

Alexander Krauskopf, B&W Deloitte GmbH

ESG- Szenario-Generator 2.0

Wie entstehen eigentlich Klimaszenarien?

qx-Club Köln/Bonn/Düsseldorf 13.01.2026

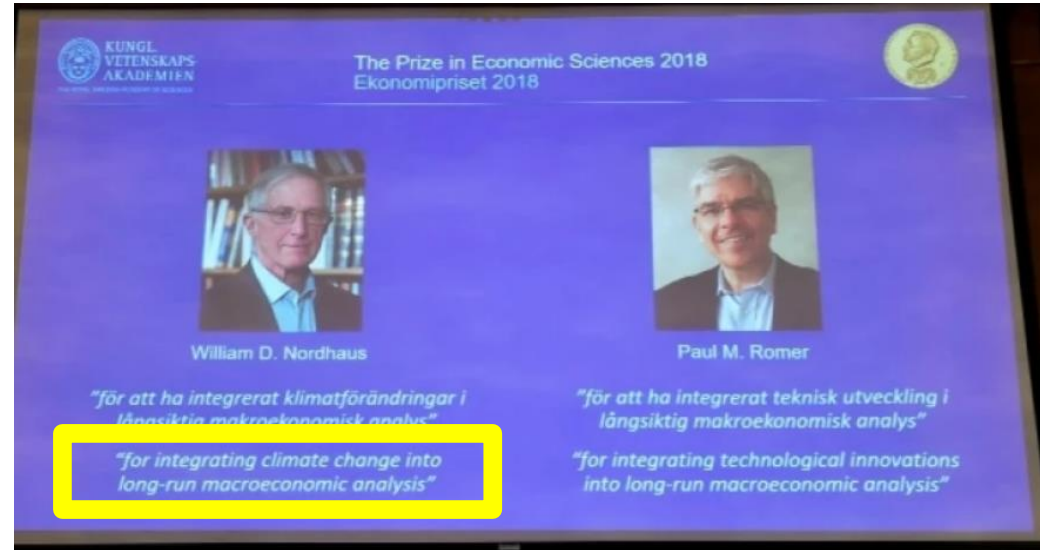
Agenda

Einleitung

IPCC- / NGFS-Szenarien

Aufbau eines IAM / Herleitung von Klimaszenarien

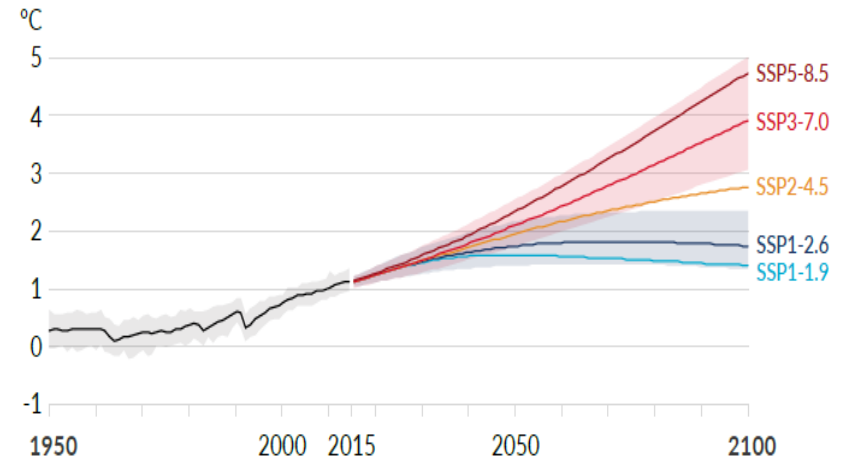
- CO₂-Emissionen durch wirtschaftliche und gesellschaftliche Aktivitäten
 - Globale Erwärmung als Folge hat massive Auswirkungen auf Mensch und Natur
 - Konsequenzen für die Volkswirtschaften
- **Komplexe Modelle** zur Beschreibung der gegenseitigen Abhängigkeiten erforderlich



William D. Nordhaus (Nobelpreis für Wirtschaft 2018, DICE-Modell)

- Szenarien für zukünftige CO₂-Konzentrationen (**RCP-Szenarien**)
- Szenarien für zukünftige sozio-ökonomische Entwicklungen, z. B. Bevölkerungswachstum, Wirtschaftstätigkeit, technische und kulturelle Entwicklung, ... (**SSP-Szenarien**)
- Ableitung von politischen Maßnahmen (insb. Emissionspreis), um unter sozioökonomischen Annahmen aus SSPx den Strahlungsantrieb gemäß RCPx zu erreichen (z. B. je niedriger die sozio-ökonomischen Herausforderungen für Emissionsminderung, desto geringer CO₂-Preis)
- nicht jede SSP-RCP-Kombination ist realisierbar
- Ableitung der globalen Temperaturentwicklung

a) Global surface temperature change relative to 1850-1900



Ungeordnetes Szenario

Delayed Transition:

Bis 2030 keine zusätzlichen Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt

Um die Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, sind dann strenge Maßnahmen erforderlich.

Negative Emissionen sind begrenzt.

too little,
too late

Fragmented World:

geht von verzögerter und uneinheitlicher klimapolitischer Reaktion der Länder weltweit aus, was zu hohen physischen und Übergangsrisiken führt. Länder mit Netto-Null-Zielen erreichen diese nur teilweise (80 % des Ziels), während die anderen Länder ihre derzeitige Politik fortsetzen.

Geordnetes Szenario

Net Zero 2050:

begrenzt die globale Erwärmung durch strenge Klimapolitik und Innovation auf 1,5 °C und erreicht um das Jahr 2050 herum weltweit Netto-Null-CO₂-Emissionen.

Below 2°C:

allmählich strengere Klimapolitik, wodurch eine Wahrscheinlichkeit von 67 % besteht, die globale Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen

Low Demand:

geht von bedeutenden Verhaltensänderungen zur Reduzierung des Energiebedarfs aus, zusätzlich zu (Schatten-)Kohlenstoffpreisen und technologiebedingten Anstrengungen, die Druck auf die Wirtschaft mindern würden, bis etwa 2050 weltweit Netto-Null-CO₂-Emissionen zu erreichen

hot-house world

Nationally Determined Contributions (NDCs):

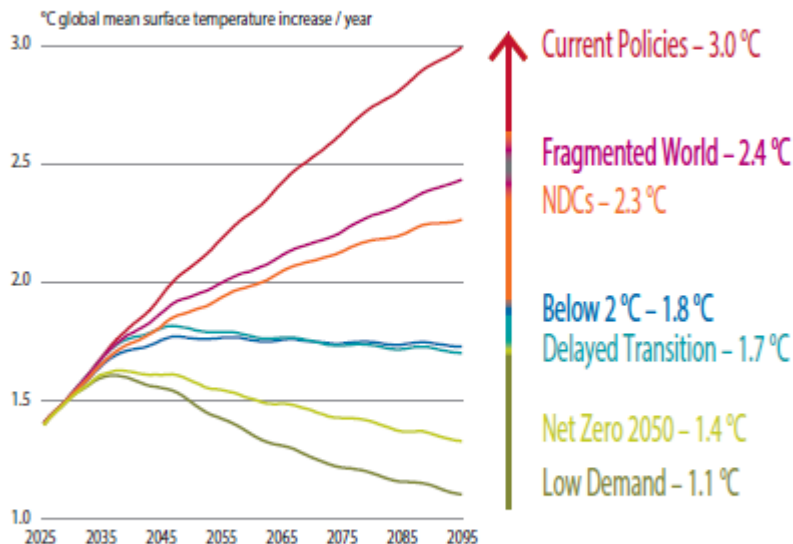
umfasst alle zugesagten Ziele, auch wenn diese noch nicht durch wirksame Maßnahmen umgesetzt wurden

Current Policies:

geht davon aus, dass nur derzeit umgesetzte Richtlinien beibehalten werden, was zu hohen physischen Risiken führt

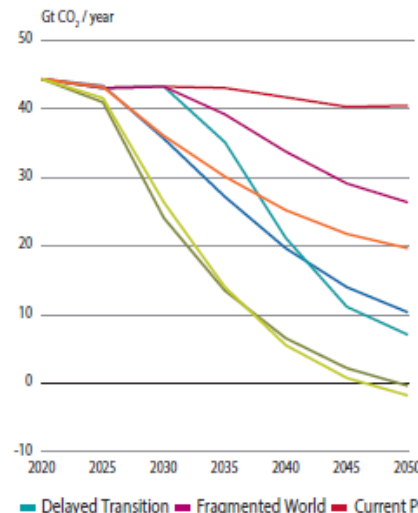
Temperature Evolution by Scenario

AR6 Surface Temperature (GSAT) increase (50th),
MAGICC with REMIND-MAGPIE emission inputs



