Einkommensungleichheit, die fortbestehende gesellschaftliche Schichtung und der begrenzte soziale Zusammenhalt stellen weiterhin eine Herausforderung für die Verringerung der Anfälligkeit gegenüber gesellschaftlichen und ökologischen Veränderungen dar und behindern bedeutende Fortschritte bei der nachhaltigen Entwicklung. Die Herausforderungen für Abschwächung und Anpassung sind daher moderat, allerdings mit erheblichen Unterschieden zwischen und innerhalb der Länder [21].

In **SSP3 „Regionale Rivalität - ein steiniger Weg“** (große Herausforderungen für Abschwächung und Anpassung) zwingen ein wiederauflebender Nationalismus, Sorgen um Wettbewerbsfähigkeit und Sicherheit sowie regionale Konflikte die Länder dazu, sich zunehmend auf nationale Fragen zu konzentrieren und die Politik immer stärker auf nationale Sicherheitsfragen auszurichten. Die Länder konzentrieren sich auf das Erreichen von Energie- und Ernährungssicherheitszielen innerhalb ihrer eigenen Region auf Kosten einer breiteren Entwicklung. Die wirtschaftliche Entwicklung verläuft langsam, der Konsum ist materialintensiv, und die Ungleichheiten bleiben bestehen oder verschärfen sich im Laufe der Zeit. Eine geringe internationale Priorität für Umweltbelange führt in einigen Regionen zu einer starken Umweltverschlechterung. Die zunehmende Ressourcenintensität und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen sowie die Schwierigkeit, internationale Zusammenarbeit zu erreichen zusammen mit dem langsamen technologischen Wandel stellen große Herausforderungen an die Abschwächung dar. Die begrenzten Fortschritte bei der menschlichen Entwicklung, das langsame Einkommenswachstum und das Fehlen regionsübergreifender Institutionen stellen viele Gruppen in allen Regionen vor großen Herausforderungen bei der Anpassung [21].

Bei **SSP4 „Ungleichheit - ein geteilter Weg“** (geringe Herausforderungen für die Abschwächung, große Herausforderungen für die Anpassung) führen sehr ungleiche Investitionen in das Humankapital in Verbindung mit zunehmenden Ungleichheiten bei den wirtschaftlichen Möglichkeiten und der politischen Macht zu einer zunehmenden Ungleichheit und Schichtung sowohl zwischen als auch innerhalb von Ländern.

Im Laufe der Zeit vergrößert sich die Kluft zwischen einer international vernetzten, kapitalintensiven Gesellschaft und einer zersplitterten Ansammlung

einkommenschwacher, schlecht ausgebildeter Gesellschaften, die in einer arbeitsintensiven, technologiearmen Wirtschaft arbeiten. Der soziale Zusammenhalt nimmt ab und Konflikte und Unruhen werden immer häufiger. Die technologische Entwicklung ist in der Hightech-Wirtschaft und in den Hightech-Sektoren hoch. Der global vernetzte Energiesektor diversifiziert sich, wobei sowohl in kohlenstoffintensive Brennstoffe wie Kohle und Öl als auch in kohlenstoffarme Energiequellen investiert wird. Die Umweltpolitik konzentriert sich auf lokale Probleme in Gebieten mit mittlerem und hohem Einkommen.

Die Kombination aus einer gewissen Entwicklung von kohlenstoffarmen Optionen und Fachwissen und einer gut integrierten internationalen politischen und wirtschaftlichen Klasse, die in der Lage ist, schnell und entschlossen zu handeln, bedeutet, dass die Herausforderungen für die Eindämmung gering sind. Die Herausforderungen für die Anpassung sind jedoch groß aufgrund der großen Bevölkerungsanteile auf niedrigem Entwicklungsniveau und mit begrenztem Zugang zu wirksamen Institutionen zur Bewältigung wirtschaftlicher oder ökologischer Belastungen [21].

Der **SSP5 „Entwicklung mit fossilen Brennstoffen- Auf der Autobahn“** (hohe Herausforderungen für die Eindämmung, geringe Herausforderungen für die Anpassung) ist durch eine Welt gekennzeichnet, die zunehmend auf wettbewerbsfähige Märkte, Innovation und partizipative Gesellschaften vertraut, um raschen technologischen Fortschritt und die Entwicklung des Humankapitals als Weg zur nachhaltigen Entwicklung zu erreichen. Die globalen Märkte sind zunehmend integriert. Gleichzeitig geht das Streben nach wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung einher mit der Ausbeutung der reichlich vorhandenen fossilen Brennstoffe und der Einführung ressourcen- und energieintensiver Lebensstile in der ganzen Welt.

All diese Faktoren führen zu einem raschen Wachstum der Weltwirtschaft. Die internationale Mobilität wird durch die schrittweise Öffnung der Arbeitsmärkte erhöht, da die Einkommensunterschiede abnehmen. Die starke Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und das Fehlen eines globalen Umweltbewusstseins führen zu hohen Herausforderungen bei der Abschwächung. Die menschliche Entwicklung, robustes Wirtschaftswachstum und eine hochtechnisierte Infrastruktur führen dazu, dass die Anpassung an einen möglichen Klimawandel relativ gering ist [21].

3.5. NGFS und Zusammenhang zu RCP/SSP

Basierend auf den repräsentativen Konzentrationspfaden (RCP) und den gemeinsamen sozioökonomischen Pfaden (SSP) wurde das Rahmenwerk der NGFS-Szenarien entwickelt [24]. Das Network for Greening the Financial System (NGFS) [25] ist ein internationales Gremium von Zentralbanken und Aufsichtsbehörden, das sich der Integration von Umwelt- und Klimarisiken in die Finanzsysteme widmet. Das Ziel des NGFS ist es, die Finanzwirtschaft in ihrem Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und zum Schutz vor Klima-bezogenen Risiken zu unterstützen. Die NGFS-Szenarien sind ein wichtiges Werkzeug, um dieses Ziel zu erreichen, indem sie helfen, Klima-bezogene Risiken und Chancen für die Finanzwirtschaft zu identifizieren und zu verstehen. Alle NGFS-Szenarien

basieren auf den Annahmen des "mittleren Weges" der SSP (SSP2). Je nach Szenario basieren die NGFS-Szenarien auf RCP2.6 (orderly and disorderly Szenarien) oder RCP6.0 (current policies⁶) [26].

Die NGFS-Szenarien versuchen einen gemeinsamen Ausgangspunkt für die Analyse von Klimarisiken für die Wirtschaft und das Finanzsystem zu bieten. Sie sollen helfen, zukünftige Risiken zu beleuchten und das Finanzsystem auf mögliche Schocks vorzubereiten. Wichtig ist, dass die NGFS-Szenarien keine Prognosen darstellen, sondern vielmehr darauf abzielen, die Grenzen von glaubwürdigen, zukünftigen Entwicklungen für die Risikobewertung im Finanzsektor zu erkunden [27]. Die betrachteten Szenarien stellen weder die wahrscheinlichsten noch unbedingt die wünschenswertesten Entwicklungen dar.

3.6. Überblick NGFS Szenarien

Die NGFS-Szenarien umfassen den Zeitraum von 2020 bis 2100 und beschreiben geordnete („orderly“), ungeordnete („disorderly“) und "Hot House World"-Pfade. Diese Szenarien wurden bewusst ausgewählt, um die Bandbreite von Risiken durch Klimaveränderungen aufgrund von Übergangsrisiken und physischen Risiken zu zeigen.

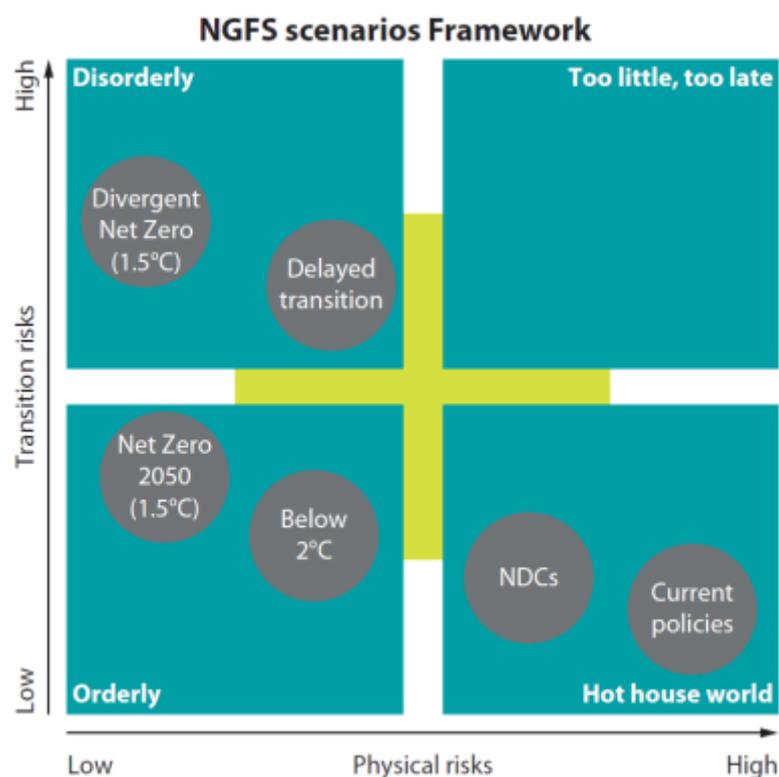


Abbildung 11. Übersicht der NGFS Szenarien. Szenarien sind in Kreisform dargestellt und entsprechend ihrer Übergangs- und physischen Risiken positioniert [25]

Die geordneten Szenarien gehen von zukünftigen Entwicklungspfaden mit einer Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur um (weit)

⁶ Eine Beschreibung der Maßnahmen im Szenario „current policies“ findet man unter: <https://climatepolicydatabase.org/about-legal>

weniger als 2°C über dem vorindustriellen Niveau aus. Dazu müssten die globalen Emissionen bis 2030 jährlich um 3% sinken [22]. Der Übergang zu einer niedrigen CO₂-Wirtschaft erfolgt in geordneter Weise und die Maßnahmen werden sofort umgesetzt. In diesen Szenarien steigen die Emissionspreise allmählich.

Die ungeordneten Szenarien zeigen die Risiken, die sich aus einer späten oder uneinheitlichen Umsetzung von Maßnahmen zum Kampf gegen den Klimawandel ergeben. Die Ziele des Pariser Abkommens werden erreicht, aber verbunden mit höheren Kosten, da die Maßnahmen entweder spät und abrupt oder uneinheitlich in den Sektoren umgesetzt werden. In beiden Szenarien steigen die Emissionspreise gegenüber den geordneten Szenarien mit vergleichbaren Temperaturzielen stärker an, in dem uneinheitlichen Szenario auf bis 700 US-Dollar pro Tonne CO₂ in 2050, was zu höheren Übergangsrisiken führt [22].

Die Szenarien "Hot house World" zeigen die Auswirkungen eines Scheiterns des Pariser Klimaabkommens. In diesem Szenario werden nur die aktuellen Maßnahmen fortgeführt und die Emissionen steigen stetig an, was zu einer Erhöhung der geschätzten Mediantemperatur von etwa 3,5°C bis 2100 führt [22]. Der Preisanstieg für Kohlenstoff ist unbedeutend und die wirtschaftlichen Akteure ändern ihr Verhalten nicht. Das Scheitern bei der Überführung in eine kohlenstoffarme Wirtschaft hat akute Auswirkungen, wie die zunehmende Häufigkeit und Schwere von klimabedingten Wetterereignissen (beispielsweise Stürme, Überschwemmungen oder Hitzewellen) und chronische Auswirkungen wie irreversible langfristige Veränderungen in Klimamustern (z.B. Ozeanversauerung, ansteigende Meeresspiegel oder Veränderungen in Niederschlägen). Es wird erwartet, dass zehn bis zwanzig Mal mehr Menschen Gefahren wie Hitzewellen, Dürren und Flussüberschwemmungen ausgesetzt sind, was zu erhöhten Schäden führt. Allein die direkten Verluste durch Flussüberschwemmungen werden sich bis zum Ende des Jahrhunderts weltweit verdoppeln. Diese Veränderungen in Exposition und Verlusten sind ungleichmäßig über die Regionen verteilt, wobei Südasien die größten Zunahmen bei der Gesamtexposition erwartet.

3.7. Umfang und Modellierung der NGFS-Szenarien

Die NGFS-Klimaszenarien umfassen Übergangspfade („Transition Pathways“), Auswirkungen des Klimawandels auf die physische Umwelt und wirtschaftliche Indikatoren.

Die Übergangspfade geben Auskunft darüber, wie sich das Energiesystem und die Landnutzung aufgrund von unterschiedlichen Klimapolitik- und Technologietrends verändern werden. Dazu wurden drei integrierte Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Models, IAMs) verwendet. Diese Modelle enthalten typischerweise Daten in 5-Jahres-Schritten bis zum Ende des Jahrhunderts und liefern Schätzungen für Temperaturentwicklungen aufgrund des Ausstoßes von Treibhausgasen. Die Daten können beispielsweise Auskunft darüber geben, wann der Einsatz von fossilen Brennstoffen abnehmen und sinken wird, wie hoch die Emissionspreise sein müssten oder wie viel Investitionen in das Energiesystem benötigt werden. Alle Übergangswege-Daten können mithilfe des NGFS IIASA Scenario Explorer [28] untersucht werden. Eine detaillierte Beschreibung der im NGFS-Kontext eingesetzten Modelle folgt in Kapitel 4.3.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die physische Umwelt (Climate Impact Data) für die NGFS-Szenarien wurden aus dem Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) abgeleitet. Diese Daten wurden darüber hinaus mithilfe des CLIMADA-Modells um die möglichen Verluste durch Flussüberflutungen und tropische Wirbelstürme erweitert [24]. Alle Klimaauswirkungsdaten bis zum Ende des Jahrhunderts können mithilfe des NGFS CA Climate Impact Explorer [29] untersucht werden und können mit anderen häufig verwendeten Szenarien verglichen werden (s. Kapitel 4.5).

Die drei NGFS-IAMs (REMIND-MAgPIE, MESSAGE-GLOBIOM und GCAM) enthalten makroökonomische Modelle, die die möglichen Auswirkungen von Übergangsrisiken auf das langfristige Wachstumspotential quantifizieren. NGFS hat dies mithilfe des NiGEM-Modells auf viele andere traditionelle Makro-Finanzvariablen ausgeweitet. Die Übergangsdaten (Einnahmen aus Kohlenstoffsteuer und Energieverbrauch) wurden aus den NGFS-IAMs bezogen. Die physikalischen Daten wurden anhand der IAM-Ergebnisse und der EM-DAT-Katastrophen-Datenbank berechnet und aus der akademischen Literatur bezogen [24].

Die gesamte Modell-Infrastruktur der NGFS-Szenarien wird in der folgenden Grafik dargestellt:

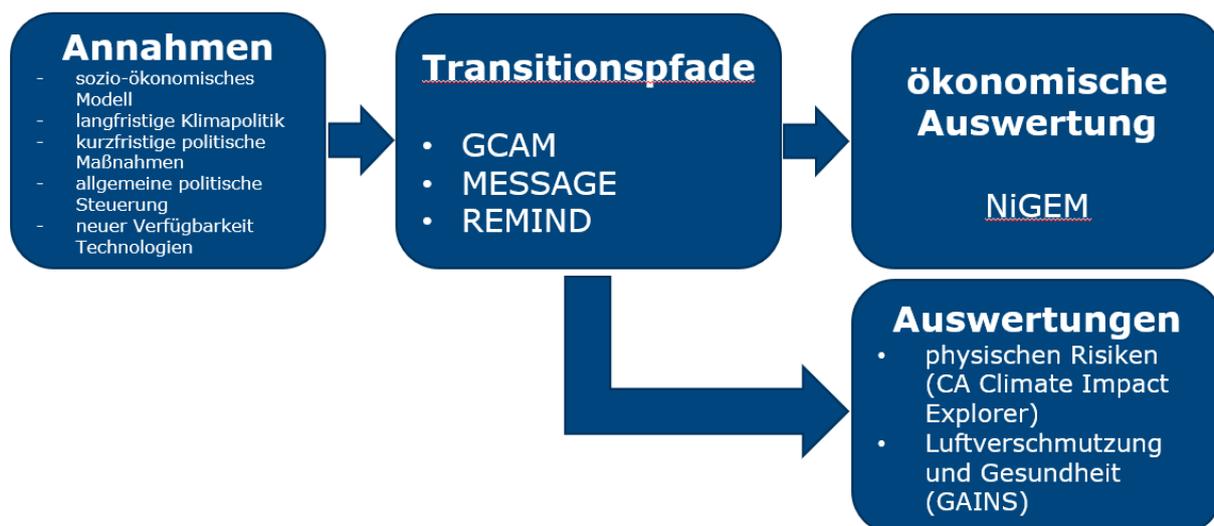


Abbildung 12. Aufbau der NGFS-Szenario-Erzeugung

3.8. Aktueller Stand der NGFS-Szenarien

Die NGFS-Klimaszenarien werden regelmäßig mit den neuesten wirtschaftlichen und klimatischen Daten, Modellversionen und politischen Entwicklungen aktualisiert. Dies geschah zuletzt im Jahr 2022, um z.B. die neuen nationalen Verpflichtungen zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen auf der COP26 im November 2021 widerzuspiegeln. Die neuen Szenarien berücksichtigen auch die neuesten Trends bei erneuerbaren Energietechnologien (z.B. Solar- und Windenergie) und wichtigen Schlüsseltechnologien zur Abschwächung des Klimawandels. Die aktuellen Daten berücksichtigen jedoch noch nicht den Krieg in der Ukraine, da die Lage und ihre langfristigen Folgen noch unklar sind und daher schwer zu modellieren sind [25].

Weitere Veränderungen resultieren aus der verbesserten Modellierung von physischen Risiken. Die Schätzungen von BIP-Verlusten aufgrund von chronischen Risiken berücksichtigen nun umfassender Modellunsicherheit. Zusätzlich bieten die NGFS-Szenarien erstmals seit ihrer Einführung eine indikative Illustration darüber, wie sich die akuten physischen Risiken im Laufe der Szenarien entwickeln könnten. Akute physische Risiken wurden inkludiert über die Integration von stochastischen Schocks aufgrund historischer Daten und Multiplikatoren zur Ableitung zukünftiger Trends.

Schließlich werden Übergangsrisiken in bestimmten Sektoren, nämlich Transport und Industrie, nun mit größerer Granularität dargestellt.

4. Verfügbare Modelle

Im Rahmen von Klimaszenarien gibt es unterschiedliche Arten von Modellen. Während für die Berichterstattung des IPCC die globalen Auswirkungen auf das Klimasystem und deren Gründe im Vordergrund stehen, liegt der Fokus von NGFS auf einer Beschreibung der transitorischen und physischen Risiken. Daher spielen in den Modellen des NGFS (IAM's und NiGEM) insbesondere globale makro-ökonomische Aspekte eine wichtige Rolle.

In diesem Kapitel wollen wir die wichtigsten Modelle, die z. Zt. in den unterschiedlichen Bereichen zum Einsatz kommen, beschreiben.

Die folgende Tabelle soll einen Überblick über die unterschiedlichen Modelle geben:

	<i>(reine) Klimamodelle</i>	<i>IPCC</i>	<i>NGFS</i>
<i>Input</i>	Emissions-/Konzentrations-Szenarien	SSP-Szenarien	SSP2-Szenario, weitere klimapolitische und ökonomische Annahmen
<i>Modelle</i>	Energiebilanzmodelle, GCM	IAM ermitteln Emissions-Szenarien, die in RCP-Szenarien übertragen werden	3 IAM's (GCAM, MESSAGE-GLOBIOM, REMIND-MagPIE) liefern Emissions- und globale Temperaturentwicklung sowie Input für NiGEM und CIE
<i>Ergebnis</i>	Globale Temperaturentwicklung, Niederschläge, Anstieg des Meeresspiegels	Globale Temperaturentwicklungen für SSPx-y-Szenarien	Globale Temperaturentwicklung, makro-ökonomische Kennzahlen sowie Auswirkungen der physischen Risiken

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Modelltypen

4.1. Klimamodelle

Globale Klimaprojektionsmodelle liefern Simulationen des Klimasystems der Erde mit dem Ziel, den Einfluss externer Antriebe (z. B. CO₂-Emission, Sonneneinstrahlung, Vulkanausbrüche oder Waldbrände) auf die globale Erwärmung zu zeigen.

Bereits vor mehr als 100 Jahren entwickelte der schwedische Physiker Svante Arrhenius eines der ersten globalen Klimamodelle, das den Zusammenhang zwischen CO₂-Emission und globaler Erwärmung bereits im Jahr 1896 aufzeigte [1]. Die Klimamodelle haben sich seitdem auch aufgrund der deutlich verbesserten Rechenkapazitäten stark weiterentwickelt. Neben sehr komplexen Klimamodellen gibt es aber auch einfache Modelle, die zum grundsätzlichen Verständnis der Zusammenhänge dienen können [30].

4.1.1. Energiebilanzmodelle

Ein Energiebilanzmodell beschreibt die Strahlungsprozesse in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche. Die Erde gewinnt Energie durch die Sonneneinstrahlung (kurzwellige Strahlung); sie verliert aber auch wieder Energie, indem sie, abhängig von ihrer Temperatur, Wärme abstrahlt (langwellige Strahlung). Die ausgehende Strahlung hängt dabei von der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und dabei insbesondere vom THG-Gehalt in der Atmosphäre ab. Da im Gleichgewicht die eingehende und ausgehende Strahlung gleich sein müssen, lässt sich mit Hilfe eines Energiebilanzmodells die globale durchschnittliche Oberflächentemperatur berechnen. Zudem kann man ermitteln, um wieviel sich die Temperatur z. B. bei einer Verdopplung des CO₂-Gehalts⁷ in der Atmosphäre erhöhen würde.

Diese Temperaturerhöhung wird, nach dem IPCC, als Klimasensitivität bezeichnet. Vom IPCC wird im AR6 [**Fehler! Textmarke nicht definiert.**] hierbei ein Wert von 3 °C, mit einer wahrscheinlichen Bandbreite von 2,5 °C bis 4 °C angegeben.

Hierbei wird zwischen der Gleichgewichtsklimasensitivität (engl. *Equilibrium Climate Sensitivity* (ECS)) und der transienten Klimasensitivität (engl. *Transient Climate Response* (TCR)) unterschieden. Wegen der langen Zeit bis zur Einstellung des Gleichgewichts ist die TCR für die Einschätzung von Klimafolgen von größerer Relevanz. Nachteilig wird die Abhängigkeit der Klimasensitivität vom Klimazustand angesehen, die durch verschiedene Rückkopplungseffekte hervorgerufen wird.

4.1.2. GCM

Im Gegensatz zu den einfachen Energiebilanzmodellen sind die sogenannten GCM (engl. General Circulation Model) komplexe Klimamodelle, die die physikalischen und biogeochemischen Prozesse in den einzelnen Subsystemen des Klimasystems (der Atmosphäre, den Ozeanen, Eis und Schnee, der Vegetation und dem Boden) in getrennten Modellen beschreiben und dann miteinander koppeln (s. Abbildung 13).

⁷ Zur Vereinfachung wird das Erwärmungspotential anderer Gase als CO₂ als CO₂ Äquivalent (CO₂e) angegeben, das die verschiedenen Erwärmungspotentiale berücksichtigt.

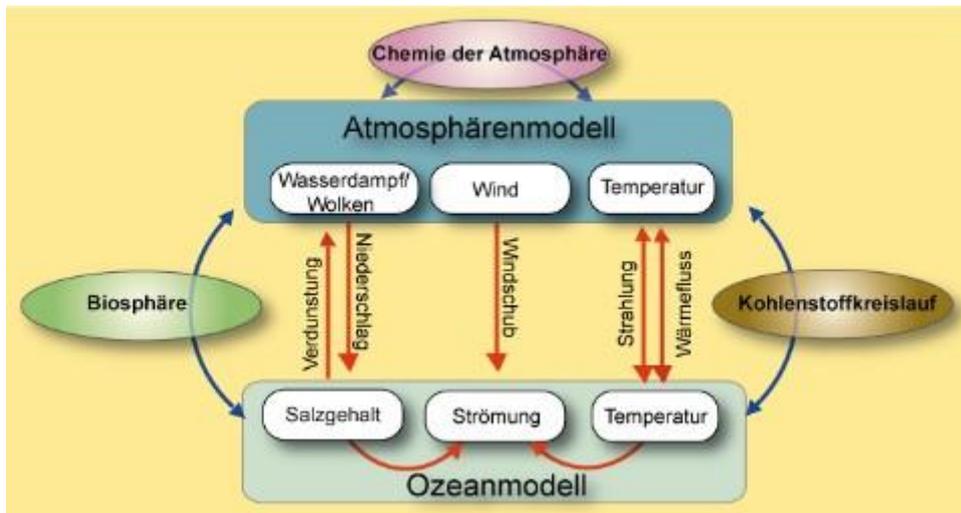


Abbildung 13. Schematische Darstellung der *General Circulation Models*

Die wichtigsten Komponenten der GCM sind das Atmosphären- und das Ozeanmodell. Das Atmosphärenmodell berechnet die atmosphärischen Parameter wie ein- und ausgehende Strahlung, Lufttemperatur, Luftdruck, Wind usw. Zudem werden Prozesse wie Wolkenbildung und -bedeckung ermittelt und deren Wechselwirkung mit allen anderen Parametern innerhalb des Atmosphärenmodells berücksichtigt. Das Ozeanmodell simuliert die Wassertemperatur, den Salzgehalt, die Meeresströmung. Über den Austausch von Energie (Strahlung und Wärmefluss), Impuls (Windschub) und Stoffflüsse (Verdunstung und Niederschlag) interagieren die beiden Modelle miteinander. Daher ist für eine möglichst realistische Simulation des Klimasystems eine sehr gute Abbildung der Prozesse in diesen beiden Modellen erforderlich.

