

CLIMATE  
ENGINEERING



Risks, Challenges,  
Opportunities?



# Modellierung in der Climate Engineering- Forschung

Aussagekräftig trotz Unsicherheiten

Schwerpunktprogramm 1689 der  
Deutschen Forschungsgemeinschaft

**DFG**



## Vorwort

In dem Schwerpunktprogramm „Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ (SPP 1689) wollen wir die in den letzten Jahren in Wissenschaft und Klimapolitik aufgekommenen Ideen zu Climate Engineering (CE) umfassend hinsichtlich möglichem Potenzial, Unsicherheiten und Risiken bewerten. Mit Climate Engineering bezeichnet man ein gezieltes großskaliges Eingreifen in das Klimasystem mit dem Ziel, den durch den Menschen verursachten Klimawandel abzumildern. Für eine tragfähige Bewertung der Ideen zu CE berücksichtigen wir im SPP 1689 neben der naturwissenschaftlich-technischen Dimension auch soziale, politische, rechtliche und ethische Aspekte. Unsere Forschung zur Bewertung – und nicht Entwicklung! – von CE ist bewusst sehr interdisziplinär aufgestellt. Feldexperimente schließen wir im Rahmen des SPP 1689 explizit aus. Die Forschungsarbeit beruht daher weitestgehend auf den Ergebnissen von Computersimulationen mit numerischen Modellen des Klimasystems.

Um die Funktionsweise, Grenzen und Möglichkeiten solcher Modelle besser zu verstehen, haben die SPP-Doktoranden aller beteiligten Fachdisziplinen unter Federführung von Miriam Ferrer González und Fabian Reith zusammen mit der Projektkoordinatorin Ulrike Bernitt einen mehr-tägigen Workshop zum Thema „Modellierung“ organisiert. Die in diesem Workshop entstandenen Fragen, Diskussionen und Ideen haben uns bewegt, die verschiedenen Aspekte der Modellierung im Kontext unseres Schwerpunktprogramms zur Bewertung von CE schriftlich zusammenzufassen. Neben Teilnehmern des Workshops kommen dabei auch einige weitere Mitglieder unterschiedlicher Fachdisziplinen des SPP 1689 zu Wort, zum Beispiel aus Philosophie oder Volkswirtschaftslehre. Wir hoffen, mit der daraus entstandenen Broschüre sowohl Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als auch der interessierten Öffentlichkeit die Grundlagen unserer Forschung etwas näherbringen zu können und damit den Einstieg in den Diskurs zu CE zu erleichtern.



ANDREAS OSCHLIES

1

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Aussagekräftig  
trotz Unsicher-  
heiten

## INHALT

Die Rolle der Modellierung in der Climate Engineering-Forschung   Andreas Oeschles .....	3
Wie beeinflussen Computersimulationen das Wissenschaftsverständnis?   Martin Carrier und Johannes Lenhard .....	6
Umgang mit Unsicherheiten   Gregor Betz .....	9
Unsicherheiten in numerischen Klimasimulationen im Kontext der Entscheidungssituation   Hauke Schmidt und Hermann Held .....	12
Das Erdsystemmodell UVic   David Keller, Nadine Mengis, Fabian Reith und Andreas Oeschles .....	15
Das Erdsystemmodell MPI-ESM   Sebastian Sonntag, Tatiana Ilyina, Julia Pongratz und Hauke Schmidt .....	18
Das Erdsystemmodell IPSL-CM   Olivier Boucher, Ulrich Platt und Christoph Kleinschmitt .....	21
Das Vegetationsmodell LPJmL   Tim Beringer, Lena Boysen und Vera Heck .....	24
Ökonomische Modellierung im Kontext von Climate Engineering   Timo Goeschl und Martin Quaas .....	27
Autoren .....	30
Das Schwerpunktprogramm 1689 .....	31
Impressum   Kontakt .....	32

2

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Aussagekräftig  
trotz Unsicher-  
heiten

# Die Rolle der Modellierung in der Climate Engineering-Forschung

Andreas Oschlies | Erdsystemmodellierer

Unter dem Begriff „Climate Engineering“ (CE) werden verschiedene großtechnische Maßnahmen zusammengefasst, die gezielt dazu eingesetzt werden könnten, den atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt zu verringern oder die Strahlungsbilanz der Erde direkt zu beeinflussen, um der anthropogen verursachten Klimaerwärmung entgegenzuwirken.

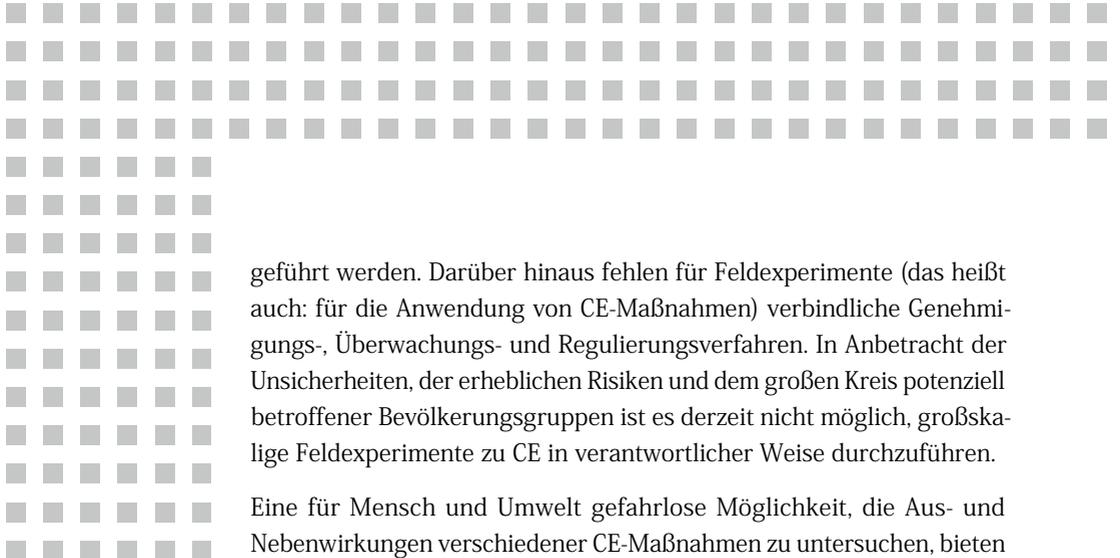
Die in Forschung und Öffentlichkeit diskutierten CE-Maßnahmen sind bisher lediglich Ideen zu technischen Verfahrensweisen, die zunächst plausibel erscheinen und im Prinzip funktionieren könnten. Die Überprüfung ihrer tatsächlichen Wirksamkeit und die Abschätzung unbeabsichtigter Nebeneffekte hingegen sind schwierig, denn CE-Maßnahmen wären ein gezielter Eingriff in das Klimasystem, ein global vernetztes System von hoher Komplexität, von dem viele Aspekte bisher nicht ausreichend verstanden sind. Im Labor oder in kleinskaligen Feldexperimenten (z.B. Eisendüngung im Ozean, Aufforstung) können mögliche Effekte und Nebeneffekte der CE-Maßnahmen nur in sehr eingeschränkter Weise getestet werden. Unklar ist zudem, inwieweit die Ergebnisse von solchen kleinräumigen und kurzzeitigen Experimenten auf das globale Klimasystem übertragen werden können.

Um die globalen Effekte und Nebeneffekte von CE empirisch verlässlich beurteilen zu können, wären demnach großskalige – möglicherweise globale – Feldexperimente erforderlich. Diese würden sich aber unter Umständen von einem tatsächlichem Einsatz von CE nicht wesentlich unterscheiden und könnten mit erheblichen Risiken behaftet sein, da sich die Ergebnisse wissenschaftlicher Experimente eben nicht sicher vorhersagen lassen. Die Folgen solcher in der Natur durchgeführten Experimente könnten irreversibel sein und die beobachteten Effekte könnten angesichts unseres unvollständigen Verständnisses des Klimasystems womöglich nicht einmal eindeutig auf das Experiment zurück-

3

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Die Rolle der  
Modellierung in  
der Climate  
Engineering-  
Forschung



geführt werden. Darüber hinaus fehlen für Feldexperimente (das heißt auch: für die Anwendung von CE-Maßnahmen) verbindliche Genehmigungs-, Überwachungs- und Regulierungsverfahren. In Anbetracht der Unsicherheiten, der erheblichen Risiken und dem großen Kreis potenziell betroffener Bevölkerungsgruppen ist es derzeit nicht möglich, großskalige Feldexperimente zu CE in verantwortlicher Weise durchzuführen.

Eine für Mensch und Umwelt gefahrlose Möglichkeit, die Aus- und Nebenwirkungen verschiedener CE-Maßnahmen zu untersuchen, bieten dagegen numerische Modelle des Erdsystems, die Experimente nicht in der Natur, sondern in einer simulierten Welt erlauben. Erdsystemmodelle simulieren das Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Klimasystems auf Basis naturwissenschaftlicher Gesetze. Diese empirisch abgeleiteten Gesetze sind vermutlich weder vollständig noch in allen Details korrekt, so dass die simulierte Welt kein perfektes Abbild der Realität ist. Außerdem können die den naturwissenschaftlichen Gesetzen entsprechenden mathematischen Gleichungen häufig nur näherungsweise durch numerische Approximationen gelöst werden (so zum Beispiel die Beschreibung kleinskaliger Turbulenzen). Je genauer die Darstellung

4

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Die Rolle der  
Modellierung in  
der Climate  
Engineering-  
Forschung

## MODELLIERUNG

Modellierung bezeichnet die vereinfachte Beschreibung eines komplexen, realen Systems, in der Regel durch mathematische Formulierungen in Form von Computerprogrammen. Sie dient der vereinfachten Abbildung der Realität. Simulationen sind die Ergebnisse der Anwendung der gegebenen Modellstruktur, wobei die Abbildung der Realität gezielt verändert werden kann. Mit simulierten Experimenten können Erkenntnisse zu Fragestellungen gewonnen werden, ohne dass diese Experimente in der Natur durchgeführt werden müssten. Dadurch kann man Vorhersagen treffen, Hypo-

thesen überprüfen oder Sachzusammenhänge darstellen. Modelle bleiben als vereinfachte Beschreibungen immer unvollständige Abbilder der Realität und sind daher nicht mit dieser gleich zu setzen, was bei der Interpretation der Modellergebnisse zu bedenken ist. Gerade durch diese Vereinfachungen gegenüber der Realität sind Modelle wichtige Werkzeuge, um einzelne Prozesse in einem komplexen System zu verstehen. Je nach Fragestellung muss die Struktur oder Komplexität eines Modells angepasst werden.

sein soll, desto höher wird im Allgemeinen der Rechenaufwand, der in der Praxis die Dauer einer Simulation bestimmt.