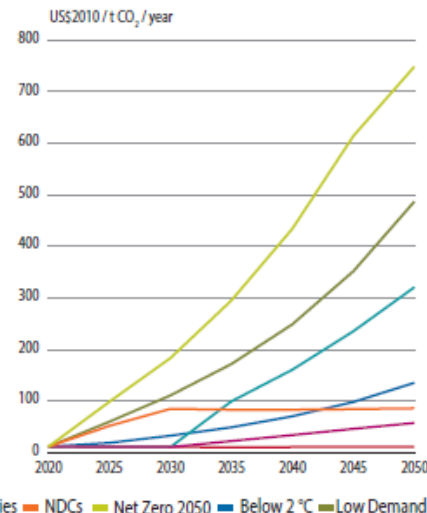
Sources: IIASA NGFS Climate Scenarios Database, MAGICC model (with REMIND-MAGPIE emissions inputs). MAGICC provides a range of temperature increase compared to the pre-industrial levels. The temperature paths displayed here follow the 50th percentile.

Global Yearly CO₂ Emissions REMIND-MAGPIE



Source: IIASA NGFS Climate Scenarios Database, REMIND-MAGPIE model. World aggregates mask strong differences across sectors and jurisdictions. Regionally and sectorally granular information is available in the IIASA Portal. End of century warming outcomes shown. 5-year time interval data.

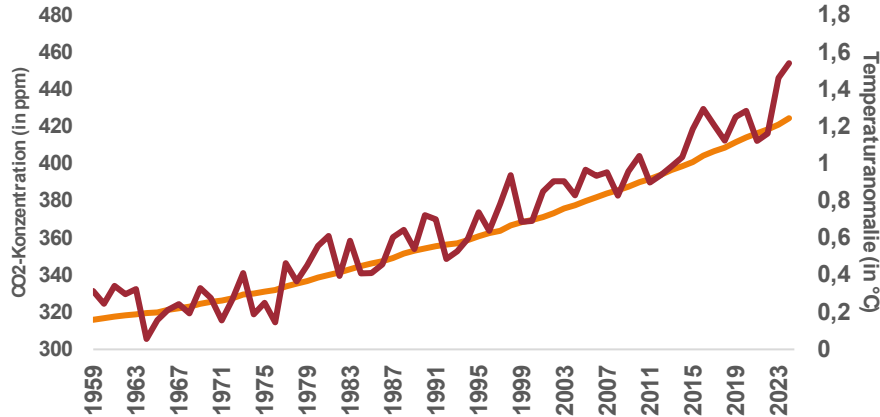
Shadow Carbon Price REMIND-MAGPIE



Source: IIASA NGFS Climate Scenarios Database, REMIND-MAGPIE model. Shadow carbon prices are weighted global. Regionally and sectorally granular information is available in the IIASA Portal. End of century warming outcomes shown. 5-year time interval data.

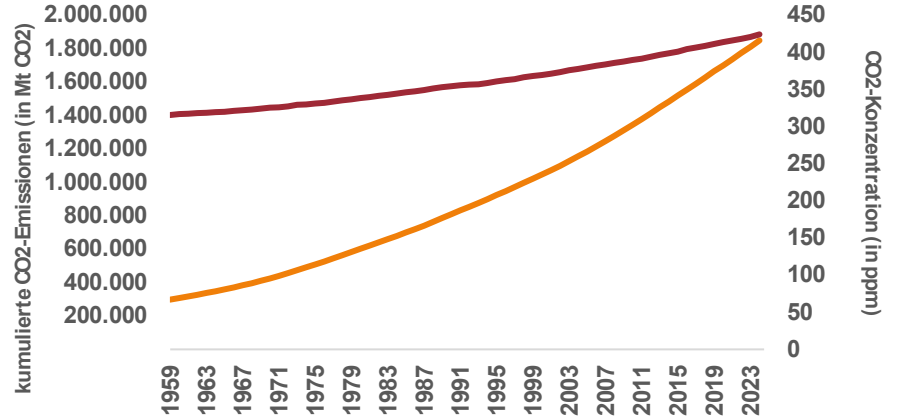
Zusammenhang CO₂-Emissionen, CO₂-Konzentration, Temperaturentwicklung

CO₂-Konzentration vs. globaler Temperaturanstieg



— CO₂-Konzentration in der Atmosphäre — Temperaturanomalie

kumulierte CO₂-Emissionen vs. CO₂-Konzentration



— kumulierte CO₂-Emissionen — CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

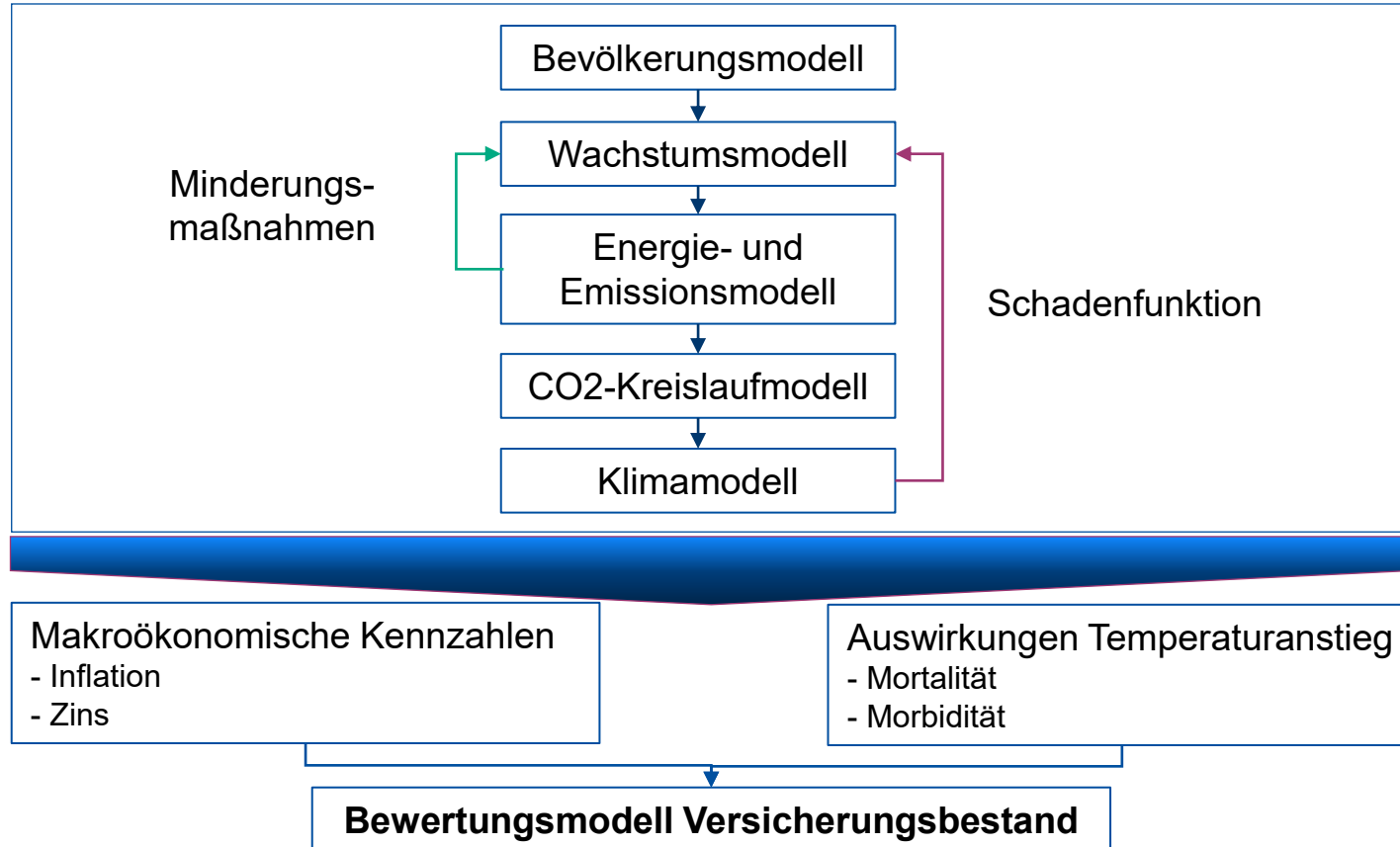
- Globaler Temperaturanstieg entwickelt sich abhängig von der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre
- CO₂-Konzentration in der Atmosphäre Folge der kumulierten jährlichen CO₂-Emissionen
- Jährliche CO₂-Emissionen Treiber für den globalen Temperaturanstieg
- Ein Ziel eines Integrated Assessment Models (IAM): Modellierung der jährlichen CO₂-Emissionen