In den aktuellen Zirkulationsmodellen werden auch weitere Komponenten wie Aufbau- und Abschmelzprozesse von Land- und Meereis (Kryosphärenmodell), Vorgänge im Zusammenhang mit der Vegetation sowie Grundwasser- und Bodeneigenschaften (Landmodell) und ein Modell für den Einfluss von Aerosolen berücksichtigt.

4.2. CMIP6 (IPCC-Modelle)

Das CMIP6 (engl. Coupled Model Intercomparison Project) ist die 6. Phase eines globalen Projektes, das 1995 vom Weltklimaforschungsprogramm (WCRP, World Climate Research Programme) ins Leben gerufen wurde, um Klimaforschern eine Datenbank mit gekoppelten globalen Zirkulationsmodellen zur Verfügung zu stellen. Am CMIP-Prozess nehmen aktuell insgesamt 134 Institutionen (z. B. nationale meteorologische Zentren oder Forschungsinstitute) aus der ganzen Welt teil, die ihre Modelle mit einem abgestimmten Satz von Input-Parametern (sogenannte „Forcings“) betreiben. In aktuell 53 Modellierungszentren werden standardisierte Ergebnisse erzeugt und diese werden zwischen den Modellierungszentren ausgetauscht und verglichen. Das grundsätzliche Ziel der CMIP-Daten ist insbesondere ein besseres Verständnis des Klimas inkl. seiner Variabilität und Veränderung sowie Aufschluss über die Reaktion des Klimasystems auf Antrieb. Darüber hinaus soll der Einfluss des Klimawandels auf die Gesellschaft und

Umwelt im Hinblick auf die Auswirkungen, die benötigten Anpassungen und die Vulnerabilität genauer untersucht werden.

Um diese Ziele zu erreichen, werden umfangreiche Validierungen der CMIP-Ergebnisse vorgenommen. Dafür werden zum einen die Ergebnisse verschiedener Modelle bei Vorgabe ähnlicher Input-Parameter analysiert. Zum anderen werden mit den Modellen Simulationen von 1850 bis in die jüngere Vergangenheit durchgeführt, um die Güte der Modelle im Hinblick auf die tatsächlichen Beobachtungen zu prüfen. Darauf aufbauend werden die Gründe und Folgen (auch für die Aussagekraft der Klimaprojektionen) von Modellverzerrungen analysiert. Als weiteres Element zur Modellvalidierung werden Sensitivitätsberechnungen, d. h. Simulationen desselben Experimentes mit demselben Modell aber leicht variierenden Modelleinstellungen, durchgeführt. Auch die Ergebnisse dieser Sensitivitätsberechnungen helfen beim Verständnis der Modellergebnisse. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden dann die zukünftigen Klimaänderungen unter Berücksichtigung der natürlichen Klimaschwankungen, der Vorhersagekraft der Modelle sowie der Unsicherheit in den Szenarien bewertet.

Um die Konsistenz zu früheren Modellrechnungen (z. B. CMIP5) aufrechtzuerhalten, wird eine Menge gemeinsamer Experimente, das DECK (Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima) und historische CMIP-Simulationen (1850 bis in die Gegenwart) definiert, anhand derer die Abweichungen zu vorherigen Modellergebnissen untersucht werden können.

Bei den in den Klimamodellen durchgeführten Experimenten handelt es sich um sogenannte **SSP-Experimente**. Ein Experiment eines SSP-Szenarios kann als zwei Pfade angesehen werden, ein SSP-Pfad und ein RCP-Pfad. Beide Pfade werden durch drei Ziffern beschrieben, aus denen sich das Experiment SSPx-y.z zusammensetzt:

x = SSP-Narrativ für die sozioökonomische Abschätzung der Zukunft

y.z = RCP-Klimaantriebspfad, einem Zukunftspfad mit einem Strahlungsantrieb von y.z W/m² im Jahr 2100, der dem Experiment zugrunde liegt

SSPx-y.z ist ein Szenario, das sich von 2015 bis 2100 erstreckt. Es wird mit einem gekoppelten allgemeinen Zirkulationsmodell für Atmosphäre und Ozean (AOGCM, Atmosphere-Ocean General Circulation Model) durchgeführt. Der Antrieb für die CMIP6-SSP-Experimente wird von möglichen zukünftigen sozioökonomischen Entwicklungen (SSPx) beschrieben, die mögliche Konzentrationspfade atmosphärischer Treibhausgase abbilden. Grundsätzlich kann mehr als ein SSP zu einem bestimmten RCP-Szenario führen. Die möglichen Kombinationen aus SSP- und RCP-Szenarien werden durch gekoppelte konsistente Modelle (Erdsystemmodelle und IAM) berechnet, die das Klimasystem, die Ökosysteme, die Wirtschaft und die Landnutzung abbilden.

Name des Experimentes	Ausführliche Beschreibung
------------------------------	----------------------------------

historisch	Das historische Experiment ist eine Simulation der jüngsten Vergangenheit von 1850 bis 2014, die mit einem gekoppelten allgemeinen Zirkulationsmodell für Atmosphäre und Ozean (AOGCM) durchgeführt wird. In den historischen Simulationen werden dem Modell veränderte Bedingungen aufgezwungen (die mit den Beobachtungen übereinstimmen), die die atmosphärische Zusammensetzung, die Landnutzung und den solaren Antrieb umfassen. Die Anfangsbedingungen für die historische Simulation werden der vorindustriellen Kontrollsimulation (piControl) entnommen, und zwar an einem Punkt, an dem die verbleibende Länge von piControl ausreicht, um über den Zeitraum der historischen Simulation hinaus bis zum Ende künftiger "Szenario"-Simulationen mit demselben Modell zu reichen. Die historische Simulation wird verwendet, um die Leistung des Modells im Hinblick auf das gegenwärtige Klima und den beobachteten Klimawandel zu bewerten.
SSP5-8.5	Das SSP5-8.5-Szenario stellt das obere Ende der plausiblen zukünftigen Treibhausgaspfade dar. SSP5-8.5 ist vergleichbar mit dem CMIP5-Experiment RCP8.5.
SSP3-7.0	Das SSP3-7.0-Szenario stellt das mittlere bis hohe Ende der plausiblen zukünftigen Treibhausgaspfade dar. SSP3-7.0 füllt eine Lücke in den CMIP5-Antriebspfaden, die besonders wichtig ist, weil sie ein Antriebsniveau darstellt, das mehreren SSP-Basispfaden (ohne Minderungsmaßnahmen) gemeinsam ist.
SSP2-4.5	Das SSP2-4.5-Szenario stellt den mittleren Teil der plausiblen zukünftigen Treibhausgaspfade dar. SSP2-4.5 ist vergleichbar mit dem CMIP5-Experiment RCP4.5.
SSP1-2.6	Das SSP1-2.6-Szenario stellt das untere Ende der plausiblen zukünftigen Treibhausgaspfade dar. SSP1-2.6 stellt aus Sicht der Nachhaltigkeit eine "bestmögliche" Zukunft dar.
SSP4-6.0	Das SSP4-6.0-Szenario füllt den Bereich der mittleren plausiblen zukünftigen Treibhausgaspfade aus. Das SSP4-6.0-Szenario definiert das untere Ende des Antriebsbereichs für unverminderte SSP-Basiszenarien.
SSP4-3.4	Das SSP4-3.4-Szenario füllt eine Lücke am unteren Ende des Spektrums plausibler zukünftiger Treibhausgaspfade. SSP4-3.4 ist für die Eindämmungspolitik von Interesse, da sich die Kosten für die Eindämmung des Klimawandels zwischen 4,5 W/m ² und 2,6 W/m ² erheblich unterscheiden.
SSP5-3.4OS	Das SSP5-3.4OS-Szenario geht im Jahr 2040 vom SSP5-8.5-Szenario ab und wendet dann deutlich negative Nettoemissionen an. SSP5-3.4OS untersucht die klimawissenschaftlichen und klimapolitischen Auswirkungen eines Höhepunkts und eines Rückgangs des Treibhauseffekts im 21. Jahrhundert. SSP5-3.4OS füllt eine Lücke in den bestehenden Klimasimulationen, indem es die

	Auswirkungen einer erheblichen Überschreitung des Strahlungsantriebs im Vergleich zu einem längerfristigen Ziel untersucht.
SSP1-1.9	as SSP1-1.9-Szenario füllt eine Lücke am unteren Ende der Bandbreite plausibler zukünftiger Treibhausgaspfade. Das SSP1-1.9-Szenario wird im Jahr 2100 deutlich unter dem SSP1-2.6-Szenario liegen. Es besteht ein politisches Interesse an Szenarien mit geringem Treibhauseffekt, die als Grundlage für ein mögliches Ziel der Begrenzung der mittleren globalen Erwärmung auf 1,5°C über dem vorindustriellen Niveau auf der Grundlage des Pariser COP21-Abkommens dienen könnten.

Tabelle 2. Beschreibung der SSP-Experimente

Die CMIP6-Daten dienen schlussendlich auch zur wissenschaftlichen Analyse für die Berichterstattung des IPCC. Die Klimaprojektionen im Rahmen des CMIP6 untermauern dabei die Schlussfolgerungen des IPCC-Reports, dass die fortgesetzte Emission von Treibhausgasen zu weiterer globaler Erwärmung und langanhaltenden Veränderungen in allen Komponenten des Klimasystems führen wird. Die Wahrscheinlichkeit schwerwiegender, weltweiter und unumkehrbarer Auswirkungen für Mensch und Ökosystem steigt.

Die CMIP-Daten werden seit 2019 veröffentlicht [46].

4.3. IAM in NGFS-Szenarien

Der Klimawandel und die sozioökonomische Entwicklung sind eng miteinander verflochten. Soziale und ökonomische Aktivitäten sind die Haupttreiber des Klimawandels. Umgekehrt aber können z. B. der Anstieg des Meeresspiegels oder die Zunahme extremer Wetterereignisse Auswirkungen auf die sozialen und ökonomischen Aktivitäten der Menschen haben. Die folgende Grafik veranschaulicht diesen Zusammenhang.

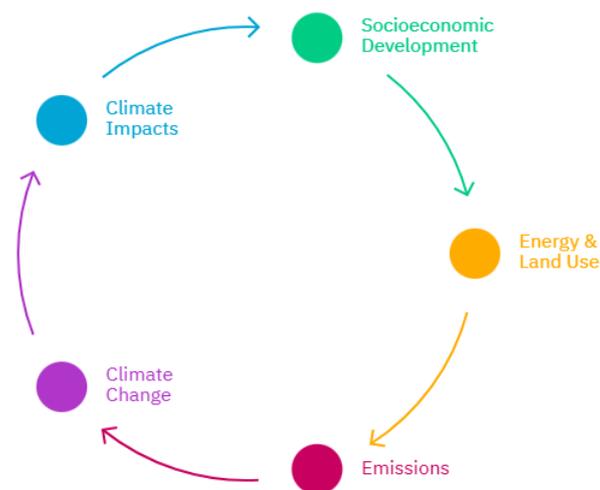


Abbildung 14. Treiber des Klimawandels [31]

Die **sozioökonomische Entwicklung** umfasst eine Vielzahl von Faktoren wie Bevölkerung, Wirtschaftstätigkeit, Verstädterung, Bildung, soziale Gleichheit, Konsumverhalten, Lebensstile und Infrastruktur. Diese Faktoren bestimmen die Art und Weise, wie wir leben, einschließlich der Art und Weise, wie wir Energie und Land nutzen. Sozioökonomische Szenarien werden zur Beschreibung möglicher sozioökonomischer Zukünfte verwendet (s. Abschnitt 3.4).

Energie und Flächennutzung sind die Hauptquellen für menschliche Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe, die beide das Klima der Erde beeinträchtigen. Zu den anthropogenen Treibhausgasemissionen gehören Kohlendioxid aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Abholzung von Wäldern, Methan aus der Viehhaltung, Reisfeldern, Abfalldeponien und der Förderung fossiler Brennstoffe sowie Distickstoffoxid aus landwirtschaftlichen Quellen. Projektionen der künftigen Energie- und Flächennutzung und der damit verbundenen Emissionen werden aus Energiewirtschafts- und Flächennutzungsmodellen abgeleitet, die häufig zu integrierten Bewertungsmodellen zusammengefügt werden.

Die **Emissionen** erhöhen die Konzentration von Treibhausgasen und Luftschadstoffen in der Atmosphäre. Dadurch ändert sich das Gleichgewicht zwischen dem Energiefluss des einfallenden Sonnenlichts und der ausgehenden Wärmestrahlung am oberen Rand der Atmosphäre, was zu einem Strahlungsantrieb des Klimasystems führt. Modelle des Kohlenstoffkreislaufs, der Atmosphärenchemie, des atmosphärischen Transports und des Strahlungstransfers werden verwendet, um Emissionsprojektionen in Konzentrations- und Strahlungsprojektionen umzuwandeln.

Der **Klimawandel** ist durch steigende Temperaturen und veränderte Niederschlagsverteilungen gekennzeichnet, die durch den Strahlungsantrieb des Klimasystems verursacht werden. Erdsystemmodelle und gekoppelte Klimamodelle werden verwendet, um Projektionen des zukünftigen Klimawandels aus Emissions- und Strahlungsantriebsprojektionen abzuleiten.

Höhere Temperaturen und veränderte Niederschläge führen zu **Klimaauswirkungen** auf die Abläufe in der Natur und menschliche Systeme, u. a. durch Dürren, Überschwemmungen, Stürme, den Anstieg des Meeresspiegels, die geringere Verfügbarkeit von Süßwasser, Hitzestress und potenzielle großräumige Umgestaltungen von Komponenten des Erdsystems (Kippunkte). Die Erforschung dieser Auswirkungen erfolgt im Rahmen von Klimafolgenstudien, bei denen eine Reihe von Modellen - von Wassertransportmodellen bis hin zu Vegetations- und Landwirtschaftsmodellen - zur Erstellung von Klimafolgenprojektionen eingesetzt werden.

Um genau diesen Zusammenhängen Rechnung zu tragen, liegen den NGFS-Szenarien sogenannte Integrated Assessment Models (IAM) zugrunde. Für die Herleitung der Transition-Pfade nutzt NGFS drei etablierte Modelle, nämlich:

<i>Modell</i>	<i>Entwickler</i>
GCAM Global Change Analysis Model	Joint Global Change Research Institute, PNNL; College Park, MD, US
MESSAGE Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact	International Institute for Applied Systems Analysis; Laxenburg, Austria
REMIND Regionalized Model of Investments and Technological Development	Potsdam Institute for Climate Impacts Research; Potsdam, Germany

Tabelle 3. Entwickler von integrierten Modellen

Alle drei Modelle sind sektorübergreifend konzipiert und haben einen ähnlichen Aufbau. Sie stellen eine Kombination aus folgenden fünf Modellen dar:

- Modell des Energiesystems
- Modell zur Land- und Forstwirtschaft sowie Landnutzung (AFOLU, Agriculture, Forestry and other Landuse)
- Modell des Wassersystems
- Makroökonomisches Modell
- Klimamodell

Die Modelle des Energiesystems, für die Landnutzung und des Wassersystems sind Angebot- und Nachfragemodelle. Um die Klimaziele – abhängig vom jeweiligen Szenario – einhalten zu können, sind Emissionsreduktionen notwendig. Um diese erreichen zu können, stehen in den Modellen Minderungsoptionen bei der Energieversorgung, bei der Energienachfrage sowie im AFOLU-Modell zur Verfügung. Die nachfolgende Tabelle zeigt die verschiedenen Optionen in den drei Modellen auf.

	GCAM	MESSAGEix-GLOBIOM	REMIND-MAGPIE
# Demand side mitigation options	14	16	15
Examples of demand side measures	Energy efficiency improvements, electrification of buildings, industry and transport sectors, CCS in industrial process applications	Energy efficiency improvements, electrification of buildings, industry and transport sectors, CCS in industrial process applications	Energy efficiency improvements, electrification of buildings, industry and transport sectors, CCS in industrial process applications
# Supply side mitigation options	18	20	17
Examples of supply side measures	Solar PV, Wind, Nuclear, CCS, Hydrogen	Solar PV, Wind, Nuclear, CCS, Hydrogen	Solar PV, Wind, Nuclear, CCS, Hydrogen
# AFOLU options	8	8	7
Examples of AFOLU measures	Reduced deforestation/ forest protection/ avoided forest conversion, forest management, methane reductions in rice paddies, nitrogen pollution reductions	Reduced deforestation/ forest protection/ avoided forest conversion, forest management, methane reductions in rice paddies, nitrogen pollution reductions, conservation agriculture	Reduced deforestation/ forest protection/ avoided forest conversion, methane reductions in rice paddies, nitrogen pollution reductions

Abbildung 15. Übersicht der Minderungsoptionen in GCAM, MESSAGEix-GLOBIOM und REMIND-MAGPIE [26]

Alle Modelle berücksichtigen zumindest zwei CDR-Technologien (CDR, Carbon Dioxide Removal), nämlich Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BECCS, Bioenergy with Carbon Capture and Storage) sowie Aufforstung und Wiederaufforstung.

Im Zusammenspiel zwischen Energie- und Landnutzungsmodell sowie des makroökonomischen Modells wird versucht, das Energiesystem so zu optimieren, dass die vorgegebene Energienachfrage unter Einhaltung von Emissionszielen im AFOLU-Sektor zu den niedrigsten Kosten bzw. maximalem Wohlstand befriedigt werden kann. Dabei handelt es sich um einen iterativen Prozess, der in den Modellen mit ökonomischen Gleichgewichtsmodellen umgesetzt ist, d. h. das Modell versucht ein Gleichgewicht aus Angebot und Nachfrage über Herleitung der zugehörigen Marktpreise herzustellen. Im Ergebnis erzeugen die Modelle kosteneffiziente Transition-Pfade, bei denen die Szenario-abhängigen Nebenbedingungen, wie z. B. Begrenzung der globalen Erwärmung auf unter 2°C, technisch-ökonomischer Rahmenbedingen und / oder politischer Maßnahmen, eingehalten werden.

Damit ermöglichen diese Modelle die Analyse komplexer und nichtlinearer Zusammenhänge innerhalb und zwischen den einzelnen Modellkomponenten. Diese Modelle wurden daher auch bereits zu einer Vielzahl von Analysen im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten zur Eindämmung des Klimawandels genutzt und in dabei überprüft.

Eine detaillierte Beschreibung der drei Modelle soll im Folgenden gegeben werden.

4.3.1. GCAM

GCAM ist ein partielles Gleichgewichtsmodell zwischen dem Energie- und dem Landnutzungssystem. Dabei agieren repräsentative Akteure auf Märkten im Modell und geben ihre beabsichtigten Angebote und / oder Nachfragen nach Waren und Dienstleistungen an. GCAM ermittelt dann Marktpreise so, dass Angebot und Nachfrage in einem Gleichgewicht sind. Hierbei handelt es sich um ein dynamisches, rekursives Modell („kurzfristiges“ Modell), d. h. die Entscheidungsträger im Modell kennen die Zukunft nicht. Nach Durchlauf jeder Periode verwendet das Modell den sich daraus ergebenden Zustand der Welt, einschließlich der Folgen durch in der abgelaufenen Periode getroffene Entscheidungen – wie Verknappung der Ressourcen, Entwicklung von Kapitalanlagen und Veränderung der Landschaft – und führt im nächsten Zeitschritt denselben Berechnungsprozess durch. Bei langlaufenden Investitionen werden zukünftige Kapitalerträge, allerdings zu den aktuellen Annahmen, berücksichtigt. GCAM wird in der Regel in Zeitschritten von fünf Jahren betrieben, wobei 2015 das letzte Kalibrierungsjahr ist.

Im Hinblick auf die Berücksichtigung von Minderungsoptionen aus technologischer Sicht unterscheidet sich GCAM von den anderen Modellen dadurch, dass es das einzige Modell ist, das die Nutzung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre z.B. in Biopolymeren vorsieht (Carbon Capture & Utilization (CCU)).

GCAM bildet grundsätzlich die gesamte Welt ab, wird aber mit unterschiedlichen Granularitäten für die verschiedenen Systeme erstellt. Für die Ermittlung der NGFS-Szenarien wird das Energie-Wirtschaftssystem für 32 Regionen weltweit genutzt, das Landnutzungssystem ist in 384 Unterregionen das Wassersystem in 235 Regionen weltweit unterteilt.

Die nachfolgende Grafik zeigt den Aufbau von GCAM.

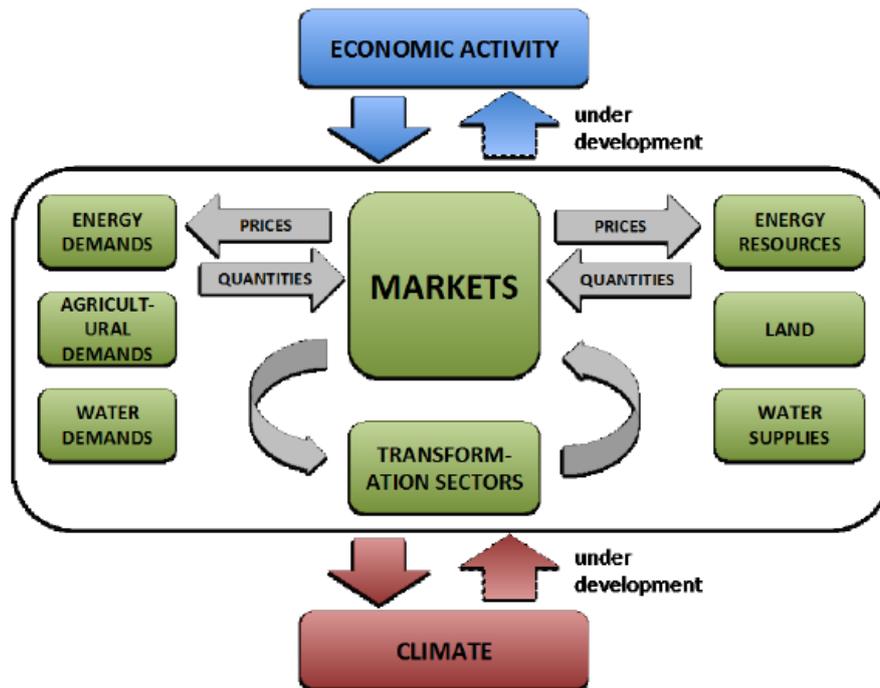


Abbildung 16. Schematische Darstellung des GCAM-Modells [26]

4.3.2. MESSAGEix-GLOBIOM

MESSAGEix-GLOBIOM ist eine Kombination der folgenden fünf Modelle:

- MESSAGE: Modell des Energiesystems
- GLOBIOM: Landnutzungsmodell
- GAINS: Luftverschmutzungs- und Treibhausgasemissionsmodell
- MACRO: makroökonomisches Modell
- MAGICC: einfaches Klimamodell

Die folgende Grafik zeigt das Zusammenspiel der einzelnen Modellkomponenten. Die einzelnen Modelle liefern die Inputs für die anderen Modelle und interagieren miteinander.

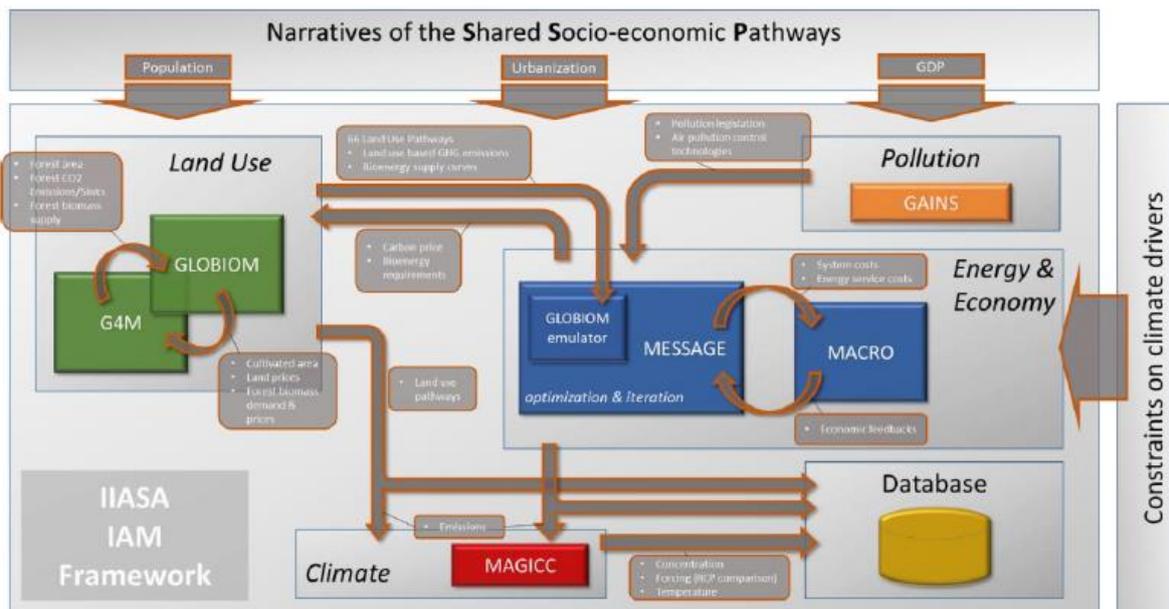


Abbildung 17. Überblick über das IIASA IAM Framework (MESSAGEix-GLOBIOM Modell). Die farbigen Kästchen stellen die jeweiligen spezialisierten Untermodelle dar, die für die Generierung intern konsistenter Szenarien genutzt werden. [26]

Im Folgenden soll die Funktionsweise des Modells grob beschrieben werden:

Die Aufgabe des MESSAGE-Modells besteht darin, das Energiesystem so zu optimieren, dass es die durch das jeweilige Szenario vorgegebene Energienachfrage zu den geringsten Kosten befriedigen kann. MESSAGE führt dabei eine Optimierung in einem iterativen Prozess zusammen mit dem makroökonomischen Modell MACRO, das jeden einzelnen Sektor betrachtet, aus. MACRO liefert die Nachfragerreaktionen, die sich aus den von MESSAGE berechneten Preisen innerhalb des Energiesystems ergeben. Innerhalb des iterativen Prozesses wird der Energiebedarf auf Basis der Energiepreise so angepasst, dass ein Gleichgewicht aus Angebot und Nachfrage entsteht. Dabei werden sich durch die Energiepreise getriebene Energieeffizienz Anpassungen ergeben.