Als Klimamodelle werden in der Regel Kopplungen von verschiedenen Zirkulationsmodellen z.B. von Ozean, Meereis oder Atmosphäre bezeichnet. Erdsystemmodelle enthalten darüberhinaus Module zur Beschreibung von Landvegetation, Böden, marinen Ökosystemen und biogeochemischen Kreisläufen. Verschiedene Forschungsgruppen und Fachdisziplinen verwenden in der Regel verschiedene Erdsystemmodelle, die sich je nach Forschungsfragen und Zielen darin unterscheiden, welche Komponenten mit welcher Detailgenauigkeit dargestellt werden.

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1689 liefern Simulationen mit mehreren verschiedenen Erdsystemmodellen unterschiedlicher Komplexität mögliche Szenarien, an denen sich alle Arbeitsgruppen orientieren können. Sie bilden somit auch eine Basis für eine geistes- oder sozialwissenschaftliche Untersuchung potenzieller Auswirkungen von CE, etwa im Hinblick auf den erkenntnistheoretischen Wert der Modelle oder die Bedeutung der Modellergebnisse in wissenschaftlichen und politischen Diskussionen und Entscheidungsprozessen. Auch in diesem stark interdisziplinärem Umgang mit Modellergebnissen muss immer klar bleiben, dass Modelle nur vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit sind. Sie vernachlässigen möglicherweise wichtige Prozesse, beinhalten Parametrisierungen<sup>1</sup> mit häufig nur sehr ungenau bekannten Parameterwerten und hängen von nicht genau bekannten Anfangs- und Randbedingungen ab. Dadurch ist jede Modellsimulation mit Unsicherheiten behaftet, die bei einer Interpretation der Modellergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Trotz dieser Einschränkungen der Geltungskraft von Modellen kann in unseren Augen eine Bewertung der Aus- und Nebenwirkungen von CE-Maßnahmen derzeit nur anhand von Computersimulationen verantwortungsvoll durchgeführt werden.

---

1 | Parametrisierungen sind vereinfachte Beschreibungen von Prozessen, die in Erdsystemmodellen nicht vollständig beschrieben werden (z.B. Wolkenbildung, Turbulenz, viele biologische Prozesse).

# Wie beeinflussen Computersimulationen das Wissenschaftsverständnis?

Martin Carrier und Johannes Lenhard | Wissenschaftsphilosophen

Eine schnell wachsende Zahl wissenschaftlicher Untersuchungen greift auf Computersimulationen zurück. Untersuchungen zu Climate Engineering (CE) gehören dazu, und das gibt Anlass, nach den methodischen Besonderheiten von Computersimulationen und deren Auswirkungen auf unser Verständnis von Wissenschaft zu fragen.

6

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Wie beeinflussen  
Computer-  
simulationen das  
Wissenschafts-  
verständnis?

Was zeichnet Computersimulationen aus? Sie basieren auf theoretischen, mathematisch formulierten Modellen, die in Digitalcomputern maschinell verarbeitet werden. Dies verlangt die Umsetzung der theoretischen Modelle in eine durch Computer zu bearbeitende Form. Dazu müssen etwa Differenzialgleichungen in numerischer Form gelöst, also Lösungen Punkt für Punkt und für besondere Parameterwerte berechnet werden. Modellbildung dieser Art unterscheidet sich in methodischer Hinsicht von herkömmlicher mathematischer Modellierung. Die genannten Parametrisierungen und andere Anpassungen, die wegen der Digitalisierung der Modelle erforderlich werden, sind nämlich häufig nicht durch die betreffenden Theorien festgelegt, sondern stellen eigenständige Modellierungsschritte dar. Wolken können zum Beispiel im Simulationsmodell nur über ihre Wirkungen an den Gitterpunkten beschrieben werden. Man muss also eine Art verdichtete Beschreibung (Parametrisierung) finden, die an den Gitterpunkten mit der übrigen Dynamik so zusammenwirkt, dass sie die Wirkung der viel komplizierteren und feinskaligeren Wolkengebilde adäquat ersetzt.

Die Modelldynamik wird oft wesentlich dadurch beeinflusst, wie die Form der Parametrisierung gewählt und wie die entsprechenden Parameter eingestellt werden. Für diesen Typ von Modellierungsschritten gibt es aber kein Rezept, das immer gelänge. Das konkrete Verhalten des Modells leitet sich eben nicht nur aus der Theorie her, sondern hängt

auch von den eingesetzten Anpassungen ab. Das führt zu einem Autoritätsverlust der Theorie. Das Verhältnis zwischen theoretischem Ansatz, pragmatischen Modifikationen und Vorhersagekraft ist in seinen Auswirkungen auf das Wissenschaftsverständnis noch nicht gut durchschaut. Die Reflexion darüber steckt sozusagen noch in den Kinderschuhen.

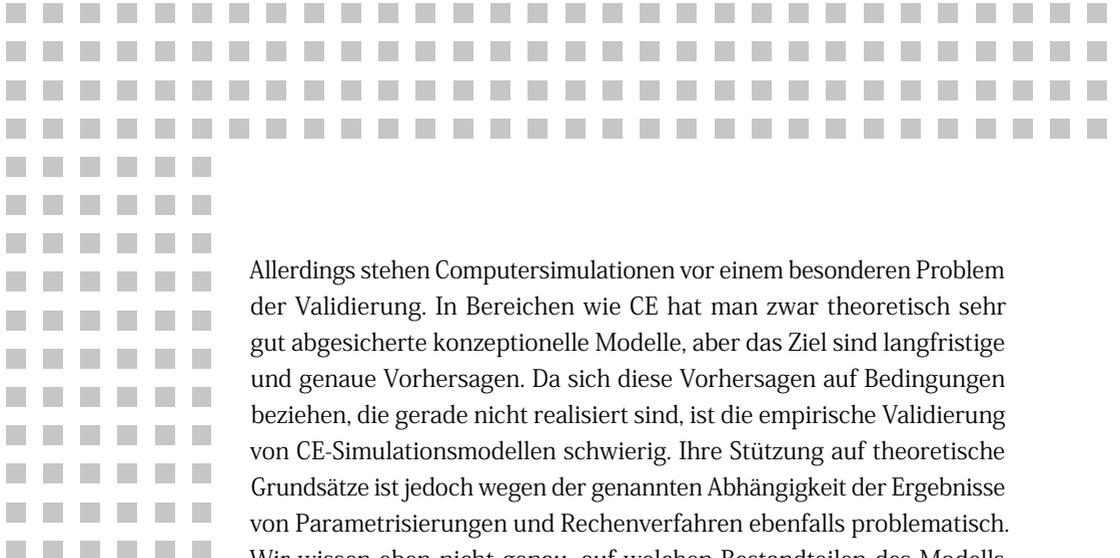
Wichtig ist, dass Computersimulationen auch Ergebnisse für komplexe Sachumstände liefern, für die an eine analytische Lösung nicht zu denken wäre. Simulationen sind also geeignet, die Konsequenzen von theoretischen Grundsätzen auszubuchstabieren, die andernfalls unzugänglich wären. Allerdings ist dann mit Blick auf das genannte Bedenken sicherzustellen, dass diese Konsequenzen tatsächlich aus den theoretischen Grundsätzen stammen und nicht aus den skizzierten pragmatischen Anpassungen dieser Grundsätze an den Lauf auf Digitalcomputern. Werden die Aussagen des theoretischen Modells tatsächlich von dessen inhaltlichen Annahmen bestimmt oder von den Umsetzungen dieser Annahmen für numerische Simulationsprozesse? Unter welchen Bedingungen können wir also erwarten, dass unsere Simulationsmodelle die künftige Entwicklung des Klimas angemessen wiedergeben?

Ein zentraler Maßstab ist die Prüfung eines Modells an der Erfahrung. Dieser Prüfung nähert man sich unter Ausnutzung eines Vorzugs von Simulationsmodellen, der mit der gewaltigen Rechenkraft von Computern zu tun hat. Man kann nämlich mit solchen Simulationsmodellen experimentell umgehen. Man verändert versuchsweise bestimmte Parameter oder Prozeduren und untersucht, welche Auswirkungen dies auf prüfbare Aussagen des Modells hat. Auf diese Weise lassen sich bestimmte Parametrisierungen und Rechenverfahren durch die Erfahrung auszeichnen. Man experimentiert dann nicht mit der Natur, sondern mit den Modellen. In solchen Simulationsexperimenten werden Modelle getestet und gegebenenfalls angepasst, um ihre Konsequenzen für konkrete Fragestellungen besser beurteilen zu können. Dadurch wird ein experimenteller Weg für die Geltungsprüfung von Simulationsmodellen eröffnet.

7

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Wie beeinflussen  
Computer-  
simulationen das  
Wissenschafts-  
verständnis?



Wie beeinflussen  
Computer-  
simulationen das  
Wissenschafts-  
verständnis?