Kaya-Identität:¹

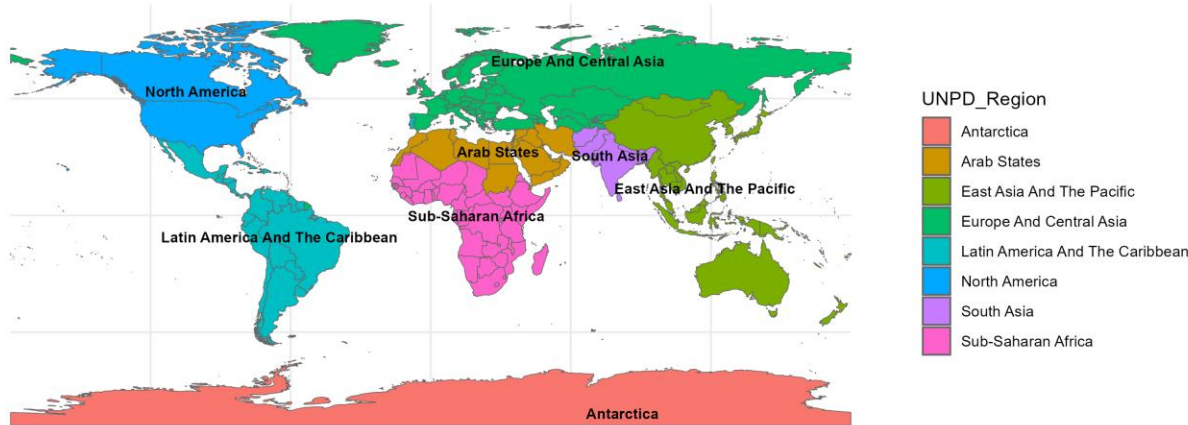
$$\underbrace{M_t}_{\text{CO}_2\text{-Emissionen}} = \underbrace{L_t}_{\text{Bevölkerung}} \cdot \underbrace{\frac{Y_t}{L_t}}_{\text{Bruttoinlands-
produkt pro
Kopf}} \cdot \underbrace{\frac{E_t}{Y_t}}_{\text{Energie-
intensität der
Wirtschaft}} \cdot \underbrace{\frac{M_t}{E_t}}_{\text{CO}_2\text{-Intensität
der Energie}}$$

- Zerlegung der jährlichen CO₂-Emissionen in die vier Haupttreiber
- Quantitative Analysen der Treiber des Klimawandels
- Ableitung von Minderungsmaßnahmen und Möglichkeit der Abschätzung der quantitativen Auswirkungen
- **Herleitung von Klimaszenarien**

¹: benannt nach Yoichi Kaya, japanischer Energie- und Umweltökonom



Weltkarte mit Regionen-Beschriftung



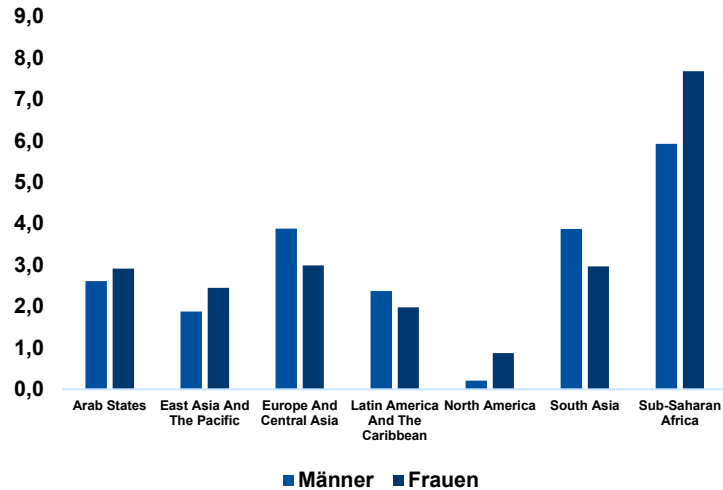
- Globales Modell wenig sinnvoll da sowohl der Einfluss auf als auch die Auswirkungen durch den Klimawandel regional sehr verschieden sind
- Aufteilung der Welt in verschiedene, einigermaßen homogene Regionen
- Hier: 7 Weltregionen gemäß UNDP gewählt (Hinweis: in NGFS teilweise andere Regionen betrachtet)
- Ähnliche sozioökonomische, geografische und entwicklungspolitische Rahmenbedingungen
- Ähnliche Rahmenbedingungen im Hinblick auf wirtschaftliche Struktur und gesellschaftliche Herausforderungen, Einkommen, Bildungsstand, Gesundheitsversorgung und politische Stabilität
- Aber: auch innerhalb der Regionen gibt es große Unterschiede
- Vorteil: In vielen Datenquellen gibt es diese Zusammenfassung der Länder

- Einfluss der Bevölkerung sehr relevant
 - Anzahl der Erwerbstätigen wichtig für Produktivität und Wachstum
 - Größe der Weltbevölkerung entscheidend für Energieverbrauch und CO₂-Emissionen
- Einfluss auf die Bevölkerung innerhalb einer Region haben
 - Geburtenrate
 - Sterblichkeit (insb. Säuglingssterblichkeit)
 - Migration (→ global neutral, regional relevant)
- Einfluss der Klimafolgen auf die Sterblichkeitsraten?
- Die Fortentwicklung der Bevölkerungsanzahl lässt sich wie folgt modellieren:

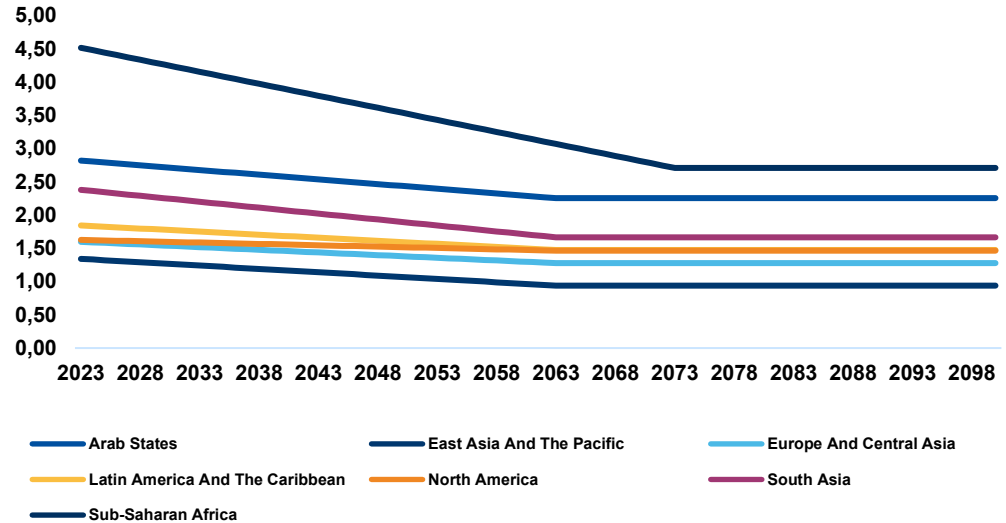
$$L_{x,t,r} = L_{x-1,t-1,r} \cdot (1 - q_{x-1,t,r}) + \mathbf{Geb}_{t,r} + \mathbf{Mig}_{x,t,r}$$

- In gängigen Klimaszenarien wird die Entwicklung der Weltbevölkerung über die SSP festgelegt, z. B. in NGFS wird SSP2 angenommen, wobei die Bevölkerung auf max. 10 Mrd. Personen ansteigt bis 2100
- Welche Annahmen muss man dafür nutzen?
- Wie sensitiv reagiert ein Bevölkerungsmodell auf diese Annahmen?

