



Konzeptuelle Fragen in den Grundlagen der Klimawissenschaften

Roman Frigg, Erica Thompson und Charlotte
Werndl

Die Autoren haben in gleichem Maß zum Artikel beigetragen und sind hier in alphabetischer Ordnung aufgelistet. Die Abschn. 1 bis 6 dieses Kapitels sind eine leicht veränderte Version des Artikels *Die Philosophie der Klimawissenschaften* im Sammelband *Grundriss Wissenschaftsphilosophie: Die Philosophien der Einzelwissenschaften*, hrsg. von Simon Lohse und Thomas Reydon (Hamburg: Meiner, 2017, 381–411). Wir danken dem Meiner-Verlag für die Erlaubnis, den Text hier erneut zu veröffentlichen.

R. Frigg (✉)

Department of Philosophy, Logic and Scientific Method,
London School of Economics and Political Science, London,
United Kingdom

E-Mail: R.P.Frigg@lse.ac.uk

E. Thompson

LSE Data Science Institute, London School of Economics
and Political Science, London, United Kingdom

E-Mail: e.thompson@lse.ac.uk

C. Werndl

Fachbereich Philosophie, Universität Salzburg, Salzburg,
Österreich

E-Mail: charlotte.werndl@plus.ac.at

Zusammenfassung Die Philosophie der Klimawissenschaften ist ein Teilgebiet der Wissenschaftstheorie, das sich mit den Methoden und Grundbegriffen der Klimawissenschaften auseinandersetzt. Ziel dieses Kapitels ist es, eine überblickende Darstellung der wichtigsten Probleme und Fragen in den Klimawissenschaften zu liefern. Nach einführenden Erläuterungen sprechen wir im zweiten Abschnitt über das Problem, Klima zu definieren. Im dritten Abschnitt stellen wir Klimamodelle vor. Im vierten Abschnitt diskutieren wir Probleme des Nachweises und der Zuschreibung von Klimawandel. Im fünften Abschnitt untersuchen wir die Bestätigung von Klimamodellen und die Grenzen der Vorhersagbarkeit. Im sechsten Abschnitt besprechen wir Klassifikationen von Unsicherheit und die Verwendung von Modell-Ensembles. Im siebten Abschnitt fassen wir zusammen und bieten einen Ausblick an.

1 Einleitung

„Klimawissenschaften“ ist ein Sammelbegriff, der sich auf wissenschaftliche Disziplinen bezieht, die Aspekte des Erdklimas studieren. Darunter fallen unter anderem Teile der Atmosphärenwissenschaften, Ozeanografie und Glaziologie. Als Folge der öffentlichen Diskussion über angemessene Reaktionen auf den Klimawandel sind Teile der Entscheidungstheorie und der Ökonomie für Klimafragen herangezogen worden, weshalb Beiträge aus diesen Gebieten manchmal auch zu den Klimawissenschaften im weiteren Sinne gezählt werden. In diesem Kapitel fokussieren wir uns auf die naturwissenschaftlichen Kerngebiete der Klimawissenschaften und verweisen entscheidungstheoretisch und ökonomisch interessierte Leser

auf die einschlägige Literatur (Bradley und Steele 2015 geben einen einführenden Überblick).

Im Zentrum der Philosophie der Klimawissenschaften steht die Betrachtung der Methodologie, die zum Erreichen von Schlussfolgerungen bezgl. des Klimas verwendet wird. Die Philosophie der Klimawissenschaften ist ein Teilgebiet der Wissenschaftstheorie, das sich zu Beginn des 21. Jahrhunderts herauskristallisiert hat, als Wissenschaftstheoretiker begonnen haben, sich genauer mit den Methoden der Klimawissenschaften auseinanderzusetzen. Mittlerweile beinhaltet sie Betrachtungen über beinahe alle Aspekte der Klimawissenschaften, inklusive der Beobachtung von Daten, Methoden des Nachweises und der Zuschreibung, den Gebrauch von Modell-Ensembles und die Charakterisierung von Unsicherheit. Da der Teufel bekanntlich im Detail steckt, operiert die Philosophie der Klimawissenschaften in engem Kontakt mit den Wissenschaften selbst und richtet viel Aufmerksamkeit auf wissenschaftliche Details. Aus diesem Grund gibt es keine klare Trennung zwischen den Klimawissenschaften und der Philosophie derselben, und Konferenzen werden oft sowohl von Wissenschaftler/innen als auch von Philosoph/innen besucht.

Ziel dieses Kapitels ist es, eine aktuelle Zusammenfassung der wichtigsten Probleme und Fragen zu den Grundlagen der Klimawissenschaften zu liefern. Im zweiten Abschnitt sprechen wir über das Problem, Klima zu definieren. Im dritten Abschnitt stellen wir Klimamodelle vor. Im vierten Abschnitt diskutieren wir Probleme des Nachweises und der Zuschreibung von Klimawandel. Im fünften Abschnitt untersuchen wir die Bestätigung von Klimamodellen und die Grenzen der Vorhersagbarkeit. Im sechsten Abschnitt besprechen wir Klassifikationen von Unsicherheit und die Verwendung

von Modell-Ensembles. Im siebten Abschnitt fassen wir zusammen und bieten einen Ausblick an.

Zwei Klarstellungen seien vorangestellt. Erstens: Wir besprechen Probleme und Fragen von einer wissenschaftstheoretischen Perspektive aus und mit speziellem Fokus auf erkenntnistheoretische Probleme. Natürlich ist dies nicht die einzige Perspektive. Man kann die Klimawissenschaften auch aus dem Blickwinkel der Wissenschaftsforschung oder der Soziologie der Wissenschaften betrachten. Aus Platzgründen können wir auf diese Gebiete nicht eingehen. Zweitens sollte, um möglichen Missverständnissen vorzubeugen, darauf hingewiesen werden, dass eine kritische philosophische Reflexion über die Ziele und Methoden der Klimawissenschaften keinesfalls gleichbedeutend mit dem Einnehmen einer Position ist, die als Klimaskeptizismus bekannt ist. Klimaskeptiker/innen sind eine heterogene Gruppe von Personen, welche die Ergebnisse der „Mainstream“-Klimawissenschaften nicht akzeptieren. Die Gruppe umfasst ein breites Spektrum an Menschen, angefangen bei denjenigen, die schlichtweg die grundlegende Physik des Treibhauseffekts (und den Einfluss von menschlichen Aktivitäten auf das Klima der Erde) leugnen, bis hin zu einer kleinen Minderheit, die sich aktiv an der wissenschaftlichen Forschung und Diskussion beteiligt und zu Konklusionen gelangt, in denen der Klimawandel als sehr gering eingeschätzt wird. Kritische Wissenschaftstheorie ist keine Handlangerin des Klimaskeptizismus. Darum sollte betont werden, dass wir dem Klimaskeptizismus nicht zustimmen. Unser Ziel ist es, zu verstehen, wie die Klimawissenschaften funktionieren, und über ihre Methoden zu reflektieren.

2 Definitionen von Klima und Klimawandel

Diskussionen über das Klima sind sowohl in den populären Medien als auch im akademischen Bereich allgegenwärtig. Dies verschleiert die Tatsache, dass „Klima“ ein komplexer Begriff ist und dass die Definitionen von Klima und Klimawandel Gegenstand wissenschaftlicher Kontroversen sind. Um ein Verständnis des Begriffs zu erlangen, ist es wichtig, ihn vom Begriff „Wetter“ zu unterscheiden. Intuitiv gesprochen ist das Wetter an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit der Zustand der Atmosphäre an diesem Ort zu dieser Zeit. Beispielsweise ist das Wetter in Berlin-Mitte am 1. Januar 2022 um 14:00 dadurch charakterisiert, dass die Temperatur 12 °C beträgt, die Luftfeuchtigkeit bei 65 % liegt etc. Im Gegensatz dazu liefert Klima eine summarische Aussage über Wetterbedingungen: Es ist eine Häufigkeitsverteilung bestimmter Variablen (die sog. Klimavariablen), welche sich aus einer bestimmten Konfiguration des Klimasystems ergibt. Zu den Klimavariablen zählen jene, die den Zustand der Atmosphäre und des Ozeans beschreiben, wie etwa die Temperatur oder die Niederschlagsmenge an einem gewissen Punkt der Erde. Manchmal inkludieren die Klimavariablen auch Variablen, welche den Zustand von Gletschern und Eisdecken beschreiben (IPCC 2021).

Die Frage ist, wie man diese intuitive Idee des Klimas präzisieren kann. In der aktuellen Diskussion findet man zwei generelle Ansätze. Beim ersten wird Klima als Häufigkeitsverteilung über eine Zeitspanne definiert, und beim zweiten wird Klima als Ensemble-Verteilung definiert.

Häufigkeitsverteilung über eine Zeitspanne. Der Wert der Klimavariablen hängt von externen Bedingungen ab, z. B. von der von der Sonne empfangenen Energie

und den Vulkanaktivitäten. Wir nehmen nun an, dass in einer gewissen Zeitspanne diese externen Bedingungen als konstant behandelt werden können, weil sie nur kleine Schwankungen um einen Mittelwert c aufweisen. Man kann Klima dann für diese Zeitspanne als Häufigkeitsverteilung der Klimavariablen während dieser Zeitspanne unter konstanten Bedingungen c definieren (Lorenz 1995). Unter Klimawandel versteht man dann die Tatsache, dass aufeinanderfolgende Zeitspannen durch verschiedene Häufigkeitsverteilungen charakterisiert werden. Allerdings sind die externen Bedingungen in der Realität nicht konstant. Und selbst wenn es in der Realität nur leichte Schwankungen um einen Mittelwert c gibt, kann es sein, dass die Häufigkeitsverteilung unter konstanten Bedingungen c sehr verschieden ist von der Häufigkeitsverteilung, die entsteht, wenn die externen Bedingungen denjenigen entsprechen, die in der Realität vorherrschen. Dies bedeutet, dass diese Definition von Klima Modellimmanent ist und *nicht* aktuelle Eigenschaften des Klimas abbildet. Aus diesem Grund ist diese Definition unbefriedigend (Werndl 2015).