Allerdings stehen Computersimulationen vor einem besonderen Problem der Validierung. In Bereichen wie CE hat man zwar theoretisch sehr gut abgesicherte konzeptionelle Modelle, aber das Ziel sind langfristige und genaue Vorhersagen. Da sich diese Vorhersagen auf Bedingungen beziehen, die gerade nicht realisiert sind, ist die empirische Validierung von CE-Simulationsmodellen schwierig. Ihre Stützung auf theoretische Grundsätze ist jedoch wegen der genannten Abhängigkeit der Ergebnisse von Parametrisierungen und Rechenverfahren ebenfalls problematisch. Wir wissen eben nicht genau, auf welchen Bestandteilen des Modells seine konkreten Vorhersagen wesentlich beruhen. Computersimulationen werfen entsprechend besondere Probleme für die Geltungsprüfung von Modellen auf.

Philosophen rekonstruieren hier zunächst die Probleme einer solchen Geltungsprüfung, indem sie die begriffliche Struktur von Modellen nachzeichnen und die Beziehungen zwischen den ihnen zugrunde liegenden theoretischen Annahmen und der Erfahrungsgrundlage analysieren. Die Philosophie strebt hier danach, die konzeptionelle Struktur der Modelle und die zugehörigen Bestätigungsbeziehungen transparent zu machen. Neben dieser Reflexion der Erkenntnisinstrumente (statt deren Konstruktion und Nutzung, wie es Erfahrungswissenschaftler z.B. in den Naturwissenschaften tun) vergleichen Philosophen die betreffenden Modell-Charakteristika mit ähnlichen oder andersartigen Fällen aus anderen Wissenschaftsdisziplinen oder stellen sie in den Kontext der historischen Entwicklung der Wissenschaft. Diese Kontextualisierung ermöglicht dann im günstigen Fall nicht nur ein vertieftes Verständnis dieser besonderen Charakteristika, sie stellt auch ein heuristisches Mittel für die angemessene Bewältigung der Probleme bei der Geltungsprüfung von Klimamodellen dar.

# Umgang mit Unsicherheiten

Gregor Betz | Wissenschaftsphilosoph

Modellierung und Computersimulation sind keine Garanten für Sicherheit und Zuverlässigkeit. Modellergebnisse können aus verschiedenen Gründen mehr oder weniger unsicher sein: Relevante kausale Zusammenhänge werden von dem Modell möglicherweise nicht erfasst; die Werte bestimmter Modellparameter sind nicht genau bekannt; oder die Anfangs- und Randbedingungen sind ungewiss.

Wir verfügen über sprachliche und mathematische Mittel, um Unsicherheit differenziert auszudrücken. In vielen Fällen lassen sich, trotz Unsicherheit, zuverlässig Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmen. In anderen Situationen können bloß relevante Möglichkeiten identifiziert werden, etwa indem man ein Intervall, eine Größenordnung oder einen Entwicklungstrend für eine Variable angibt.

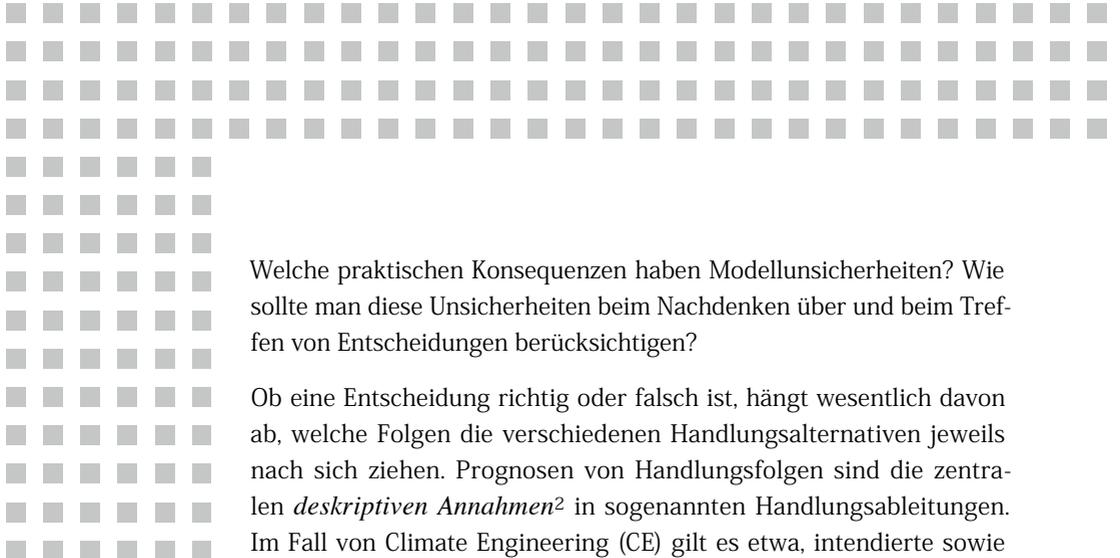
Es ist sowohl unter Klimawissenschaftlern als auch unter Wissenschaftsphilosophen umstritten, welche Art von Wissen Klimamodelle darstellen und wie ihre zum Teil sehr unterschiedlichen Resultate zu interpretieren sind. Dazu gibt es wenigstens vier Vorschläge:

1. Man betrachtet die Modelle als konkurrierende Hypothesen über die tatsächliche Struktur des Klimasystems und orientiert sich an den Prognosen der empirisch bestbestätigten Modelle.
2. Man deutet die Häufigkeitsverteilung der Modellergebnisse selbst als Wahrscheinlichkeit, um so die Prognoseunsicherheit zu quantifizieren.
3. Man interpretiert die Modellergebnisse als Szenarien, die den Raum plausibler Möglichkeiten aufspannen.
4. Man verwendet die Modelle zur Identifikation bisher unbekannter Handlungsfolgen (*unknown unknowns*).

9

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Umgang mit  
Unsicherheiten



Welche praktischen Konsequenzen haben Modellunsicherheiten? Wie sollte man diese Unsicherheiten beim Nachdenken über und beim Treffen von Entscheidungen berücksichtigen?

Ob eine Entscheidung richtig oder falsch ist, hängt wesentlich davon ab, welche Folgen die verschiedenen Handlungsalternativen jeweils nach sich ziehen. Prognosen von Handlungsfolgen sind die zentralen *deskriptiven Annahmen*<sup>2</sup> in sogenannten Handlungsableitungen. Im Fall von Climate Engineering (CE) gilt es etwa, intendierte sowie nicht-intendierte Folgen der Erforschung und des Einsatzes von CE-Maßnahmen abzuschätzen. Des Weiteren fließen als *normative Annahmen*<sup>2</sup> neben Folgenbewertungen auch Risikopräferenzen in Handlungsbegründungen ein. Es ist also möglich, dass sich zwei Parteien zwar einig sind über die Prognose<sup>3</sup> und Bewertung von Handlungsfolgen, doch aufgrund unterschiedlicher Risikobereitschaft uneinig über die Maßnahme, die aufgrund dessen ergriffen werden sollte.

In der Risiko-Ethik und der Entscheidungstheorie werden Entscheidungssituationen gemäß dem verfügbaren Zukunftswissen, welches mehr oder weniger unsicher sein kann, klassifiziert: nämlich als Entscheidungen

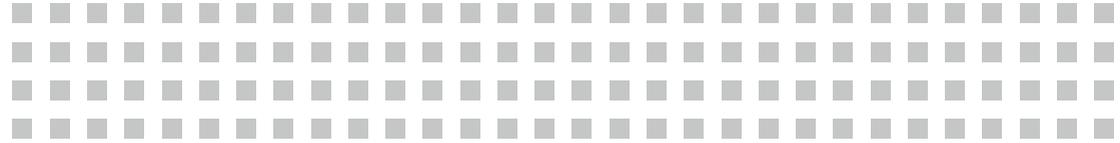
- ▀ unter Risiko (Eintrittswahrscheinlichkeiten für Handlungsfolgen bekannt),
- ▀ unter Ungewissheit (alle plausiblen Handlungsfolgen bekannt),
- ▀ unter Nichtwissen (relevante Handlungsfolgen unbekannt).

Trotz des zum Teil sehr limitierten Zukunftswissens ist es in all diesen Situationen prinzipiell möglich, vernünftig für und wider Handlungs-

---

2 | Deskriptive Annahmen beschreiben, was der Fall *ist* (bzw. war oder sein wird); normative Annahmen sagen etwas darüber aus, was der Fall sein *sollte*, sie bewerten einen Sachverhalt, ohne zu implizieren, dass er tatsächlich besteht. „Peter hält sein Versprechen“ ist z.B. eine deskriptive Aussage, „Peter sollte sein Versprechen halten“ hingegen eine normative.

3 | Wahrscheinlichkeits- oder Möglichkeitsprognose



optionen zu argumentieren. In Entscheidungen unter Risiko wird häufig das Prinzip der Erwartungsnutzenmaximierung unterstellt. Herrscht Ungewissheit, so lässt sich z.B. das Vorsorgeprinzip anwenden.

In welche dieser Kategorien Entscheidungen im Kontext von CE fallen, also etwa Entscheidungen über den zukünftigen Einsatz, die globale Regulierung von CE-Maßnahmen oder deren Erforschung und Entwicklung, hängt nun ganz maßgeblich davon ab, wie genau Klimamodelle und ihre Ergebnisse interpretiert werden.

# Unsicherheiten in numerischen Klimasimulationen im Kontext der Entscheidungssituation

Hauke Schmidt | Klimawissenschaftler

und Hermann Held | Physiker und Klimaökonom

Numerische Computermodelle des Erdsystems sind unverzichtbare Werkzeuge zur Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung. Auf Grundlage von Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen wird das Klima der Zukunft projiziert. Wie genau müssen derartige Projektionen sein?

Die gesellschaftliche Relevanz der Genauigkeit von Klimaprojektionen drückt sich u.a. darin aus, dass (wegen einer dann vergrößerten Planbarkeit) ein volkswirtschaftlicher Nutzen entstehen könnte, wenn die Projektionen genauer angegeben werden könnten.