Erhöhung der Lebenserwartung eines Neugeborenen (in Jahren)

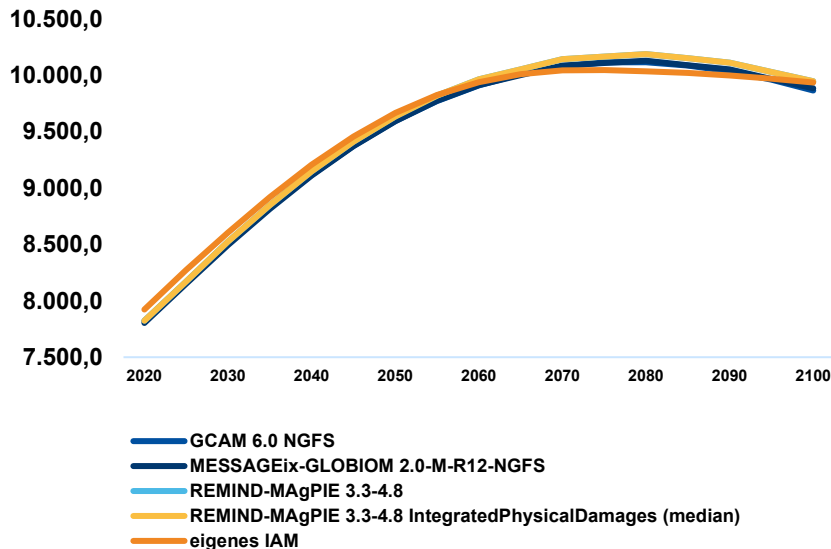


Entwicklung der Geburtenrate

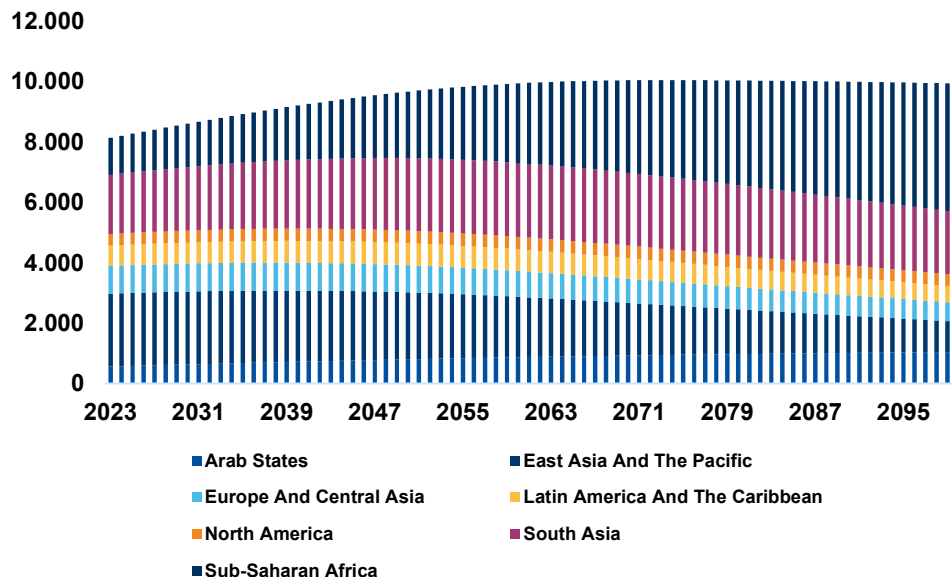


- Berücksichtigung einer weiteren Sterblichkeitsverbesserung, unterschiedliche Ausprägung in den Regionen (insb. in Afrika, sowie Europa und Südasien)
- Ansatz: Linearer Rückgang der Geburtenrate (Neugeborene pro Frau), unterschiedlich stark in den Regionen (insb. in Afrika starker Rückgang angenommen)

Bevölkerung (in Mio.)



Bevölkerungsentwicklung nach Regionen

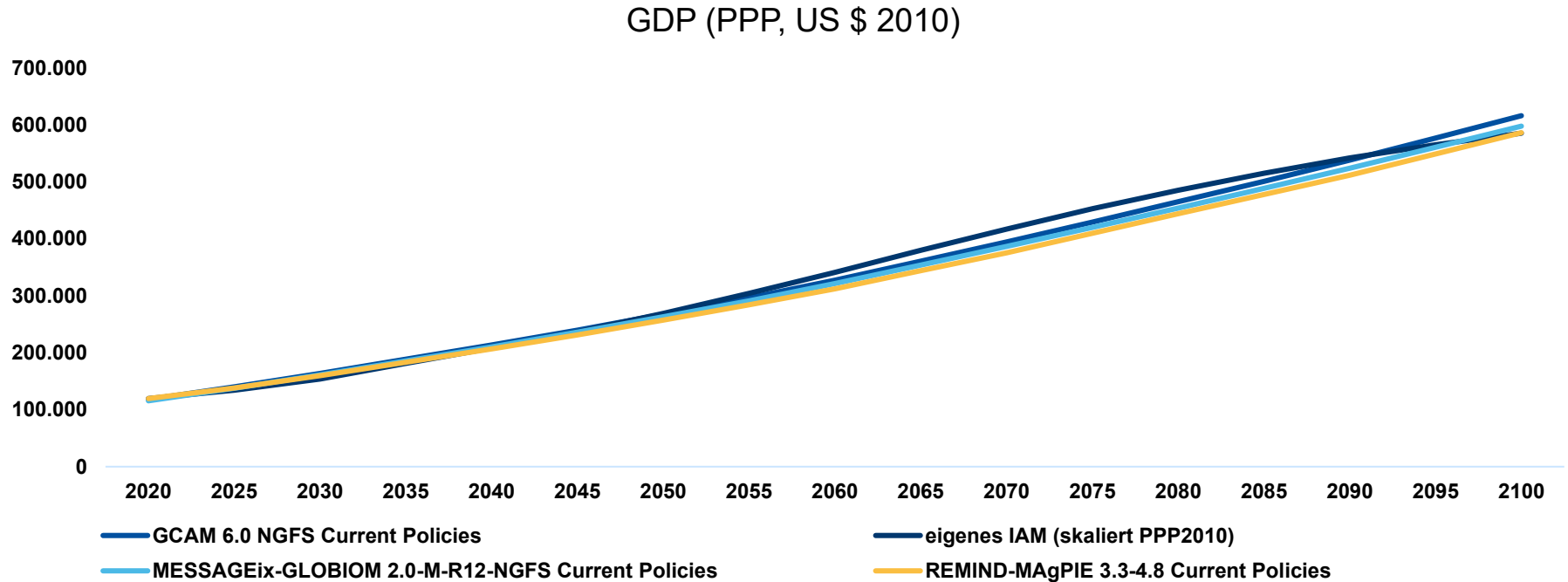


- Mit den getroffenen Annahmen kann die Bevölkerungsentwicklung aus NGFS (SSP2) ziemlich gut nachvollzogen werden
- Bisher noch eine vereinfachte Berücksichtigung von Migration in dem Modell
→ Verteilung der Bevölkerung auf die Regionen wird sich verschieben

- Wirtschaftswachstum ist zentrale Kennzahl zur Messung der wirtschaftlichen Stärke, des Konsums, der Investition eines Landes / einer Region
- Wichtig im Modell ist die weltweite Vergleichbarkeit → GDP inflations- und kaufkraftbereinigt (hier: Referenzjahr 2017, NGFS: Referenzjahr 2010, NiGEM: Referenzjahr 2017)
- Ökonomische Modelle zur Beschreibung des Wirtschaftswachstums („Wachstumsmodelle“) berücksichtigen die Anzahl Arbeitskräfte (abhängig von der Bevölkerungsentwicklung) und das Kapitalvermögen (abhängig vom Wohlstand eines Landes)
- Technologischer Fortschritt als ein wesentlicher Treiber des GDP → TFP (Total Factor Productivity) als zentrale Kennzahl
- Wirtschaftswachstum regional sehr unterschiedlich
- **Cobb-Douglas-Modell** kann zur Modellierung genutzt werden:

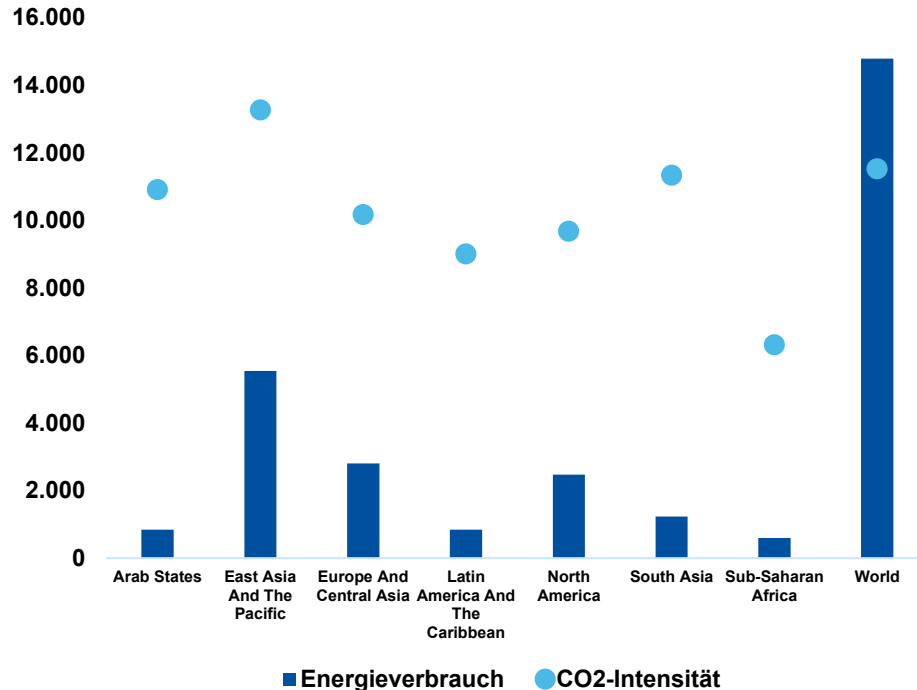
$$Y_{r,t} = TFP_{r,t} \cdot K_{r,t}^{(1-\alpha)} \cdot LH_{r,t}^{\alpha}$$

- Klimaschäden und Anpassungs-/Minderungskosten müssen zusätzlich berücksichtigt werden
- Verringert oder vergrößert der technologische Fortschritt den Energieverbrauch?



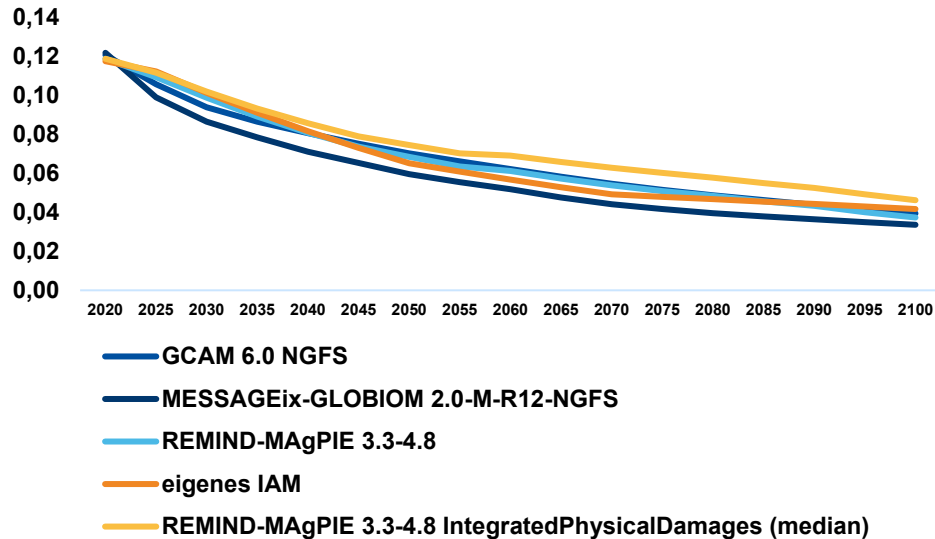
- GDP-Verlauf in einem „Current Policies“-Szenario sehr ähnlich
- GDP-Reduktion durch Klimaschäden hier noch nicht enthalten

Energieverbrauch (in Mio. toe) und
CO₂-Intensität (in tCO₂e/toe) im Jahr 2022

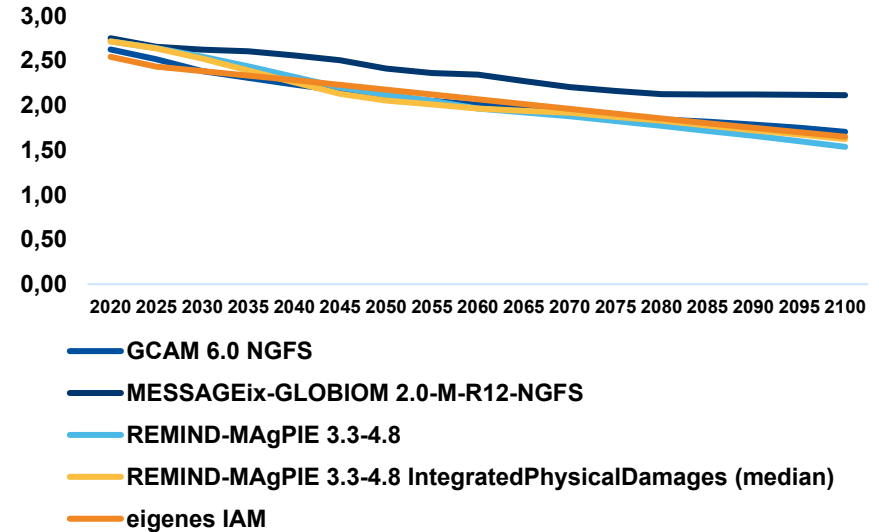


- Ziel: Modellierung des **zukünftigen Primärenergieverbrauch**
- Energieverbrauch regional unterschiedlich
- Betrachtung der Energie-Intensität, d. h. Energieverbrauch pro 1 US-\$ GDP (PPP, 2017)
- Vorgabe von Startwerten und regionalen Trends (auch bereits im Current Policies-Szenario)
- Hier: keine Unterteilung des Energieverbrauchs nach Sektoren
- Ziel: Modellierung der **zukünftigen CO₂-Intensität**
- Kennzahl zur Angabe der CO₂-Emissionen pro 1 Einheit Energieverbrauch
- Vorgabe von Startwerten und regionalen Trends (auch bereits im Current Policies-Szenario)
- Hier: ebenfalls keine Unterteilung nach Sektoren

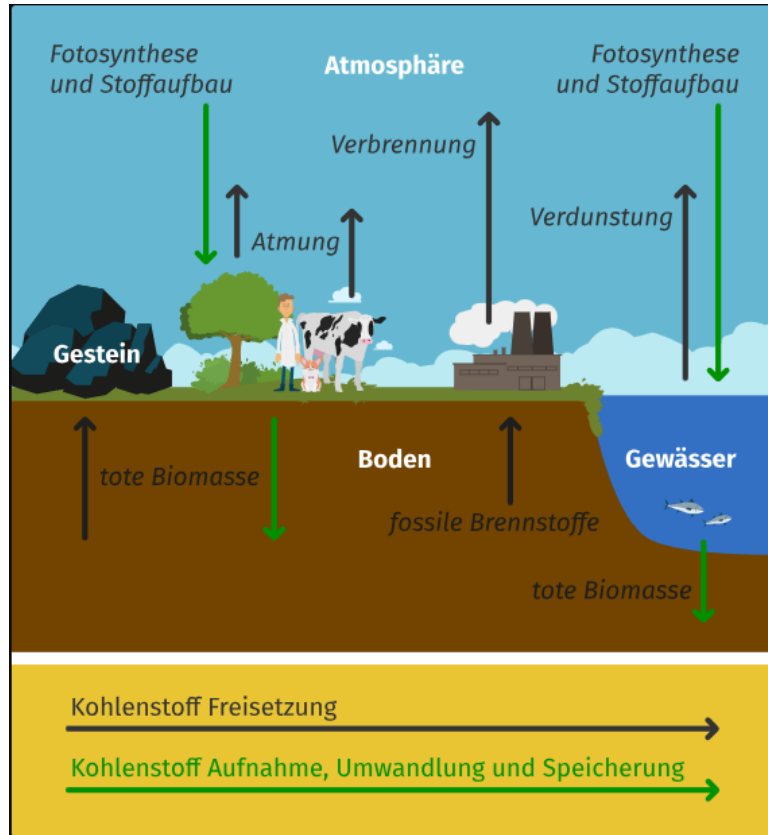
Energie-Intensität (in toe/Mrd. US \$ 2010 (PPP))