Das GLOBIOM-Modell liefert Informationen über die Flächennutzung und deren Auswirkungen, einschließlich Verfügbarkeit und Kosten für Bioenergie sowie Verfügbarkeit und Kosten für Emissionsreduktionen im AFOLU-Sektor an das MESSAGE-Modell. Diese Informationen werden im Rahmen des iterativen Prozesses genutzt und bestimmen die Bioenergieanforderungen sowie den CO₂-Preis.

Die Auswirkungen des Energiesystems auf die Luftverschmutzung werden in MESSAGE durch Anwendung technologiespezifischer Luftverschmutzungskoeffizienten berücksichtigt, die aus dem GAINS-Modell abgeleitet werden.

Je nach Szenario werden die gesamten Kohlenstoffemissionen (aus allen Sektoren) derart beschränkt, dass das gewünschte Niveau des Strahlungsantriebs erreicht wird (s. rechte Seite in der Abbildung 17). Diese Beschränkung wird in der Optimierung bei der Bestimmung des CO₂-Preises innerhalb des MESSAGE-GLOBIOM berücksichtigt und dann im GLOBIOM-Modell angewandt.

Schließlich werden die kombinierten Ergebnisse für Landnutzung, Energie und Emissionen von MESSAGE und GLOBIOM zusammengeführt und an MAGICC

(Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change), einem weniger komplexen globalem Kohlenstoffkreislauf- und Klimamodell, übergeben, das dann Schätzungen der Klimaauswirkungen in Bezug auf die atmosphärischen Konzentrationen, den Strahlungsantrieb und den globalen mittleren Temperaturanstieg liefert.

Die Modelle werden auf weltweit 11 Regionen angewandt und liefern ihre Ergebnisse in 10-Jahres-Zeitschritten (mit dem Basisjahr 1990).

Im Unterschied zu GCAM handelt es sich bei MESSAGEix-GLOBIOM (genauso wie bei REMIND-MAGPIE) um ein allgemeines Gleichgewichtsmodell, das mit einem intertemporalen Optimierungsalgorithmus (d. h. mit perfekter Voraussicht) gelöst wird. Dadurch können die Modelle Veränderungen, die im Laufe des 21. Jahrhunderts auftreten werden (z. B. steigende Kosten für begrenzte Ressourcen, sinkende Kosten für Solar- und Windtechnologien, steigende CO₂-Preise), vollständig vorhersehen.

4.3.3. REMIND-MAGPIE

REMIND (Regional Model of Investment and Development) simuliert die zukünftige Dynamik innerhalb und zwischen den Systemen Energie, Landnutzung, Wasser, Luftverschmutzung und Gesundheit, Wirtschaft und Klima.

Die nachfolgende Grafik verdeutlicht den Aufbau des Modells.

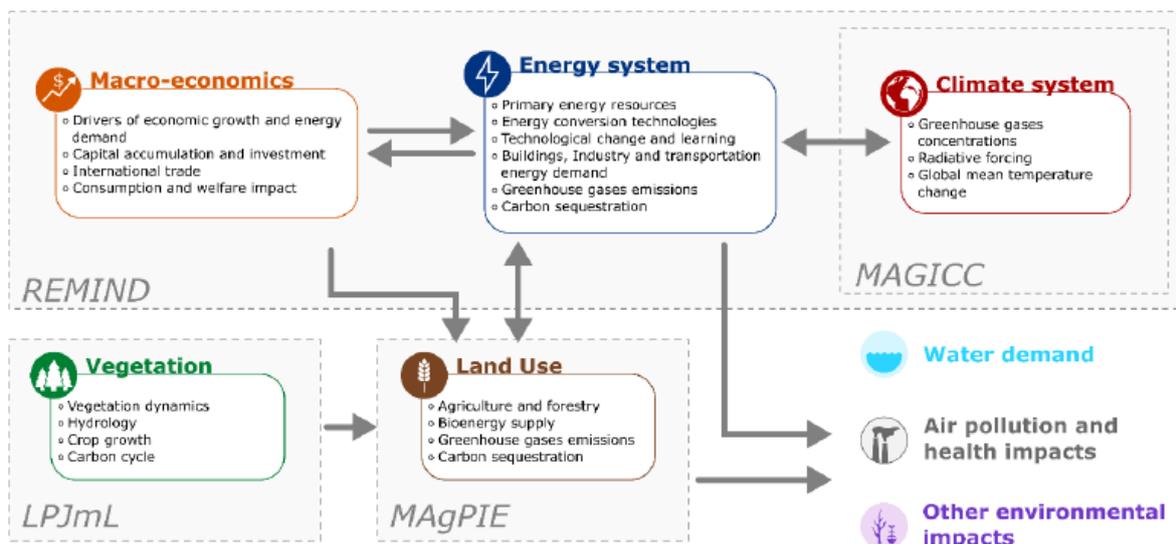


Abbildung 18. Überblick über das REMIND-MagPIE-Modell [26]

Dabei besteht REMIND aus vier Hauptkomponenten:

- Allgemeines energiewirtschaftliches Gleichgewichtsmodell mit perfekter Voraussicht, das ein makro-ökonomisches Wachstumsmodell mit einem technologie-basierten Modell des Energiesystems verknüpft und eine Maximierung des Wohlstands zum Ziel hat. Es deckt 11 Weltregionen ab (s. Abbildung 19), differenziert verschiedene Energietechnologien (fossile, biogene, nukleare und

erneuerbare Energien) und bildet die Dynamik von Wirtschaftswachstum und internationalem Handel ab.

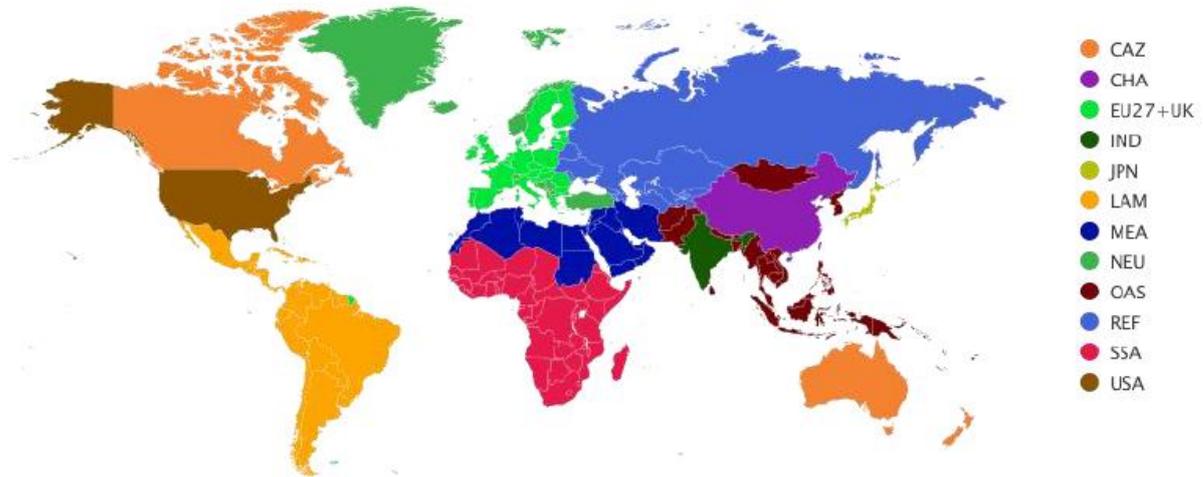


Abbildung 19. Regionale Definitionen im REMIND-Modell [26]

Zudem wird die Anpassung an neue Technologien sowie die dabei entstehenden Anpassungskosten berücksichtigt. Die Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen werden nach Verursachungsquellen dargestellt und werden mit den Aktivitäten in dem Modell des Energiesystems in Verbindung gebracht. In REMIND werden außerdem verschiedene Maßnahmen im Energiesektor (wie z. B. Kraftstoffsteuer, Subventionen für Verbraucher sowie Handel mit Energieressourcen) explizit modelliert.

- b) MAGPIE (Model of Agricultural Production and its Impacts on the Environment) ist ein partielles Gleichgewichtsmodell des Agrarsektors. Es handelt sich um rekursives dynamisches Modell, in dem die landwirtschaftliche Nachfrage für zehn Weltregionen zu minimalen globalen Kosten (inkl. Investitionen für neue Technologien und Kosten für CO₂-Preise) unter Berücksichtigung biophysikalischer und sozioökonomischer Beschränkungen befriedigt werden sollen. Biophysikalische Inputs für MAGPIE, wie landwirtschaftliche Erträge, Kohlenstoffdichten und Wasserverfügbarkeit, werden aus einem dynamischen globalen Vegetations-, Hydrologie- und Pflanzenwachstumsmodell, dem Lund-Potsdam-Jena-Modell für bewirtschaftetes Land (LPJmL), abgeleitet. MAGPIE leitet damit Landnutzungsmuster, zukünftige landwirtschaftliche Ertragssteigerungen, Preise für Nahrungsmittel und Bioenergie sowie Treibhausgasemissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion und Landnutzungsänderungen ab.

Der Ansatz der Kopplung zwischen REMIND und MAGPIE ist darauf ausgelegt, Szenarien mit ausgeglichenen Bioenergie- und Emissionsmärkten abzuleiten. Darüber hinaus entsprechen die Emissionen in REMIND, die sich aus vorgegebenen klimapolitischen Annahmen ergeben, den Treibhausgasemissionen aus dem Landnutzungssektor, die in MAGPIE unter den Emissionspreisen und der Bioenergienutzung abgeleitet werden, die durch dieselbe Klimapolitik vorge-schrieben sind. Das gleichzeitige Gleichgewicht der Bioenergie- und

Emissionsmärkte wird durch eine Iteration von REMIND- und MAgPIE-Simulationen hergestellt, bei der REMIND Emissionspreise und Bioenergienachfrage an MAgPIE liefert und im Gegenzug Landnutzungsemissionen und Bioenergiepreise von MAgPIE erhält.

- c) Das REMIND-Modell ist - wie das MESSAGEix-GLOBIOM – mit dem vereinfachten Klimamodell MAGICC verknüpft, um Änderungen von klimabezogenen Variablen wie der globalen mittleren Oberflächentemperatur abzuschätzen.
- d) Außerdem kann REMIND mit anderen Modellen verknüpft werden Modelle, die die Analyse anderer Umweltauswirkungen wie Wasserbedarf, Luftverschmutzung und gesundheitliche Auswirkungen ermöglichen.

Die abschließende Tabelle liefert noch einmal einen Überblick über die wichtigsten Merkmale der drei IAM's im Rahmen der NGFS-Szenario-Erstellung.

Integrated Assessment Model	GCAM 5.2	MESSAGEix_GLOBIOM 1.0	REMIND1.7-MagPIE3.0
Short name	GCAM	MESSAGEix-GLOBIOM	REMIND-MAgPIE
Solution concept	Partial Equilibrium (price elastic demand)	General Equilibrium (closed economy)	REMIND: General Equilibrium (closed economy) MAgPIE: Partial Equilibrium model of the agriculture sector
Anticipation	Recursive dynamic (myopic)	Intertemporal (perfect foresight)	REMIND: Inter-temporal (perfect foresight) MAgPIE: recursive dynamic (myopic)
Solution method	Cost minimisation	Welfare maximisation	REMIND: Welfare maximisation MAgPIE: Cost minimisation
Temporal dimension	Base year: 2015 Time steps: 5 years Horizon: 2100	Base year: 1990 Time steps: 10 years Horizon: 2100	Base year: 2005 Time steps: 5 (2005-2060) and 10 years (2060-2100) Horizon: 2100
Spatial dimension	32 world regions	11 world regions	11 world regions
Technological change	Exogenous	Exogenous	Endogenous for Solar, Wind and Batteries
Technology dimension	58 conversion technologies	64 conversion technologies	50 conversion technologies

Abbildung 20. Überblick über die wichtigsten Modelleigenschaften [26]

In Kapitel 0 werden die Ergebnisse der NGFS aus den unterschiedlichen Teilmodellen grafisch dargestellt, um die Narrative der einzelnen NGFS-Szenarien zu veranschaulichen. Dabei werden zum einen die Unterschiede zwischen den Szenarien (innerhalb eines IAM) als auch die Unterschiede der drei IAM (für dasselbe Szenario) dargestellt.

4.4. NiGem (Makro-ökonomisches Modell in NGFS)

Die Übergangspfade werden im Rahmen der NGFS-Szenarien von den drei beschriebenen IAM-Teams erstellt: PIK (REMIND-MAgPIE-Modell), IIASA (MESSA-GEix-GLOBIOM-Modell) und UMD (GCAM-Modell). Die ökonomischen Variablen – basierend auf den Outputs der IAM – werden vom Nationalen Institut für Wirtschafts- und Sozialforschung (NIESR, National Institute of Economic and Social Research) erstellt.

Bei NiGem (**N**ational **I**nstitute **G**lobal **E**conometric **M**odel) handelt es sich um ein globales ökonometrisches Modell, welches seit ca. 30 Jahren vom NIESR verwaltet und weiterentwickelt wird ([32]). Dieses Modell hat eine breite Anwender-Gemeinschaft, die von politischen Entscheidungsträgern bis zu den Unternehmen des privaten Sektors reicht, und die NiGem für Wirtschaftsprognosen, Szenarioanalysen oder Stresstests verwendet.

Das NiGem besteht aus einzelnen Ländermodellen für die wichtigsten Volkswirtschaften, die durch den Handel mit Waren und Dienstleistungen sowie integrierte Kapitalmärkte miteinander verbunden sind.

Das Modell berücksichtigt alle OECD-Länder mit Ausnahme von Island und Israel sowie Argentinien, China, Indien, Russland, Hong Kong, Taiwan, Brasilien und Südafrika.

Das Modell bildet über 5.000 Variablen mit quartalsweiser Frequenz ab, u.a. zu den Bereichen volkswirtschaftliche Gesamtrechnung, Handel, öffentlicher Sektor sowie Preise, Zinsen und andere Finanzmarktvariablen.

4.4.1. Allgemeine NiGem-Modellstruktur

Die einzelnen Ländermodelle umfassen u.a. die folgenden Bestandteile:

- Angebot und Nachfrage
- Finanzmärkte
- Arbeitsmärkte
- Staatseinflüsse (Steuern etc.)

Die Modelle der einzelnen Länder sind durch Handelsbeziehungen und die Preisgestaltungen von Vermögenswerten miteinander verbunden. Die folgende Abbildung ([33]) vermittelt einen Überblick über die Modellstruktur, also die wichtigsten Gleichungen und Abhängigkeiten:

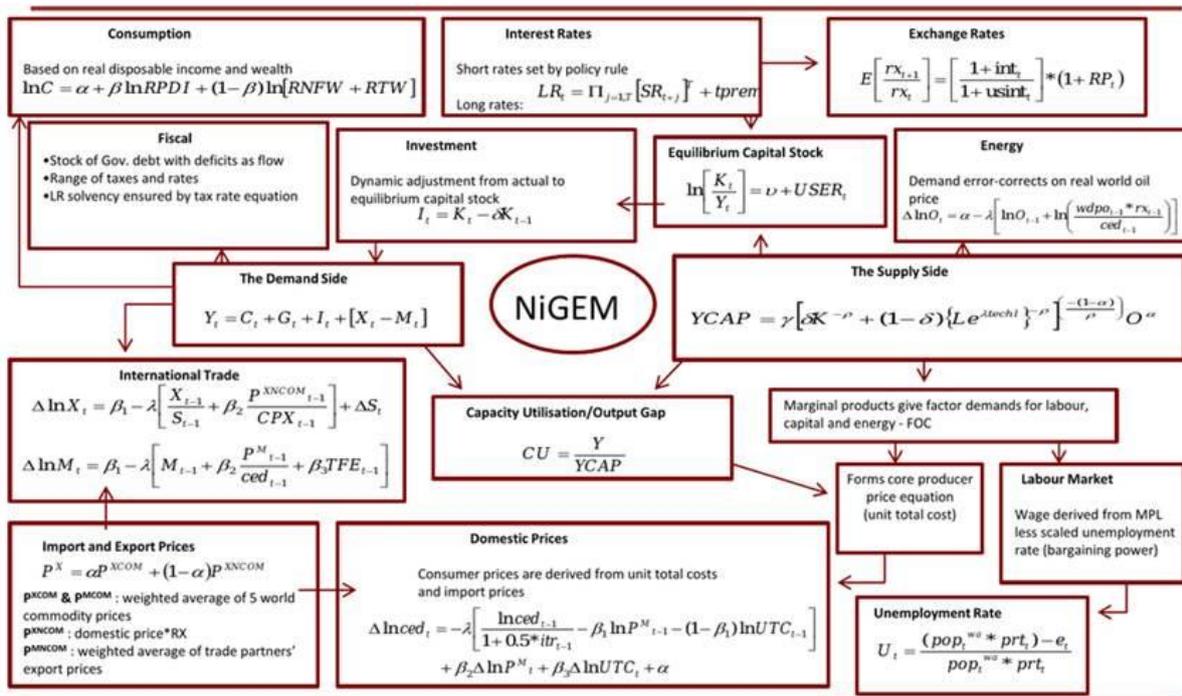


Abbildung 21. Modellstruktur NiGEM

4.4.2. NiGem-Relevanz im Kontext der Klimarisiken bzw. Klimaszenarien

Das NiGem-Modell wird sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern verwendet, um die Auswirkung von Klimaszenarien auf den Finanzsektor, die Versicherungsbranche sowie andere Branchen zu studieren. Hier einige von vielen Beispielen – für detailliertere Informationen s. Anhang A:

- Die Bundesbank analysiert mithilfe von NiGem die Sensitivität des deutschen Finanzsektors, also insbesondere der Banken, Asset Manager und Versicherer, bezüglich klimabezogener Transitionsrisiken ([34]).
- Die Zentralbanken Frankreichs und der Niederlande sowie die UK-Regulierungsbehörde PRA verwenden NiGem, um Klimastresstests herzuleiten. Sie analysieren anhand des Modells, welche finanziellen/ökonomischen Schocks ein Klimastress wie z.B. ein Anstieg des CO₂-Preises auslösen würde ([35]).
- Des Weiteren berechnet etwa die Zentralbank der Niederlande die sogenannten TVF-Faktoren (Transition Vulnerability Factors). Dies sind Risikofaktoren, die die relative CO₂-Abhängigkeit einer Industrie in einem Szenario erfassen. Man beachte, dass der TVF der Gesamtwirtschaft per definitionem gleich Eins ist, während sie z.B. für die Post etwa 0,2 und für den Bergbau etwa 13,5 betragen könnte (s. etwa [35], [36]).

4.4.3. NiGem und Klimarisiken

Die allgemeine Vorgehensweise zur „Übersetzung“ von Klimaszenarien in makroökonomische Szenarien lässt sich anhand dieser Graphik aus [37] illustrieren:

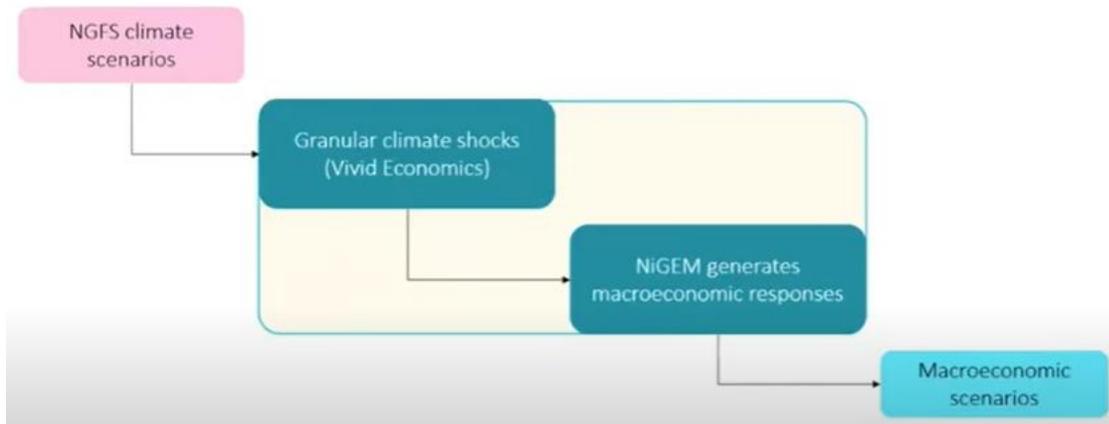


Abbildung 22. Übersetzung von Klimaszenarien in makroökonomische Szenarien

Die Klimaszenarien für diese „Übersetzung“ kommen von NGFS und basieren auf IAMs. Die IAMs bilden real- und finanzwirtschaftliche Variablen jedoch nicht granular ab, wodurch eine direkte Anwendung von Klimaszenarien im Rahmen von Analysen bzw. Stressberechnungen von Versicherungen/Banken nicht möglich ist.

Durch Kopplung der IAMs mit dem NiGEM-Modell wird diese Lücke geschlossen. Konkret werden dabei die Verläufe derjenigen realwirtschaftlichen Variablen, die sowohl in den IAMs als auch in NiGEM abgebildet sind, in NiGEM durch eine entsprechende Kalibrierung repliziert. Dies umfasst z.B. folgende Variablen:

- Wirtschaftsleistungen
- Investitionen
- Konsum verschiedener Energieträger
- CO₂-Preise.

Den konkreten Einsatz von NiGEM in diesem Kontext können wir am besten anhand eines Beispiels skizzieren – wir betrachten dazu einen starken Anstieg der CO₂-Preise und folgen bei der Diskussion unten der Darstellung aus [33]. Betrachten wir zunächst eine Übersicht darüber, wie sich ein CO₂-Preisanstieg durch die Angebots- und Nachfragekanäle in NiGEM propagiert:

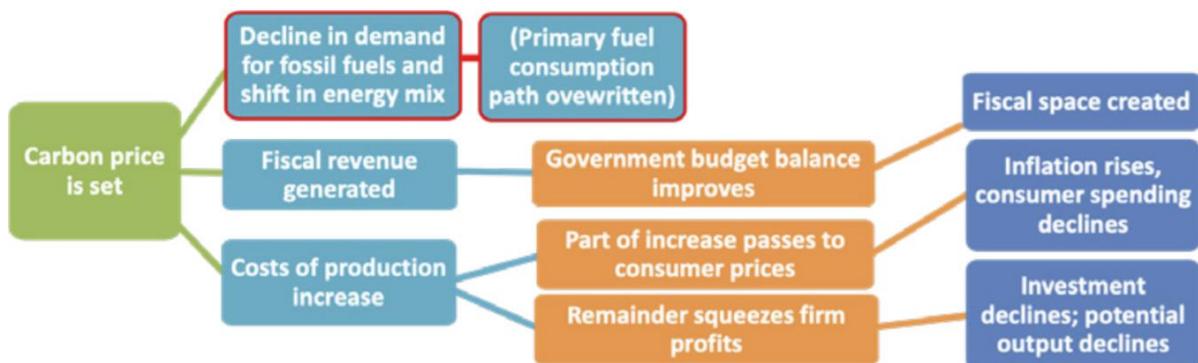


Abbildung 23. Auswirkung des CO₂-Preisanstiegs in NiGEM

Man beachte, dass die vom CO₂-Preisanstieg ausgelösten Veränderungen im Energiemix zwar in NiGEM berücksichtigt, jedoch durch ausgefeiltere NGFS-Daten überschrieben werden.

Die Verminderung der Nachfrage nach fossilen Rohstoffen wirkt sich ihrerseits wie folgt in NiGEM aus:

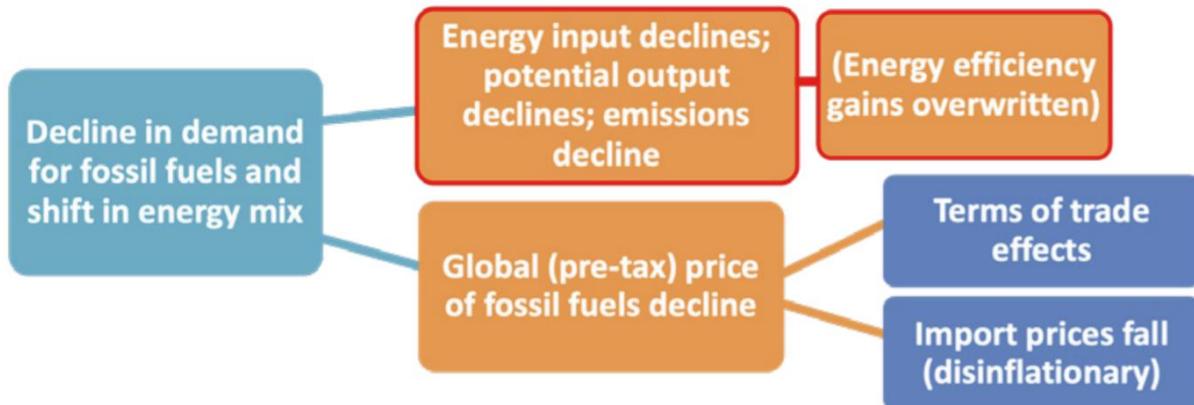


Abbildung 24. Umsetzung der Nachfrageminderung in NiGEM

In diesem Szenario werden einerseits Effizienzgewinne durch neue Technologien erwartet. Andererseits materialisieren sich diese Effekte auf der Angebotsseite nicht kurzfristig, und dementsprechend werden kurzfristige Störungen der wirtschaftlichen Tätigkeit modelliert.

Des Weiteren werden Auswirkungen auf die Kapitalanlagen betrachtet – insbesondere die Auswirkungen auf CO₂-intensive Assets. Dabei kann es zu kurzfristigen Asset-Notverkäufen kommen und das Finanzsystem unter Druck setzen, ähnlich wie bei der Finanzkrise 2008. Um diese Effekte abzubilden, werden über zwei Jahre andauernde Kreditbeschränkungen modelliert.