Für Szenarien ohne Climate Engineering (CE) wurde der erwartete Nutzen maximaler Präzision bereits berechnet: er liegt global zwischen Milliarden und hunderten von Milliarden Euro pro Jahr (für diese Ergebnisse wurde vereinfachend angenommen, dass sich jedwede Unbestimmtheit von Klimaprojektionen durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ausdrücken lässt). Ferner liegt es nahe, dass bei der Bewertung, ob der Einsatz von CE sinnvoll erscheine, die Stärke der Reaktion des Klimasystems auf den Treibhausgas-Antrieb eine Rolle spielt. Wesentliche Strategien, um nun diese Stärke abzuschätzen, sind a) die Evaluation der Modelle anhand von Beobachtungsdaten und b) der Vergleich verschiedener Modelle.

## *Modell-Evaluation:*

Um Vertrauen in die Zukunftsprojektionen eines Modells zu generieren, ist eine notwendige Voraussetzung die realistische Simulation der beobachteten Klimaentwicklung des 20. Jahrhunderts. Allerdings ist dies keine Garantie für die Projektionen der Zukunft. Die meisten Modelle der großen Klimaforschungszentren reproduzieren beispielsweise den bisher beobachteten mittleren globalen Temperaturanstieg recht gut.

12

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Unsicherheiten in  
numerischen  
Klimasimulationen  
im Kontext der  
Entscheidungssituation

Das bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die zugrunde liegenden Mechanismen in den Modellen richtig beschrieben sind. Beispielsweise ist die Quantifizierung des Effekts anthropogener atmosphärischer Aerosole unsicher. Mögliche Fehler eines Modells in Bezug auf die Auswirkung der Treibhausgase auf die Temperatur (Klimasensitivität) könnten also durch die unterschiedliche Berücksichtigung von Aerosoleffekten kompensiert werden. Deswegen ist es notwendig, die Evaluierung mit verschiedenen Parametern und nicht nur mit der global gemittelten Temperatur durchzuführen. Für die Simulation von CE-Maßnahmen besteht außerdem das Problem der fehlenden Erfahrung und fehlender Messdaten. Bei dem CE-Vorschlag beispielsweise, Schwefel in die Stratosphäre zu injizieren, behilft sich die Klimaforschung mit der Analogie großer Vulkanausbrüche. Allerdings ist auch hier die Evaluierung schwierig; zum einen gibt es nur wenige gut beobachtete große Vulkanausbrüche (zuletzt jenen des Pinatubo in 1991), zum anderen ist nicht klar, wie ähnlich die Reaktionen des Klimas auf künstlichen und natürlichen vulkanischen Aerosoleintrag sind.

#### *Modell-Vergleich:*

Seit Mitte der 1990er Jahre werden in der internationalen Klimamodellierung systematische Modellvergleiche im Rahmen des „Coupled Model Intercomparison Project“ (CMIP) durchgeführt, das auch einen wesentlichen Input für die Sachstandsberichte des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) liefert. Dabei werden mit allen Modellen (zuletzt von etwa 20 Forschungsinstituten) die exakt gleichen Klimaszenarien simuliert. Wo die Übereinstimmung des simulierten Klimas groß ist, spricht man von robusten Signalen und geht davon aus, dass diese wesentlich durch die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Klimas bedingt sind und wenig von speziellen Modellformulierungen abhängen. In Bezug auf CE hat die Klimaforschung sich CMIP als Beispiel genommen und simuliert seit etwa 2010 die möglichen Klimaeffekte von vorgeschlagenen Maßnahmen der Strahlungsmanipulation im „Geoengineering Model Intercomparison Project“ (GeoMIP).



### *Von der Naturwissenschaft zum ökonomischen Entscheiden und Handeln*

Während Klimamodelle einen Zusammenhang zwischen Emissionsszenarien und Klimareaktion herstellen, soll mit ökonomischen Modellen ein Zusammenhang zwischen Regulierungseingriffen und Änderungen im Emissionsverhalten sowie damit verbundenen Kosten geliefert werden. Für eine Entscheidung für oder gegen den Einsatz von CE wird nun am Ende nicht allein die professionelle Berücksichtigung der Unsicherheiten der Klimareaktion von Bedeutung sein, sondern diejenige des gekoppelten Gesamtsystems, inklusive ökonomischer Komponenten.

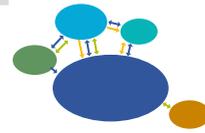
Es sollte grundsätzlich möglich sein, die oben beschriebenen Strategien zur Erfassung von Unsicherheit auch auf die deskriptiven Komponenten (siehe auch Goeschl und Quaas, S. 27) ökonomischer Module zu übertragen – ein Vorgang, der jedoch erst qualitativ umgesetzt ist. Hierzu müsste zunächst stärker herausgearbeitet werden, welche Komponenten des ökonomischen Systems auf welcher Aggregationsstufe als deskriptive, d.h. autonome, dynamische und eindeutig zu bestimmende Objekte angesehen werden können. Normative Komponenten hingegen, sofern sie auf Entscheider-Ebene liegen, bedeuten, dass sich der Entscheider/die Entscheiderin zunächst über ihre eigenen grundlegenden Präferenzen klar werden muss, die vor der ökonomischen Betrachtung liegen. Hier können systematisierende Zugänge aus dem Bereich der Ethik hilfreich sein.

14

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Unsicherheiten in  
numerischen  
Klimasimulationen  
im Kontext der  
Entscheidungssituation

# Das Erdsystemmodell UVic



David Keller, Nadine Mengis, Fabian Reith und Andreas Oschlies

| Erdsystemmodellierer

Das im SPP 1689 verwendete UVic-Modell ist ein Erdsystemmodell mittlerer Komplexität, entwickelt an der University of Victoria in Kanada. Im Vergleich zu komplexen Erdsystemmodellen, wie z. B. dem MPI-ESM des nachfolgenden Kapitels, kommt es mit wesentlich geringeren Rechenzeiten aus. Damit können mit UVic wesentlich mehr und längere Simulationen durchgeführt werden, was z. B. Unsicherheitsanalysen von Modellparametern und möglichen Zukunftsszenarien ermöglicht.

Das Modell besteht aus folgenden Komponenten: (1) einem dreidimensionalen Ozeanmodell, (2) einem Meereismodell, (3) einem terrestrischen Modell und (4) einem einfachen zweidimensionalen Atmosphärenmodell. Alle Komponenten haben eine horizontale Auflösung von  $3,6^\circ$  Breite x  $1,8^\circ$  Länge. Die Ozeankomponente hat eine vertikale Auflösung von 19 Schichten, deren Dicke mit der Tiefe von 50 m bis 500 m zunimmt.

Das *Ozeanmodell* setzt sich aus einem allgemeinem physikalischen Zirkulationsmodell und einem biogeochemischen Ökosystemmodell zusammen. In dem Zirkulationsmodell werden die globalen Meeresströmungen sowie Temperatur- und Salzverteilungen anhand von physikalischen Grundgleichungen berechnet. Das Ökosystemmodell des Ozeans berechnet die marinen Stoffkreisläufe von Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Sauerstoff.

Das *Meereismodell* berechnet die Meereisverteilung und die resultierenden Effekte auf Albedo<sup>4</sup> sowie auf Wärme- und Stoffflüsse zwischen Atmosphäre und Ozean. Hierzu werden aus dem physikalischen Ozeanmodell die Oberflächenwerte für Strömung und Temperatur benötigt.

---

4 | Mit Albedo (griech. weiß) wird der Reflektionsgrad von Meeres-, Wolken- oder Landoberfläche für solare Einstrahlung bezeichnet. Ein Wert von 1 bedeutet komplette Reflexion (perfektes Weiß), ein Wert von 0 perfekte Absorption aller auftreffenden Sonnenstrahlung (perfektes Schwarz).

Verändern sich diese Parameter (z.B. durch Klimawandel), können mit dem Meereismodell die daraus resultierenden Veränderungen der Meereisausdehnung simuliert werden.

Das *terrestrische Modell* setzt sich aus einem Landoberflächenmodell und einem dynamischen Vegetationsmodell zusammen, das fünf Vegetationsklassen und den Erdboden mit Bodenfeuchtigkeit und Oberflächenabfluss darstellt. Damit liefert es die Randbedingungen für Kohlenstoff-, Wärme- und Frischwasserflüsse zwischen Ozean, Atmosphäre und Landoberfläche sowie die daraus resultierende Albedo.

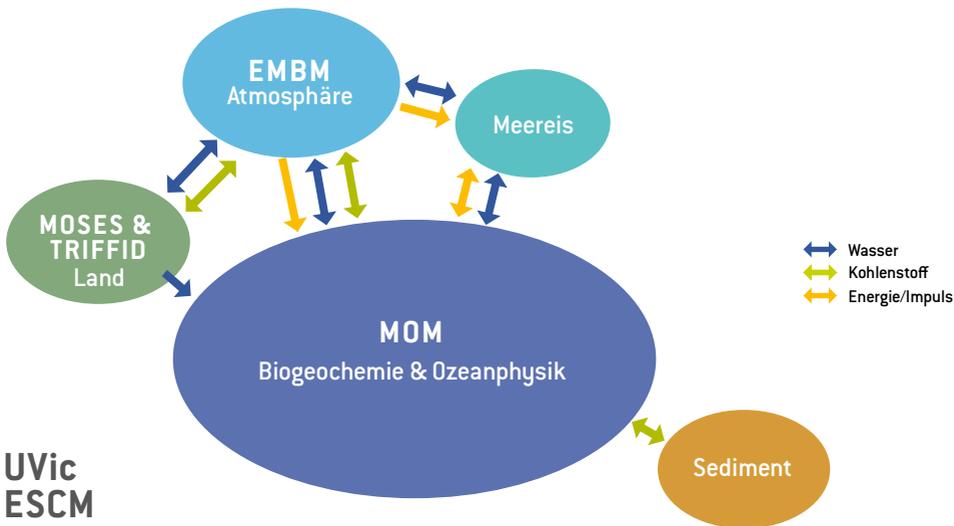
In dem *zweidimensionalen Atmosphärenmodell* wird, unter Berücksichtigung der lokalen Albedo, die eingehende solare Einstrahlung berechnet. Zusammen mit der langwelligen Abstrahlung der Erde wird die globale Strahlungsbilanz ermittelt. Anhand der resultierenden Temperatur- und Feuchteverteilung und vorgegebener Windfelder werden die Kohlenstoff-, Frischwasser- und Wärmeflüsse zwischen den einzelnen Modellkomponenten bestimmt.