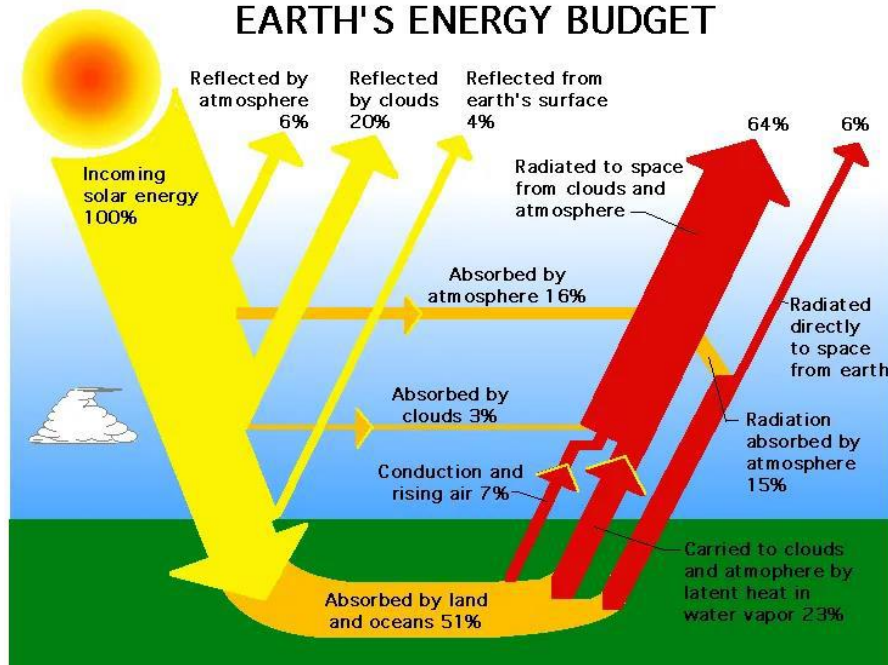
CO₂-Intensität (in tCO₂e/toe)



- Verläufe zur globalen Energieintensität und CO₂-Intensität gut mit NGFS vergleichbar
- Current Policies-Szenario bildet die Basis für die weiteren Szenarien mit Einsparungen



- CO₂-Kreislaufmodell beschreibt, wie CO₂ zwischen Atmosphäre, Ozean, Landbiosphäre und weiteren Reservoirien ausgetauscht wird:
 - Atmosphäre nimmt CO₂ aus Emissionen auf und gibt es an Landbiosphäre und Ozean ab
 - Biosphäre (Pflanzen, Böden) nimmt CO₂ durch Photosynthese auf und gibt welches durch Atmung und Zersetzung ab
 - Ozean nimmt CO₂ an der Oberfläche auf und gibt es teilweise wieder ab
 - Tiefer Ozean und Sedimente speichern Kohlenstoff über sehr lange Zeiträume
- Mathematische Beschreibung über Box-Modelle (z. B. drei Boxen: Atmosphäre, Ozean, Land) und ein System von Differentialgleichungen zur Beschreibung der Veränderung der CO₂-Menge in jeder Box (Flüsse)
- Alternativ Nutzung einer Impulse Response Function (IRF)
→ Modellierung des verbleibenden CO₂ in der Atmosphäre über Berücksichtigung der Verweildauern für verschiedenen Austauschprozesse

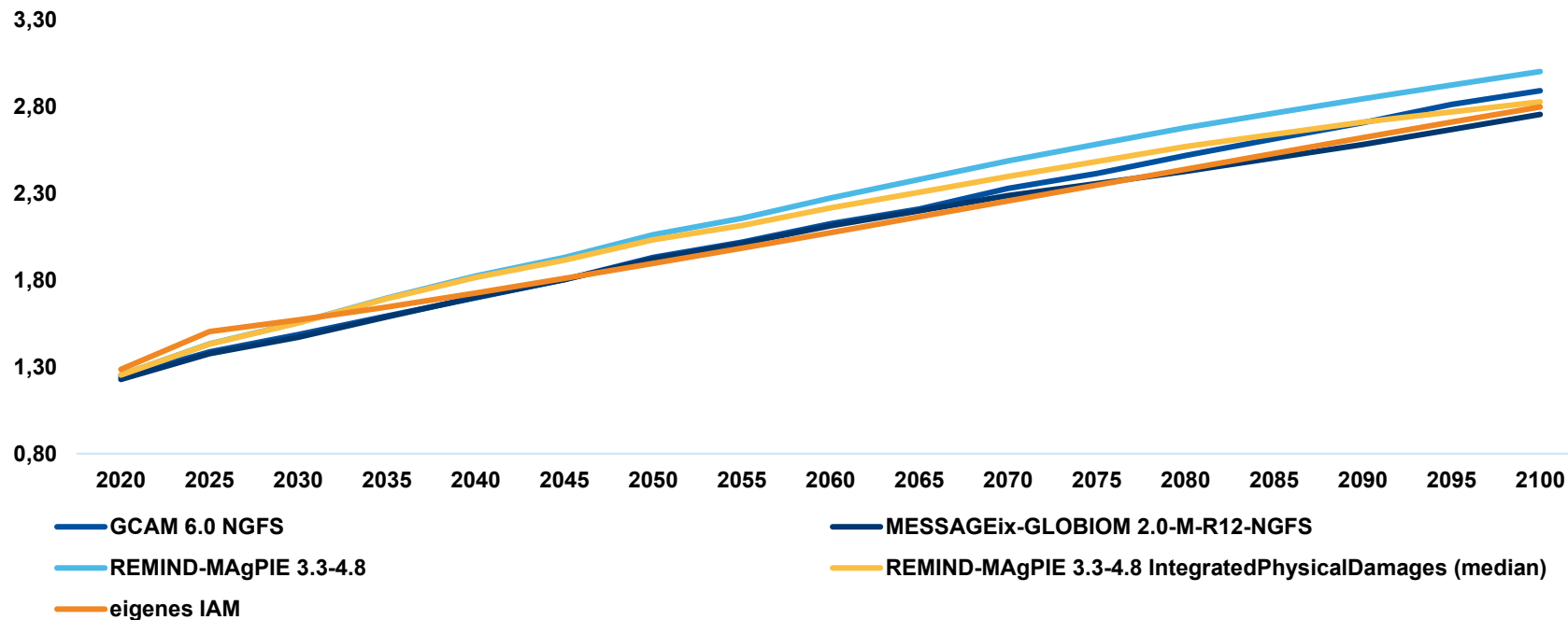


- Klimamodell zur vereinfachten Simulation der physikalischen Prozesse von Atmosphäre, Ozeanen, Land und Eis zur Vorhersage der zukünftigen Temperaturentwicklung
- Grundlage bildet die Energiebilanzgleichung nach der die absorbierte und emittierte Energie identisch sind
- Durch die zusätzlichen CO_2 -Emissionen entsteht ein Ungleichgewicht in der Energiebilanz, das zu einer Temperaturerhöhung führt:

$$C \cdot (T_t - T_{t-1}) = F_t - \lambda \cdot T_{t-1}$$

- T_t = Temperaturerhöhung gegenüber vorindustrieller Zeit
- F_t = zusätzliche Energiemenge, die durch CO_2 -Emissionen in Atmosphäre verbleibt
- $\lambda \cdot T_{t-1}$ = zusätzliche Energie, die aufgrund der Temperaturerhöhung abgestrahlt wird
- C = Wärmekapazität der Erde, d. h. benötigte Energie für 1°C Erderwärmung

Globale Erwärmung (in °C)

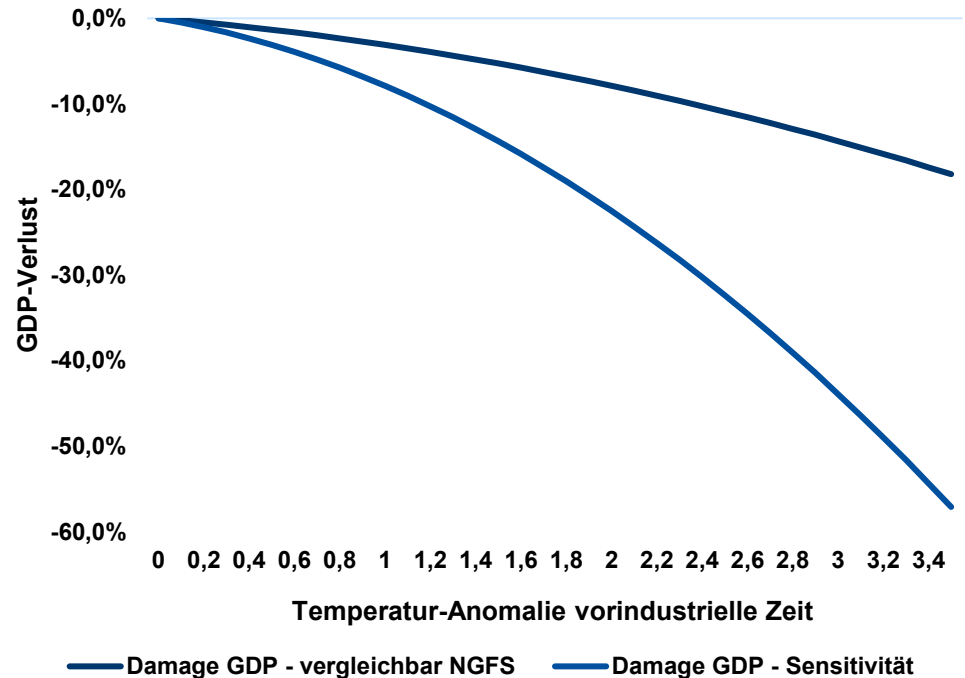


- Globale Temperaturdifferenz ist nicht übertragbar auf alle Regionen der Welt
- Kontinente erhitzen sich stärker als tropische oder ozeanische Regionen
- Umrechnung der globalen Erwärmung auf die Regionen
- Auswirkung auf das GDP wird i.d.R. mittels Polynoms beschrieben:

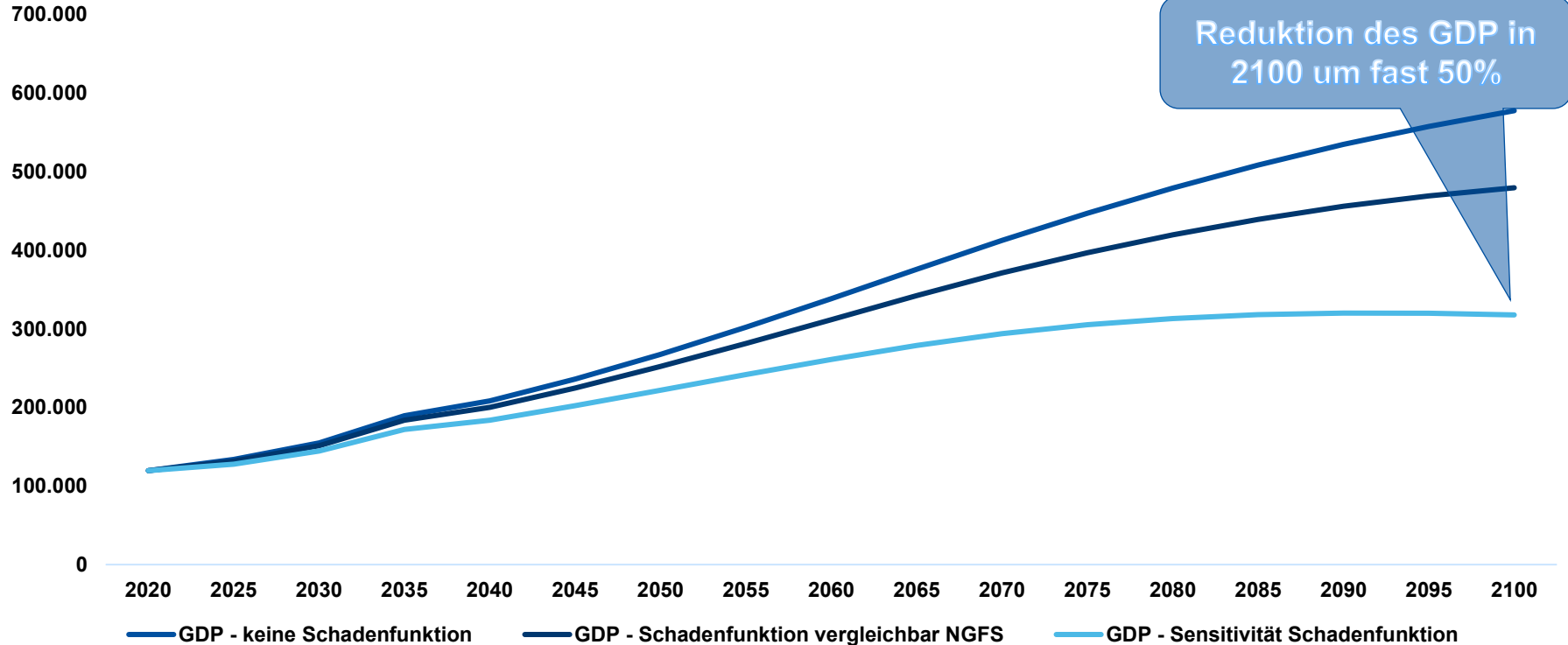
$$GDP - Verlust_{r,t} = \alpha_{r,r} \cdot \Delta T_{r,t} + \beta_{r,r} \cdot \Delta T_{r,t}^2$$

- Parametrisierung unterscheidet sich je nach Studie
- Berücksichtigung von Kipppunkten fehlt häufig in der Schadenfunktion

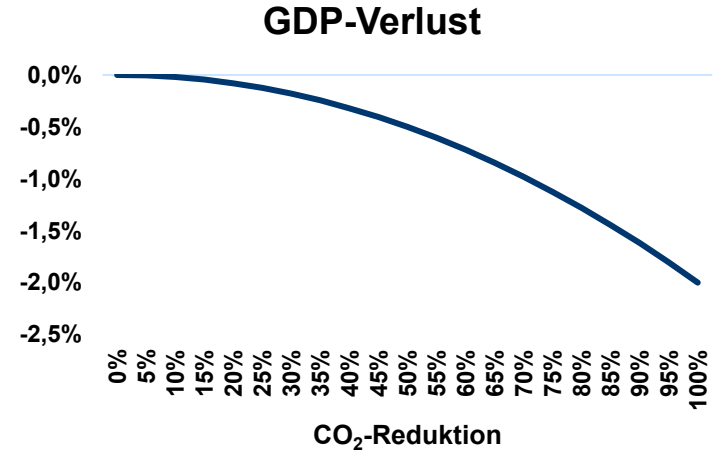
GDP-Verlust abhängig von Temperatur-Anomalie



Wirkung Schadenfunktion auf GDP (PPP, US \$ 2010)



- **Ziel der IAM:** Erstellung von Szenarien / Sensitivitäten für die zukünftige Temperaturentwicklung
- Zentrales Steuerungselement zur Erreichung von Klimazielen ist die Reduktion von CO₂-Emissionen
- Reduktion von CO₂ hat Einfluss auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und somit auf die globale / regionale Temperaturentwicklung
- Aber: CO₂-Reduktion ist (zumindest zunächst) mit höheren Kosten (**Abatement Cost**) verbunden (z. B. teurere Technologien für Ersatz von fossilen Brennstoffen)
- Abatement Cost der Teil des GDP, der für Reduktion der CO₂-Emissionen aufgewandt werden muss
- Abatement Cost reduzieren das GDP und somit den verfügbaren Konsum und Investitionen
- Kosten steigen mit zunehmender Emissionsreduktion
→ optimale Balance aus Klimaschäden und Minderungskosten erforderlich
- Eine Möglichkeit: langfristig Kosten für Backstop-Technologie ansetzen, die fossile Brennstoffe komplett ersetzen



$$B_{r,t} = \theta_1 \cdot R_{r,t}^{\theta_2}$$

- $B_{r,t}$ = Anteil der GDP-Reduktion im Jahr t , in Region r
- $R_{r,t}$ = CO₂-Reduktion in Jahr t , in Region r
- θ_1 = Kostenparameter, der den Anteil des GDP für vollständige Emissionsfreiheit angibt
- θ_2 = Maß für die Steigung der Kostenfunktion

Absolute Reduktion der CO₂-Emissionen:

$$A_{r,t} = R_{r,t} \cdot M_{r,t}$$

Abatement Cost (absolute Reduktion des GDP):