Dieses Problem kann vermieden werden, wenn man Klima als *empirisch beobachtbare* Häufigkeitsverteilung über eine gewisse Zeitspanne definiert, wobei die externen Bedingungen variieren können. Das heißt, Klima ist hier definiert als die Häufigkeitsverteilung, die entsteht, wenn die externen Bedingungen der Realität entsprechen. Unter Klimawandel versteht man dann auch wieder, dass aufeinanderfolgende Zeitspannen durch verschiedene Verteilungen charakterisiert werden. Diese Definition ist populär, weil das Klima dann anhand von Beobachtungen berechnet werden kann, z. B. anhand von den Zeitreihen der letzten 30 Jahre (Hulme et al. 2009). Allerdings ist auch diese Definition nicht frei von Problemen. Ein Problem dieser Definition kann an einem Beispiel

illustriert werden: In der Mitte einer Zeitspanne wird die Erde von einem Meteoriten getroffen, wodurch sie zu einem viel kälteren Ort wird. Offensichtlich unterscheidet sich das Klima vor dem Einschlag von dem danach. Dieser Klimawandel kann aber durch diese Definition nicht eingefangen werden, da Klima als Häufigkeitsverteilung der tatsächlichen Werte der Klimavariablen über die Zeitspanne definiert wird und die Definition deshalb gegenüber plötzlichen radikalen Veränderungen blind ist.

Um dieses Problem zu umgehen, führte Werndl (2015) die Idee von Systemen mit variierenden externen Bedingungen ein und schlug vor, Klima als die Verteilung der Klimavariablen über die Zeit, die unter bestimmten Regimen von variierenden externen Bedingungen auftreten, zu definieren. Was genau als ein Regime von variierenden externen Bedingungen zählen soll, muss gut überlegt werden und ist eine nichttriviale Frage. Eine vernünftige Anforderung etwa scheint zu sein, dass die externen Bedingungen keinen zu starken konstanten Abwärts- oder Aufwärtstrend zeigen.

Ensemble-Verteilung. Ein Ensemble von Klimasystemen (nicht zu verwechseln mit einem Ensemble von Modellen, dem wir uns weiter unten zuwenden) ist eine Sammlung von virtuellen Kopien des Klimasystems. Nun betrachten wir das Sub-Ensemble mit denjenigen Kopien, in denen die Werte der Klimavariablen in einem bestimmten Intervall um die im aktuellen Klimasystem gemessenen Werte liegen (das sind die Werte, welche mit der Messgenauigkeit kompatibel sind). Zudem betrachten wir wieder eine Zeitspanne, während der die externen Bedingungen relativ stabil sind und nur kleine Schwankungen um einen Mittelwert c aufweisen. Das Klima eines zukünftigen Zeitpunktes t wird dann oft als die Häufigkeitsverteilung der Werte der Klimavariablen definiert, welche auftritt, wenn alle Systeme im Sub-Ensemble sich von jetzt bis t unter

konstanten externen Bedingungen c entwickeln (Lorenz 1995). Anders ausgedrückt: Das Klima in der Zukunft ist die Häufigkeitsverteilung der möglichen Werte der Klimavariablen, welche mit den aktuellen Beobachtungen unter der Annahme konstanter externer Bedingungen c konsistent sind. Allerdings sind die externen Bedingungen in der Realität nicht konstant. Selbst wenn es in der Realität nur kleine Schwankungen um einen Mittelwert c gibt, kann es sein, dass die Ensemble-Verteilung, die unter konstanten externen Bedingungen c entsteht, sehr verschieden ist von der Ensemble-Verteilung, die entsteht, wenn man die Entwicklung aller Systeme im Sub-Ensemble unter externen Bedingungen, die der Realität entsprechen, betrachtet (Werndl 2015). Das heißt, man hat hier wieder das Problem, dass diese Definition von Klima *nicht* aktuelle Eigenschaften des Klimas abbildet bzw. vorhersagt.

Um diesem Problem zu entgehen, liegt die Modifikation nahe, dass man die Entwicklung des Ensembles unter den externen Bedingungen studiert, die der Realität entsprechen. Das Klima zu einem zukünftigen Zeitpunkt t ist dann die Häufigkeitsverteilung der Klimavariablen, welche auftritt, wenn das Ensemble sich unter den tatsächlichen externen Bedingungen vorwärts zum Zeitpunkt t entwickelt (Daron und Steinforth 2013).

Diese Definition hat mehrere begriffliche Probleme. Erstens macht sie das Klima von unserem Wissen abhängig (durch Messgenauigkeit), was aber unseren Intuitionen widerspricht, denn wir verstehen Klima als etwas Objektives und unabhängig von unserem Wissen Existierendes. Zweitens ist die obige Definition eine Definition von *zukünftigem* Klima, und es ist schwer zu erkennen, wie das gegenwärtige oder vergangene Klima definiert werden soll. Ohne einen Begriff von gegenwärtigem und vergangenem Klima lässt sich jedoch Klimawandel nicht definieren. Ein

drittes Problem ist, dass man gerne eine Verbindung hätte zwischen dem Klima und Beobachtungsreihen von Klimavariablen, etwa den Beobachtungsreihen der Temperatur über ein paar Jahrzehnte oder den Beobachtungsreihen der Niederschlagsmengen über ein paar Jahrzehnte. Es kann jedoch gezeigt werden, dass Ensemble-Verteilungen nicht mit Beobachtungsreihen in Verbindung stehen und insbesondere auch das Klima nicht anhand von Beobachtungsreihen geschätzt oder berechnet werden kann (Werndl 2015). Dies widerspricht der gängigen Praxis, das Klima anhand vergangener Daten zu schätzen.

3 Klimamodelle

Ein Klimamodell ist eine Repräsentation von bestimmten Aspekten des Klimasystems (für eine Diskussion relevanter Repräsentationsbegriffe s. Frigg und Nguyen 2020 und für eine Diskussion von Modellen s. Frigg 2023). Eines der einfachsten Klimamodelle ist das Energiebilanz-Modell, welches die Erde als Linie mit eindimensionaler Atmosphäre betrachtet. Es basiert auf dem einfachen Prinzip, dass im Gleichgewichtszustand die einfallende und die ausfallende Energie gleich sein müssen. Dieses Modell kann durch eine Einteilung der Erde in Zonen (wobei der Energietransfer zwischen den Zonen erlaubt ist) oder durch eine Einführung eines Vertikalprofils der atmosphärischen Charakteristika verfeinert werden (für eine Diskussion solcher Modelle s. Dessler 2011, Kap. 3–6). Trotz ihrer Einfachheit liefern diese Modelle ein gutes qualitatives Verständnis des Treibhauseffektes.

Die modernen Klimawissenschaften zielen darauf ab, Modelle zu konstruieren, welche möglichst viel vom aktuellen Wissensstand integrieren (für eine Einführung in Klimamodellierung s. McGuffie und Henderson-Sellers

2005). Normalerweise geschieht dies durch Einteilung der Erde (Atmosphäre und Ozean) in Gitterzellen. Aktuelle Klimamodelle arbeiten mit einer horizontalen Gitterskala von etwa 100 km. Klimaprozesse können dann durch Flüsse zwischen diesen Zellen beschrieben werden, z. B. von Hitze oder Dampf von einer Zelle zur anderen. Diese Flüsse werden mathematisch durch Gleichungen beschrieben. Diese Gleichungen bilden den „dynamischen Kern“ eines sogenannten *Global Circulation Model* (GCM). Diese Gleichungen können normalerweise nicht analytisch gelöst werden, weshalb leistungsstarke Supercomputer verwendet werden, um sie numerisch zu integrieren. Aus diesem Grund werden sie oft als Simulationsmodelle bezeichnet. Um die Gleichungen numerisch lösen zu können, wird die Zeit diskretisiert. Auf Supercomputern dauert es Wochen oder Monate, um die Klimaentwicklung über ein Jahrhundert zu simulieren.

Um eine hypothetische Entwicklung des Klimasystems zu berechnen, benötigen wir auch *Anfangs- und Randbedingungen*. Die Ersteren sind mathematische Beschreibungen vom Zustand des Klimasystems zu Beginn der simulierten Periode. Die Letzteren sind Werte für alle Variablen, die das System betreffen, aber nicht direkt berechnet werden. Diese beinhalten z. B. die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt, die Konzentration von Aerosolen und die Menge der Sonneneinstrahlung auf der Erde. Weil dies Schlüsselfaktoren des Klimawandels sind, werden sie oft als *externe Faktoren* oder *externe Bedingungen* bezeichnet.