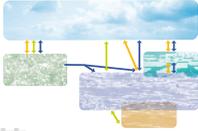
Das UVic-Modell wird durch das Einstellen mehrerer astronomischer und geographischer Parameter konfiguriert, wie z.B. von Erdbahnparameter, solarer Strahlungskonstante, kontinentalen Eisschilden oder der Geographie von Flussläufen und Wassereinzugsgebieten. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre kann entweder vorgeschrieben werden oder sie variiert basierend auf unterschiedlichen Emissionsszenarien, wie z.B. denen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Der wesentliche Vorteil des UVic-Modells gegenüber komplexeren Modellen ist die Tatsache, dass Simulationen um mehrere Größenordnungen schneller und auch auf einfachen Computern berechnet werden können (ca. 200 Jahre Simulation pro Tag auf einem einfachen Laptop-Prozessor) als dies für komplexere Modelle wie dem MPI-ESM der Fall ist. Folglich können mehrere Zukunftsszenarien simuliert und jeweils viele verschiedene Modellparameter oder Emissionsszenarien verwendet werden. Damit ist es möglich, die Sensitivitäten der Simula-

tionsergebnisse gegenüber verschiedenen Annahmen, Szenarien (z. B. verschiedener CE-Maßnahmen), Prozessparametrisierungen und Modellparametern ausführlicher zu untersuchen. So können Unsicherheiten in den Modellergebnissen besser abgeschätzt werden, als das mit der deutlich geringeren Zahl realisierbarer Rechnungen komplexer Modelle möglich wäre.

Dieser Vorteil wird neben der im Allgemeinen größeren Auflösung räumlicher Strukturen vor allem durch eine stark vereinfachte Beschreibung der Atmosphäre erkaufte. Zudem werden im UVic Modell Winde nicht vom Modell berechnet, sondern durch externe Datensätze vorgeschrieben. Dadurch kann eine dynamische Reaktion der Atmosphäre auf Klimaänderungen nicht simuliert werden. Änderungen in Wärme und Feuchte der Atmosphäre werden jedoch berechnet, und damit auch Änderungen der Wärme- und Feuchtetransporte durch die vorgeschriebenen Windfelder. Vom UVic Modell simulierte globale und großräumige Änderungen des Erdsystems liegen für verschiedene IPCC Szenarien im Bereich der Ergebnisse komplexerer Erdsystemmodelle.





# Das Erdsystemmodell MPI-ESM

Sebastian Sonntag, Tatiana Ilyina, Julia Pongratz und  
Hauke Schmidt | Klimawissenschaftler

Das MPI-ESM (Max Planck Institut Erdsystemmodell) ist ein umfassendes Erdsystemmodell, das am Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelt wurde. Es bildet die Komponenten und Prozesse ab, die für das Erdsystem und dessen Veränderung wichtig sind. Das Modell wurde im Rahmen der Modellvergleichsstudie CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) eingesetzt, die in den fünften Weltklimastatusbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) eingeflossen ist.

Das MPI-ESM beinhaltet Prozesse in der Atmosphäre, im Ozean und auf der Landoberfläche und koppelt diese Komponenten durch den Austausch von Energie, Impuls, Wasser und wichtigen Spurengasen wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Die Hauptkomponenten des Modells sind (1) das atmosphärische Zirkulationsmodell ECHAM6 und (2) das Ozeanzirkulationsmodell MPIOM sowie die Modelle (3) JSBACH für die Landbiosphäre und (4) HAMOCC für die Biogeochemie im Ozean. Das MPI-ESM kann in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen benutzt werden. Im SPP 1689 wird eine Modellversion mit horizontaler Auflösung von  $1.9^\circ$  mit 47 vertikalen Schichten in der Atmosphäre sowie  $1.5^\circ$  und 40 vertikalen Schichten im Ozean verwendet.

Das *dreidimensionale Zirkulationsmodell ECHAM6* berechnet Winde sowie die Verteilung von Temperatur, Wasserdampf und Spurengasen in der Atmosphäre. Das Modell basiert auf den Grundgleichungen für die Dynamik der atmosphärischen Strömungen und löst diese ausgehend von vorgegebenen Rand- und Anfangsbedingungen wie zum Beispiel der Sonneneinstrahlung und der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre. Wichtige Prozesse, die auf kleinen räumlichen Skalen stattfinden, wie zum Beispiel die Wolken- und Niederschlagsbildung, werden

18

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Das Erdsystem-  
modell MPI-ESM

im Modell parametrisiert, d.h., ihre Effekte werden auf der Grundlage physikalischer Überlegungen und Erfahrungen aus Beobachtungen für die einzelnen Gitterpunkte abgeschätzt.

Analog hierzu berechnet das *dreidimensionale Zirkulationsmodell MPIOM* die Strömungen und die Verteilung von Temperatur und Salzgehalt im Ozean. Auch hier stellen physikalische Grundgleichungen für die Dynamik der Strömungen die Basis. Zudem ist ein Modell für die Meereisverteilung und ihre Effekte auf Stoff- und Wärmeflüsse enthalten.

Das *Landbiosphärenmodell JSBACH* berechnet die Vegetation und ihre Veränderung und daraus die Beschaffenheit der Landoberfläche sowie den Austausch von Wasser, Energie und CO<sub>2</sub> zwischen Land und Atmosphäre. Einerseits wird die Vegetation durch Temperatur, Niederschlag und atmosphärisches CO<sub>2</sub> beeinflusst, andererseits wirken z.B. Albedo-Veränderungen der Landoberfläche oder die Aufnahme von CO<sub>2</sub> auf die Atmosphäre zurück.

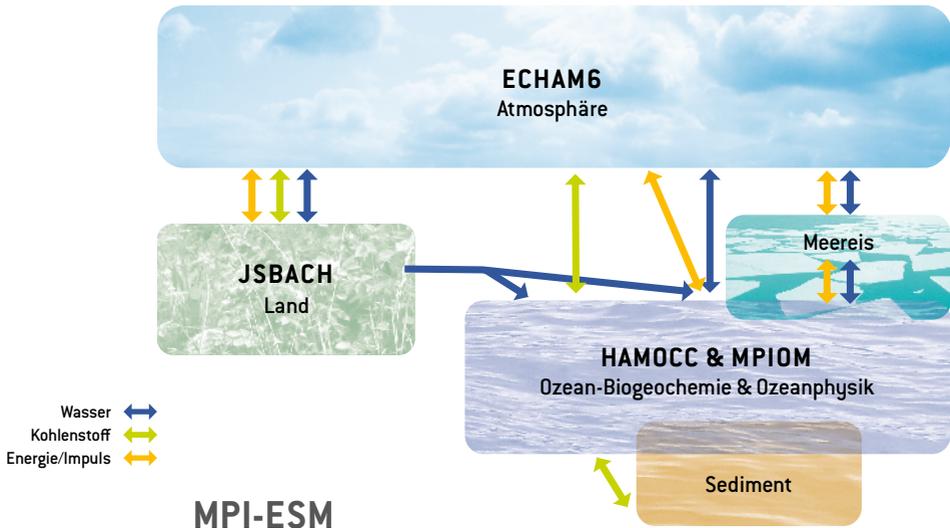
Das *Ozeanbiogeochemiemodell HAMOCC* berechnet die marinen biogeochemischen Stoffkreisläufe von Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Sauerstoff, Silikat und Eisen in der Wassersäule und in den oberen Sedimentschichten. Diese sind abhängig von der Ozeanzirkulation und Klimadynamik, beeinflussen aber auch selbst die anderen Komponenten wie etwa den atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt durch den Austausch von CO<sub>2</sub> zwischen Ozean und Atmosphäre.

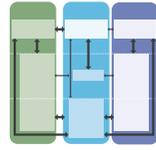
Ein wesentliches Merkmal des MPI-ESM ist der vollständig gekoppelte Kohlenstoffkreislauf, mit dem nun auch Rückkopplungen des Klimawandels auf die Kohlenstoffverteilung selbst untersucht werden können. Hierzu werden anthropogene Emissionen von CO<sub>2</sub> aus historischen Daten oder aus Szenarien für die zukünftige Entwicklung in das Modell eingelesen und die resultierende Kohlenstoffverteilung in Atmosphäre, Ozean und Biosphäre berechnet.

Das Erdsystem-  
 modell MPI-ESM

Zahlreiche Prozesse werden somit in relativ hoher räumlicher Auflösung im MPI-ESM gleichzeitig berechnet. Dies bedarf einer sehr großen Rechenleistung, wie sie nur von Supercomputern, wie dem des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg, bereitgestellt werden. Dennoch können auch hier an einem Tag lediglich etwa 15 Jahre im Modell simuliert werden.

Wichtige Eigenschaften des MPI-ESM sind die relativ gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit Beobachtungen aus der Vergangenheit sowie die Berücksichtigung von sehr vielen miteinander interagierenden Prozessen im Modell. Hierin liegt im Vergleich zu Erdsystemmodellen geringerer Komplexität das relativ hohe Vertrauen begründet, zukünftige Entwicklungen des Erdsystems sowie seine Reaktion auf menschliche Einflüsse realistisch wiedergeben zu können.