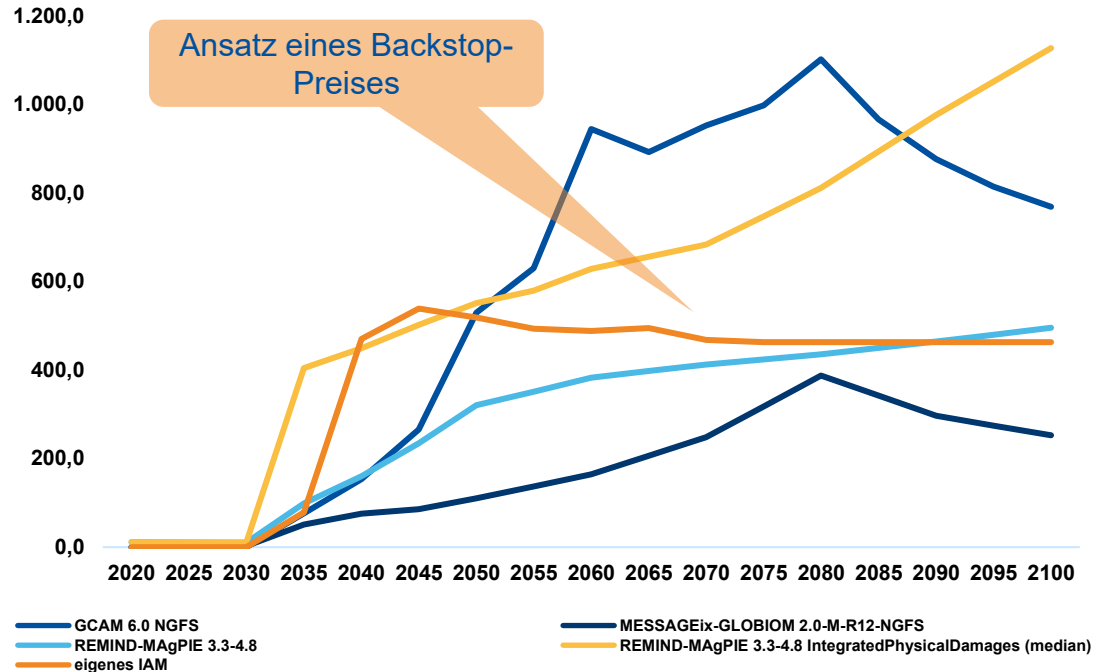
$$AC_{r,t} = B_{r,t} \cdot Y_{r,t} = \theta_1 \cdot A_{r,t}^{\theta_2} \cdot \frac{Y_{r,t}}{M_{r,t}^{\theta_2}}$$

CO₂-Preis („Grenzkosten“ für Reduktion 1 Tonne CO₂):

$$P_{r,t} = \frac{\partial AC_{r,t}}{\partial A_{r,t}} = \frac{\theta_1 \cdot \theta_2 \cdot R_{r,t}^{\theta_2-1}}{\sigma_{r,t}}$$

$$\sigma_{r,t} := \frac{M_{r,t}}{Y_{r,t}} \quad (\text{CO}_2\text{-Intensität des GDP})$$

CO₂-Preis (PPP, \$2010, t CO₂) – delayed transition



- IAM liefert keine Information über Finanzmarktkennzahlen wie Inflation oder Zins
- Auch in NGFS liefern die IAM keine Finanzmarktkennzahlen → NiGEM liefert makroökonomische Kennzahlen
- Aber: Es gibt Möglichkeiten, aus den ökonomischen Größen des IAM auch diese Werte abzuleiten

Möglicher Ansatz zur Modellierung der Inflation (**Phillips-Kurve**):

$$\text{Inflation} = \text{Basis_Inflation} + \alpha_{infl} \cdot \text{GDP_GAP} + \beta_{infl} \cdot \Delta \text{Energiekosten}$$

- Basis-Inflation (z. B. 2%) zzgl. ökonomischer Einflussgrößen
- **Energiekosten** werden aus Veränderung des CO₂-Preises abgeleitet

Möglicher Ansatz zur Modellierung der short-term-rate (**Taylor-Regel**):

$$\text{short_term_rate} = \text{Basis_short_term_rate} + \alpha_{zins} \cdot \text{GDP_GAP} + \beta_{zins} \cdot (\text{Inflation} - \text{Basis_Inflation})$$

- Erwarteter Basiszins (z. B. Inflation zzgl. 1,25%) zzgl. ökonomischer Einflussgrößen
- Inflation als Treiber für Zins → Inflation oberhalb der Basisinflation führt zu Erhöhung der short-term-rate

Ökonomische Einflussgrößen abgeleitet aus IAM

GDP-GAP:

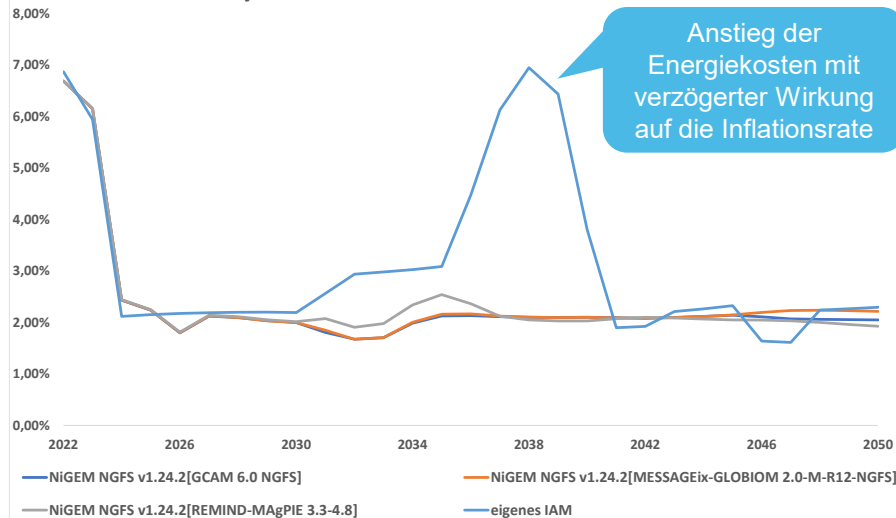
- Vergleich des tatsächlichen GDP mit dem potentiellen GDP (= „normales“ Produktionsniveau einer Volkswirtschaft) (= „Output-Lücke“)
 - a) tatsächliches GDP > potentielles GDP („Boom“):
Wirtschaft „überhitzt“ → Unternehmen arbeiten am Limit, Arbeitskräfte sind knapp, Löhne und Produktionskosten steigen → höhere Inflation
 - b) tatsächliches GDP < potentielles GDP („Rezession“):
Geringe Nachfrage → stabile oder sinkende Preise → niedrige Inflation oder Deflation

Energiekosten:

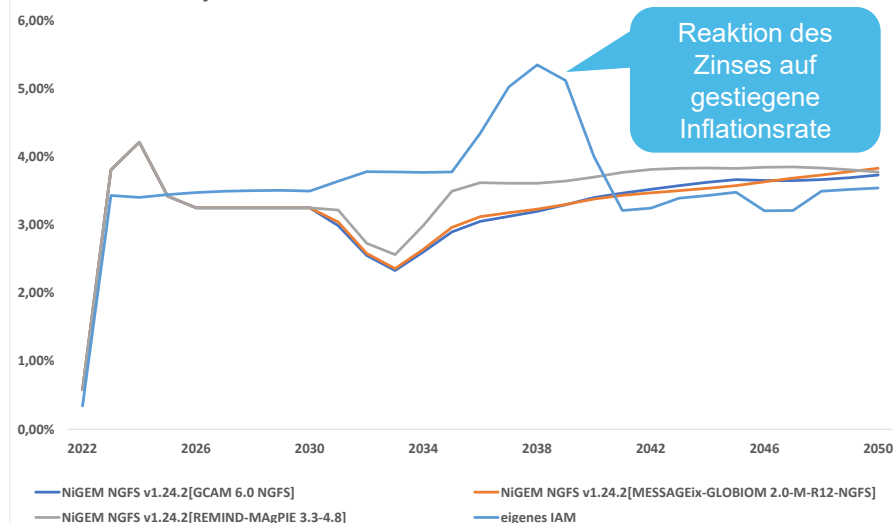
- Veränderung der Energiepreise repräsentiert aus Veränderung des modellierten CO₂-Preises
- Direkte Auswirkung auf Verbraucherpreise über die Energiepreise (z. B. Benzin, Heizöl, Gas, ...)
- Indirekte Auswirkungen verzögert über Preiserhöhungen anderer Produkte durch gestiegene Energiekosten

Herleitung der Parameter für die Modellierung der Inflation und short-term-rate ist auch für einzelne Länder möglich.

delayed transition - Inflation in Deutschland



delayed transition - short-term rate in Deutschland



„Die Zukunft des Klimas ist mit großer Unsicherheit behaftet, aber eines ist klar: Die Kosten des Handelns sind geringer als die Kosten des Nicht-Handelns.“
— William Nordhaus, *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World.*



**Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit.**

Alexander Krauskopf, B&W Deloitte GmbH
alkrauskopf@deloitte.de

**Besuchen Sie
unsere Webseite**

www.aktuar.de