Insgesamt werden mithilfe von NiGEM die Auswirkungen des CO₂-Preisanstiegs auf eine Vielzahl relevanter Variablen modelliert. So sehen beispielsweise die modellierten kurzfristigen Auswirkungen auf das Bruttoinlandsprodukt und die Inflation wie folgt aus:

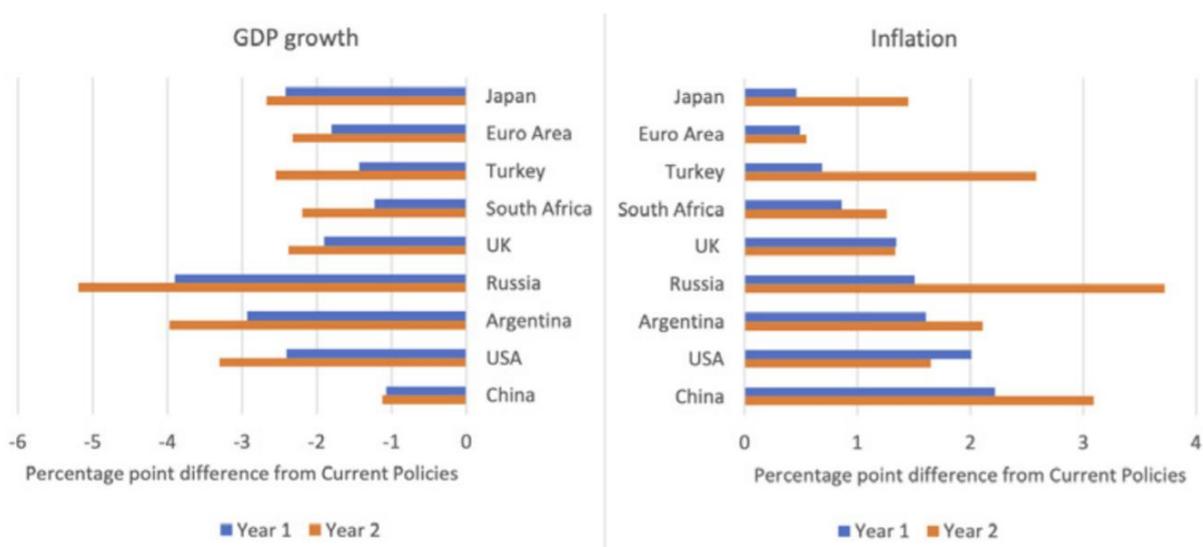


Abbildung 25. Auswirkungen auf BIP und Inflation

Des Weiteren ergeben sich aus dem Modell die folgenden kurzfristigen Auswirkungen auf die Aktienkurse und die Immobilienpreise:

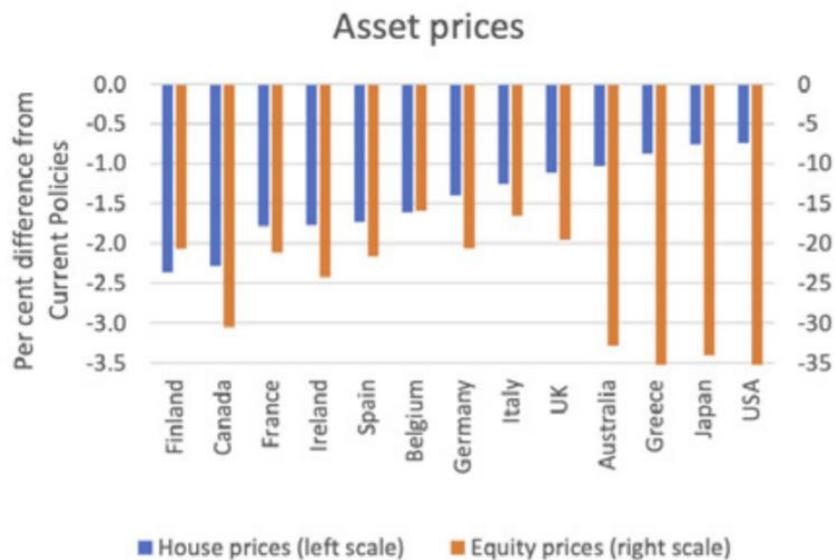


Abbildung 26. Auswirkungen auf Aktienkurse und Immobilienpreise

Schließlich seien noch die mittelfristigen Auswirkungen auf die Steuern und die Staatsverschuldung im betrachteten Szenario erwähnt (nach 5 Jahren):

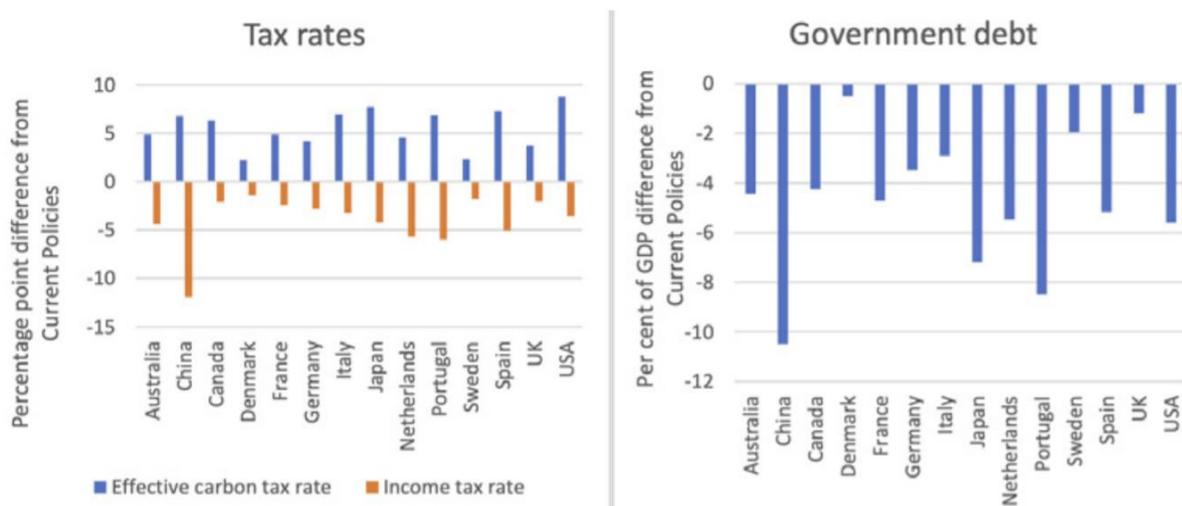


Abbildung 27. Auswirkungen auf Steuereinnahmen und Staatsverschuldung

4.4.4. Schlussfolgerungen

Das NiGEM – Modell stellt ein leistungsfähiges Toolkit dar, welches unter anderem von Banken, Versicherern und den Regulierungsbehörden anerkannt ist.

Damit lassen sich u.a. Klimastress-Szenarien herleiten, und zwar konsistent zu den best-in-class NGFS-Szenarien.

Die mithilfe von NiGEM hergeleiteten Szenarien zu Klimastresstests können eine hilfreiche Grundlage zur Klimarisikobewertung für Versicherer bilden. Zur Anwendung der von NiGEM abgeleiteten Stresse sollten jedoch weitere Schritte zur Ableitung von hinreichend granularen Variablen unternommen werden. Dazu zählen beispielsweise:

- Ausweitung der Granularität zu Schocks, da eine dem Sektor- oder Emittenten gegenüber agnostische Bewertung transitorische Risiken nur

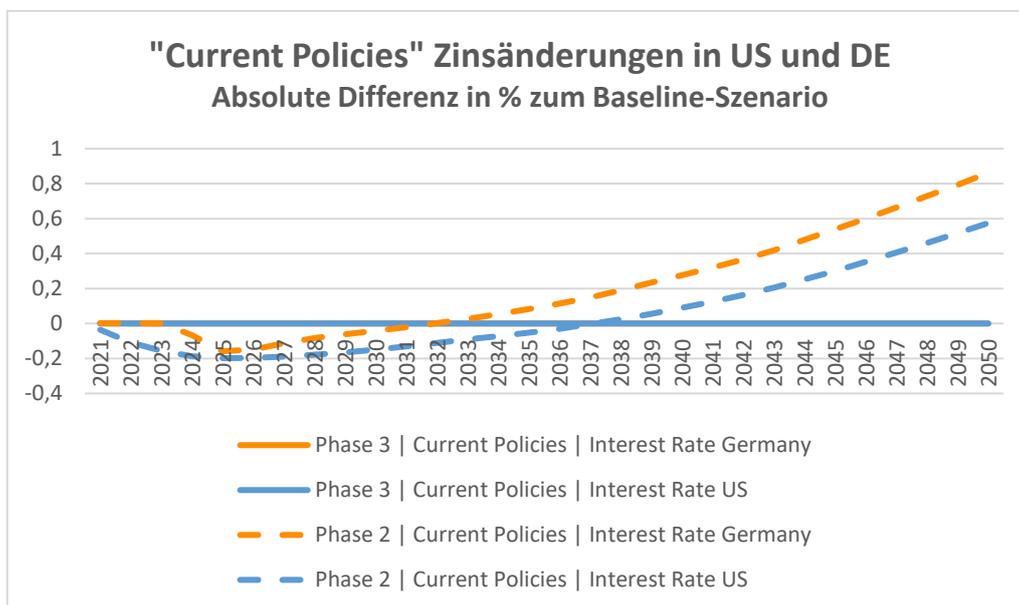
unzureichend bewerten kann. Hierzu können sektorielle oder emittenten-spezifische Ansätze verwendet werden.

- Erweiterung um weitere, für den Anwender relevante Stressfaktoren – dazu zählen insbesondere Spreads und Kreditausfallrisiken.

Weiterhin sollte betrachtet werden, ob die Bewertung von staatsanleihenbehafteten Risiken im Rahmen der NiGEM/NGFS aus Sicht des Anwenders angemessen dargestellt sind. Last, but not least: Die zugrundeliegende Modellierung ist naturgemäß hochgradig komplex und wird stets weiterentwickelt. Eine Reihe der dabei verwendeten Formeln und Ansätze sind u.a. im Anhang von [33] zusammengefasst.

Im Lichte der komplexen Modellierung sowohl Schlüsselannahmen- als auch Auswirkungen einer kritischen Einordnung unterzogen werden, insbesondere da ein komplexes Modell wie NiGEM auch unerwartete und teilweise nur schwer nachvollziehbare Auswirkungen hervorbringen kann.

Beispielsweise fällt in den „Hot-house-World“-Szenarien beim Vergleich zwischen den Phase 2- und 3-Szenarien auf, dass die in Phase 2 noch vorhandenen Zinsbewegungen in den Phase 3-Szenarien nicht mehr zu finden sind⁸. Ein anderes Beispiel ist die Aktienmarktentwicklung in den USA in den Phase 2-Transitionsszenarien – hier ist in den Phase 2-Szenarien ein kontinuierlicher Niedergang sichtbar, welcher nur schwer mit der in den GDP-Zahlen sichtbaren ökonomischen Erholung vereinbar ist. Die Phase 3-Szenarien zeigen dieses Verhalten nicht.



⁸ Eine unveränderte Zinskurve gegenüber dem Baseline-Szenario ist konsistent mit der in der NGFS-Dokumentation angegebenen Geldpolitik in den Hot-House-World-Szenarien, siehe [15] sowie die entsprechende Vorgängerversion zu Phase 2.

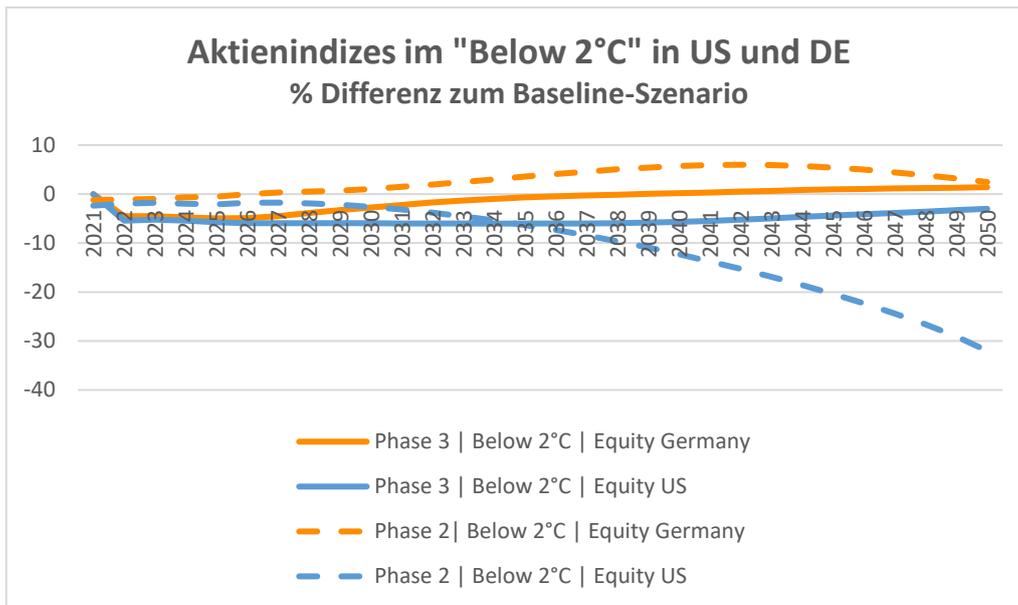


Abbildung 28. Vergleich der Phase 2- und Phase 3-NGFS-Szenarien (Zinsänderung und Aktienindizes)

Sollten auch allgemein bei Klimaszenarien die unterliegenden Annahmen kritisch hinterfragt werden, so ist dies bei den von NiGEM erzeugten Ergebnissen in besonderem Maße der Fall, da die unterliegenden Modelle für Finanzmarktvariablen Ergebnisse entscheidend beeinflussen. Beispielsweise weist auch eine Studie des NGFS [16] darauf hin, dass die fiskalpolitischen Annahmen, die der Projektion unterliegen, einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse in den Transitionszenarien haben.

Zusammenfassend können die mithilfe von NiGEM abgeleiteten Stresse eine außerordentlich hilfreiche Grundlage für Klimarisikoszenarien bilden, insbesondere zur Bewertung von transitorischen Risiken. Unmittelbare Verwendung der Ergebnisse ist jedoch typischerweise nur mit Einschränkungen möglich, Erweiterungen bezüglich der Granularität helfen dabei, eine differenziertere Sicht auf die Verteilung von transitorischen und physischen Risiken innerhalb des Portfolios zu geben. Darüber hinaus sollte mit der Analyse stets eine kritische Einordnung und Bewertung von Annahmen und von Ergebnissen erfolgen.

4.5. Climate Impact Explorer

4.5.1. Allgemeiner Aufbau

Neben den Transition-Pfaden für die unterschiedlichen Klimaszenarien innerhalb des NGFS-Frameworks, die vor allem die ökonomischen Kennzahlen bereitstellen, werden bei der Bewertung von Klimawandelszenarien auch physische Risiken betrachtet. Diese stellt z. B. der Climate Impact Explorer (CIE), der von Climate Analytics – unterstützt durch das PIK und die ETH Zürich – bereitgestellt wird, zur Verfügung.

Das Ziel des CIE ist es, Informationen über die projizierten Veränderungen verschiedener Klimaauswirkungsindikatoren (akute wie z. B. ökonomische Schäden durch Überschwemmungen, Waldbrände oder tropische Wirbelstürme und

chronische wie z. B. Veränderung landwirtschaftlicher Erträge, Anstieg der Tageshöchsttemperaturen, Rückgang der Arbeitsleistung durch Hitzestress) bei unterschiedlichen globalen Temperatursteigerungen zu geben. Zusätzlich wird auch die in den Projektionen enthaltene Unsicherheit angegeben.

Basis für die Ergebnisse des CIE bilden zum einen die ISIMIP-Daten sowie zum anderen CLIMADA.

Das Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) stellt eine sehr umfangreiche Datenbank an Ergebnissen von Klimasimulationen bis zum Jahr 2100 unter bestimmten klimatischen und sozioökonomischen Annahmen zur Verfügung. Bis Anfang 2021 wurden dabei die Daten von mehr als 100 Modellen berücksichtigt. Als Input für die aktuellen Ergebnisse des CIE werden die ISIMIP2b-Klimadaten verwendet, die mit vier GCMs aus CMIP5 (5. Phase des Coupled Model Intercomparison Project) erzeugt wurden und auch einer Kalibrierung auf Referenzdaten unterzogen wurden.

CLIMADA ist ein Open-Source-Tool für die Modellierung von Katastrophenrisiken und wird verwendet, um die Schäden durch Extremereignisse abzuschätzen, indem ihre Eintrittswahrscheinlichkeit und das mit ihnen verbundene Verlustrisiko modelliert werden.

Anhand von Diagrammen und Karten zeigt der CIE, wie sich der Klimawandel in einer Vielzahl von Szenarien (u. a. den NGFS-Szenarien) im Zeitablauf auf allen Kontinenten, in allen Ländern bis hinunter auf einzelne Regionen (z. B. Bundesländer in Deutschland) auswirken wird.

Die nachfolgende Grafik zeigt den grundsätzlichen Aufbau des CIE.

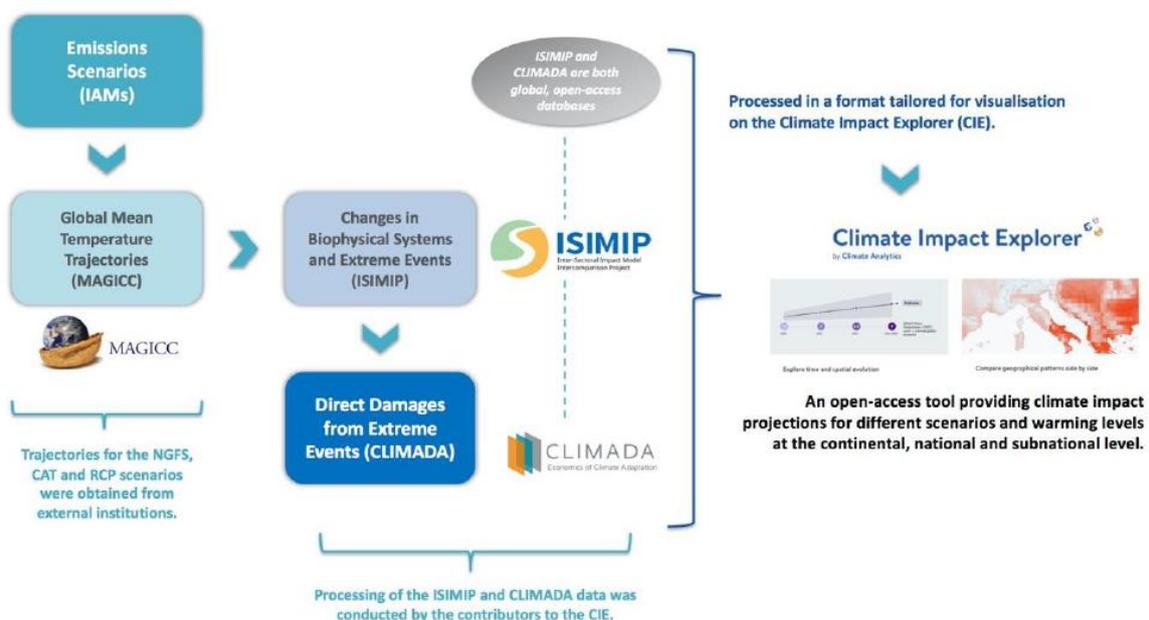


Abbildung 29. Aufbau des Climate Impact Explorer [39]

4.5.2. Methodik zur Ermittlung der Klimaauswirkungen

Die Ermittlung der Klimaauswirkungen im CIE ist ein mehrstufiges Verfahren.

Im ersten Schritt werden auf Basis der erwarteten Emissionen für das jeweils betrachtete Szenario (z. B. die NGFS-Szenarien, RCP-Szenarien) mittels des einfachen Klimamodells MAGICC6 die Veränderung der globalen mittleren Temperatur GMT (engl. Global Mean Temperature) ermittelt. MAGICC6 verwendet dabei einen stochastischen Ansatz, indem 600 verschiedene Parametrisierungen für einen Emissionspfad benutzt werden. Dadurch wird die Unsicherheit in der GMT-Projektion sichtbar, insb. kann ein Bereich zwischen dem 5%- und 95%-Quantil für die GMT ermittelt werden (s. Abbildung 30).

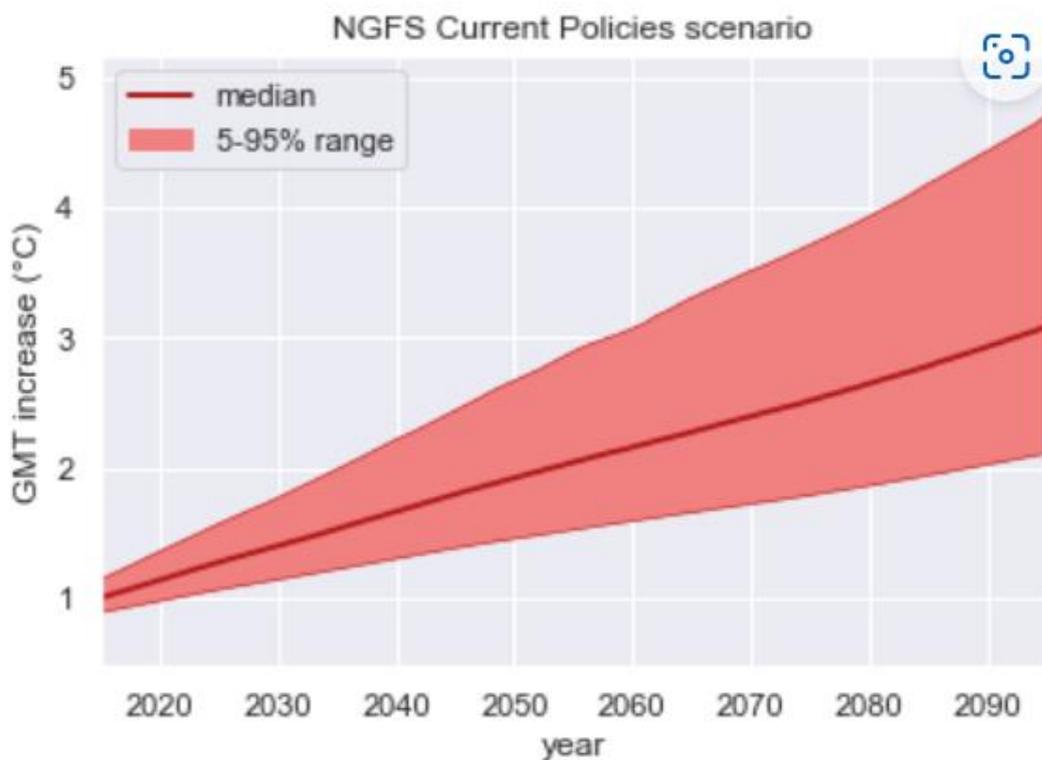


Abbildung 30. Mit dem Modell MESSAGEix-GLOBIOM 1.0 projizierte GMT-Trajektorien, die dem Emissionspfad Current Policies entsprechen. Der schattierte Bereich zeigt den 5-95%igen Unsicherheitsbereich in der Klimasensitivität des MAGICC6-Modells. [39]

Im zweiten Schritt werden die ISIMIP-Daten zur Quantifizierung der Auswirkungen bei einer bestimmten globalen Erwärmung benutzt. In ISIMIP-Phase 2b werden Klimaauswirkungen sektorübergreifend für verschiedene RCP-Emissionspfade unter Berücksichtigung von Unsicherheiten ermittelt. Der Unsicherheit wird dadurch Rechnung getragen, dass vier verschiedene GCM für die Temperaturprojektionen verwendet werden. Für ein RCP-Szenario werden die von jedem GCM simulierten GMT-Pfade als Input für verschiedene Auswirkungsmodelle (IM, Impact Models) verwendet. Dadurch wird auch die Unsicherheit bei den Klimaauswirkungen berücksichtigt. Die folgende Grafik soll den Zusammenhang zwischen GMT-Veränderung und Klimaauswirkung zeigen.

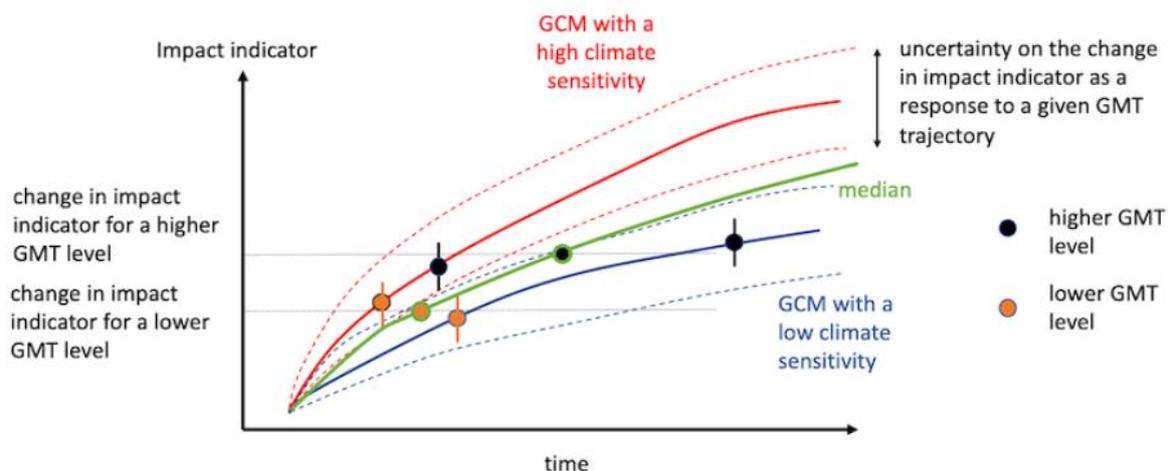


Abbildung 31. Schematische Darstellung des Anstiegs eines Auswirkungsindikators für ein bestimmtes Szenario. Zwei GCMs (dargestellt durch die rote und blaue Farbe) werden verwendet, um die Unsicherheit in der Klimasensitivität zu erfassen. Mehrere IMs (engl. Impact Models) werden dann verwendet, um die Unsicherheit in der Auswirkungsreaktion auf eine bestimmte GMT-Trajektorie zu bewerten (visualisiert durch die von den gestrichelten Linien gebildeten Kurven). Eine ähnliche Veränderung eines bestimmten Auswirkungsindikators kann für ein bestimmtes GMT-Niveau erwartet werden, das zu einem anderen Zeitpunkt von den beiden verschiedenen GCMs erreicht wird. Ein Blick auf den Median der Auswirkungen für die beiden GCMs gibt mehr Vertrauen in den tatsächlichen Wert, während die Streuung der Ergebnisse jeder IM-Simulation für diese GMT die gesamte Unsicherheit (in der Klima- und Auswirkungsreaktion) anzeigt. [39]

Betrachtet werden nun die Kombinationen aus den vier GCM und den RCP-Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5. Für jede dieser Kombinationen wird das Jahr bestimmt, in dem eine bestimmte GMT-Veränderung eintritt, startend bei 1°C-Erhöhung und fortlaufend mit jeder weiteren Erhöhung um 0,1°C. Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt aus den Ergebnissen.