# Das Erdsystemmodell IPSL-CM

Olivier Boucher, Ulrich Platt und Christoph Kleinschmitt

| Erdsystemmodellierer

IPSL-CM (Institut Pierre-Simon Laplace Climate Model) ist ein Erdsystemmodell, das am Institut Pierre-Simon Laplace in Paris in Zusammenarbeit mit anderen Forschungsinstituten entwickelt wurde. IPSL-CM setzt sich zusammen aus dem Atmosphärenmodell LMDZ, dem Landoberflächenmodell ORCHIDEE, dem Ozeanmodell NEMO und dem Meereismodell LIM. Diese beschreiben gemeinsam das physikalische Klimasystem. Das Modell kann um zusätzliche Komponenten erweitert werden, wie z. B. um das Modell für marine Biogeochemie PISCES, das Vegetationsmodell STOMATE, das Gasphasen- und Aerosolchemiemodell INCA oder das Stratosphärenchemiemodell REPROBUS. Die verschiedenen Komponenten interagieren miteinander, um die Komplexität des Erdsystems ansatzweise darzustellen. IPSL-CM wurde im Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) für den fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) verwendet. Das Modell wird in Vorbereitung auf CMIP6 weiterentwickelt; u. a. wird der vollständig gekoppelte Klima-Kohlenstoffkreislauf um den Stickstoff- und Phosphorkreislauf und deren Wechselwirkungen mit dem Kohlenstoffkreislauf ergänzt. Während das Atmosphärenmodell LMDZ sehr flexibel auf Arbeitsplatzrechnern eingesetzt werden kann und damit ein schnelles Testen und eine schnelle Entwicklung ermöglicht, benötigt das vollständige Erdsystemmodell IPSL-CM eine sehr hohe Rechenleistung, die nur von heutigen Supercomputern bereitgestellt werden kann.

Im SPP 1689 wird eine Entwicklungsversion des Modells mit einer horizontalen Auflösung von 2.5° und 39 vertikalen Schichten der Atmosphäre verwendet. Versionen mit höherer Auflösung sind verfügbar und können, wenn nötig, eingesetzt werden. Mit dem Modell werden potenzielle Grenzen von stratosphärischen Aerosolinjektionen und mariner Wolkenaufhellung untersucht, also zwei der Hauptmethoden des Solar Radiation Management (SRM), die als CE-Maßnahmen zur Abschwächung des Klimawandels vorgeschlagen werden.

21

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

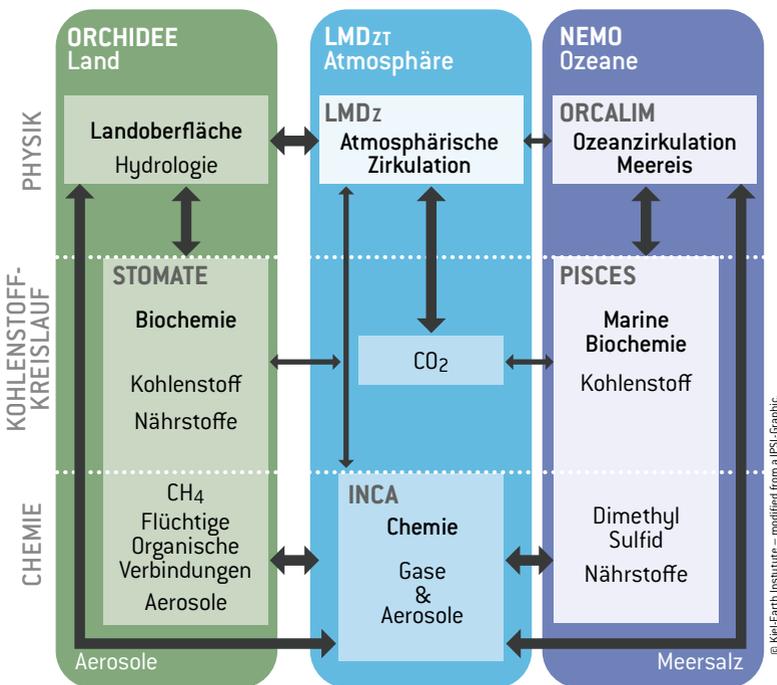
Das Erdsystem-  
modell IPSL-CM

In dem Gasphasen- und Aerosolchemiemodell INCA werden stratosphärische Prozesse wie Koagulation<sup>5</sup>, Sedimentation und Transport der Aerosole berücksichtigt, um zu untersuchen, wie diese die Auswirkungen einer stratosphärischen Aerosolinjektion auf den potenziellen Strahlungsantrieb beeinflussen. Das LMDZ Modell enthält in seiner aktuellsten Version eine Parametrisierung des atmosphärischen Strahlungstransports, die komplex genug ist, um die Wechselwirkung von stratosphärischem Aerosol sowohl mit der Sonnenstrahlung, als auch der terrestrischen Wärmestrahlung zu untersuchen. Außerdem beinhaltet LMDZ Parametrisierungen kleinskaliger atmosphärischer Prozesse wie Grenzschichtmischung, Konvektion und Niederschlag, die von den dynamischen Gleichungen des Modells nicht aufgelöst werden können, für die Darstellung des Wasserkreislaufes sowie der Wolkenlebensdauer und -zyklen aber benötigt werden. LMDZ-INCA kann im gekoppelten oder ungekoppelten Modus mit dem Ozeanmodell NEMO verwendet werden, je nachdem, ob der Fokus auf dem Verständnis der physikalischen atmosphärischen Prozesse oder der Reaktion des Klimas auf SRM-Maßnahmen liegt.

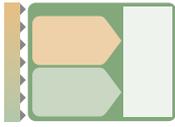
Klima- und Erdsystemmodellen gelingt es zunehmend, viele der beobachteten Eigenschaften des Erdklimas darzustellen. Sie sind damit extrem nützliche Werkzeuge zur Untersuchung des Klimasystems sowie des Klimawandels und zur Beurteilung von CE-Maßnahmen. Dennoch sind sie längst nicht perfekt und haben bekanntlich zahlreiche Unzulänglichkeiten, die sich darin zeigen, dass einige der simulierten Variablen systematisch von regionalen Beobachtungen abweichen. Die Frage der Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse eines Modells wie IPSL-CM ist wichtig und zentral für die Beurteilung von CE. Um das Vertrauen in die Ergebnisse zu stärken, ist eine gute Übereinstimmung mit historischen Beobachtungen nötig. Zur Beurteilung der CE-Maßnahme der stratosphärischen Aerosolinjektion und des IPSL-CM an-sich können die großen, gut dokumentierten Vulkanausbrüche des El Chichón und des

5 | Koagulation = Prozess, in dem sich Aerosolpartikel durch Kollision zu größeren Teilchen verbinden

Pinatubo genutzt werden. Andere Ausbrüche des vergangenen Jahrtausends sind schlechter dokumentiert, liefern aber eine größere Bandbreite an Bedingungen. Für die CE-Maßnahme der marinen Wolkenaufhellung stellen anthropogene Verschmutzung mit Aerosolen und deren Auswirkungen auf die Wolkeneigenschaften eine interessante Analogie dar. Der Vergleich mit Beobachtungen ist aber nicht der einzige Weg, um Vertrauen in Modellergebnisse zu gewinnen. Es ist auch wichtig herauszuarbeiten, welche physikalischen und chemischen Prozesse für die untersuchte wissenschaftliche Fragestellung relevant sind und dem Modell das richtige Maß an Komplexität verleihen. Darüber hinaus können Sensitivitätsexperimente Aufschluss über die Robustheit der Ergebnisse geben. Letztendlich arbeitet das Modell innerhalb eines Bereichs von Annahmen, was bedacht werden muss, um eine Überinterpretation der Ergebnisse zu vermeiden.



© MetEarth Institute - modified from a IPSL Graphic.



## Das Vegetationsmodell LPJmL

Tim Beringer, Lena Boysen und Vera Heck | Erdsystemwissenschaftler

Vegetation und Böden sind im Erdsystem über den Austausch von Kohlenstoff und Wasser eng mit der Atmosphäre verbunden. Durch die Photosynthese nehmen Pflanzen Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und speichern Kohlenstoff unter Abgabe von Sauerstoff in Form neuer Biomasse. Abgestorbene Pflanzenteile werden durch Pilze und Bakterien im Boden zersetzt und der gespeicherte Kohlenstoff wird wieder in die Atmosphäre abgegeben.

Heute bedecken Äcker und Weideflächen mehr als 40 % der eisfreien Landoberfläche. Der Mensch greift durch diese großflächigen Veränderungen tief in die globalen Kreisläufe von Kohlenstoff und Wasser ein und etwa 10 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen durch Entwaldung und Landwirtschaft. Andere Ökosysteme wie aufwachsende junge Wälder hingegen nehmen als Kohlenstoffsinken insgesamt mehr als 25 % der menschlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf und tragen so aktiv zum Klimaschutz bei.

Um die vielfältigen Prozesse und Veränderungen in den Landökosystemen in Vergangenheit und Zukunft simulieren und verstehen zu können, wurden globale Vegetationsmodelle entwickelt. Das Vegetationsmodell LPJmL (Lund-Potsdam-Jena managed Land) des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung bildet neben den natürlichen Ökosystemen auch Ackerflächen und Weiden ab. Für die Simulation von landwirtschaftlichen Gebieten berücksichtigt LPJmL die zwölf ökonomisch wichtigsten Feldfrüchte, drei Pflanzentypen für die Bioenergieproduktion sowie Gräser auf Weideflächen. Angetrieben wird das Modell durch Klimadaten zu Temperatur, Niederschlag, Bewölkung und atmosphärischem CO<sub>2</sub>-Gehalt sowie durch Informationen über menschliche Landnutzung. Aus diesen Informationen berechnet LPJmL die globale Verteilung von Vegetationstypen, Pflanzenwachstum, das Auftreten von Feuern ebenso wie landwirtschaftliche Erträge oder den Wasserbedarf für Bewässerung. Das Modell wird kontinuierlich auf Basis von

24

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Das Vegetations-  
modell LPJmL

diversen Beobachtungsdaten evaluiert und validiert. So zeigten sich unter anderem gute Übereinstimmungen von Simulationen mit Satellitendaten der pflanzlichen Produktivität, Messungen der CO<sub>2</sub>-Flüsse in natürlichen und landwirtschaftlichen Ökosystemen, Messungen von Abflussmengen großer Flussgebiete oder auch Statistiken landwirtschaftlicher Erträge.