Wenn Prozesse auf einer kleineren Skala als dem Gitter auftreten, dann können sie im Modell durch sogenannte Parametrisierungen berücksichtigt werden, wobei das Nettoergebnis des Prozesses gesondert als eine Funktion

der Gittervariablen berechnet wird. Wolkenbildung beispielsweise ist ein physikalischer Prozess, der nicht direkt simuliert werden kann, weil Wolken typischerweise viel kleiner als eine Gitterzelle sind und das Wissen über Wolkenbildung begrenzt ist. Der Nettoeffekt von Wolken wird deswegen normalerweise in jeder Gitterzelle parametrisiert (als Funktion von Temperatur, Luftfeuchtigkeit etc.) und für die Berechnungen verwendet. Prozesse, die kleiner als eine Gitterzelle sind, sind eine der Hauptquellen für die Unsicherheit in Klimamodellen. Es gibt zurzeit mehrere Klimamodelle, welche kontinuierlich von nationalen Modellierungszentren wie der NASA, dem britischen Met Office und dem Beijing Climate Center weiterentwickelt werden. Die genaue Anzahl ändert sich immer wieder. Im Januar 2022 wurden im Webportal des *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) 69 Modelle von 31 verschiedenen Gruppen aufgeführt, wobei nicht alle dieser Modelle unabhängig voneinander sind, da Institutionen Algorithmen und Modellannahmen teilen. Um die Ergebnisse dieser unterschiedlichen Modelle zu vergleichen, hat das CMIP eine Reihe von Standardexperimenten definiert, die von jedem Klimamodell durchlaufen werden. Eines der Standardexperimente ist, jedes Modell unter Verwendung der Faktoren, die während des 20. Jahrhunderts vorherrschend waren, laufen zu lassen. Dies erlaubt einen direkten Vergleich der Simulation mit den wirklichen Klimadaten. Klimamodelle werden an vielen Stellen in den Klimawissenschaften verwendet und ihre Verwendung wirft wichtige Fragen auf. Diese Fragen besprechen wir in den nächsten Abschnitten.

4 Nachweis und Zuschreibung von Klimawandel

Jede empirische Studie des Klimas beginnt mit der Beobachtung des Klimas. Meteorologische Beobachtungen messen allerlei Variablen wie z. B. die Lufttemperatur nahe der Erdoberfläche unter Verwendung von Thermometern. Jedoch wurden mehr oder weniger systematische Beobachtungen erst seit ca. 1750 gemacht. Um das Klima davor zu rekonstruieren, müssen Wissenschaftler/innen sich auf sogenannte *Klimaproxy*s verlassen. Dies sind Daten für Klimavariablen, welche aus anderen natürlichen Phänomenen wie z. B. Baumringen, Eisbohrkernen und Ozeansedimenten abgeleitet werden. Obwohl es aufgrund der begrenzten Daten und Methoden tatsächlich eine Vielfalt an möglichen Temperaturkurven gibt, unterstützen diese Studien den Konsens, dass die Temperaturen während des späten 20. Jahrhunderts sehr wahrscheinlich die wärmsten der letzten 1400 Jahre sind (Frank et al. 2010).

Zeigen steigende Temperaturen an, dass es einen Klimawandel gibt, und falls ja, kann der Klimawandel menschlichen Handlungen zugeschrieben werden? Diese beiden Probleme sind als *Nachweis* und *Zuschreibung* bekannt. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definiert diese folgendermaßen:

„Ein Nachweis des Klimawandels ist definiert als eine Demonstration, dass sich das Klima oder ein anderes, vom Klima beeinflusstes System in einem statistisch beschreibbaren Sinn verändert hat, ohne einen Grund für diese Veränderung anzugeben. Eine bestimmte Veränderung wird als in Beobachtungen nachgewiesen betrachtet, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass die Veränderung durch Zufall oder aufgrund der internen Variabilität aufgetreten ist,

als klein eingestuft werden kann.“ [...] Zuschreibung ist definiert als „der Prozess der Evaluation der relativen Beiträge verschiedener kausaler Faktoren zu einer bestimmten Veränderung oder einem Ereignis, wobei eine statistische Konfidenz anzugeben ist“. (IPCC 2013, S. 872; Übersetzung der Autor/innen)

Diese Definitionen werfen mehrere Probleme auf. Die Wurzel der Probleme ist die Aussage, dass Klimawandel nur dann nachgewiesen worden ist, wenn eine beobachtete Veränderung im Klima sehr wahrscheinlich nicht aufgrund von interner Variabilität erfolgt ist. *Interne Variabilität* ist das Phänomen, dass Klimavariablen wie Temperatur und Niederschlag sich aufgrund von internen Dynamiken des Klimasystems über die Zeit verändern: Es würde wärmere und kältere Jahrzehnte und Jahrhunderte gegeben, auch wenn es überhaupt keine Menschen gäbe.

Diese Definition von Nachweis hat die Konsequenz, dass es keinen internen Klimawandel geben kann. Die Eiszeiten beispielsweise würden nicht als Klimawandel gelten, wenn sie aufgrund von interner Variabilität entstanden wären. Dies widerspricht nicht nur grundsätzlichen Intuitionen über das Klima und den gängigsten Definitionen von Klima als einer endlichen Verteilung über eine relativ kurze Zeitspanne (wo interner Klimawandel möglich ist); es führt auch zu Problemen in Hinblick auf Zuschreibung: Wenn nachgewiesener Klimawandel *per definitionem* nicht von interner Variabilität herrührt, dann ist es von Beginn an ausgeschlossen, dass bestimmte Faktoren (nämlich interne Klimadynamiken) zur Veränderung des Klimas führen können.

Im Fall der Eiszeiten würden wohl viele betonen, dass interne Variabilität zu unterscheiden ist von natürlicher Variabilität. Weil die Orbitalbewegung die Eiszeiten erklärt und etwas Natürliches, aber Externes ist, ist dies

ein Fall von externem Klimawandel. Dadurch werden zwar einige Probleme gelöst, aber das Problem, dass es keinen allgemein akzeptierten Weg gibt, wie man interne von externen Faktoren unterscheidet, bleibt bestehen. Derselbe Faktor wird manchmal als intern und manchmal als extern klassifiziert. Vergletscherung beispielsweise wird manchmal als interner und manchmal als externer Faktor behandelt. Ebenso wird die Biosphäre manchmal als externer Faktor behandelt, manchmal jedoch auch intern modelliert. Man könnte sogar so weit gehen, zu fragen, ob menschliche Handlungen ein externer Faktor für das Klimasystem sind. Studien behandeln menschliche Handlungen zwar normalerweise als externe Faktoren, aber es könnte konsistent dafür argumentiert werden, dass sie ein interner dynamischer Prozess sind. Die angemessene Definition hängt schlicht und einfach davon ab, für welche Fragen man sich interessiert (für eine weitere Diskussion dieser Themen, s. Katzav und Parker 2018).

Die Effekte der internen Variabilität sind auf allen Zeitskalen gegenwärtig: von Schwankungen, die kürzer als einen Tag dauern und als Wetter diskutiert werden, bis hin zu langfristigen Veränderungen aufgrund der Zyklen der Vergletscherung. Da interne Variabilität das Ergebnis der Dynamik eines hochkomplexen nichtlinearen Systems ist, ist es auch unwahrscheinlich, dass die statistischen Eigenschaften von interner Variabilität über die Zeit hinweg konstant sind. Aktuelle Klimamodelle zeigen sowohl in der Größe der internen Variabilität als auch was die Zeitskala von Veränderungen betrifft signifikante Unterschiede. Schätzungen der internen Variabilität im Klimasystem werden von Klimamodellen selbst produziert (Hegerl et al. 2010), was zu einer möglichen Zirkularität führt. Dies unterstreicht die Schwierigkeiten von Aussagen bezüglich Zuschreibungen, die sich auf die obige Definition stützen, welche einen beobachteten Klimawandel nur dann

anerkennt, wenn er sehr wahrscheinlich nicht auf interner Variabilität basiert.

Weil die Definitionen des IPCC von vielen Klimawissenschaftler/innen verwendet werden, wird die weitere Diskussion auf diesen Definitionen basieren. Der Nachweis des Klimawandels stützt sich auf statistische Tests. Studien zum Nachweis betreffen oft die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses oder einer Abfolge von Ereignissen, welche man in Abwesenheit von Klimawandel vorfinden würde. In der Praxis ist es eine Herausforderung, eine angemessene Nullhypothese (das erwartete Verhalten des Systems in Abwesenheit von sich verändernden externen Faktoren) zu definieren, mit welchen dann die Beobachtungen verglichen werden können. Dies stellt keine triviale Aufgabe dar, da das Klimasystem ein dynamisches System mit nichtlinearen Prozessen und Feedbacks ist, welche auf allen Skalen aktiv sind. Die Wichtigkeit der Nullhypothese wird durch die Studie von Cohn und Lins (2005) illustriert, welche dieselben Daten mit verschiedenen Nullhypothesen vergleichen. Die Ergebnisse unterscheiden sich in ihrer Signifikanz in 25 Größenordnungen. Dies zeigt nicht, dass nur gewisse Nullhypothesen angemessen sind, aber es veranschaulicht die Sensibilität des Resultats in Bezug auf die gewählte Nullhypothese. Dies wiederum unterstreicht, wie wichtig die Wahl der Nullhypothese ist und wie schwierig es ist, eine derartige Wahl zu treffen, wenn die zugrundeliegenden Prozesse nur schlecht verstanden werden.

In der Praxis wird die beste verfügbare Nullhypothese oft vom besten verfügbaren Modell abgeleitet. Dieses Modell wird verwendet, um Kontrolldurchläufe durchzuführen: Unter konstanten externen Bedingungen wird dabei die interne Variabilität des Modells abgeschätzt. Klimawandel wird dann als nachgewiesen betrachtet, wenn die beobachteten Werte außerhalb eines im Vorhinein

festgelegten Bereichs der internen Variabilität des Modells fallen. Die Schwierigkeit bei dieser Methode ist, dass es nicht ein einziges „bestes“ Modell zur Auswahl gibt: Viele solche Modelle existieren, die in vielerlei Hinsicht ähnlich gut sind, aber sie können, wie oben schon erwähnt, zu sehr unterschiedlicher interner Variabilität führen.