Warming Level [°C]	GFDL-ESM2M rcp26	GFDL-ESM2M rcp45	GFDL-ESM2M rcp60	GFDL-ESM2M rcp85	HadGEM2-ES rcp26	HadGEM2-ES rcp45	HadGEM2-ES rcp60	HadGEM2-ES rcp85	IPSL-CM5A-R rcp26	IPSL-CM5A-LR rcp45	IPSL-CM5A-LR rcp60	IPSL-CM5A-LR rcp85	MIROC5 rcp26	MIROC5 rcp45	MIROC5 rcp60	MIROC5 rcp85
1.0	2015	2015	2017	2016	2007	2007	2006	2006	2008	2011	2010	2008	2012	2013	2015	2012
1.1	2021	2021	2025	2022	2010	2010	2009	2009	2013	2016	2014	2013	2018	2018	2024	2015
1.2	2030	2028	2032	2027	2012	2013	2012	2011	2016	2019	2018	2016	2025	2023	2032	2019
1.3	2079	2034	2045	2031	2014	2016	2015	2013	2020	2023	2022	2020	2030	2028	2038	2023
1.4	2100	2043	2053	2035	2016	2019	2017	2015	2024	2026	2025	2023	2036	2033	2043	2027
1.5		2051	2059	2038	2019	2023	2022	2018	2030	2029	2030	2025	2042	2035	2048	2031

Tabelle 4. Temperaturanstiege in verschiedenen GCM-RCP-Kombinationen

Im nächsten Schritt werden die zugehörigen Klimaauswirkungen aus den Impact Models in die Betrachtung mit einbezogen. Für die Kombination aus GCM-RCP und IM werden die Klimaauswirkungen in einem Intervall von +/- 10 Jahren um das Jahr herum betrachtet, in dem eine bestimmte GMT-Veränderung eingetreten ist. Als Klimaauswirkung wird dann der Mittelwert der Auswirkungen in diesen 21 Jahren angesetzt. Da angenommen wird, dass die Klimaauswirkung nur von der Temperaturveränderung abhängt, es aber nicht wichtig ist, in welchem Jahr und in welchem konkreten Emissionsszenario diese Temperaturveränderung beobachtet wurde, wird der Mittelwert über alle Szenarien der GCM-IM-Kombinationen gebildet. Somit hat man zu allen Kombinationen GCM aus GCM und IM die entsprechenden Auswirkungen in Abhängigkeit von der Temperaturveränderung und kann den zugehörigen Median über alle GCM-IM-Kombinationen ermitteln.

Für jedes Klimaszenario können somit die Auswirkungen auf Basis der mit MAGICC6 projizierten Temperaturveränderungen abgeschätzt werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Unsicherheit in den Ergebnissen für größere Temperaturerhöhungen (insb. bei globalen Erwärmungen jenseits von 2,5°-3°C) zunimmt, da diese Temperatursteigerung nur in einer geringen Anzahl von Klimamodellen erreicht werden.

Aber auch bei geringeren Temperatursteigerungen sind Unsicherheiten in den ermittelten Klimaauswirkungen enthalten. Diese werden anhand der Streuung der Projektionen aller GCMs (für die Klimaindikatoren) bzw. GCM-IM-Kombinationen (für die sektoralen Auswirkungsindikatoren) für eine GMT-Veränderung (beginnend mit 1°C und fortlaufend mit jeder weiteren Erhöhung um 0,1°C) ermittelt. Man ermittelt die Abweichung der GCM-IM-Projektion vom Median über alle GCM-IM-Kombinationen und führt eine Quantilsregression durch. Somit erhält man eine Beziehung zwischen dem 5%- und 95%-Quantil der Auswirkungsprojektion von der GMT-Veränderung (s. Abbildung 32).

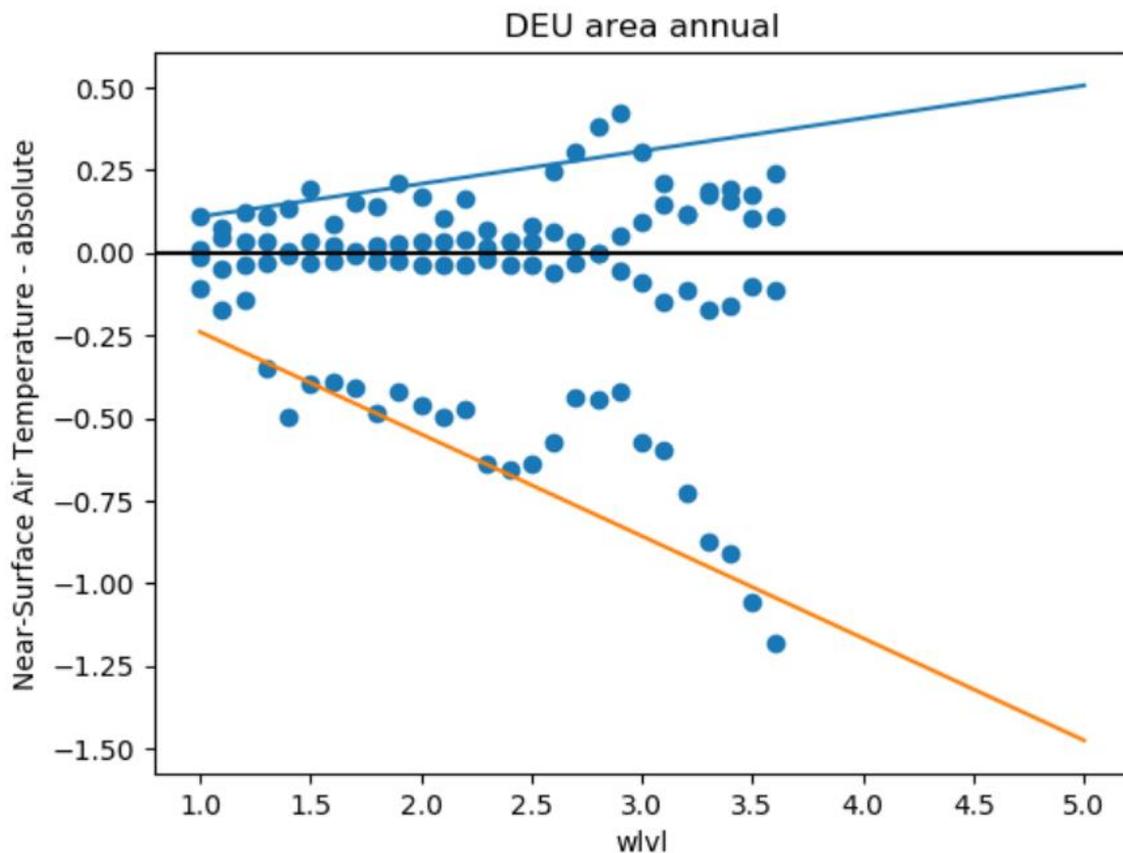


Abbildung 32. Abweichungen der flächengewichteten durchschnittlichen jährlichen bodennahen Lufttemperatur vom Gesamt-Median aller GCMs für jedes Erwärmungsniveau (x-Achse). Die blauen und orangefarbenen Linien zeigen die Quantilsregressionslinien für das 5. und 95. Perzentil. Unter der Voraussetzung, dass sie die x-Achse nicht zwischen 1° und 5°C kreuzen, werden diese beiden Linien zur Quantifizierung der Auswirkungsunsicherheit bei jedem Erwärmungsniveau verwendet. [39]

Bei unplausiblen Ergebnissen für das 5%- / 95%-Quantil wird die Ermittlung über alle GMT-Veränderungen hinweg durchgeführt und es wird angenommen, dass die Differenz der Quantile zum Median unabhängig von der GMT-Veränderung ist.

Als letzten werden nun noch die Unsicherheiten aus der Temperatur-Simulation mittels MAGICC6 und aus der Auswirkungsanalyse kombiniert. In der nachfolgenden Grafik wird dies beispielhaft dargestellt, wobei die 5-95%-ige MAGICC6-Unsicherheit in den GMT-Projektionen grün und die 5-95%-ige Unsicherheit in den Auswirkungsprojektionen braun hervorgehoben sind. Der kombinierte volle Unsicherheitsbereich ist durch die blauen Markierungen angegeben.

Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die lokale Reaktion der Klima- oder Auswirkungsindikatoren unabhängig ist von der globalen Klimasensitivität. Obwohl dies im Allgemeinen eine plausible Annahme ist, kann es Regionen und Auswirkungen geben, bei denen die globalen und regionalen Veränderungen der Indikatoren voneinander abhängig sind.

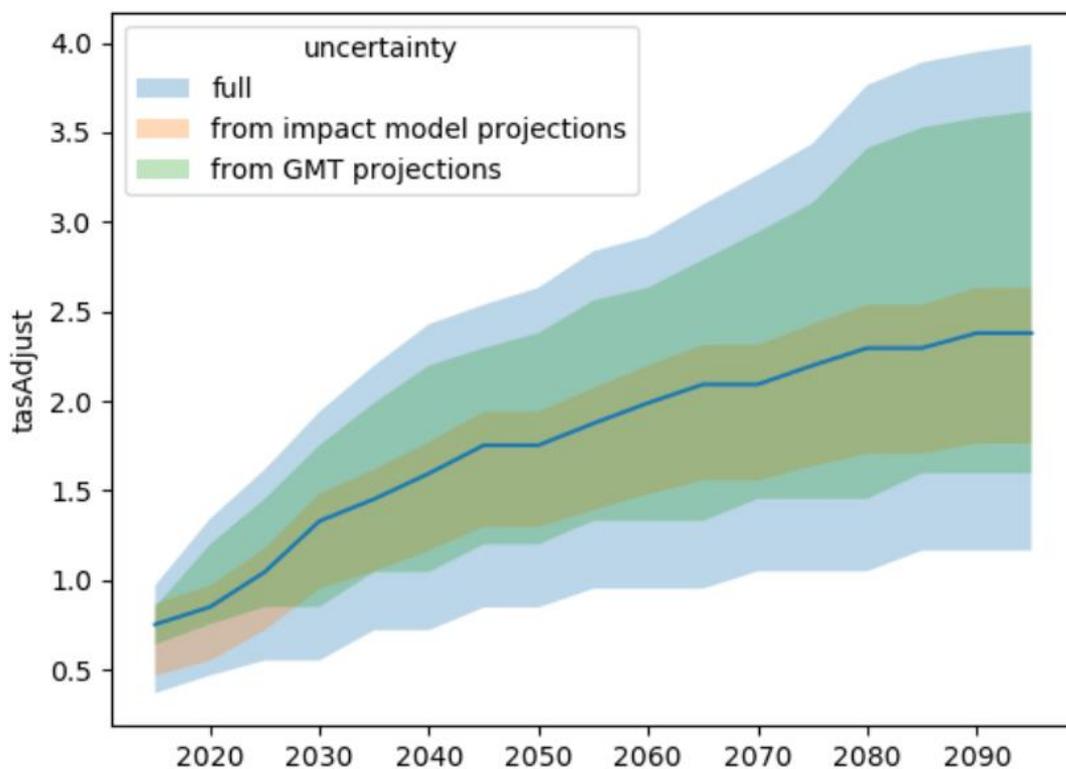


Abbildung 33. Veranschaulichung der kombinierten Unsicherheiten bei der globalen Mitteltemperatur und der lokalen Auswirkung am Beispiel der oberflächennahen Lufttemperaturänderungen in Deutschland. [39]

5. Beschreibung konkreter NGFS-Szenarien

Im Folgenden sollen die NGFS-Szenarien detaillierter beschrieben werden.

Allen NGFS-Szenarien liegen die sozioökonomischen Annahmen des SSP2-Pfades „Middle of the Road“ zugrunde, d. h. die aktuelle Entwicklung setzt sich fort. Die Weltbevölkerung wächst moderat bis zum Höhepunkt von rd. 9,7 Mrd. im Jahr 2070 und nimmt danach wieder leicht ab (s. Abbildung 34).

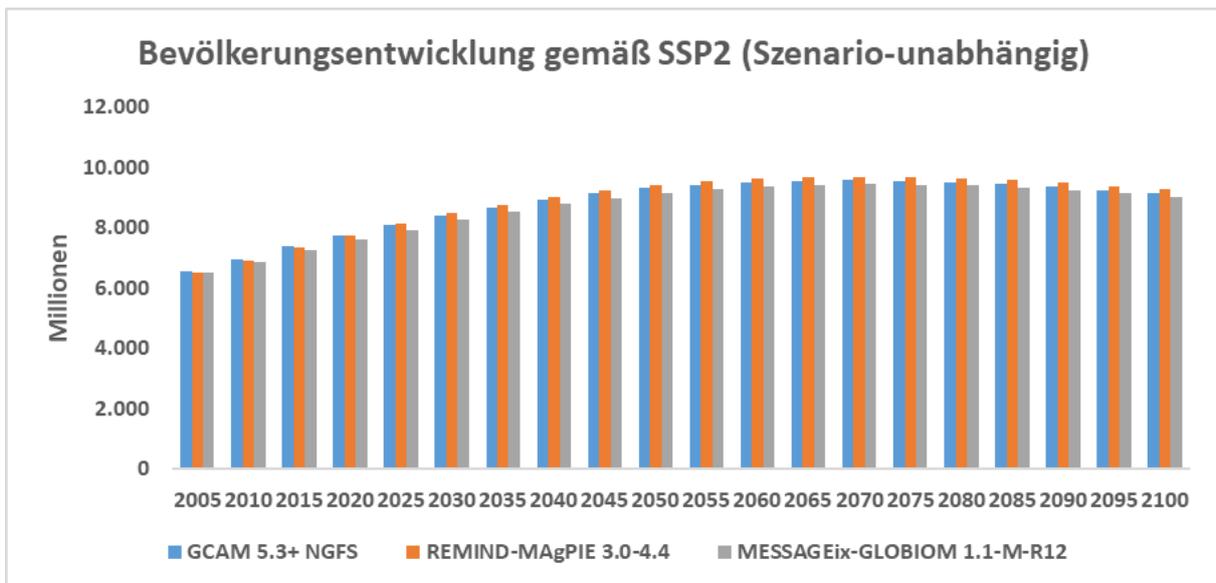


Abbildung 34. Entwicklung der Weltbevölkerung im Szenario SSP2 (unabhängig vom konkreten NGFS-Szenario)

Dadurch nimmt auch der Bedarf an Wohnflächen (s. Abbildung 35) sowie der Energiebedarf zunächst weiter zu.

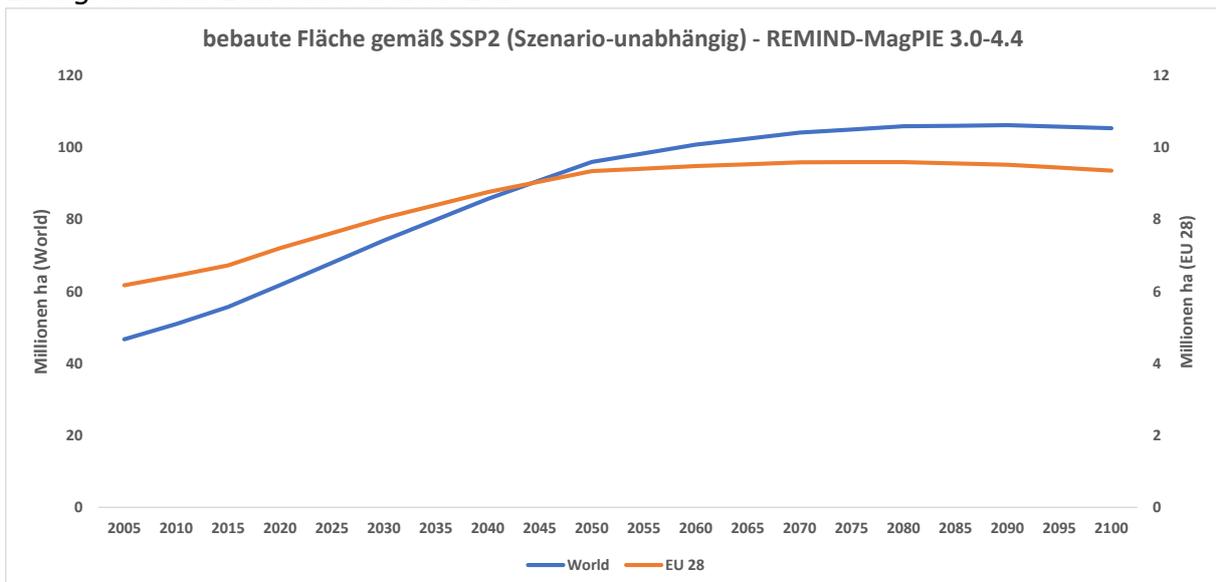


Abbildung 35. Entwicklung der bebauten Fläche im Szenario SSP2 (unabhängig vom konkreten NGFS-Szenario)

Während die Entwicklung der Weltbevölkerung und der Bedarf an Wohnfläche Szenario-unabhängig sind, entwickelt sich der Energiebedarf in den verschiedenen NGFS-Szenarien unterschiedlich.

Entscheidend für die Erreichung der Klimaziele des Pariser Klimaabkommens (entsprechend dem NGFS-Szenario Net Zero 2050) sind die Verbesserung der Energieeffizienz und die Senkung des Energieverbrauchs.

Das wesentliche Steuerungselement zur Reduktion der CO₂-Emissionen in den IAMs, die die NGFS-Szenarien erzeugen, stellt der CO₂-Preis dar. Dieser unterscheidet sich zwischen den verschiedenen NGFS-Szenarien. Aber auch für ein einzelnes Szenarien unterscheiden sich die Ergebnisse der drei IAMs aufgrund der unterschiedlichen Modellierungsansätze. Der CO₂-Preis verdeutlicht einerseits die Ambitionen der Politik zur Eindämmung des Klimawandels (je höher der CO₂-Preis, desto größer sind die Anstrengungen) und andererseits den Zeitpunkt der Umsetzung der Maßnahmen. Die Modelle zeigen, dass mittel- und langfristig höhere CO₂-Preise erforderlich sind, wenn die politischen Maßnahmen erst verzögert umgesetzt werden.

Die nachfolgende Abbildung illustriert den Verlauf des CO₂-Preises bis zum Jahr 2050 in den verschiedenen NGFS-Szenarien anhand des REMIND-Modells. Zur Verdeutlichung der Schwankungen zwischen den IAMs wird in der rechten Grafik der Verlauf des CO₂-Preises für das Szenario Net Zero 2050 dargestellt. Im Mittel über alle Modelle wird im Jahr 2030 ein CO₂-Preis von rd. 190 US\$(2010) pro Tonne CO₂ benötigt. Allerdings liegt die Standardabweichung bei rd. 140 US\$(2010) pro Tonne CO₂ und verdeutlicht damit die hohe Unsicherheit in der Ökonomie der Modelle.

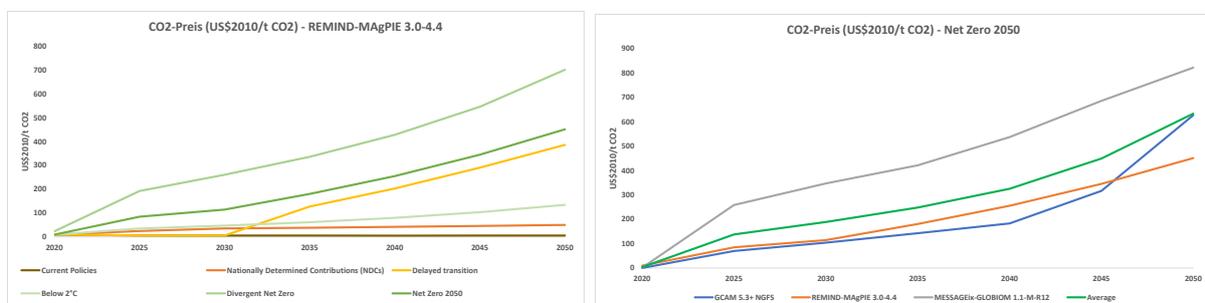


Abbildung 36. Entwicklung des CO₂-Preises in den verschiedenen Szenarien und IAMs

5.1. Energie

Zur Erreichung der Klimaziele spielt insbesondere die **Elektrifizierung** eine Schlüsselrolle. Ein Elektroauto zum Beispiel ist nicht nur selbst emissionsfrei, sondern es benötigt auch etwa dreimal weniger Energie als ein Auto mit Verbrennungsmotor [41]. Voraussetzung für eine nachhaltige Elektrifizierung, bei der die CO₂-Emissionen auch tatsächlich reduziert werden, ist die **Dekarbonisierung der Stromerzeugung**. Sie erfordert die Umstellung auf alternative Energiequellen wie v. a. Sonne und Wind. Im globalen Energiemix der NGFS-Szenarien wird auch der Ausbau der Kernenergie als Beitrag zur Dekarbonisierung angesehen. Je nach NGFS-Szenario wird der Übergang auf erneuerbare Energien bei der Stromerzeugung mit mehr oder weniger Konsequenz vorangetrieben. Während in den Szenarien Current Policies und NDC fossile Brennstoffe zur Stromerzeugung

weiterhin genutzt werden, wird in den Szenarien, die einen Übergang auf eine CO₂-neutrale Gesellschaft beschreiben, die Nutzung fossil-betriebener Kraftwerke bis zum Jahr 2050 komplett heruntergefahren. Die folgende Abbildung zeigt die für die Stromerzeugung verwendeten Energieformen in den einzelnen NGFS-Szenarien (auf Basis der Ergebnisse des REMIND-MagPIE-Modells):

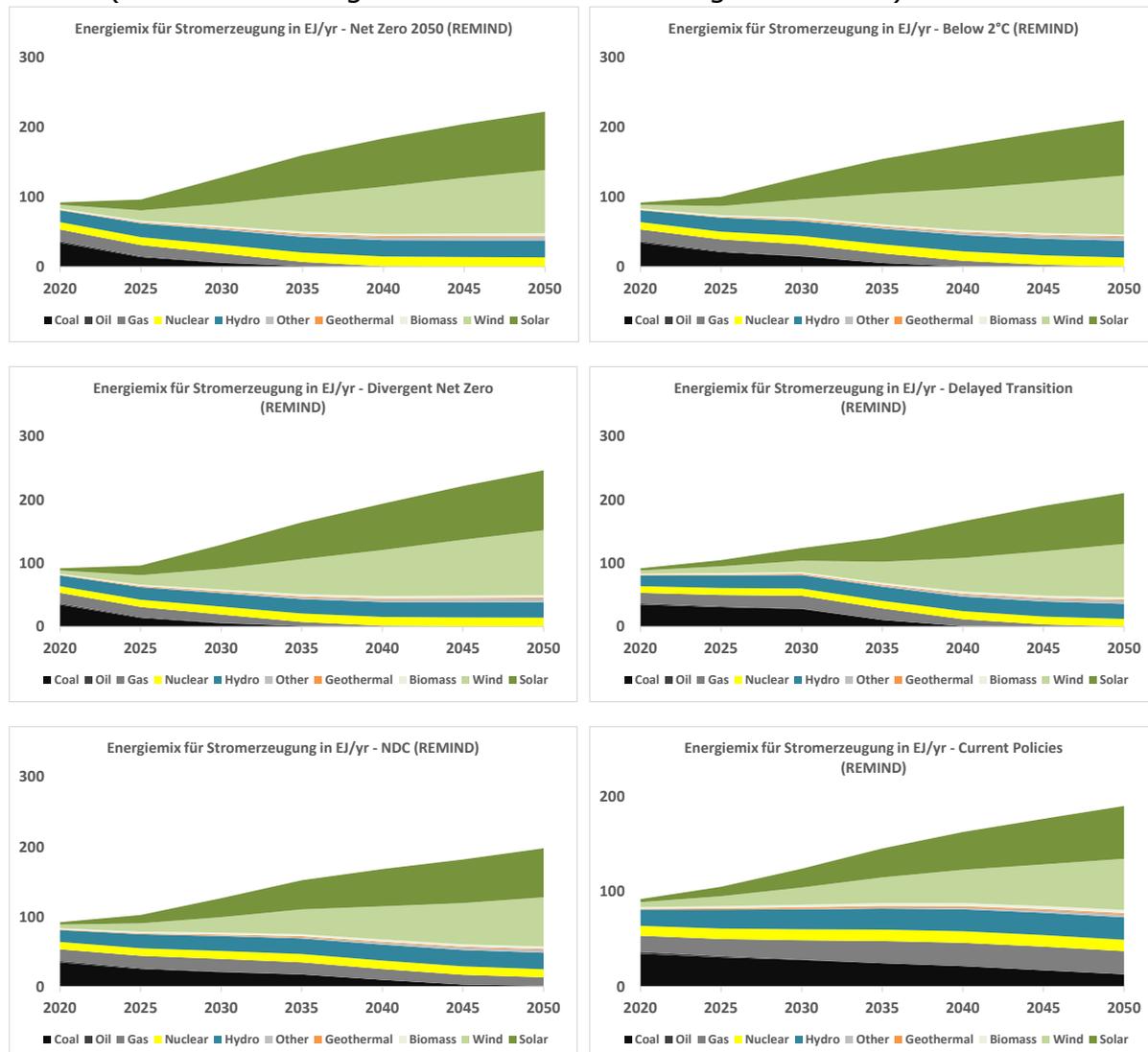


Abbildung 37. Energiemix für die Stromerzeugung in den verschiedenen NGFS-Szenarien

Für die flächendeckende Nutzung grünen Stroms werden zudem Investitionen in den Ausbau der Netzinfrastruktur und die Entwicklung neuer Speicherlösungen benötigt.