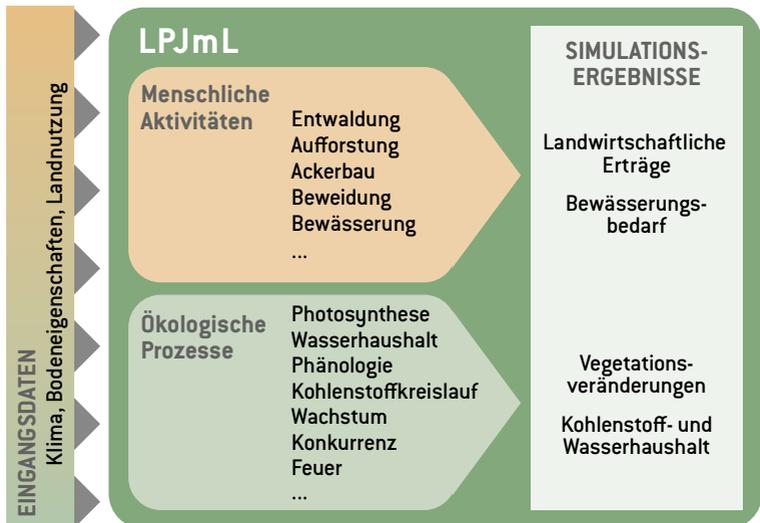
Einige CE-Maßnahmen zielen darauf ab, Kohlenstoffsenken zu verstärken, um die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration zu reduzieren. Kohlenstoffsenken können zum Beispiel durch Landnutzungsmaßnahmen vergrößert werden, die darauf abzielen, möglichst viel Kohlenstoff in pflanzlicher Biomasse zu binden. Im Rahmen des SPP 1689 wird LPJmL eingesetzt, um die Wirksamkeit großflächiger Aufforstungsprojekte und der Kultivierung schnell wachsender Bioenergiepflanzen zu untersuchen. Dabei sind auch die Auswirkungen auf den Wasserbedarf und die Konkurrenzen um Land mit Nahrungsmittelproduktion und Naturschutz wichtiger Teil der Analysen.

Andere CE-Maßnahmen wie die Einbringung von Aerosolen in die Atmosphäre zur Verringerung der einfallenden Sonnenstrahlung sollen direkt die Temperaturen auf der Erdoberfläche reduzieren. Klimamodelle zeigen allerdings, dass sich diese Eingriffe auch auf Verteilung und Intensität von Niederschlägen auswirken und damit die Wachstumsbedingungen von Pflanzen verändern können. Im Rahmen des SPP 1689 wird LPJmL von entsprechenden Klimaszenarien angetrieben, um die Auswirkungen der durch CE veränderten Sonneneinstrahlung auf die terrestrische Biosphäre zu simulieren. So kann beispielsweise untersucht werden, welche Regionen von bestimmten CE-Maßnahmen profitieren werden und wo sich die veränderten klimatischen Bedingungen nachteilig auf landwirtschaftliche Erträge oder Kohlenstoffspeicherung in Vegetation und Böden auswirken können.

Unsicherheiten in den Analysen ergeben sich unter anderem aus den Unsicherheiten in den verwendeten Klimaszenarien, mit denen LPJmL angetrieben wird. Vor allem Niederschlagsveränderungen haben in vielen Regionen den stärksten Einfluss auf pflanzliches Wachstum und

werden von den verschiedenen Klimamodellen in ihren räumlichen und zeitlichen Dynamiken sehr unterschiedlich dargestellt. Darüber hinaus sind auch verschiedene Prozesse wie bakterielle Zersetzungsprozesse im Boden und die Reaktion der Pflanzen auf den steigenden  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre nicht genau verstanden und ihre Darstellung im Modell entsprechend unsicher. Auch werden bestimmte Prozesse, wie z.B. vermehrter Schädlingsbefall durch steigende Temperaturen, im Modell nicht berücksichtigt, könnten in der Zukunft aber stärkere Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum haben.

Die Annahmen über zukünftige CE-Maßnahmen stellen die größte Unsicherheit in den zu analysierenden Szenarien dar. Ob, wie stark und in welcher Form Aufforstung als CE-Maßnahme umgesetzt wird, wird von einer Vielzahl politischer Entscheidungen und sozio-ökonomischer Rahmenbedingungen abhängen. Vor diesem Hintergrund versuchen die Simulationen mit LPJmL ein umfassendes Spektrum möglicher Zukünfte abzudecken. Die Analysen stellen keine Vorhersagen dar, sondern sollen Potenziale und mögliche Auswirkungen verschiedener Handlungsoptionen quantifizieren.



# Ökonomische Modellierung im Kontext von Climate Engineering

Timo Goeschl und Martin Quaas | Umweltökonomien

Ökonomen verwenden mathematische Modelle, um das Entscheidungsverhalten ökonomischer Agenten in unterschiedlichen Zusammenhängen zu beschreiben und die Auswirkungen dieser Entscheidungen zu analysieren. Agenten können dabei z. B. Individuen, Haushalte, Unternehmen, Regierungen oder der „Soziale Planer“, eine hypothetische Person, die im Namen einer gesamten Gesellschaft entscheidet, sein. Die Zusammenhänge spiegeln dabei insbesondere die technologischen und ökonomischen Einschränkungen wider, unter denen Individuen zwischen Alternativen wählen. Modelle werden verwendet, um Forschungsfragen zu beantworten, die typischerweise in eine der folgenden drei Kategorien fallen:

1. *Normative Fragestellungen:* Zum Beispiel, zu welchem Zeitpunkt und in welchem Ausmaß sollte die Gesellschaft am besten Climate Engineering (CE) als Teil der Klimapolitik unternehmen?
2. *Positive (oder: deskriptive) Fragestellungen:* Zum Beispiel, wie werden Akteure individuell oder kollektiv auf jene Anreize reagieren, die die Verfügbarkeit von CE-Maßnahmen bietet?
3. *Instrumentelle Fragestellungen:* Zum Beispiel, wie müssen Steuerungsmaßnahmen ausgestaltet werden, um sicherzustellen, dass Akteure so handeln, wie es dem gesellschaftlichen Interesse entspricht?

Für Fragen aller drei Kategorien verwenden Ökonomen unterschiedliche analytische Herangehensweisen, um das jeweilige System zu beschreiben. Das Herangehen kann je nach Fragestellung beispielsweise über statische oder dynamische, deterministische oder stochastische Methoden geschehen. Dabei steht Optimierung oft im Mittelpunkt, um das zielorientierte Handeln der Akteure abzubilden. Für positive und instrumentelle Fragestellungen werden oft spieltheoretische Methoden verwendet, um damit Aussagen über erwartete Resultate in den Interaktionen zwischen den Agenten zu treffen.

27

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Ökonomische  
Modellierung im  
Kontext von  
Climate  
Engineering

Während sie sich in ihrer Komplexität unterscheiden, fußen die erwähnten Modelle stets auf der Wirtschaftstheorie. Im Kontext von CE machen sich ökonomische Modelle zusätzlich häufig Einsichten aus anderen Disziplinen zu Nutze. Sogenannte integrierte Bewertungsmodelle (IAMs, engl. integrated assessment models) verbinden Klimamodelle mit ökonomischen Modellen (s. Abbildung). IAMs legen den Fokus auf die dynamischen Rückwirkungen zwischen dem Klimasystem und der Ökonomie und bestimmen sowohl mögliche Emissions- und Einsatzszenarien als auch optimale Verringerung von Treibhausgasen im Verlauf der Zeit. Wenn normative Fragestellungen angegangen werden, werden Ziele auf ethische Überlegungen gestützt, d. h. diese Modelle beziehen Einsichten der Moralphilosophie mit ein. So gehen beispielsweise viele Modelle in

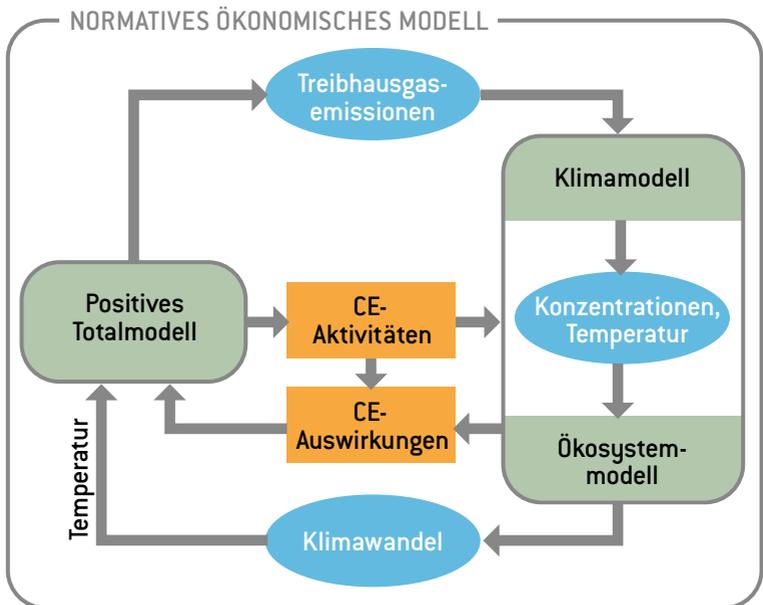


Abb.: Integrierte Bewertungsmodelle (IAMs) verbinden normalerweise ein positives ökonomisches Totalmodell mit einem Klimamodell, um Rückwirkungen der Teilmodelle aufeinander zu untersuchen und in einem weiteren Schritt normative Analysen durchzuführen.

der Ökonomie (des Klimawandels) normative Fragestellungen ausgehend vom Utilitarismus an.<sup>6</sup>

Ein typisches Beispiel der normativen Kategorie im Kontext von CE ist die Bestimmung eines oder mehrerer Maße für Wohlfahrt der Weltgesellschaft und das Untersuchen sowohl der Existenz als auch der Art von Bedingungen, unter denen dieses Maß sich durch eine bestimmte CE-Maßnahme erhöht oder verringert. Vollentwickelte IAMs, welche gleichzeitig dynamische Marktgleichgewichte modellieren und die Wohlfahrtswirkungen von CE untersuchen, wurden bislang jedoch noch nicht veröffentlicht.