Die Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen sind für die eindeutigsten Resultate, wie etwa die aktuelle Steigerung der globalen Durchschnittstemperatur, relativ unwichtig. Hier ist, wie von Parker (2010) betont wurde, der Nachweis über verschiedene Modelle hinweg robust (in Abschn. 6 wird Robustheit näher behandelt werden), und es gibt eine Vielfalt an Evidenz dafür, dass sich die globale Durchschnittstemperatur erhöht hat. Die Frage, welche Nullhypothese man verwendet und wie interne Variabilität quantifiziert wird, kann dennoch wichtig für den Nachweis von kleineren und lokalen Klimaveränderungen sein.

Wenn Klimawandel nachgewiesen worden ist, dann stellt sich die Frage der Zuschreibung. Dies kann eine Zuschreibung entweder einer direkten Klimaveränderung (wie etwa einer erhöhten globalen Durchschnittstemperatur) oder einer Auswirkung einer Klimaveränderung (wie z. B. der von Waldbränden vernichteten Fläche) zu einer identifizierten Ursache (wie z. B. einem erhöhten CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre) sein. Wo eine indirekte Einwirkung betrachtet wird, ist ein zwei- oder mehrstufiger Ansatz möglicherweise angemessen, welcher zuerst eine direkte Klimaveränderung ausfindig macht und dann im zweiten Schritt die indirekte Klimaveränderung als deren Konsequenz zuschreibt. Ein Beispiel dafür, welches dem IPCC *Good-Practise-Guidance*-Artikel (Hegerl et al. 2010) entnommen ist, ist die Zuschreibung der Auswirkung von Verkalkungen der Korallenriffe auf den CO_2 -Gehalt. In dieser Zuschreibung wird eine Zwischenstufe

verwendet: Zuerst werden die Veränderungen der Kohlenstoff-Eisen-Konzentration der Erhöhung des CO_2 -Gehalts und dann die Verkalkungen den Veränderungen in der Kohlenstoff-Eisen-Konzentration zugeschrieben. Dies zeigt die Notwendigkeit eines klaren Verständnisses der beteiligten physikalischen Mechanismen auf, um eine verlässliche Zuschreibung durchführen zu können.

Statistische Analysen messen die Stärke der Beziehung unter den vereinfachenden Annahmen, welche dem Verfahren der Zuschreibung zugrunde liegen; aber der Konfidenzgrad in diese vereinfachenden Annahmen muss außerhalb des Rahmens bewertet werden. Dieser Konfidenzgrad ist vom IPCC in diskrete (aber subjektive) Kategorien standardisiert worden: fast sicher (>99 %), extrem wahrscheinlich (>95 %), sehr wahrscheinlich (>90 %), etc. Das Ziel ist, die begrenzte Datenverfügbarkeit, die Adäquatheit des verwendeten Modells und die Präsenz von verzerrenden Faktoren zu berücksichtigen. Die Schlussfolgerungen werden dann entsprechend qualifiziert. Ein Beispiel ist die folgende Aussage:

„Es ist *wahrscheinlich*, dass gut gemischte Treibhausgase eine Erwärmung von 1,0 °C bis 2,0 °C beigetragen haben, andere menschliche Faktoren (primär Aerosole) haben eine Kühlung von 0,0 °C bis 0,8 °C beigetragen, natürliche Faktoren haben die globale Temperatur auf der Erdoberfläche um -0,1 °C bis +0,1 °C verändert und interne Variabilität um -0,2 °C bis +0,2 °C.“ (IPCC 2021, SPM A.1.3; Übersetzung der Autor/innen)

Der sogenannte *optimale Fingerabdruck* ist eine Methode, um ein solches Resultat zu erreichen. Diese Methode assoziiert mit jedem potenziellen Schlüsselfaktor (z. B. Treibhausgasen oder der Veränderung der Sonneneinstrahlung)

ein raumzeitliches Muster von Veränderung (Fingerabdruck), normalisiert relativ zur internen Variabilität. Dieses Muster wird mit einem Klimamodell berechnet. Danach wird eine statistische Regression der beobachteten Daten im Hinblick auf lineare Kombination dieser Muster durchgeführt. Die restliche Variabilität, nachdem die Beobachtungen dem jeweiligen Faktor zugeschrieben wurden, sollte mit der internen Variabilität konsistent sein; wenn nicht, dann deutet dies darauf hin, dass eine wichtige Ursache für Variabilität nicht berücksichtigt wurde.

Wie von Parker (2010) betont wurde, beruhen Fingerabdruck-Studien auf mehreren Annahmen. Die erste ist Linearität, d. h., dass die Reaktion des Klimasystems, wenn mehrere Faktoren gegenwärtig sind, gleich der linearen Kombination dieser Faktoren ist. Da das Klimasystem nichtlinear ist, ist dies offensichtlich eine Quelle methodologischer Schwierigkeiten, obwohl für Prozesse auf globaler Ebene (im Gegensatz zu Prozessen auf regionaler Ebene) gezeigt wurde, dass die Additivität eine gute Annäherung ist. Eine andere Annahme ist, dass Klimamodelle die kausalen Prozesse, welche im Klimasystem der Erde auftreten, genau genug simulieren. Der Erfolg von Fingerabdruck-Studien kann dabei helfen, Bedenken über diese Annahmen zu entkräften, wie Parker auch argumentiert. Ein weiteres Problem ist einmal mehr die Notwendigkeit, die Charakteristiken von interner Variabilität zu definieren. Wie schon besprochen, wird in der Praxis interne Variabilität mit Hilfe der besten Klimamodelle abgeschätzt, was die Problematik der Zirkularität aufwirft.

In Aussagen über Zuschreibung ist der Konfidenzgrad in erster Linie vom physikalischen Verständnis der involvierten Prozesse abhängig. Wo es einen klaren, einfachen und wohlverstandenen Mechanismus gibt, sollte es größeres Vertrauen in die statistischen Ergebnisse geben;

wo die Mechanismen unzusammenhängend oder mehrstufig sind oder wo ein komplexes Modell als Bindungsmitglied verwendet wird, ist das Vertrauen dementsprechend niedriger. In einem Artikel zur Good Practice Guidance warnen die IPCC-Autoren:

„Wo Modelle in der Zuschreibung verwendet werden, da sollte die Fähigkeit des Modells, kausale Zusammenhänge realistisch zu repräsentieren, beurteilt werden. Das sollte eine Beurteilung verzerrender Tendenzen sowie der Fähigkeit des Modells, die relevanten Prozesse auf den relevanten Skalen darzustellen, beinhalten.“ (Hegerl 2010, S. 5; Übersetzung der Autor/innen)

Ebenso gibt es ein größeres Vertrauen in die Resultate von Zuschreibungen, wenn die Resultate robust sind und eine Vielfalt an Evidenz vorliegt, wie Parker (2010) argumentiert. Beispielsweise hat sich die Erkenntnis, dass der Temperaturanstieg gegen Ende des 20. Jahrhunderts hauptsächlich von Treibhausgasen verursacht worden ist, als robust bei einer großen Auswahl an Modellen, verschiedenen Analysetechniken und unterschiedlichen Faktoren herausgestellt, und es gibt eine Vielfalt an Evidenz, welche diese Behauptung stützt. Dadurch ist unser Vertrauen hoch, dass Treibhausgase die globale Erwärmung erklären.

Es gibt eine interessante Frage in Hinblick auf den Status von Methoden der Zuschreibung wie der Fingerabdruck-Methode. Der Treibhauseffekt ist gut dokumentiert und in Laborexperimenten einfach zu beobachten. Manche argumentieren, dass dies ein gutes qualitatives Verständnis des Klimasystems liefert, was ausreicht, um mit Zuversicht zu behaupten, dass die globale Erwärmung real ist und dass menschlich bedingtes CO₂ als Ursache für den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur identifiziert

worden ist (Betz 2013). Dann würden statistische Debatten über Methoden der Zuschreibung, welche zeigen, dass vom Menschen verursachte CO₂-Emissionen die globale Erwärmung verursachen, nicht mehr unbedingt benötigt. Diese Argumentationslinie wird aber nicht von allen akzeptiert, und es wird argumentiert, dass Modelle bei der Zuschreibung der Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur durch menschlich bedingte CO₂-Emissionen essenziell sind (Winsberg 2018).

5 Bestätigung und Vorhersage

Zwei Fragen stehen in Verbindung mit Klimamodellen im Vordergrund: Wie werden Modelle bestätigt und was ist ihre Vorhersagekraft? Bestätigung betrifft die Frage, ob und in welchem Ausmaß ein bestimmtes Modell von den Daten bestätigt wird. Lloyd (2009) argumentiert, dass viele Klimamodelle von Daten über die Vergangenheit bestätigt werden. Parker widerspricht dieser Behauptung. Sie argumentiert, dass die Annahme, dass Klimamodelle an sich bestätigt werden können, nicht ernsthaft in Erwägung gezogen werden kann, weil alle Klimamodelle falsch und empirisch nicht adäquat sind. Parker (2009) spricht sich für ein Umdenken von Bestätigung zu *Adäquatheit für einen Zweck* aus: Hypothesen von Klimamodellen können nur für bestimmte Zwecke bestätigt werden. Beispielsweise könnte man behaupten, dass ein gewisses Klimamodell die globale Temperatur bis 2100 bis maximal auf einen Fehler von 0,5 Grad adäquat vorher sagt. Zur gleichen Zeit könnte man jedoch meinen, dass den Vorhersagen des globalen Niederschlagsmittelwerts bis 2100 durch das gleiche Modell nicht getraut werden kann.