Der Einsatz **kohlenstoffneutralen Stroms** kann in vielen Bereichen der Gesellschaft erfolgen, sowohl in der Wirtschaft als auch in den privaten Haushalten, und damit den heutigen Gebrauch von Kohle, Öl und Gas überflüssig machen. Dazu gehören z. B. batteriebetriebene Elektroautos sowie Wärmepumpen in Gebäuden und bestimmte industrielle Anwendungen. In Zukunft könnten neue Technologien entwickelt werden, um die Produktion von Stahl, Zement und anderen Industrieprodukten frei von Kohlendioxidemissionen zu machen.

Energie-Effizienz spielt in den Szenarien ebenfalls eine wichtige Rolle. Bei gestiegenen Energiekosten lohnen sich Maßnahmen zur Energieeinsparung – vor allem bei der Gebäudedämmung und in industriellen Prozessen.

Während im Szenario Net Zero 2050 über 50% des Energiebedarfs aus Strom gedeckt werden, beträgt der Anteil im Szenario Current Policies lediglich 30%. Der größte Anteil an der Elektrifizierung hat der Gebäudesektor. Im Szenario Net Zero 2050 sind im Jahr 2050 mehr als 75% der Gebäude elektrifiziert, unter Annahme des Current Policies-Szenarios immerhin auch 50%. Den geringsten Anteil an Stromnutzung zum Energieverbrauch hat der Verkehrssektor (rd. 35% in Net Zero 2050, rd. 20% in Current Policies).

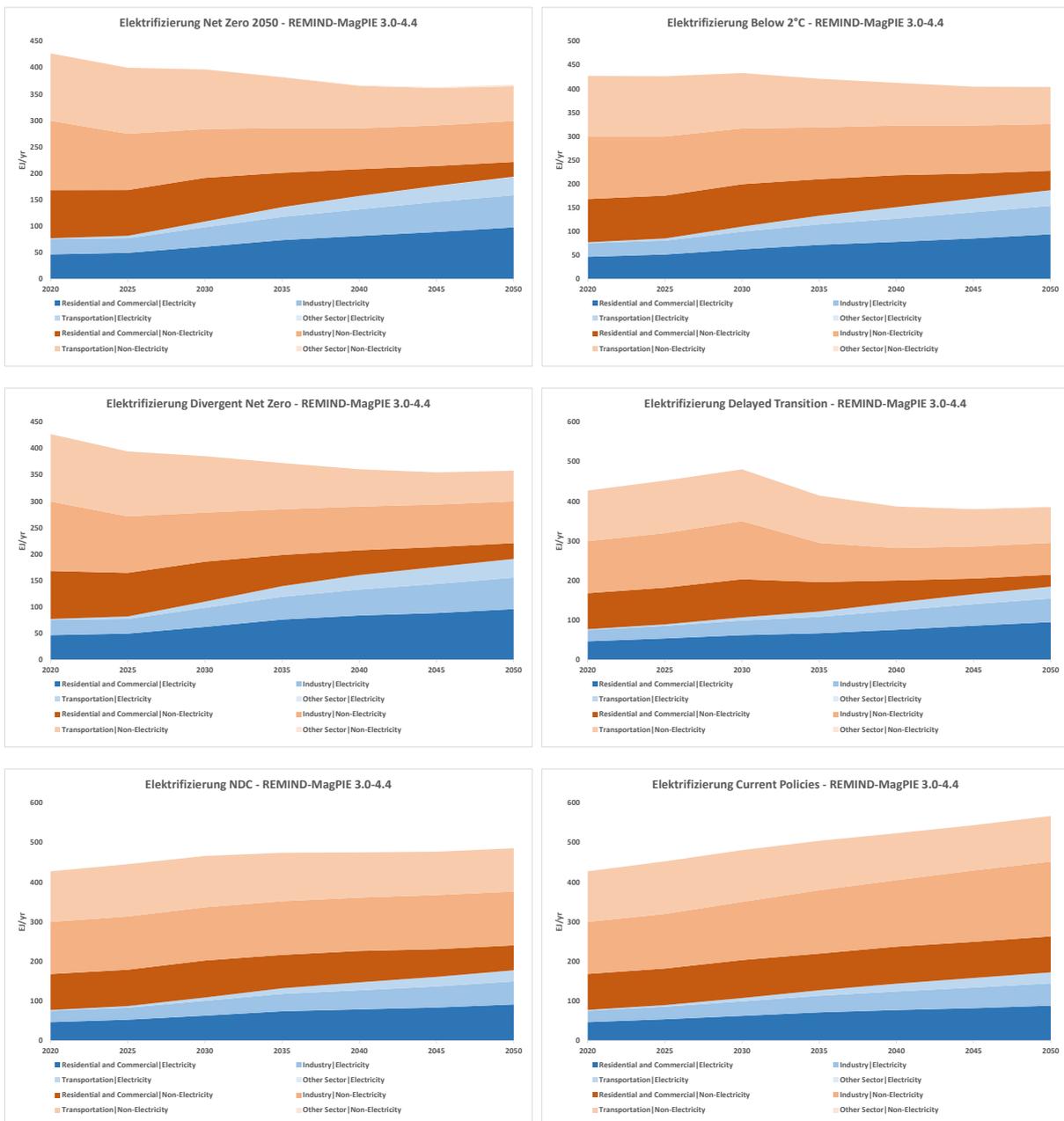


Abbildung 38. Anteil der Elektrifizierung in der Gesellschaft in den verschiedenen Szenarien bis zum Jahr 2050

Neben einer stärkeren Elektrifizierung spielt auch der **Übergang auf CO₂-neutrale Kraftstoffe** eine wichtige Rolle. Diese Kraftstoffe wie grüner Wasserstoff, Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe können einen Ersatz darstellen, wenn eine Elektrifizierung nicht möglich ist (z.B. in der Luftfahrt). Es sind zusätzliche Investitionen und politische Anreize erforderlich, um diese Kraftstoffe in großem Maßstab und kohlenstoffneutral zu produzieren.

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Kraftstoffmixes im Verkehrssektors von 2020 bis 2050 in den unterschiedlichen NGFS-Szenarien. In allen Szenarien steigt der Anteil an E-Mobilität (auf 20-35% je nach Szenario) und auch der Anteil der Biokraftstoffe nimmt zu. Trotzdem wird im Jahr 2050 in allen Szenarien mit Ausnahme des Szenarios Divergent Net Zero der überwiegende Teil der Kraftstoffe aus fossilen Brennstoffen gewonnen.

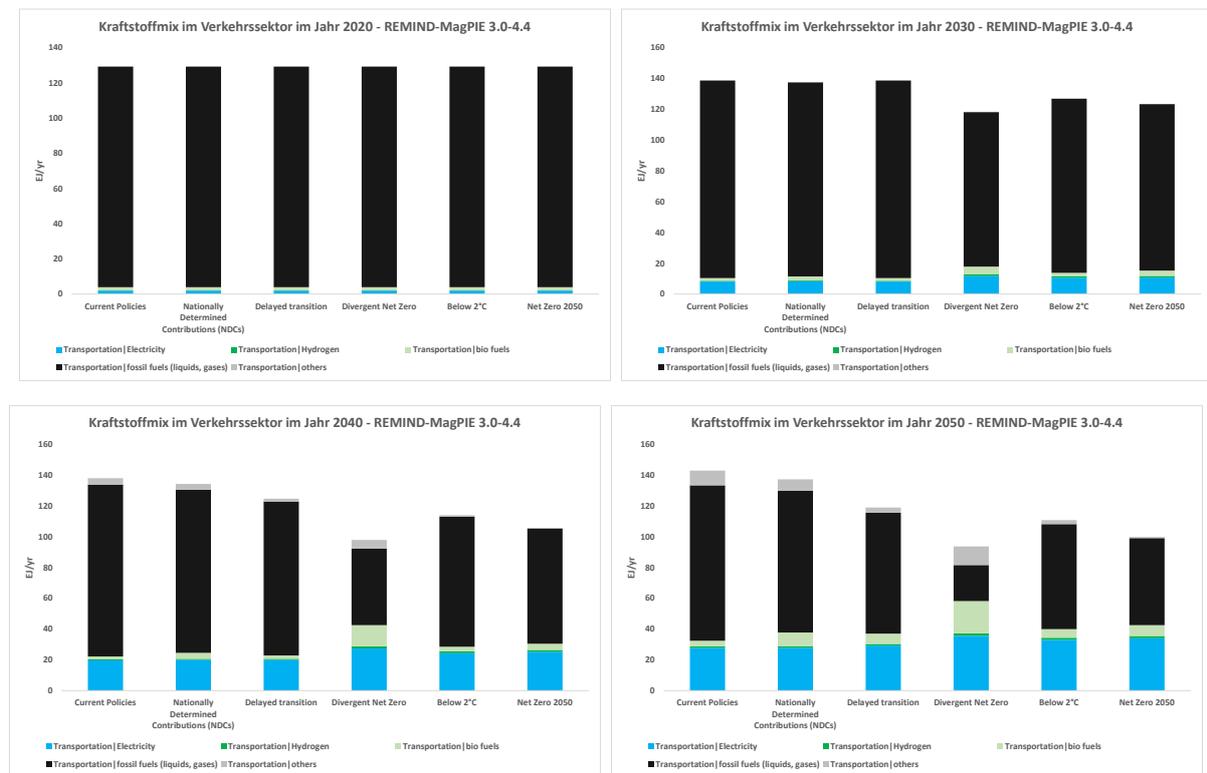


Abbildung 39. Entwicklung des Kraftstoffmixes im Verkehrssektor bis zum Jahr 2050 in den verschiedenen Szenarien

Neben einer vollständigen Abkehr von CO₂ können auch neue Technologien zur Verbrennung fossiler Brennstoffe mit **Kohlenstoffabscheidung und -speicherung** (Carbon Capture and Storage) helfen, die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu begrenzen. Der Einsatz von Technologien zur **Kohlendioxidabscheidung** (Carbon Dioxide Removal, CDR) kann die Emissionen aus Sektoren, in denen ein Abbau der CO₂-Emission schwer realisierbar ist, kompensieren, indem Kohlenstoff aus der Atmosphäre entfernt und in Speichern (z. B. Wäldern, Felsen, geologischen Reservoirs) gebunden wird. Die derzeitigen Technologien sind unterschiedlich weit fortgeschritten und stoßen auf verschiedene Hürden (z. B. hoher Energiebedarf und Kosten), so dass ihr Einsatz mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

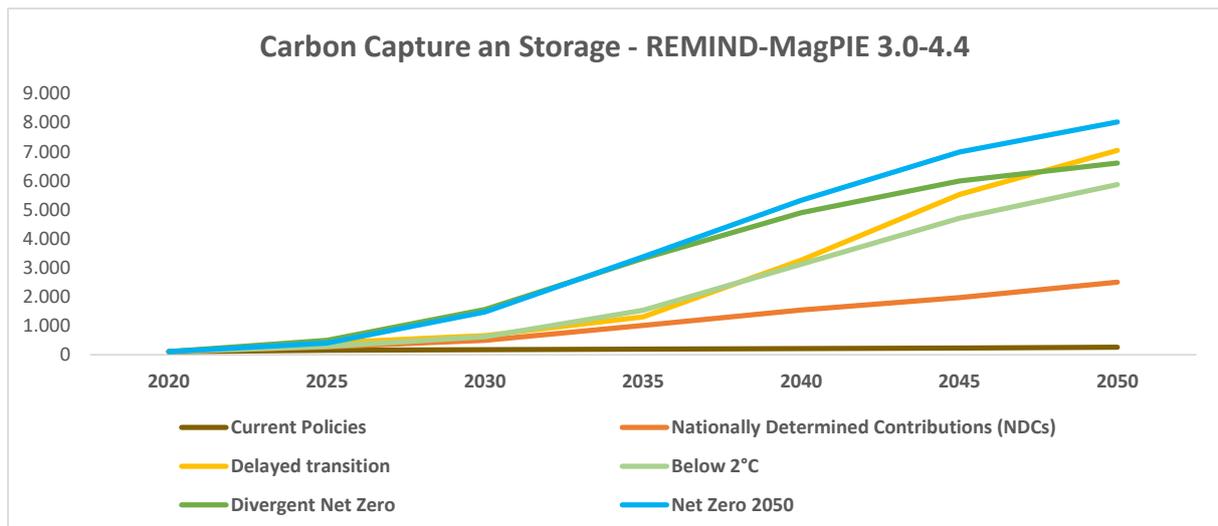


Abbildung 40. Entwicklung von CCS-Technologien

5.2. Landwirtschaft

Ein wesentlicher Sektor beim Übergang auf CO₂-Neutralität ist die **Land- und Forstwirtschaft und die sonstige Landnutzung (AFOLU)**. Mehr als 20 % der gesamten Treibhausgasemissionen fallen in diesem Sektor an. Der größte Teil der Kohlenstoffemissionen stammt aus der Rodung und Abholzung von Wäldern. Der Stopp der Rodungen und die Vergrößerung der Waldfläche sind von entscheidender Bedeutung, um die Netto-Null-Ziele zu erreichen. Der Agrarsektor kann auch eine Schlüsselrolle bei der Verringerung anderer Treibhausgasemissionen (z. B. CH₄ und N₂O) spielen, indem Stickstoffdünger effizienter eingesetzt und andere nachhaltigere Verfahren eingeführt werden. Sie lassen sich jedoch nur schwer vollständig vermeiden. Selbst im Szenario Net Zero 2050 ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen schwerer zu realisieren als in anderen Sektoren, so dass ihr Anteil kontinuierlich anwächst (s. Abbildung 41). Ernährungsumstellungen wie die Reduzierung des Fleischkonsums können ebenfalls eine wichtige Rolle spielen, auch wenn sie in den aktuellen NGFS-Szenarien nicht berücksichtigt werden. Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der Treibhausgasemissionen im Sektor AFOLU bis zum Jahr 2050 in den verschiedenen NGFS-Szenarien sowie deren Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen.

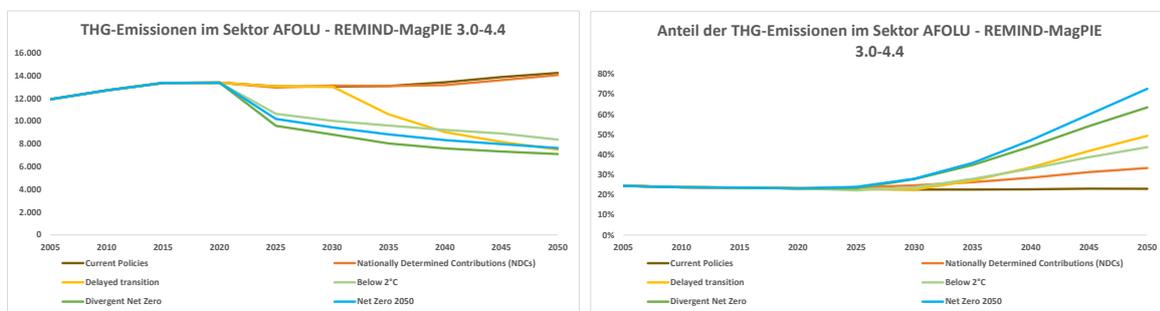


Abbildung 41. THG-Emissionen im Sektor AFOLU

Als Folge aller klimapolitischen Maßnahmen in den verschiedenen NGFS-Szenarien ergeben sich die zukünftigen CO₂-Emissionen und daraus abgeleitet die CO₂-Konzentrationen, aus denen die Klimamodelle eine globale

Temperaturerwärmung ableiten. Während in den Szenarien Current Policies und NDC die CO₂-Emissionen bis 2050 weiter steigen, sinken sie in allen anderen Szenarien mehr oder weniger stark ab. Allerdings gelingt es nur in den Szenarien Net Zero 2050 und Divergent Net Zero die für die globale Erwärmung so wichtige CO₂-Konzentration bis 2050 nicht weiter ansteigen zu lassen. In allen anderen Szenarien (auch in den Szenarien mit einer Reduktion der Emissionen) reichen die Anstrengungen nicht aus (s. Abbildung 42).

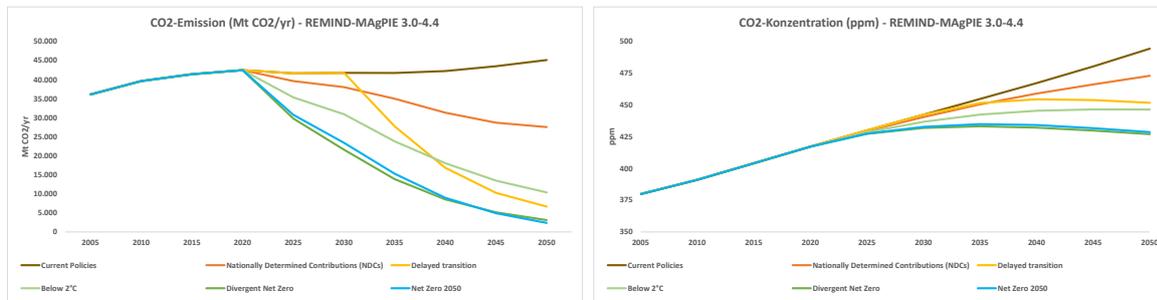


Abbildung 42. Entwicklung der CO₂-Emissionen und -Konzentrationen in den verschiedenen NGFS-Szenarien bis zum Jahr 2050

Dies zeigt sich auch bei der Projektion der globalen Durchschnittstemperatur bis zum Jahr 2100. Die kontinuierlichen Emissionen von Treibhausgasen seit der industriellen Revolution ab dem Jahr 1850 haben bereits heute zu einer globalen Erwärmung von etwa 1,2°C geführt. Die derzeitigen Temperaturen sind höher als zu jedem anderen Zeitpunkt in den letzten 12.000 Jahren. Wenn keine weiteren klimapolitischen Maßnahmen ergriffen werden, sind im 21. Jahrhundert sowohl durchschnittliche als auch extreme Temperaturveränderungen zu erwarten. In dem NGFS-Szenario Current Policies könnte die globale Erwärmung in den 2030er Jahren 1,5°C betragen, um 2050 2°C und in den 2090er Jahren 3°C. Eine solche globale Erwärmung wird zu einer Zunahme schwerwiegender und unumkehrbarer Klimaauswirkungen führen. Demgegenüber kann in den Szenarien Net Zero 2050 und Divergent Net Zero ein Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur über 1,5°C vermieden werden.

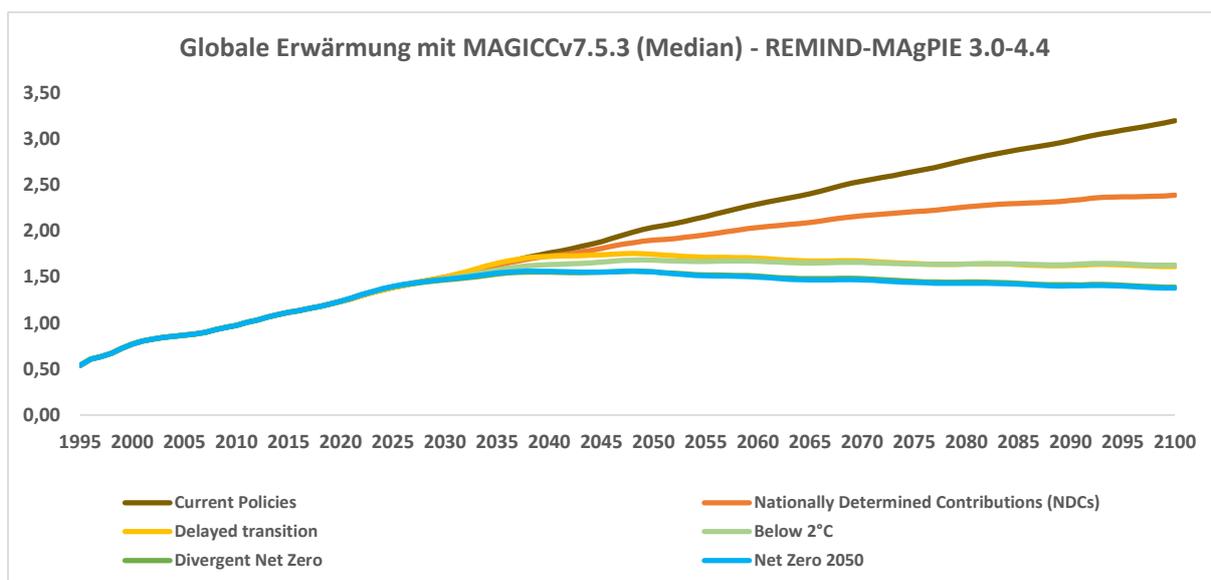


Abbildung 43. Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur bis zum Jahr 2100 in den verschiedenen NGFS-Szenarien

Der Temperaturanstieg hat erhebliche Konsequenzen. So wird sich die physische **Arbeitsproduktivität** durch heiße und feuchte Klimabedingungen erheblich verringert. Global wird diese in einer 3°C-Welt voraussichtlich um 10 % oder mehr zurückgehen, etwa dreimal so stark wie bei einer Begrenzung der Erwärmung auf 1,5°C. Die Auswirkungen sind in den tropischen Regionen am stärksten ausgeprägt, mit besonders starken Auswirkungen in Afrika und Asien. Während für Europa im Durchschnitt geringere Auswirkungen erwartet werden, gibt es in den anderen Ländern je nach Breitengrad und lokalem Klima eine beträchtliche Bandbreite. Die folgende Grafik zeigt die Auswirkungen in Deutschland.

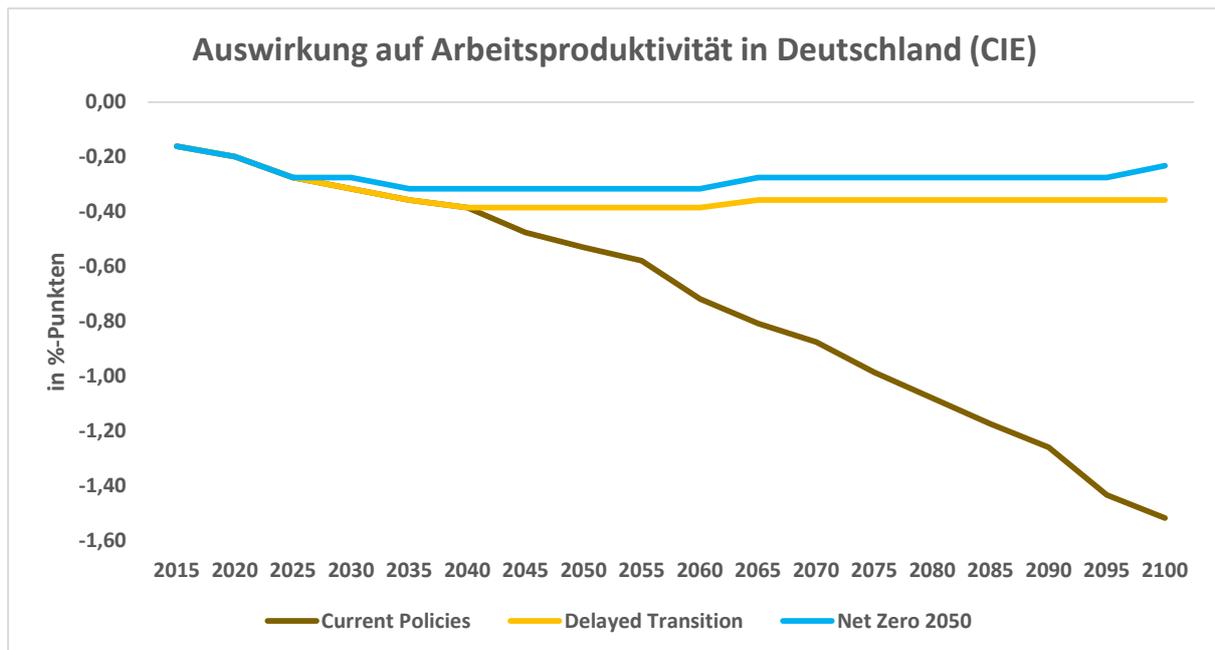


Abbildung 44. Reduktion der Arbeitsproduktivität in Deutschland bis zum Jahr 2100

Auch die Exposition gegenüber Naturgefahren wie Überschwemmungen wird sich bei einer globalen Erwärmung um 3°C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter weltweit erhöhen. In einer 3°C-Welt könnten die jährlich erwarteten Schäden durch Flussüberschwemmungen in Indien um das Dreifache und in China und Deutschland um das Doppelte gegenüber dem Stand von 2020 ansteigen. Die Schätzungen konzentrieren sich auf die direkten materiellen und berücksichtigen weder weitergehende soziale und wirtschaftliche Auswirkungen noch Änderungen des Sachwertes. In der nachfolgenden Grafik wird die prozentuale Veränderung der jährlich erwarteten Schäden durch Überschwemmungen in den drei Szenarien Net Zero 2050, Delayed Transition und Current Policies in Deutschland dargestellt. Wie bereits bei anderen Ergebnissen zeigt sich auch hier, dass eine verspätete Reaktion (Delayed Transition) zu einem deutlichen Anstieg der physischen Risiken gegenüber einem geregelten Übergang (Net Zero 2050) führt.