Ein typisches Beispiel der positiven Kategorie ist die spieltheoretische Analyse der Anreize für Staaten, sich wegen räumlich differenzierter Folgewirkungen von CE zu Koalitionen zusammenzuschließen. Ein anderes ist die Untersuchung, ob das Vorhandensein großer Ölreserven die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass ein Land CE-Kapazitäten entwickelt. Auch die Entscheidung einer Gesellschaftsgeneration, aus Gründen intergenerativer Gerechtigkeitsvorstellungen eine bestimmte Kombination aus Vermeidungsstrategien und CE-Forschung zu wählen, kann Gegenstand der positiven Forschung sein.

Fragen, welche der instrumentellen Kategorie angehören, wurden in Hinblick auf CE bislang nicht eingehend durch ökonomische Modellierung untersucht.

In seiner Vorhersagekraft ist die ökonomische Modellierung von CE durch beschränkte Datenverfügbarkeit, Unvollständigkeiten in der Modellierung und unberücksichtigte Feedback-Prozesse oft noch mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet. Gleichzeitig leistet sie durch die systematische Aufarbeitung der ökonomischen Sachverhalte und das Aufzeigen von Anzeizeffekten einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung elementarer Fehleinschätzungen der Wirtschaftlichkeit von CE.

---

6 | Nach der utilitaristischen Moral sollte die Gesellschaft danach streben den Gesamtnutzen zu maximieren, d.h. die Summe der Nutzen aller Einzelpersonen. Der Nutzen einer Einzelperson wird dabei als eine steigende und konkave Funktion im Konsum von Gütern und Dienstleistungen angenommen.



## Autoren

Dr. Tim Beringer | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Prof. Dr. Gregor Betz | Karlsruher Institut für Technologie

Dr. Olivier Boucher | National Center for Scientific Research /

Laboratoire de Météorologie Dynamique, France

Lena Boysen | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Prof. Dr. Martin Carrier | Universität Bielefeld

Prof. Timo Goeschl, PhD | Universität Heidelberg

Vera Heck | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Prof. Dr. Hermann Held | Universität Hamburg

Dr. Tatiana Ilyina | Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg

Dr. David Keller | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Christoph Kleinschmitt | Universität Heidelberg

PD Dr. Johannes Lenhard | Universität Bielefeld

Nadine Mengis | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Prof. Dr. Andreas Oschlies | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für

Ozeanforschung Kiel

Prof. Dr. Ulrich Platt | Universität Heidelberg

Dr. Julia Pongratz | Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg

Prof. Dr. Martin Quaas | Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Fabian Reith | GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Dr. Hauke Schmidt | Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg

Dr. Sebastian Sonntag | Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg

Redaktion: Ulrike Bernitt | Kiel Earth Institute

30

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Aussagekräftig  
trotz Unsicher-  
heiten



CLIMATE  
ENGINEERING

Risks, Challenges,  
Opportunities?

## Das Schwerpunktprogramm 1689

In dem Schwerpunktprogramm „Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?“ (SPP 1689) wollen wir Climate Engineering bewerten und die Folgen von CE-Maßnahmen abschätzen.

16 Universitäten und Forschungsinstitute sind seit April 2013 an dem Schwerpunktprogramm beteiligt. Es wird zunächst für drei Jahre mit knapp fünf Millionen Euro von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und von Prof. Andreas Oschlies, tätig am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und dem KIEL EARTH INSTITUTE koordiniert.

### WESENTLICHE ZIELE DER FORSCHUNG IM SPP 1689 SIND:

- Erforschung der klimatischen, ökologischen und gesellschaftlichen Risiken und möglichen Auswirkungen verschiedener CE-Maßnahmen,
- Evaluierung der wissenschaftlichen und öffentlichen Wahrnehmung von CE,
- Bewertung – nicht Entwicklung! – von CE unter Einbeziehung naturwissenschaftlicher, sozialer, politischer, rechtlicher und ethischer Aspekte.

Mehr Informationen zum Schwerpunktprogramm und den einzelnen Projekten unter: [www.spp-climate-engineering.de](http://www.spp-climate-engineering.de)

31

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Das Schwerpunkt-  
programm 1689

**DFG**

## Impressum | Kontakt

KIEL EARTH INSTITUTE  
Düsternbrooker Weg 2  
24105 Kiel | Germany  
Telefon: 0431 - 600 4140  
[www.kiel-earth-institute.de](http://www.kiel-earth-institute.de)  
[info-ce@spp-climate-engineering.de](mailto:info-ce@spp-climate-engineering.de)

### Koordination:

Ulrike Bernitt, [ulrike.bernitt@kiel-earth-institute.de](mailto:ulrike.bernitt@kiel-earth-institute.de)

### Gestaltung:

Rita Erven, [rita.erven@kiel-earth-institute.de](mailto:rita.erven@kiel-earth-institute.de)

### Abbildungen:

soweit nicht anders gekennzeichnet: © KIEL EARTH INSTITUTE

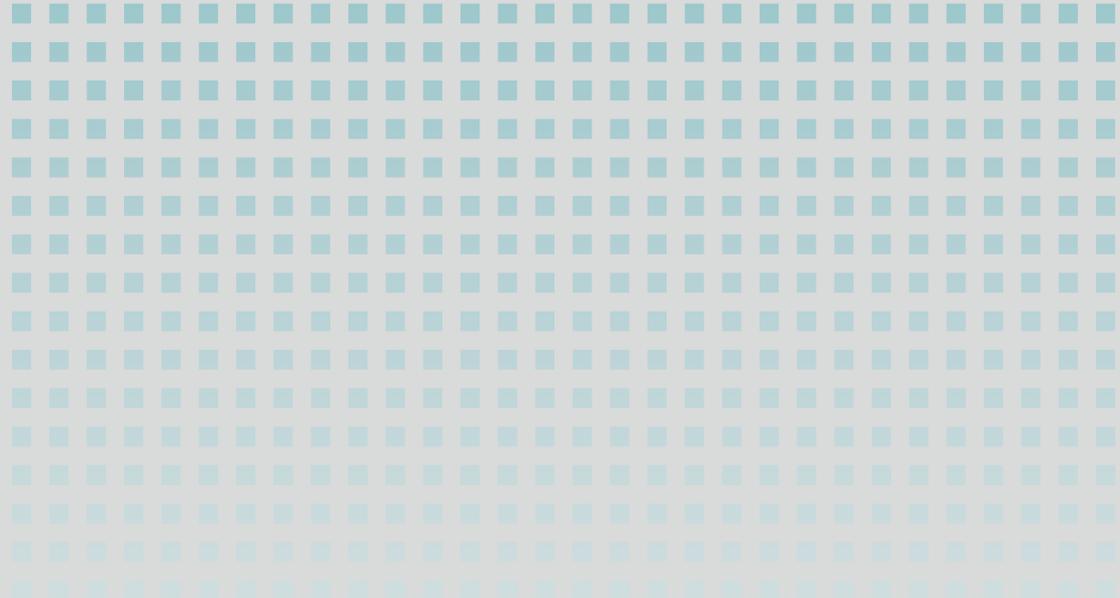
Auflage: 1.000

32

MODELLIERUNG  
IN DER CLIMATE  
ENGINEERING-  
FORSCHUNG

Aussagekräftig  
trotz Unsicher-  
heiten

© KIEL EARTH INSTITUTE 2014



Weitere Informationen und weiterführende Literatur zum Thema  
„Modellierung in der Climate Engineering-Forschung“ unter  
[www.spp-climate-engineering.de/modellierung](http://www.spp-climate-engineering.de/modellierung)

---

## Aussagekräftig trotz Unsicherheiten – Modellierung in der Climate Engineering-Forschung

Unter dem Begriff „Climate Engineering“ (CE) werden verschiedene großtechnische Maßnahmen zusammengefasst, die gezielt dazu eingesetzt werden könnten, den atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt zu verringern oder die Strahlungsbilanz der Erde direkt zu beeinflussen, um der anthropogen verursachten Klimaerwärmung entgegenzuwirken.

Die in Forschung und Öffentlichkeit diskutierten CE-Maßnahmen sind bisher lediglich Ideen zu technischen Verfahrensweisen, die zunächst plausibel erscheinen und im Prinzip funktionieren könnten. Die Überprüfung ihrer tatsächlichen Wirksamkeit und die Abschätzung unbeabsichtigter Nebeneffekte hingegen sind schwierig, denn CE-Maßnahmen wären ein gezielter Eingriff in das Klimasystem, ein global vernetztes System von hoher Komplexität, von dem viele Aspekte bisher nicht ausreichend verstanden sind.

Eine für Mensch und Umwelt gefahrlose Möglichkeit, die Aus- und Nebenwirkungen verschiedener CE-Maßnahmen zu untersuchen, bieten dagegen numerische Modelle des Erdsystems, die Experimente nicht in der Natur, sondern in einer simulierten Welt erlauben.

Diese Broschüre soll helfen, die Funktionsweisen, Grenzen und Möglichkeiten der Modellierung zu verstehen und damit den Einstieg in den Diskurs zu CE zu erleichtern. Sie ist im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Schwerpunktprogrammes 1689 entstanden.