Katzav (2014) warnt, dass der Begriff der Adäquatheit für einen Zweck nur begrenzt nützlich ist. Er

argumentiert, dass normalerweise nicht bewertet werden kann, ob ein Modell adäquat für einen Zweck ist, weil es höchst unklar ist, welche der beobachtbaren Folgerungen des Modells zeigen könnten, dass das Modell angemessen für einen Zweck ist. Stattdessen behauptet er, dass Klimamodelle bestenfalls über mögliche Zukunftsszenarien Auskunft geben können. Katzav betont zu Recht, dass Abschätzungen, ob Modelle adäquat für einen Zweck sind, schwieriger sind, als sie auf den ersten Blick erscheinen. Aber die Methode der Adäquatheit für einen Zweck sollte nicht als Ganzes verworfen werden; tatsächlich wird sie erfolgreich in verschiedenen Wissenschaften verwendet (z. B. wenn bestätigt wird, dass ideale Gasmodelle nützlich für bestimmte Zwecke sind). Ob Bewertungen der Adäquatheit für einen Zweck möglich sind oder nicht, hängt vom vorliegenden Fall ab.

Ein weiteres Problem betrifft die Verwendung von Daten bei der Konstruktion von Modellen. Die Werte der Parameter von Modellen werden oft aufgrund von Beobachtungen bestimmt, ein Prozess, der als Schätzung bekannt ist. Beispielsweise wird das Ausmaß der Aerosol-effekte oft mithilfe von Daten geschätzt. Wenn die Daten zur Schätzung verwendet worden sind, stellt sich die Frage, ob die *gleichen Daten nochmal für die Bestätigung des Modells verwendet* werden können. Wenn Daten für die Bestätigung verwendet werden, welche nicht bereits zur Schätzung verwendet worden sind, sind sie neuwertig. Wenn Daten sowohl für die Bestätigung als auch die Schätzung verwendet werden, wird dies als „double-counting“ bezeichnet.

Wissenschaftler/innen und Philosoph/innen argumentierten gleichermaßen, dass „double-counting“ nicht legitim ist und dass die Daten neuwertig sein müssen, um bestätigen zu können (Lloyd 2010; Shackley et al. 1998; Worrall 2010; Frisch 2015). Steele und Werndl (2013) wider-

sprechen dieser Schlussfolgerung und argumentieren dafür, dass zumindest im Bayesianischen Rahmenwerk double-counting legitim ist. Des Weiteren behaupten Steele und Werndl (2016), dass die klassische *Model Selection Theory* ein nuancierteres Bild der Verwendung von Daten anbietet als die allgemein diskutierten Positionen. Hier gibt es zwei Möglichkeiten. Erstens gibt es Methoden wie das Kreuzvalidierungsverfahren, bei welchen die Daten neuwertig sein müssen. Für das Kreuzvalidierungsverfahren werden die Daten in zwei Gruppen aufgeteilt: Die erste Gruppe wird für die Schätzung verwendet, die zweite zur Bestätigung. Obwohl die Daten zur Bestätigung neuwertig sein müssen, findet double-counting statt, da alle Daten letztendlich neben der Bestätigung auch für die Schätzung verwendet werden. Zweitens gibt es Methoden wie das Akaike-Informationskriterium, für welches die Daten nicht neuartig sein müssen und wo ebenfalls double-counting stattfindet.

Dies bringt uns zum zweiten Punkt: *Vorhersage*. Im Kontext des Klimas wird typischerweise von Prognosen gesprochen. „Prognose“ ist in der Klimamodell-Literatur ein technischer Ausdruck und bezeichnet eine Vorhersage, welche von einem bestimmten Strahlungsantrieb-Szenario abhängt. Das Strahlungsantrieb-Szenario wird entweder durch die Menge an Treibhausgasemissionen und Aerosolen bestimmt, welche der Atmosphäre zugeführt werden, oder direkt durch ihre Konzentration in der Atmosphäre (s. Werndl [2018] für eine eingehende Diskussion von Prognosen).

Modelle können unterschiedlich verwendet werden. Insbesondere können aus Simulationsresultaten entweder physikalische Einsichten in das System gewonnen oder aus diesen Prognosen zum zukünftigen Klima abgeleitet werden (s. Held 2005 für eine Erörterung dieses Vergleichs). Ein großer Teil der Forschung heutzutage konzentriert sich auf Prognosen über die tatsäch-

liche zukünftige Evolution des Klimasystems, auf Basis derer dann politische Entscheidungen getroffen werden sollen. In diesen Fällen ist es notwendig zu verstehen und zu quantifizieren, wie gut diese Prognosen voraussichtlich sein werden.

Es ist zweifelhaft, ob dies mit herkömmlichen Methoden bewerkstelligt werden kann. Eine solche Methode wäre etwa, sich auf die Bestätigung eines Modells gegenüber historischen Daten zu beziehen und zu argumentieren, dass die Fähigkeit eines Modells, historische Daten erfolgreich zu reproduzieren, uns Zuversicht geben sollte, dass auch die Vorhersagen in der Zukunft richtig sein werden. Das Problem ist, dass Klimaprognosen einen Bereich außerhalb eines bereits erfahrenen Strahlungsantrieb-Szenarios betreffen, und zumindest *prima facie* gibt es keinen Grund anzunehmen, dass Erfolg in niedrigen Strahlungsantrieb-Kontexten zu Erfolg in hohen Strahlungsantrieb-Kontexten führen wird; beispielsweise könnte ein Modell, dessen Parameter geschätzt wurden durch Daten einer Welt, in der die Arktische See von Eis bedeckt ist, ihren Zweck nicht mehr erfüllen, wenn das Eis komplett geschmolzen ist und die relevanten dynamischen Prozesse anders sind. Aus diesem Grund haben Schätzungen mit vergangenen Daten bestenfalls begrenzte Relevanz für den erwarteten Erfolg der Vorhersagen eines Modells (Oreskes et al. 1994; Stainforth et al. 2007a, 2007b; Steele und Werndl 2013).

Diese Beobachtung unterstreicht, dass es keinen Konsens über die Frage der Vertrauenswürdigkeit von Modellergebnissen gibt. Es herrscht jedoch Einigkeit darüber, dass Vorhersagen für Durchschnitte von großen Zeitintervallen, für größere räumliche Durchschnitte, für niedrige Spezifität und bei Vorhandensein von gutem physikalischem Verständnis besser sind; bei sonst gleichen Bedingungen sind Ereignisse in näherer Zukunft leichter vorherzusagen als Ereignisse in der fernen Zukunft. Weiter

werden die Trends der globalen Durchschnittstemperatur als vertrauenswürdig erachtet, und es wird allgemein akzeptiert, dass die Durchschnittstemperatur weiter steigen wird (Oreskes 2007). Die IPCC-Reports (IPCC 2021, Summary for Policymakers; IPCC 2013, Summary for Policymakers) postulieren etwa, dass modellierte Muster und Trends der Oberflächentemperatur, auf einen globalen und kontinentalen Maßstab bezogen, vertrauenswürdig sind.

Ein schwierigeres Problem betrifft die Verwendung von Modellen, um detaillierte Informationen über das *lokale* zukünftige Klima zu erlangen. Beispielsweise hat das UKCP09-Projekt das Ziel, hochauflösende, wahr-scheinlichkeitstheoretische Vorhersagen des Klimas bis zum Jahr 2100 zu treffen (ein Ziel, welches auch das Nachfolgeproject, UKCP18, teilt). Diese basieren auf dem globalen Klimamodell HadCM3, welches am UK Met Office Hadley Centre entwickelt wurde. Die Wahr-scheinlichkeiten werden für Ereignisse auf einem 25-km-Gitter angegeben. Spezifische Ereignisse wie z. B. die Temperaturveränderungen des wärmsten Tages im Sommer, Änderungen des Niederschlags am nassesten Tag im Winter oder die Veränderung der durchschnittlichen Wolkenmenge im Sommer werden mit Prognosen angegeben, welche in sich überschneidende Segmente von 30 Jahren eingeteilt sind, die bis zum Jahr 2100 reichen. Es ist beispielsweise prognostiziert, dass die Wahrscheinlichkeit (für ein mittleres Emissionsszenario) für eine 20- bis 30%ige Reduktion des durchschnittlichen Niederschlags im Zentrum von London im Jahr 2080 bei 0,5 liegt.

Die Vertrauenswürdigkeit von solchen Prognosen und deren Relevanz für die Politik wurde angefochten. Ein Modell hat einen strukturellen Modellfehler, wenn die Dynamik des Modells sich von der Dynamik des

Zielsystems unterscheidet. Frigg et al. (2014a) weisen darauf hin, dass jeder strukturelle Modellfehler möglicherweise dazu führt, dass entscheidungsrelevanten Vorhersagen nicht getraut werden kann. Ferner gibt es wenig Grund anzunehmen, dass die Nachbearbeitung von Modellergebnissen die Konsequenzen solcher Fehler korrigieren kann (Frigg et al. 2014b, 2015a). Dies wirft Zweifel auf in Hinblick auf die Fähigkeit, zum jetzigen Zeitpunkt vertrauenswürdige hochauflösende Prognosen bis ans Ende des Jahrhunderts zu treffen. Die entscheidende Frage für die Forschung wäre, die Zeitskalen, in denen solche Prognosen wahrscheinlich verlässlich sind, zu bestimmen und außerhalb dieser Zeitskalen den Effekt der Inadäquatheit des Modells abzuschätzen. Wo liegt die Grenze zwischen vertrauenswürdigen und nichtvertrauenswürdigen Prognosen? Das heißt, wo zwischen globalen Temperaturtrends und präzisen Prognosen auf einem 25-km-Gitter endet die Vertrauenswürdigkeit? Das ist eine entscheidende – und für die Politik enorm wichtige – Frage in der Philosophie der Klimawissenschaften, und sie ist bisher nicht gelöst. Die Schlussfolgerungen von Frigg et al. (2014a) werden von Winsberg und Goodwin (2016) bestritten. Sie argumentieren, dass hier die Beschränkungen durch Modellfehler überbewertet werden. Eine Replik findet sich in Frigg und Smith (2022).