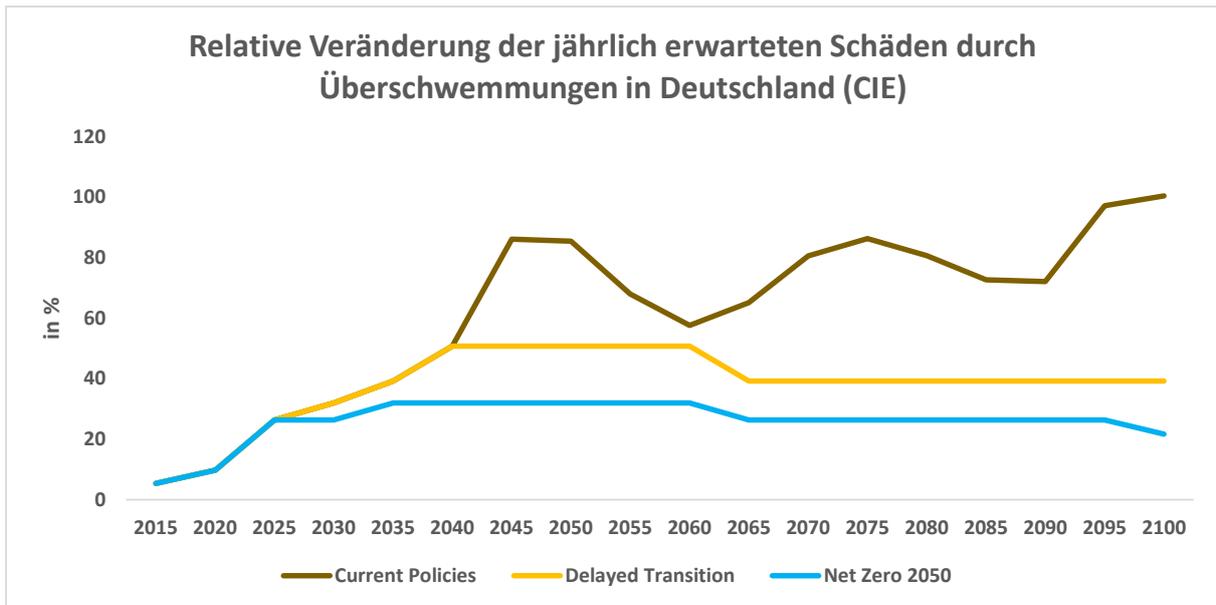


Abbildung 45. Veränderung der jährlich erwarteten Schäden durch Überschwemmungen in Deutschland bis zum Jahr 2100 für unterschiedliche NGFS-Szenarien

Die wirtschaftlichen Auswirkungen der physischen Risiken kann anhand der Verluste des globalen Bruttoinlandsproduktes (engl. Gross Domestic Product, GDP) dargestellt werden. Diese schwanken sehr stark abhängig vom jeweiligen Szenario und vom Ausmaß der berücksichtigten Schäden (s. Abbildung 46).

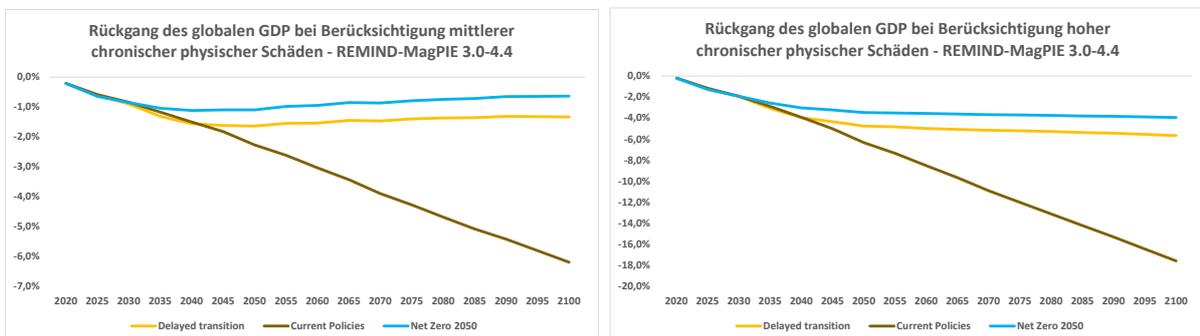


Abbildung 46. BIP-Veränderung unter Berücksichtigung von physischen Schäden in den verschiedenen NGFS-Szenarien

In den Szenarien sind Auswirkungen extremer Wetterereignisse, des Anstiegs des Meeresspiegels oder allgemeiner gesellschaftlicher Auswirkungen durch Migration oder Konflikte nicht enthalten. Für bestimmte Länder würden diese das physische Risiko wahrscheinlich stark erhöhen. Diese Projektionen berücksichtigen zudem auch nicht vollständig die Anpassungsmaßnahmen, die die Auswirkungen verringern würden, aber erhebliche Investitionen erfordern.

6. Einordnung / kritische Bewertung

Im Lichte der sich schnell ändernden, komplexen und langfristigen Natur von klimabezogenen Risiken sind Szenarioanalysen von zentraler Wichtigkeit für die Abschätzung der Auswirkungen auf Unternehmen. Bei der Einordnung und kritischen Bewertung der Szenarien dürfen jedoch wesentliche Einschränkungen nicht außer Acht gelassen werden:

- Ungewissheit: Eine zentrale Herausforderung des Klimawandels ist die fundamentale Ungewissheit über zukünftige Entwicklungen. Hierbei können „tail events“, Dominoeffekte und Kippunkte sowohl auf der physikalischen als auch auf der sozioökonomischen und politischen Seite eine wesentliche Rolle spielen. Die Klimarisiko-Szenarioanalyse stützt sich auf eine Reihe von Annahmen und Prognosen politischer und physikalischer Natur, welchen einen hohen Grad an Unsicherheit aufweisen.
- Komplexität: Der Klimawandel ist ein komplexes Phänomen mit zahlreichen interagierenden Faktoren, und die Analyse der Auswirkungen ist komplex und schwierig zu modellieren. Zukünftige Entwicklungen hängen in hohem Maße von politischen Entscheidungen ab. Klimarisikoszenarien begegnen dieser Komplexität mit einer Vielzahl von Annahmen über zukünftige Treibhausgasemissionen, die Klimasensitivität und die Geschwindigkeit der globalen Erwärmung, und über Ausmaß, Implementierung und Reaktion auf klimapolitische Maßnahmen. Relevanz und Auswirkungen dieser Annahmen sind für Anwender von Klimaszenarien nicht immer transparent und bedürfen einer tiefergehenden Auseinandersetzung.
- Begrenzte Statistik: Nach aktuellem Stand sind aus technischer Sicht detaillierte Szenarioanalysen für die meisten Risikotreiber nur für eine begrenzte Zahl Szenarien möglich. Damit ist es, wenn überhaupt nur unter sehr hohem Aufwand möglich, einzelne Annahmen und Modellierungsentscheidungen isoliert zu quantifizieren und aus statistischer Sicht einzuordnen. Dennoch sollte im Rahmen der Szenarioanalyse sowohl das Szenario als auch die davon abgeleiteten Parameter zumindest qualitativ im Hinblick auf ihre mehr oder weniger extremen Ausprägungen eingeordnet werden – beispielsweise im Vergleich mit existierenden Risikokennzahlen und historischen Stressen.
- Grenzen der Modellierung: Klimamodelle und die darauf basierenden Szenarien unterliegen materiellen Einschränkungen im Hinblick auf ihre Modellierbarkeit. Dazu zählen nicht nur bekannte Einschränkungen in der Modellierbarkeit von akuten physischen Risiken, sondern insbesondere auch Kippunkte und kaskadierende Effekte sowohl physikalischer als auch sozioökonomischer Natur. Physikalische Kippunkte bezeichnen hier insbesondere die Kippunkte des Weltklimas [42], weitere mögliche kaskadierende Effekte können beispielsweise Pandemien, Finanzkrisen oder militärische Konflikte beinhalten.

Aus diesen wesentlichen Einschränkungen ziehen wir zwei Hauptempfehlungen zur kritischen Einordnung und Bewertung von Klimaszenarien:

- 1. Die Benutzung von etablierten Klimaszenarien (bspw. NGFS) zur unternehmenseigenen Szenarioanalyse bedarf einer**

Auseinandersetzung und Einordnung sowohl der Szenarioannahmen und verwendeten Variablen, als auch der resultierenden Auswirkungen und Verläufe.

Klimaszenarien stellen plausible Entwicklungspfade dar, die bedingt sind auf Klimaziele und weitere soziale, politische und ökonomische Annahmen. Als plausible Entwicklungspfade auf Basis ökonomischer Modelle handelt es sich damit allerdings nicht um Vorhersagen oder auch nur wahrscheinliche Entwicklungen.

Im Zuge der Durchführung von Szenarioanalysen sind diese auf ihre Angemessenheit und Einordnung für das anwendende Unternehmen zu prüfen. Die den verwendeten Szenarien zugrunde liegenden Annahmen, verwendete Parameter, der gewählte Grad der Komplexität, sowie weitere wesentliche Modellannahmen bedürfen einer kritischen Einordnung. Nach Durchführung von Szenarien ist eine Analyse der Ergebnisse erforderlich, bei der vor dem Hintergrund der unvermeidlichen Unzulänglichkeiten von Modellen die resultierenden Kernaussagen dahingehend untersucht werden, ob sie als tragfähig einzustufen sind. In diesem Kontext ist kann beispielsweise auch ein Vergleich mit gängigeren, vom Versicherer bereits bewerteten Stressszenarien wesentliche Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Einschränkungen herausstellen.

Weiterhin ist es insbesondere zur Einordnung der potenziellen Schäden in Klimarisikoszenarien wichtig, zu beachten, ob es sich bei den verwendeten Szenarien eher um Extrem- oder eher um Szenarien nahe eines ökonomischen Best-Estimate-Pfades handelt. Beispielsweise sind die üblicherweise verwendeten NGFS- oder IPCC-Szenarien nicht notwendigerweise Extremszenarien, sondern häufig „Best-Estimate“-Pfade, bedingt auf die entsprechenden sozialen, politischen und ökonomischen Annahmen. Dies hat zur Folge, dass der eher stetige zukünftige Verlauf dieser Szenarien typischerweise deutlich kleinere Auswirkungen beschreibt als durch Extremereignisse hervorgerufene Auswirkungen, auch wenn diese Extremereignisse klimarelevant sind.

Ein Beispiel für ein solches Extremereignis ist die Entwicklung der geopolitischen Situation in 2022 (siehe Abbildung 47). Die Auswirkungen des sicherlich als Extremereignis einzustufenden Ukraine-Konflikts zum Beispiel auf Energiepreise und das Wirtschaftswachstum verschiedener Länder führen zu Abweichungen von erwarteten Trajektorien, die kurz- und mittelfristig wesentlich höher sind als die Unterschiede zwischen diversen bestehenden Klimaszenarien und dem zentralen Pfad.

Abhängig von der Einschätzung über den zukünftigen Verlauf solcher Parameter muss dann überlegt werden, ob eine Neukalibrierung der Klimaszenarien im Hinblick auf die nicht-klimagetriebenen Parameter erforderlich ist. Abhängig von Konstruktion und Betrachtungsweise kann sich das Extremereignis gleichermaßen auf Basis-Szenario und Klimaszenario auswirken, so dass der Nettoeffekt relativ zu einem gewählten Basisszenario vernachlässigbar ist. Ebenso kann es sein, dass der langfristige Einfluss des Ereignisses auf makroökonomische Parameter nicht wesentlich ist. Aufgrund des hohen Aufwands muss die Frage nach der geeigneten Frequenz einer solchen individuellen (Nach-)Kalibrierung im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse gestellt werden, da bereits die regulären Klimaszenarien für viele Unternehmen einen hohen Aufwand darstellen.

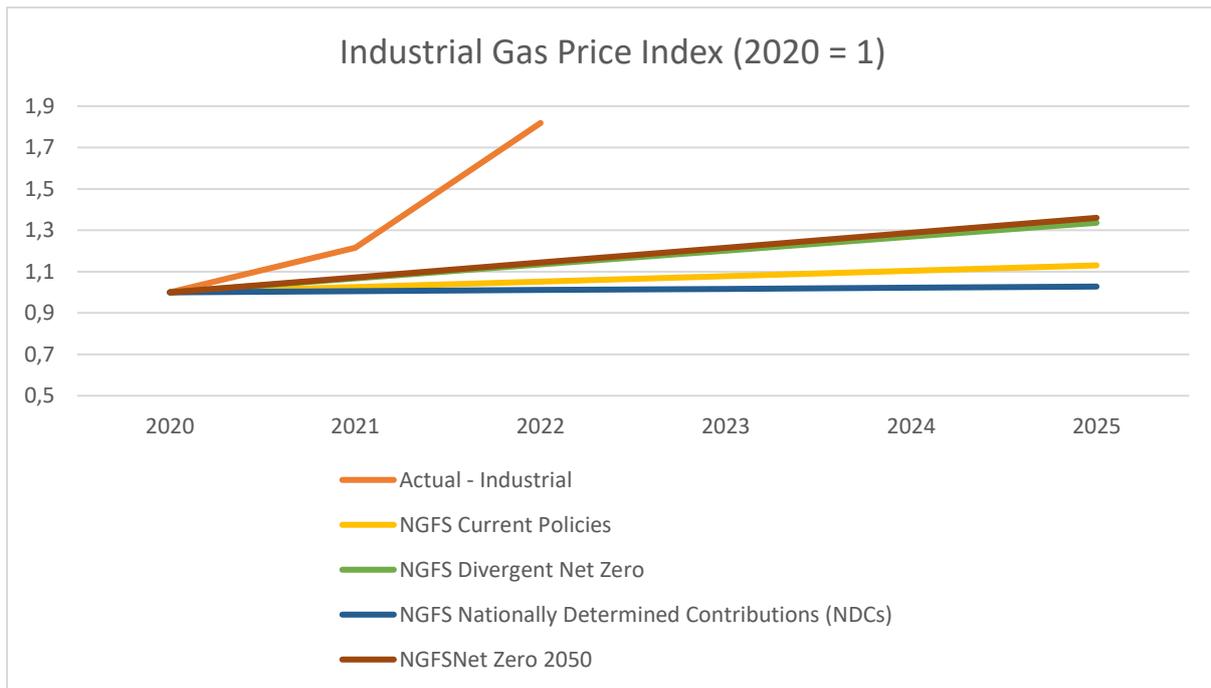


Abbildung 47. Index der Industriegaspreise in den NGFS-Szenarien

Auf der anderen Seite sind eine Reihe regulatorischer Stresstests eher an Extrem-szenarien ausgerichtet – so zeichnet beispielsweise das „No-Additional-Action“-Szenario der Bank of England in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts einen Temperaturverlauf, welcher aus dem Temperaturverlauf im IPCC-Extremszenario RCP8.5 in der zweiten Jahrhunderthälfte abgeleitet ist. Auch das „No-Action“-Stresszenario der Monetary Authority of Singapore (MAS) zeigt einen Temperaturanstieg, welcher deutlich über dem Extremszenario des IPCC liegt. Das „Current Policies“-Szenario des NGFS hingegen zeigt einen Verlauf nahe des RCP6.0, welches nach gängiger Auffassung ein wahrscheinlicher Emissionspfad unter der aktuellen Klimapolitik ist. Da der Temperaturanstieg einer der Hauptindikatoren für das Level an physischen Schäden ist, sind somit in diesen regulatorischen Szenarien weitaus höhere Schäden zu erwarten als in NGFS oder IPCC-Szenarien.

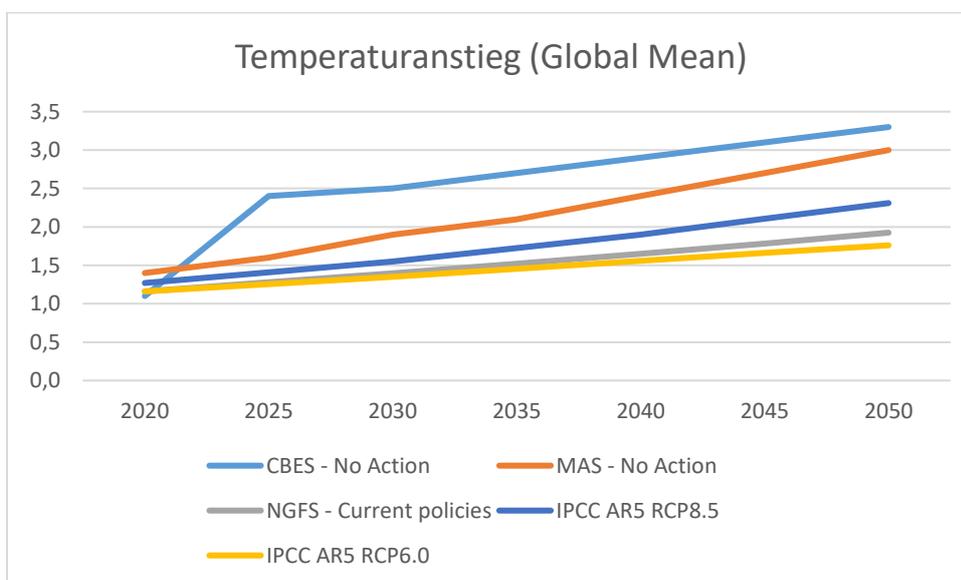


Abbildung 48. Projizierter Temperaturanstieg in verschiedenen Klimaszenarien

2. Aufgrund der ausgesprochenen Ungewissheit können Szenarien per Konstruktion niemals alle möglichen Risiken abdecken. Szenarioanalysen müssen somit in den Gesamtkontext des qualitativen und quantitativen Risikomanagements eingeordnet werden.

Das bedeutet zweierlei: Erstens ist der Raum der möglichen für Klimarisiko relevanten Variablen sehr groß, was in der Praxis notwendigerweise eine Vorauswahl von Treibern erfordert. Diese Auswahl von Treibern ist auch durch praktische Gegebenheiten wie Datenverfügbarkeit limitiert, dennoch sollte bei der Szenariokonstruktion eine Vorauswahl von relevanten Treibern (Marktbewegungen, Inflation, Sterblichkeitsrate, Großschadenereignisse...) stattfinden. Auch sollten hier angemessene Granularität und eine übermäßige Scheingenaugigkeit gegeneinander abgewogen werden.

Die relevanten Treiber wiederum zu identifizieren ist aber nicht trivial, da sie nicht allgemeingültig sind, sondern vom Unternehmen und dessen Strategie, Portfolio etc. abhängen. Zusätzlich kann sich die Relevanz auch über den Zeithorizont verändern, beispielsweise zeigen Treiber im Zusammenhang mit physischen Risiken typischerweise auf längeren Zeithorizonten eine höhere Relevanz. Weiterhin ist vom Anwender ebenfalls einzuordnen, inwieweit ausgewählte Treiber tatsächlich für das Klimarisikoprofil in Abgrenzung zum regulären Markt- oder versicherungstechnischen Risiko relevant sind.

Zweitens hat insbesondere die Erfahrung der letzten Jahre gezeigt, dass die größten Auswirkungen oft durch indirekte, möglicherweise kaskadierende Effekte erzeugt werden. Diese können aber auch von komplexen Modellen nur unzureichend und mit größter Unsicherheit modelliert werden. Wesentliche Einschränkungen nahezu aller verfügbaren Klimaszenarien sind damit insbesondere fehlende Modellierung von Kippunkten und kaskadierenden Effekten.

Table 1. Table showing our literature-based threshold, timescale, and impact estimates for the tipping elements we categorize as global core or regional impact. Element acronym colors indicate Earth system domain (blue, cryosphere; green, biosphere; orange, ocean-atmosphere), and element name and estimate colors indicate subjective confidence levels (green, high; yellow, medium; red, low). Bolded element names indicate elements featured in previous climate tipping element characterizations.

Category	Proposed climate tipping element (and tipping point)	Threshold (°C)			Timescale (years)			Maximum impact* (°C)	
		Est.	Min	Max	Est.	Min	Max	Global	Region
Global core tipping elements	GrIS Greenland Ice Sheet (collapse)	1.5	0.8	3.0	10k	1k	15k	0.13	0.5 to 3.0
	WAIS West Antarctic Ice Sheet (collapse)	1.5	1.0	3.0	2k	500	13k	0.05	1.0
	LABC Labrador-Irminger Seas / SPG Convection (collapse)	1.8	1.1	3.8	10	5	50	-0.50	-3.0
	EASB East Antarctic Subglacial Basins (collapse)	3.0	2.0	6.0	2k	500	10k	0.05	?
	AMAZ Amazon Rainforest (dieback)	3.5	2.0	6.0	100	50	200	Partial: 30 GtC / 0.1°C Total: 75 GtC / 0.2°C	0.4 to 2.0
	PFTP Boreal Permafrost (collapse)	4.0	3.0	6.0	50	10	300	125-250 GtC / 175-350 GtCe / 0.2-0.4°C	~
	AMOC Atlantic M.O. Circulation (collapse)	4.0	1.4	8.0	50	15	300	-0.50	-4 to -10
	AWSI Arctic Winter Sea Ice (collapse)	6.3	4.5	8.7	20	10	100	0.60	0.6 to 1.2
	EAIS East Antarctic Ice Sheet (collapse)	7.5	5.0	10.0	?	10k	?	0.60	2.0
	REEF Low-latitude Coral Reefs (die-off)	1.5	1.0	2.0	10	~	~	~	~
Regional impact tipping elements	PFAT Boreal Permafrost (abrupt thaw)	1.5	1.0	2.3	200	100	300	Abrupt thaw adds 50% to gradual: 10 GtC/14 GtCe / .04°C per °C @2100; 25 GtC/35 GtCe / .11°C per °C @2300	~
	BARI Barents Sea Ice (abrupt loss)	1.6	1.5	1.7	25	?	?	~	+
	GLCR Mountain Glaciers (loss)	2.0	1.5	3.0	200	50	1k	0.08	+
	SAHL Sahel and W. African Monsoon (greening)	2.8	2.0	3.5	50	10	500	~	+
	BORF Boreal Forest (southern dieback)	4.0	1.4	5.0	100	50	?	+52GtC / net -0.18°C	-0.5 to -2
	TUND Boreal Forest (northern expansion)	4.0	1.5	7.2	100	40	?	-6 GtC / net +0.14°C	0.5-1.0

*Feedback strength in °C per °C for abrupt permafrost thaw is calculated relative to preindustrial and declines with further degrees of warming (by ~21% per °C).

Abbildung 49. Wesentliche Kippunkte des Klimas, mit Temperaturgrenzwerten und wahrscheinlichen Zeitskalen [42].

Dazu zählen auf der physikalischen Seite insbesondere die eingeschränkte Modellierung von Kippunkten im Weltklima, so sie denn auf der im Rahmen der Szenarioanalyse betrachteten Zeitskala und dem jeweiligen Klimaszenario relevant sind (siehe Abbildung 49). Beispielsweise könnte ein Abschwächen des Nordatlantikstromes (LABC in Abbildung 49) eine kurzfristig rapide Abkühlung mit starken regionalen Differenzialen zur Folge haben [43], welche mit hoher Wahrscheinlichkeit auch materielle ökonomische Konsequenzen nach sich ziehen würde.

Auf der sozioökonomischen Sicht sind ebenfalls eine Reihe nicht modellierter Effekte potenziell risikorelevant [44]. Dazu gehört beispielsweise die fehlende

Betrachtung von kaskadierenden Effekten von physischen und transitorischen Risiken, beispielsweise durch Pandemien und Finanzkrisen. Darüber hinaus werden innerhalb der Szenarien Klimarisiken wie bereits diskutiert auf einem „Best Estimate“-Pfad, isoliert und ohne Berücksichtigung von plausiblen simultanen Schocks behandelt, welche mögliche Schäden auf ein Vielfaches der Einzelschocks ausweiten würden. Dazu zählen insbesondere extremere, aber dennoch nicht unplausible Szenarien, in denen der Klimawandel eine nachhaltige geopolitische Instabilität mit induziert, beispielsweise durch Kriege oder Flüchtlingsbewegungen.

Die nur eingeschränkte Modellierbarkeit solcher Risiken stellt eine wesentliche Herausforderung für das Management von Klimarisiken dar. Die Relevanz einer kritischen Einordnung der Szenarioanalyse in den Gesamtkontext des qualitativen und quantitativen Risikomanagements wird damit umso offener, gegeben dass sich einige der zentralen Klimarisiken derzeit einer direkten Modellierbarkeit entziehen. Dies kann beispielsweise im Rahmen einer komplementären, qualitativen Analyse von Klimarisiken adressiert werden.

Fazit

Trotz der genannten Einschränkungen ist die Analyse der Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien ein wichtiger Baustein in der Betrachtung von Klimarisiken. Abseits der regulatorischen Anforderungen ermöglicht die Szenarioanalyse ein besseres Verständnis der Wirkungsmechanismen und möglicher Auswirkungen von Klimarisiken. Eine unmittelbare Verwendung der Ergebnisse ist jedoch üblicherweise nur bedingt möglich. Erweiterungen bezüglich der Granularität der Ergebnisvariablen können dabei helfen, eine differenziertere Sicht zu erhalten. Nicht direkt modellierte Effekte können im quantitativen und vor allem auch im qualitativen Risikomanagement näher untersucht werden.

Mit jeder Analyse sollte eine kritische Auseinandersetzung mit den Annahmen und Ergebnissen der Szenarien verbunden sein. Diese ermöglicht wichtige Einblicke in potentielle zukünftige Abläufe, Strukturen und Auswirkungen, und kann damit Input für ein entsprechendes Anpassen der Unternehmensstrategie geben.

7. Glossar

Begriff	Bedeutung	Beschreibung
AFOLU	engl. Agriculture Forestry and other Land use	ist ein Treibhausgasinventarsektor, der Emissionen und Abbau von Treibhausgasen umfasst, die sich aus der direkten vom Menschen verursachten Landnutzung wie Siedlungen und kommerziellen Nutzungen, Landnutzungsänderungen und forstwirtschaftlichen Aktivitäten ergibt.
BECCS	engl. Bioenergy with Carbon Capture and Storage	Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung umfasst jeden Energiepfad, bei dem CO ₂ aus einer biogenen Quelle gewonnen und dauerhaft gespeichert wird.
Carbon Accounting		Erfassen, Bewerten und Verfolgen der Anzahl von Treibhausgasemissionen eines Unternehmens.
carbon footprint	CO ₂ -Bilanz / -Fußabdruck	Menge der CO ₂ -Emissionen (in Tonnen CO ₂ -Äquivalent), die mit der Aktivität einer Person / eines Unternehmens zusammenhängt
carbon offset	Klimakompensation	Aktivität, die die CO ₂ -Emissionen oder Emissionen von anderen Treibhausgasen ausgleicht, indem sie diese an einem anderen Ort reduziert.
CDP	engl. Carbon Disclosure Project	NGO, die ein globales Informationsoffenlegungssystem für Unternehmen, Investoren, Regionen zur Verwaltung von deren Umwelteinflüssen.
CDR	engl. Carbon Dioxide Removal	Ansätze und Methoden zum Entfernen von CO ₂ aus der Atmosphäre und anschließendem permanenten Speichern in unterirdischen Gesteinsformationen, Biomasse, ...
CIE	engl. Climate Impact Explorer	Das Ziel des CIE ist es, Informationen über die projizierten Veränderungen verschiedener Klimaauswirkungsindikatoren bei unterschiedlichen globalen Temperatursteigerungen zu geben.