6 Verstehen und Quantifizieren von Unsicherheit

Unsicherheit – ein prominentes Thema in vielen Diskussionen über die Klimawissenschaften – ist ein schlecht verstandener Begriff, der viele komplizierte Fragen aufwirft. Im Allgemeinen wird unter Unsicherheit ein Mangel an Wissen verstanden. Die erste Herausforderung ist, genauer

zu beschreiben, was mit „Unsicherheit“ gemeint ist und was die Quellen der Unsicherheit sind. Es wurden dahingehend bereits einige Vorschläge gemacht, die Diskussion ist aber immer noch in einer „vor-paradigmatischen“ Phase. Smith und Stern (2011) identifizieren vier relevante Arten von Unsicherheit: Ungenauigkeit, Mehrdeutigkeit, Nicht-Analysierbarkeit und Unbestimmtheit. Spiegelhalter und Riesch (2011) betrachten eine fünfstufige Struktur mit drei Binnen-Modell-Stufen – Ereignis-, Parameter- und Modell-Unsicherheit – und zwei Extra-Modell-Stufen, welche bekannte und unbekannt Unzulänglichkeiten im Modellierungsprozess betreffen. Wilby und Dessai (2010) diskutieren das Thema mit Bezug auf sogenannte Kaskaden der Unsicherheit: Sie studieren, wie sich Unsicherheiten vergrößern, wenn man von Annahmen über zukünftige Treibhausgasemissionen Konsequenzen für lokale Klimaanpassungen ableitet. Petersen (2012) stellt eine Unsicherheits-Matrix vor, in welcher er die Quellen von Unsicherheit in vertikaler und die Arten von Unsicherheit in horizontaler Richtung auflistet. Lahsen (2005) betrachtet das Thema aus dem Blickwinkel der Wissenschaftsforschung und diskutiert die Verteilung von Unsicherheit als eine Funktion der Distanzen vom Ort der Wissensproduktion. Dies sind nur einige von vielen zurzeit verfügbaren Vorschlägen.

Das nächste Problem ist die Messung und Quantifizierung von Unsicherheit bezüglich Klimavorhersagen. Bei den für diese Herausforderung entwickelten Ansätzen spielen Modell-Ensembles eine zentrale Rolle. Aktuelle Berechnungen der Klimasensitivität und des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur unter verschiedenen Emissionsszenarien beispielsweise werden von aus Klimamodellen bestehenden Ensembles abgeleitet. Der Grund, Ensembles zu verwenden, ist die anerkannte Unsicherheit in individuellen Modellen, welche sowohl die Anfangs-

bedingungen, die Parameter des Modells, als auch die Modellstruktur betrifft. Es ist eine allgemein übliche Annahme, dass Ensembles dabei helfen, die Effekte dieser Unsicherheiten zu mindern, entweder durch „robuste“ Vorhersagen oder durch das Bereitstellen von numerischen Abschätzungen der Unsicherheit (für eine Diskussion von Modell-Ensembles s. Parker 2013).

Bevor wir die epistemische Funktion von Ensembles diskutieren, müssen wir zwischen zwei Typen von Ensembles unterscheiden. Wie oben bereits erwähnt, enthalten Klimamodelle eine Vielzahl an Parametern. Manche repräsentieren physikalische Größen wie z. B. die Viskosität des Wassers, während andere „effektive Zusammenfassungen“ von Prozessen sind, welche kleiner als das Gitter sind (wie z. B. die Wolkenbedeckung). Ein *Perturbed Parameter Ensemble* (PPE) untersucht durch mehrmaligen Durchlauf des Modells, wie sensibel die Ergebnisse eines Modells von den Parametern abhängen. Dabei werden bei jedem Durchlauf andere Werte für die Parameter verwendet. Dadurch erforscht das Ensemble den Einfluss parametrischer Unsicherheit auf Vorhersagen; d. h. es bietet eine Sensibilitätsanalyse in Hinblick auf die gewählten Parameter. Im Gegensatz dazu besteht ein Multi-Modell-Ensemble aus mehreren verschiedenen Modellen – d. h. Modelle, welche sich nicht nur in den Werten der Parameter, sondern auch in der mathematischen Struktur und dem physikalischen Gehalt unterscheiden. Solche Ensembles werden verwendet, um zu untersuchen, wie Vorhersagen von relevanten Klimavariablen von Unsicherheit bezüglich der Modellstruktur beeinflusst werden.

Ein Resultat ist robust, wenn alle (oder die meisten) Modelle im Ensemble das gleiche Ergebnis aufweisen (für eine allgemeine Diskussion der Analyse von Robustheit s. Weisberg 2006 und Harris und Frigg 2022a, 2022b).

Wenn beispielsweise alle Modelle in einem Ensemble bei einem bestimmten Emissionsszenario mehr als 4 °C Erwärmung (der globalen Durchschnittstemperatur) bis zum Ende des Jahrhunderts vorhersagen, dann ist dieses Resultat bezüglich des Ensembles robust. Rechtfertigt Robustheit größere Zuversicht? Lloyd (2010, 2015) argumentiert, dass Robustheitsargumente in Verbindung mit Klimamodellen sehr stark sind und zumindest Kernaussagen, wie jener, dass die globale Erwärmung im 20. Jahrhunderts real ist, Glaubwürdigkeit verleihen. Im Gegensatz dazu ist Parkers Schlussfolgerung nüchtern:

„Wenn die heutigen Klimamodelle darin übereinstimmen, dass eine interessante Hypothese über zukünftige Klimaänderungen wahr ist, kann daraus nicht gefolgert werden ..., dass die Hypothese wahrscheinlich wahr ist, dass die Zuversicht der Wissenschaftler in die Hypothese zunehmen sollte oder dass die Behauptung, dass es Evidenz für die Hypothese gibt, sicherer ist.“ (2011, S. 579; Übersetzung der Autor/innen)

Eines der Hauptprobleme ist, dass die heutigen Modelle sich die gleichen Annahmen bezüglich des Klimasystems teilen und die gleichen, in der Rechnerarchitektur begründeten technologischen Begrenzungen haben. Und aus diesem Grund teilen sie sich zwangsläufig auch einige gemeinsame Fehler. Tatsächlich wurden solche gemeinsame Fehler umfassend diskutiert (z. B. Knutti et al. 2010) und mehrere Studien haben einen Mangel an Unabhängigkeit von Modellen aufgezeigt (Bishop und Abramowitz 2013; Jun et al. 2008). Wenn Modelle aber nicht unabhängig voneinander sind, dann ist unklar, ob Übereinstimmung zwischen ihnen epistemisches Gewicht hat.

Wenn Ensembles nicht zu robusten Vorhersagen führen, dann wird die Bandbreite an Resultaten innerhalb des

Ensembles oft zur quantitativen Abschätzung der Unsicherheit des Ergebnisses verwendet. Es gibt diesbezüglich hauptsächlich zwei Ansätze. Der erste Ansatz beruht darauf, das Histogramm der Modellresultate direkt in eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu übersetzen. Das Leitprinzip hier ist, dass die Wahrscheinlichkeit eines Ergebnisses proportional zu der Anzahl an Modellen im Ensemble ist, die zu diesem Ereignis führen. Der Gedanke, welcher dieser Methode zugrunde liegt, scheint zu sein, dass man Modelle als austauschbare Informationsquellen behandeln kann (und deshalb auch, dass es keinen Grund gibt, einem Ensemblemitglied mehr zu trauen als einem anderen) und dies deshalb zu einer Art von Häufigkeitsinterpretation bezüglich der Wahrscheinlichkeiten führt. Wie aber oben angesprochen wurde, ist die Annahme, dass Modelle unabhängig sind, aus mehreren Gründen problematisch. Darüber hinaus gibt es ein weiteres Problem: Auch die Modelle der besten zurzeit verfügbaren Ensembles wie z. B. CMIP5 sind nicht dazu entworfen worden, um systematisch alle Möglichkeiten zu untersuchen, und es ist daher vorstellbar, dass es große Klassen von Modellen gibt, welche völlig andersartige Resultate produzieren würden. Solange kein Grund gefunden werden kann, dies auszuschließen, ist es nicht klar, warum die Anzahl an Ensemble-Resultaten als Richtwert für Wahrscheinlichkeiten gelten soll. Das IPCC erkennt diese Einschränkungen an und vermindert die festgesetzte Wahrscheinlichkeit von Konfidenzgraden, welche durch Ensembles hergeleitet werden (Thompson et al. 2016).

Ein bescheidenerer Ansatz betrachtet Ergebnisse von Ensembles als einen Indikator von Möglichkeiten anstatt von Wahrscheinlichkeiten. Gemäß dieser Auffassung zeigt die Bandbreite des Ensembles den Umfang der Ereignisse, die nicht ausgeschlossen werden können. Dieser Umfang liefert eine untere Grenze der Unsicherheit (Stainforth

et al. 2007b). In diesem Sinn argumentiert Katzav (2014), dass die Konzentration auf Vorhersagen fehlgeleitet ist und Modelle dazu verwendet werden sollten, zu zeigen, dass gewisse Szenarien echte Möglichkeiten darstellen.

Obwohl zweifelsfrei weniger stark als der Zugang über Wahrscheinlichkeiten, wirft auch dieser Ansatz viele Fragen auf. Zeigen Resultate, welche nach aktuellem Wissensstand nicht ausgeschlossen werden können, wirklich Möglichkeiten an? Wenn nicht, was ist dann ihre Relevanz für die Berechnung von Grenzen der Unsicherheit? Es ist ferner wichtig, nicht zu vergessen, dass Modell-Ensembles nicht die gesamte Breite an Möglichkeiten aufzeigen, wodurch bestimmte Typen von formalisierten Entscheidungsfindungsprozessen unmöglich werden. Für eine weiterführende Diskussion dieser Probleme s. Betz (2009, 2010) und Sjölin Wirling und Grüne-Yanoff (2021).

Letztendlich betonen eine Vielzahl von Autor/innen die Beschränkungen der modellbasierten Methoden (wie etwa Ensemble-Modellen) und argumentieren, dass jede realistische Beurteilung von Unsicherheiten sich auch auf andere Gesichtspunkte verlassen müssen wird, insbesondere auf Urteile von Experten. Petersen (2012, Kap. 4) diskutiert die Methode der *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*, welche Expertinnen- und Expertenurteile als eine wichtige Komponente der Einschätzung von Unsicherheit betrachtet. Aspinall (2010) schlägt die Verwendung von strukturierten Expert/innen-Umfragen vor.

Im Lichte der oben aufgeworfenen Probleme stellt sich die Frage, wie Unsicherheit in den Klimawissenschaften den Entscheidungsträger/innen gegenüber kommuniziert werden soll. Der prominenteste Rahmen für die Kommunikation von Unsicherheit ist jener des IPCC. Dessen neueste Version, die im fünften Sachbestandsbericht (IPCC 2013) verwendet worden ist, wird

in der *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties* eingeführt und von Mastrandrea et al. (2011) sowie in Box 1.1 in Kap. 1 des sechsten Sachbestandsbericht (IPCC 2021) weiter erläutert. Der Rahmen basiert auf zwei Maßeinheiten für die Kommunikation von Unsicherheit. Die erste, ein qualitatives „Konfidenzmaß“, hängt sowohl von der Art der Evidenz ab als auch vom Grad der Übereinstimmung unter den Expert/innen. Das zweite Maß ist eine quantitative Skala zur Repräsentation von Wahrscheinlichkeiten (oder etwas genauer: Intervallen von Wahrscheinlichkeiten) für relevante Klima- und Ökonomievariablen. Das folgende Zitat veranschaulicht die Verwendung dieser beiden Maße für die Kommunikation von Unsicherheit:

„Die Veränderung der durchschnittlichen globalen Oberflächentemperatur ist für die Zeitspanne von 2016–2035 relativ zu 1986–2005 für die vier RCPs ähnlich und wird wahrscheinlich im Bereich zwischen 0,3 °C und 0,7 °C (mittlere Konfidenz) liegen.“ (IPCC 2013, S. 20; Übersetzung der Autor/innen)

„RCP“ ist die Abkürzung für „*representative concentration pathway*“, also die zukünftige Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Eine Erörterung dieses Rahmens kann bei Budescu et al. (2014) sowie bei Adler und Hadorn (2014) gefunden werden.

An dieser Stelle sollte auch darauf hingewiesen werden, dass die Rolle von ethischen und sozialen Werten in Verbindung mit Unsicherheiten in den Klimawissenschaften kontrovers diskutiert wird. Winsberg (2012) beruft sich auf komplexe Simulationsmodellierung, um zu argumentieren, dass es für Klimawissenschaftler/innen nicht möglich ist, Resultate zu produzieren, welche nicht

von ethischen und sozialen Werten beeinflusst sind. Noch konkreter: Er argumentiert, dass die Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten zu Hypothesen über zukünftige Klimaveränderungen von ethischen und sozialen Werten abhängt, weil diese Werte bei der Konstruktion und der Bewertung von Klimamodellen ins Spiel kommen. Parker (2014) entgegnet, dass oft pragmatische Faktoren und nicht soziale und ethische Werte während der Bewertung und Konstruktion von Klimamodellen eine Rolle spielen. Sie argumentiert weiter, dass der Fokus nicht auf präzise, wahrscheinlichkeitstheoretische Berechnungen von Unsicherheit gelegt werden soll. Unsicherheit über zukünftige Klimaveränderungen wird durch gröbere Berechnungen angemessener dargestellt, und diese größeren Berechnungen sind weniger von Werten beeinflusst. Sie argumentiert, dass diese Einwände zeigen, dass Winsbergs Argumente zwar nicht falsch sind, der Einfluss von ethischen und sozialen Werten aber überbetont wird. Parker bringt weiterhin vor, dass traditionelle Probleme bezüglich des Ideals von wertfreier Wissenschaft auch in den Klimawissenschaften zum Tragen kommen. Man könnte nämlich argumentieren, dass Berechnungen von Unsicherheit selbst immer einigermaßen unsicher sind. Dadurch würde die Entscheidung für eine bestimmte Berechnung von Unsicherheit wiederum Werturteile involvieren.

7 Schlussbetrachtungen

In diesem Kapitel haben wir verschiedene Fragestellungen in den Klimawissenschaften erörtert sowie die sich daran anschließenden Probleme diskutiert. Dass dabei Meinungsverschiedenheiten und Kontroversen zutage getreten sind, sollte nicht erstaunen, denn diese sind ein

integraler Bestandteil einer jeden gesunden Wissenschaft und treten in jedem Fachbereich auf. Dennoch mögen sich manche Leser nun fragen, wieso man auf die Klimawissenschaften hören soll, wenn doch anscheinend noch so viel kontrovers ist. Eine Antwort auf diese Frage ergibt sich aus einer differenzierteren Betrachtung der Fragen, die kontrovers diskutiert werden. Wissenschaftliche Disziplinen sind keine monolithischen Blöcke. Wissenschaftliche Disziplinen haben eine interne Struktur, und diese gilt es zu beachten, wenn man die Praxisrelevanz von Ergebnissen und Einsichten evaluiert. Kontroversen drehen sich meistens um offene Fragen und aktuelle Projekte, und da Wissenschaftler/innen sich größtenteils mit diesen beschäftigen, kann leicht der Eindruck entstehen, dass alles kontrovers sei, dass kein Konsensus bestehe, und dass deshalb alles eine reine Meinungsache sei. Dieser Eindruck ist falsch. Sobald eine Frage geklärt ist, tritt diese in den Hintergrund (und damit oft aus dem Rampenlicht), und die Forscher wenden sich anderen Fragen zu. So auch in den Klimawissenschaften, wo z. B. die Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur durch Modelle gut vorhergesagt wurde, wo die physikalischen Mechanismen des Treibhauseffekts (der für die globale Erwärmung des Klimas verantwortlich ist) extrem gut verstanden sind, und wo über die Rolle, die anthropogene Emissionen beim Klimawandel spielen, Einigkeit herrscht. Diese Grundfragen gelten als geklärt, und es wäre ein Fehlschluss, aus der Tatsache, dass über aktuelle Forschungsfragen gestritten wird, abzuleiten, dass auch bei den Antworten auf diese Grundfragen keine Einigkeit herrscht. Dasselbe gilt übrigens auch für die extremen Wetterereignisse wie Fluten und Waldbrände, die in den letzten Jahren vielerorts für Katastrophen gesorgt haben. Das Auftreten solcher Katastrophen wurde von Wissenschaftlern vorhergesagt, und die Ereignisse

kamen deshalb kaum unerwartet. Was unerwartet war, war das Ausmaß der Katastrophen und die Höhe der Schäden, die diese angerichtet haben.

Es gibt also gute Gründe, auf Wissenschaft zu hören, auch wenn manche Fragen kontrovers erörtert werden. In jüngster Zeit (und vor allem auch im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie) war aber oft von mehr als vom *Hören* die Rede. Politiker rechtfertigten Maßnahmen mit dem Slogan, dass man der Wissenschaft *folgen* müsse. Das ist ein Irrtum. Die Wissenschaften sagen uns nicht, was wir zu tun haben. Die Wissenschaften machen Konditionalausagen, die uns sagen, was passieren wird (oder passieren könnte), falls wir gewisse Dinge tun oder unterlassen. Ob wir diese Dinge dann tun oder unterlassen sollen, ist eine Frage für die Politik und nicht für die Wissenschaft. Die Klimawissenschaften sagen uns beispielsweise, dass, wenn wir den CO₂-Ausstoß nicht massiv reduzieren, die durchschnittliche Erderwärmung auf über 2°C steigen wird und dass wir unter solchen Umständen mit einer erhöhten Frequenz extremer Wetterereignisse rechnen müssen. Die Wissenschaft sagt uns nicht, dass wir dies vermeiden müssen. Ob wir einer Welt leben wollen, die bedeutend häufiger von Fluten, Dürren und Waldbränden heimgesucht wird, ist eine politische Frage, die in der Arena der Politik diskutiert und entschieden werden muss. Die Politik kann sich nicht durch einen Verweis auf die Wissenschaft aus der Verantwortung stehlen!