CLIMADA	CLIMate ADAPtion	CLIMADA ist ein Open-Source-Tool für die Modellierung von Katastrophenrisiken und wird verwendet, um die Schäden durch Extremereignisse abzuschätzen, indem ihre Eintrittswahrscheinlichkeit und das mit ihnen verbundene Verlustrisiko modelliert wird.
Decarbonisation		Prozess der Reduzierung der Treibhausgasemission, z.B. CO ₂ , in die Atmosphäre durch bspw. verringern des Verbrennens von fossilen Energieträgern.
DECK	engl. Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima	
emission factor	Emissionsfaktor	Koeffizient, der die Rate beschreibt, mit welcher Treibhausgase in die Atmosphäre aufgrund einer Tätigkeit emittiert werden.
financed emissions	Finanzierte Emissionen	Indirekte Treibhausgasemissionen, die Finanz-, Versicherungsunternehmen, etc. aufgrund deren Finanzierung des ursprünglichen Emittenten zugeordnet werden.
fugitive emissions	Diffuse Emissionen	Unregelmäßige Emission oder Entweichung von (Treibhaus-) Gasen, meist aus der Industrie.
GCAM	engl. Global Change Assessment Model	GCAM ist ein partielles Gleichgewichtsmodell zwischen dem Energie- und dem Landnutzungssystem.
GCM	engl. General Circulation Model	GCM sind ein komplexe Klimamodelle, die die physikalischen und biogeochemischen Prozesse in den einzelnen Subsystemen des Klimasystems in getrennten Modellen beschreiben und dann miteinander koppeln.
IAM	engl. Integrated Assessment Models	Die IAM bilden die Dynamik des Klimawandels und dessen Abhängigkeit von Treibhausgasemissionen, sowie die globalen wirtschaftlichen Prozesse, welche zu diesen Emissionen führen, ab.

ICONICS	engl. International Committee On New Integrated Climate change assessment Scenarios	Das ICONICS entwickelt, erleichtert und fördert die Nutzung sozioökonomischer Entwicklungspfade, um interdisziplinäre Forschung und Bewertung von Risiken im Zusammenhang mit dem Klimawandel zu unterstützen und die Erforschung der Wirksamkeit von Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen über räumliche und zeitliche Skalen hinweg zu unterstützen, um diese Risiken im Kontext der Ziele für nachhaltige Entwicklung zu reduzieren.
IPCC	engl. Intergovernmental Panel on Climate Change	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen: „Weltklimarat“ Beurteilt begutachtete Literatur und Methoden der Industrie, um die Einflüsse und mögliche Handlungsmöglichkeiten zur globalen Erwärmung festzustellen. Produziert selbst keine eigenen wissenschaftlichen Arbeiten.
ISIMIP	engl. Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project	ISIMIP ist ein Rahmenwerk von internationalen Klimamodellierern um die konsistente Projektion der Auswirkungen des Klimawandels in allen betroffenen Sektoren und auf allen räumlichen Ebenen zu untersuchen.
Kyoto-Protokoll		Ziel: Reduzieren von Treibhausgasemissionen: CO ₂ , Methan, Distickstoffmonoxid, Perfluorcarbonen (PFC), Fluorkohlenwasserstoffen (HFC),..., die die globale Erwärmung verursachen.
MAGICC6	engl. Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change	
MAGPIE	engl. Model of Agricultural Production and its Impacts on the Environment	MAGPIE ist ein partielles Gleichgewichtsmodell des Agrarsektors. Es handelt sich um ein rekursives dynamisches Modell, in dem die landwirtschaftliche Nachfrage für zehn Weltregionen zu minimalen globalen Kosten unter Berücksichtigung biophysikalischer und

		sozioökonomischer Beschränkungen befriedigt werden sollen.
MESSAGE-GLOBIOM		Das MESSAGE ix-GLOBIOM Integrated Assessment Model basiert auf dem MESSAGEix-Framework, einer Open-Source-Modellierungsumgebung zur Optimierung von Energiesystemen, die ein makroökonomisches Feedback unter Verwendung eines stilisierten, berechenbaren allgemeinen Gleichgewichtsmodells enthält.
NGFS	engl. Network for Greening the Financial System	NGFS ist ein globales Netzwerk von 66 Zentralbanken und Aufsichtsbehörden, die bereit sind, auf freiwilliger Basis bewährte Verfahren auszutauschen und zur Entwicklung des Umwelt- und Klimarisikomanagements im Finanzsektor beizutragen.
NGFS CA Climate Impact Explorer	https://climate-impact-explorer.climateanalytics.org/	
NGFS IIASA Scenario Explorer	https://iiasa.ac.at/models-tools-data/ngfs-iiasa-scenario-explorer	
NIESR	engl. National Institute of Economic and Social Research	Das Institut konzentriert sich auf die grundlegenden Fragen der globalen wirtschaftlichen und sozialen Strukturen mit ihren Auswirkungen auf Haushalte und Märkte, Sektoren und Regionen. Entwickler des NiGEM Modells.
NiGEM-Modell	engl. National Institute's Global Econometric Model	Bei NiGEM handelt es sich um ein globales ökonometrisches Modell. Dieses Modell hat eine breite Anwender-Gemeinschaft, die von politischen Entscheidungsträgern bis zu den Unternehmen des privaten Sektors reicht, und die NiGem für Wirtschaftsprognosen, Szenarioanalysen oder Stress-tests verwendet.
Pariser Abkommen		Als Verbesserung und Ersatz des Kyoto-Protokolls: Limitieren von Treibhausgasemissionen zum Verhindern des globalen Temperaturanstiegs an der

		Erdoberfläche um mehr als 2 °C im Vergleich zum Beginn der industriellen Revolution.
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung	Das Institut analysiert die neuesten Erkenntnisse zum Erdsystem mit der Abschätzung von Klimarisiken und mit der Erforschung von Politikoptionen. In Kooperation mit ETH Zürich wurde CIE entwickelt.
RCP	engl. Representative Concentration Pathway	Diese Pfade beschreiben verschiedene Klimazukunftsszenarien, je nachdem, wie viele Treibhausgase in den kommenden Jahren bis 2100 emittiert werden.
REMIND-MAgPIE	engl. Regional Model of Investment and Development	REMIND simuliert die zukünftige Dynamik innerhalb und zwischen den Systemen Energie, Landnutzung, Wasser, Luftverschmutzung und Gesundheit, Wirtschaft und Klima.
SSP	engl. Shared Socio-economic Pathway (SSP)	SSP sind Szenarien projizierter sozioökonomischer globaler Veränderungen bis 2100. Sie werden verwendet, um Treibhausgasemissionsszenarien abzuleiten.
Transition Pathways	Übergangswege	Auswirkungen des Klimawandels auf die physische Umwelt und wirtschaftliche Indikatoren.
Treibhausgase (THG)		Treibhausgase sind Spurengase, die zum Treibhauseffekt eines Planeten beitragen. Sie absorbieren einen Teil der von der Planetenoberfläche abgegebenen langwelligen Wärmestrahlung (Infrarot oder Thermische Strahlung), die sonst unmittelbar ins Weltall abgegeben würde.
TVF	engl. Transition Vulnerability Factors	Es handelt sich um Risikofaktoren, die die relative CO ₂ -Abhängigkeit einer Industrie in einem Szenario erfassen.
UNFCCC	engl. United Nations Framework Convention on Climate Change	Internationales Umweltabkommen zum Bekämpfen des gefährlichen anthropogenen (vom Menschen verursachten) Einfluss auf das Klima.

WCRP	engl. World Climate Research Programme	Das WCRP ist führend bei der Behandlung wissenschaftlicher Grenzfragen im Zusammenhang mit den gekoppelten Klimasystem - Fragen. Durch internationale wissenschaftliche Koordination und Partnerschaften trägt WCRP dazu bei, unser Verständnis der multiskaligen dynamischen Wechselwirkungen zwischen natürlichen und sozialen Systemen, die das Klima beeinflussen, zu verbessern.
------	--	---

8. Literaturverzeichnis

- [1] G. Supran, S. Rahmstorf, y N. Oreskes, *Science* vol. 379 (2023) eabk0063
- [2] NOAA, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>, (2022)
- [3] WMO, Provisional state of the global climate, <https://library.wmo.int/> (2022)
- [4] J. Hansen and M. Sato, 2016: Regional Climate Change and National Responsibilities *Environ. Res. Lett.* 11, 034009
- [5] J. Hansen and M. Sato, Regional Climate Change and National Responsibilities update 2019 http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2020/20200706_ShiftingBell-CurvesUpdated.pdf
- [6] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [7] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896
- [8] CRO Forum, Emerging risks initiative - major trends and emerging risk radar (2022 update), (2022).
- [9] Geneva Association task force on climate change risk assessment for the insurance industry, Anchoring climate change risk assessment in core business decisions in insurance, (2022)
- [10] E. N. Foote, Circumstances affecting the heat of the sun's rays, *Am. J. Sci. Arts* vol. 22 (1856) 382
- [11] S. Arrhenius, On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Phil. Mag. J. Sci.* vol. 41 (1896) 237–276
- [12] S. A. Clough and M. J. Iacono, Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates: 2. Application to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide and the halocarbons, *J. Geophys. Res.*, 100 (1995) 16519–16535
- [13] T. M. Lenton, H. Held, E. Kriegler, and H. J. Schellnhuber, Tipping elements in the earth's climate system, *PNAS* vol. 105 (2008) 1786–1793
- [14] J. B. Smith, H. J. Schellnhuber, y M. M. Q. Mirza, "Vulnerability to Climate Change and Reasons for Concern: A Synthesis.", in IPCC Third Assessment Report – Climate Change 2001. Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press, 2001, 915–959.
- [15] D. I. A. McKay, A. Staal, J. F. Abrams, R. Winkelmann, B. Sakschewski, S. Lo-riani, I. Fetzer, S. E. Cornell, J. Rockström, y T. M. Lenton, Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points, *Science* vol. 377 (2022) eabn7950
- [16] C. Tarnocai, J. G. Canadell, E. A. G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, y S. Zimov, Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region, *Global Biogeochemical Cycles* vol. 23 (2009) GB2023
- [17] M. Morlighem, C. N. Williams, E. Rignot, L. An, J. E. Arndt, J. L. Bamber, G. Catania, N. Chauche, J. A. Dowdeswell, B. Dorschel, I. Fenty, K. Hogan, I. Howat, A. Hubbard, M. Jakobsson, T. M. Jordan, K. K. Kjeldsen, R. Millan, L. Mayer, J. Mouginot, B. P. Y. Noel, C. O’Cofaigh, S. Palmer, S. Rysgaard, H. Seroussi, M. J. Siegert, P. Slabon, F. Straneo, M. R. van den Broeke, W. Weinrebe, M. Wood, y K. B. Zinglensen, *Bedmachine v3: Complete bed topography and ocean bathymetry mapping of greenland from multibeam echo sounding combined with mass conservation.*, *Geophys. Res. Lett.* vol. 44 (2017) 11051–11061
- [18] N. Boers and M. Rypdal, Critical slowing down suggests that the western green-land ice sheet is close to a tipping point, *PNAS* vol. 118 (2021) e2024192118
- [19] Intergovernmental Panel on Climate Change, Global warming of 1.5°C: Special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related

global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, (2018).

[20] "The heat is on" - Insurability and Resilience in a Changing Climate - Emerging Risk Initiative - Position Paper

[21] "Application guidance on running climate change materiality assessment and using climate change scenarios in the ORSA" - EIOPA-BoS-22/329 - 02 August 2022

[22] "Ausblick: Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)" - Narrative für Szenarien der nächsten Generation - TCFD Think Tank

[23] "The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century" - Brian C. O`Neill et al. (2014)

[24] <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/ecb.climateriskfinancialstability202107~87822fae81.en.pdf> (EZB Report, Juli 2021)

[25] <https://www.ngfs.net/> (Offizielle Seite)

[26] https://www.ngfs.net/sites/default/files/media/2022/11/21/technical_documentation_ngfs_scenarios_phase_3.pdf (Technische Dokumentation)

[27] https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/ngfs_climate_scenarios_for_central_banks_and_supervisors_.pdf.pdf (Präsentation zum letzten Release)

[28] <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/ngfs-iiasa-scenario-explorer> (NGFS IIASA Scenario Explorer)

[29] <https://climate-impact-explorer.climateanalytics.org/> (NGFS CA Climate Impact Explorer)

[30] <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Hauptseite>

[31] Quelle: <https://climatescenarios.org>

[32] <https://www.niesr.ac.uk/nigem-macroeconomic-model>

[33] <https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2022/05/Economic-Impacts-of-Climate-Change.pdf>

[34] <https://www.bundesbank.de/resource/blob/875940/8e7ac54396fb19056eb9e4f201939a0b/mL/2021-13-technical-paper-data.pdf>

[35] https://www.eiopa.europa.eu/sites/default/files/financial_stability/insurance_stress_test/methodological_principles_of_insurance_stress_testing_-_climate_change_component.pdf

[36] <https://www.oecd.org/finance/Financial-Markets-and-Climate-Transition-Opportunities-Challenges-and-Policy-Implications.pdf>

[37] <https://www.youtube.com/watch?v=Zf2CEzHteUo>

[38] <https://www.ngfs.net/ngfs-scenarios-portal/>

[39] <https://climate-impact-explorer.climateanalytics.org/methodology/>

[40] <https://climatedata.ca/resource/understanding-shared-socio-economic-pathways-ssps/>

[41] <https://www.bmuv.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/effizienz-und-kosten>

[42] Armstrong McKay DI, A Staal, JF Abrams, R Winkelmann, B Sakschewski, S Loriani, I Fetzer, SE Cornell, J Rockström, TM Lenton (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points, *Science* 377 (6611). [doi: 10.1126/science.abn7950], climatetippingpoints.info

[43] Sgubin G, Swingedouw D, Drijfhout S, Mary Y, Bennabi A. Abrupt cooling over the North Atlantic in modern climate models. *Nat Commun.* 2017 Feb 15;8:14375. doi: 10.1038/ncomms14375. Erratum in: *Nat Commun.* 2018 Jun 25;9:16222. PMID: 28198383; PMCID: PMC5330854.

[44] Irene Monasterolo. Climate scenarios for financial risk analysis. EDHEC Research Insights, Spring 2023

[45] UNFCCC: The Paris Agreement - Paris Climate Change Conference (November 2015); Publication Date: November 2018

[46] <https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz/>

[47] Ergebnisbericht des Ausschuss Investment "Klimaszenarien – praktische Anwendung in der Kapitalanlage", 05.05.2022

Anhang A: Anwendungen des NiGEM-Modells im Rahmen von Klimastresstests bzw. Analysen klimabezogener Risiken

(1) De Nederlandsche Bank N.V. (2018) –

An energy transition stress test for the financial system of the Netherlands

[https://www.dnb.nl/media/pdnpdalc/201810_nr-7_2018-an_energy_transition_risk_stress_test_for_the_financial_system_of_the_netherlands.pdf](https://www.dnb.nl/media/pdnpdalc/201810_nr-7_2018_an_energy_transition_risk_stress_test_for_the_financial_system_of_the_netherlands.pdf)

In Abhängigkeit der im Stresstest unterstellten vier Szenarien wurden die makroökonomischen und finanzwirtschaftlichen Ausprägungen der Szenarien auf Basis des NiGEM-Modells generiert. Z.B. enthält das NiGEM-Modell separate Preise für die fossilen Brennstoffe Kohle, Öl und Gas. Im 1. Szenario („Policy shock“) wird z.B. ein Anstieg des CO₂-Preises um 100 USD pro Tonne unterstellt. Dann wird der CO₂-Preisanstieg pro Barrel Öl und den entsprechenden Äquivalenten von Kohle und Gas in Abhängigkeit der jeweiligen CO₂-Emissionsintensität ermittelt und anschließend auf die im NiGEM-Modell gegebenen jeweiligen (Basis-)Preise hinzuaddiert.

Folgeeffekte des CO₂-Preisanstiegs im 1. Szenario:

- ⇒ Geringeres BIP-Wachstum
- ⇒ Höhere Inflation
- ⇒ Sinkende Aktienpreise
- ⇒ Höhere Zinssätze

Year	Inflation	10Y interest rate	Stock price index
1	+2,1%	+1,0 p.p.	-5,3%
2	+2,3%	+0,6 p.p.	-5,4%
3	+2,2%	-0,0 p.p.	-2,6%
4	+2,7%	-0,2 p.p.	-0,8%
5	+3,5%	-0,0 p.p.	-0,3%

(2) Deutsche Bundesbank (2021) –

Technical Paper: Sensitivitätsanalyse klimabezogener Transitionsrisiken des deutschen Finanzsektors

<https://www.bundesbank.de/resource/blob/875940/8e7ac54396fb19056eb9e4f201939a0b/mL/2021-13-technical-paper-data.pdf>

In dieser Studie wird die Einführung einer globalen CO₂-Bepreisung angenommen, welche in ihrer Höhe in allen Sektoren und Ländern einheitlich ist. Mögliche Verwundbarkeiten aus anderen, global und sektoral heterogenen CO₂-Preispfaden sowie potentielle Verwundbarkeiten aus den physischen Folgen des Klimawandels werden *nicht* untersucht.

Den Ausgangspunkt der Analyse bilden IAMs. In der Analyse werden

komplementäre ökonomischen Modelle verwendet, welche die in den IAMs hergeleiteten realwirtschaftlichen Effekte in den zentralen Variablen nachbilden (Bruttoinlandprodukt, Energie- und Emissionsintensitäten, globale CO₂-Preispfade) und um weitere, insbesondere finanzwirtschaftliche Variablen wie Zinsen, Profite und Unternehmensbewertungen ergänzen. Darüber hinaus werden die regional und sektoral höher aggregierten IAM-Variablen in beiden Dimensionen weiter ausdifferenziert und in Effekte auf die Realwirtschaft übersetzt. Einerseits wird das ebenfalls im NGFS genutzte und erweiterte makroökometrische Modell NiGEM, welches die ökonomischen Variablen der IAMs in eine Vielzahl von detaillierteren makro- und finanzwirtschaftlichen Variablen übersetzt, eingesetzt. Andererseits wird zusätzlich ein von der Bundesbank intern entwickeltes Sektorenmodell, welches die lediglich auf nationaler Ebene ausdifferenzierten NiGEM-Ergebnisse auf 56 realwirtschaftliche Sektoren umlegt, verwendet.

Darüber hinaus werden die von den ökonomischen Modellen bereitgestellten Finanzvariablen je Szenario mit Hilfe von Finanzmarktmodellen in Wertverluste einzelner Wertpapiere umgerechnet. Um eine möglichst breite Abdeckung aller Wertpapierarten in der Analyse zu erhalten, werden historische Korrelationen zwischen einerseits der Entwicklung von Bruttoinlandsprodukt, Sektorumsätzen und -aktienbewertungen und andererseits Anleihen- und Kreditausfallraten geschätzt. Die historischen Elastizitäten werden dann auf die Szenariovariablen angewandt, um Wertanpassungen zu erhalten. Diese werden anschließend in die Bilanzen der deutschen Finanzintermediäre gespiegelt. Besonderheiten der verschiedenen Finanzsektoren, d.h. Banken, Fonds und Versicherer, werden in der Methodik berücksichtigt.

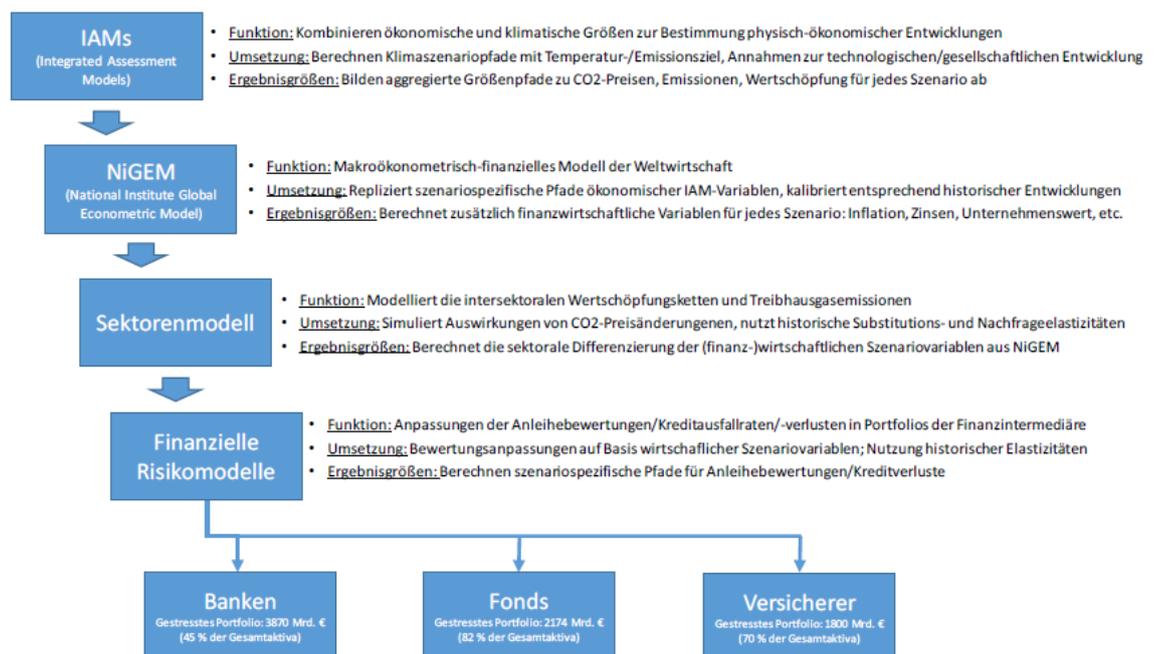


Abbildung 1 Modellkette zur Analyse von Auswirkungen klimabedingter Risiken auf das Finanzsystem

Prozentuale Differenz der Variablenwerte im „Net Zero 2050“-Szenario zum „Current Policies“-Szenario

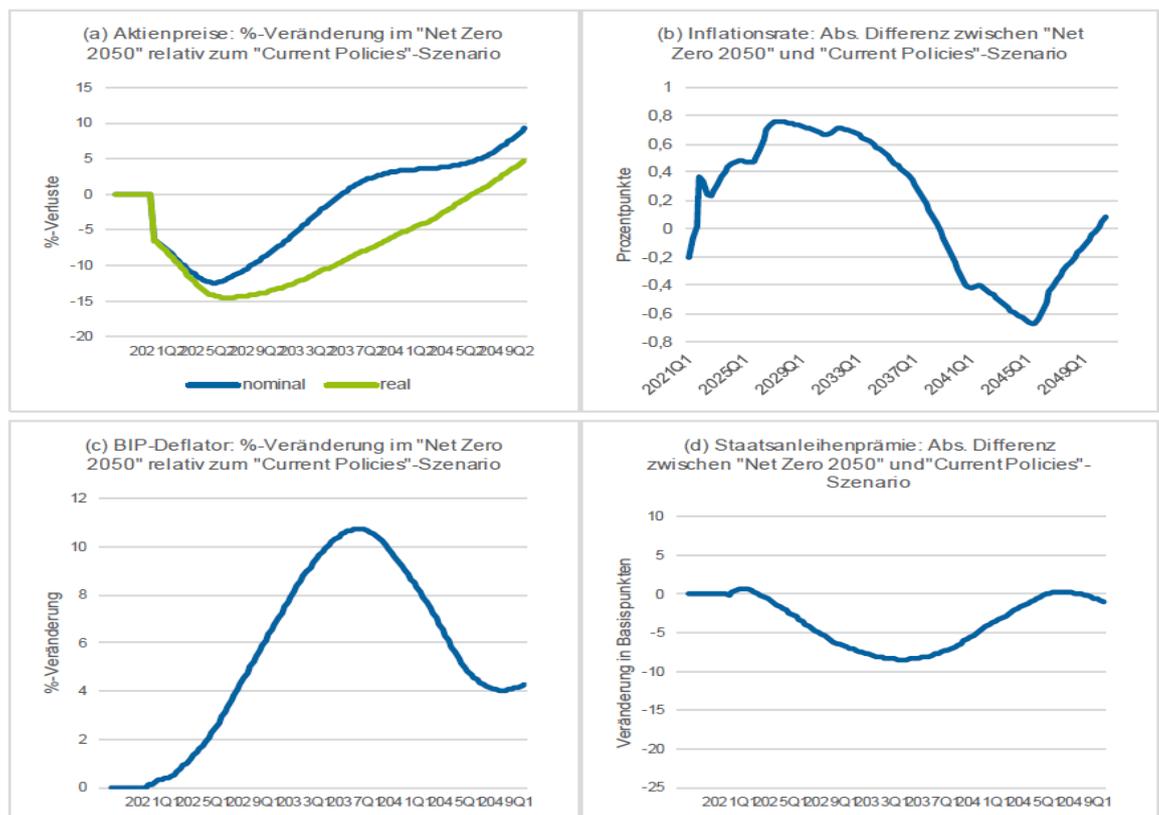


Abbildung 7: Entwicklungspfade der Aktienpreise, der Inflationsrate, des BIP-Deflators und der Staatsanleihenprämie in Deutschland im NGFS-„Net Zero 2050“-Szenario, relativ zum „Current Policies“-Szenario