Am Ende der Einleitung haben wir uns gegen den Vorwurf des Klimaskeptizismus gewehrt. Wir stellen allerdings fest, dass die Notwendigkeit, dies auszusprechen, in den letzten Jahren abgenommen hat. Während Klimaskeptizismus in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts einen ernstzunehmenden Einfluss auf die öffentliche Debatte hatte, hat dieser in den letzten Jahren bedeutend an Einfluss verloren. Die Einsicht, dass der Klimawandel ein

reales Problem darstellt, ist unterdessen weitgehend akzeptiert, und der Klimaskeptizismus wird immer mehr zur Nischenposition. In der Folge dreht sich die öffentliche Debatte immer mehr um Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen, die Anpassung an ein verändertes Klima und die ökonomischen Konsequenzen des Klimawandels. Damit ist der Weg frei für eine zukunftsgerichtete Debatte über den Umgang mit dem Klimawandel.

Literatur

- Adler, C.E., und G. Hirsch Hadorn. 2014. The IPCC and Treatment of Uncertainties: Topics and Sources of Dissensus. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 5(5):663–676.
- Aspinall, W. 2010. A Route to More Tractable Expert Advice. *Nature* 463:294–295.
- Betz, G. 2009. What Range of Future Scenarios should Climate Policy be based on? Modal Falsificationism and its Limitations. *Philosophia Naturalis* 46:133–158.
- Betz, G. 2010. What's the Worst Case? *Analyse und Kritik* 32:87–106.
- Betz, G. 2013. Chaos, Plurality and Model Metrics in Climate Science. In *Models, Simulation, and the Reduction of Complexity*, Hrsg. von Ulrich Gähde et al., 255–263. Berlin: De Gruyter.
- Bishop, C.H., und G. Abramowitz. 2013. Climate Model Dependence and the Replicate Earth Paradigm. *Climate Dynamics* 41:885–900.
- Bradley, Richard, und Katie Steele. 2015. Making Climate Decisions. *Philosophy Compass* 10(11):799–810. <https://doi.org/10.1111/phc3.12259>.
- Budescu, D.V., H. Por, S.B. Broomell, und M. Smithson. 2014. The Interpretation of IPCC Probabilistic Statements Around the World. *Nature Climate Change* 4:508–512.
- Cohn, T.A., und H.F. Lins. 2005. Nature's Style: Naturally Trendy. *Geophysical Research Letters* 32:L23402.

- Daron, J.D., und D. Stainforth. 2013. On Predicting Climate under Climate Change. *Environmental Research Letters* 8:1–8.
- Dessler, A. 2011. *Introduction to Modern Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Frigg, R., und J. Nguyen. 2020. *Modelling Nature: An Opinionated Introduction to Scientific Representation*. Berlin: Springer.
- Frigg, Roman, Seamus Bradley, Hailiang Du und Leonard A. Smith. 2014a. Laplace's Demon and the Adventures of His Apprentices. *Philosophy of Science* 81(1):31–59.
- Frigg, Roman, David A. Stainforth, und Leonard A. Smith. 2014b. The Myopia of Imperfect Climate Models: The Case of UKCP09. *Philosophy of Science* 80(5):886–897.
- Frigg, Roman, David A. Stainforth, und Leonard A. Smith. 2015a. An Assessment of the Foundational Assumptions in High-Resolution Climate Projections: The Case of UKCP09 2015. *Synthese* 192(12):3979–4008.
- Frigg, Roman und Leonard A. Smith 2022. An ineffective antidote for hawkmoths. *European Journal for Philosophy of Science* 12(33).
- Frigg, Roman 2023. *Models and Theories. A Philosophical Inquiry*. London: Routledge.
- Frisch, M. 2015. Tuning Climate Models, Predictivism, and the Problem of Old Evidence. *European Journal for Philosophy of Science* 5(2):171–190.
- Harris, Margherita und Frigg, Roman 2022a. Climate Models and Robustness Analysis – Part I: Core Concepts and Premises, forthcoming. In *Handbook of the Philosophy of Climate Change*, Hrsg. Gianfranco Pellegrino and Marcello Di Paola. Springer.
- Harris, Margherita und Frigg, Roman 2022b. Climate Models and Robustness Analysis – Part II: The Justificatory Challenge, forthcoming. In *Handbook of the Philosophy of Climate Change*, Hrsg. Gianfranco Pellegrino and Marcello Di Paola. Springer.
- Hegerl, G. C., O. Hoegh-Guldberg, G. Casassa, M. P. Hoerling, R. S. Kovats, C. Parmesan, D. W. Pierce, und P. A. Stott. 2010. Good Practice Guidance Paper on Detection and Attribution Related to Anthropogenic Climate Change.

- In *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Detection and Attribution of Anthropogenic Climate Change*, hrsg. von T. F. Stocker, C. B. Field, D. Qin, V. Barros, G.-K. Plattner, M. Tignor, P. M. Midgley, und K. L. Ebi. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern.
- Held, Isaac M. 2005. The Gap between Simulation and Understanding in Climate Modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 1609–1614.
- 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*. Hrsg. von S. Solomon, D. Qin, und M. Manning. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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*. Hrsg. von V. Masson-Delmotte, 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, und B. Zhou. Cambridge: Cambridge University Press. In Press.
- Jun, M., R. Knutti, und D.W. Nychka. 2008. Local Eigenvalue Analysis of CMIP3 Climate Model errors. *Tellus A* 60(5):992–1000.
- Katzav, J. 2014. The Epistemology of Climate Models and some of its Implications for Climate Science and the Philosophy of Science. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 46:228–238.
- Katzav, J., und W.S. Parker. 2018. Issues in the Theoretical Foundations of Climate Science. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 63:141–149.
- Knutti, R., R. Furrer, C. Tebaldi, J. Cermak, und G.A. Meehl. 2010. Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate* 23(10):2739–2758.
- Lloyd, E.A. 2009. Varieties of Support and Confirmation of Climate Models. *Proceedings of the Aristotelian Society* Supplementary Volume LXXXIII: 217–236.

- Lloyd, E.A. 2010. Confirmation and robustness of climate models. *Philosophy of Science* 77:971–984.
- Lloyd, E.A. 2015. Model robustness as a confirmatory virtue: The case of climate science. *Studies in History and Philosophy of Science* 49: 58–68.
- Lorenz, Edward N. 1995. Climate is what you expect. Prepared for publication by NCAR. Unpublished. 1–33.
- Mastrandrea, M.D., K.J. Mach, G.-K. Plattner, O. Edenhofer, T.F. Stocker, C.B. Field, K.L. Ebi, and P.R. Matschoss. 2011. The IPCC AR5 Guidance Note on Consistent Treatment of Uncertainties: A Common Approach across the Working Groups. *Climatic Change* 108:675–691.
- McGuffie, K., and A. Henderson-Sellers. 2005. *A Climate Modelling Primer*. New Jersey: Wiley.
- Oreskes, N., K. Shrader-Frechette, and K. Belitz. 1994. Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Science. *Science New Series* 263(5147):641–646.
- Oreskes, N. 2007. The Scientific Consensus on Climate Change: How Do We Know We're Not Wrong? In *Climate Change: What It Means for Us, Our Children, and Our Grandchildren*, Hrsg. von J. F. C. DiMento, und P. Doughman, 65–99. Boston: MIT Press.
- Lahsen, M. 2005. Seductive Simulations? Uncertainty Distribution Around Climate Models. *Social Studies of Science* 35(6):895–922.
- Parker, W.S. 2009. Confirmation and Adequacy for Purpose in Climate Modelling. *Aristotelian Society Supplementary* 83(1):233–249.
- Parker, W.S. 2010. Comparative Process Tracing and Climate Change Fingerprints. *Philosophy of Science* 77:1083–1095.
- Parker, W.S. 2013. Ensemble Modeling, Uncertainty and Robust Predictions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 4(3):213–223.
- Parker, W.S. 2014. Values and Uncertainties in Climate Prediction, Revisited. *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 46:24–30.

- Petersen, A.C. 2012. *Simulating Nature: A Philosophical Study of Computer-Simulation Uncertainties and Their Role in Climate Science and Policy Advice*. Boca Raton: CRC Press.
- Shackley, S., P. Young, S. Parkinson, und B. Wynne. 1998. Uncertainty, Complexity and Concepts of Good Science in Climate Change Modelling: Are GCMs the Best Tools? *Climatic Change* 38:159–205.
- Sjölin Wirling, Y. und Grüne-Yanoff, T. 2021. The epistemology of modal modeling. *Philosophy Compass* e12775: 1–11.
- Smith, L.A., und N. Stern. 2011. Uncertainty in Science and its Role in Climate Policy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369(1956):4818–4841.
- Spiegelhalter, D.J., und H. Riesch. 2011. Don't know, can't know: Embracing Deeper Uncertainties when Analysing Risks. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369:4730–4750.
- Stainforth, D.A., M.R. Allen, E.R. Tredger, und L.A. Smith. 2007a. Confidence, Uncertainty and Decision-support Relevance in Climate Predictions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 365:2145–2161.
- Stainforth, D.A., T.E. Downing, R. Washington, A. Lopez, und M. New. 2007b. Issues in the Interpretation of Climate Model Ensembles to Inform Decisions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 365:2163–2177.
- Steele, K., und C. Werndl. 2013. Climate Models, Confirmation and Calibration. *The British Journal for the Philosophy of Science* 64:609–635.
- Steele, K., und C. Werndl. 2016. Model-Selection Theory: The Need for a More Nuanced Picture on Use-Novelty and Double-Counting. *The British Journal for the Philosophy of Science* 69(2). <https://doi.org/10.1093/bjps/axw024>.
- Thompson, Erica, Roman Frigg, und Casey Helgeson. 2016. Expert Judgment for Climate Change Adaptation. *Philosophy of Science* 83(5):1110–1121.
- Werndl, C. 2015. On Defining Climate and Climate Change. *The British Journal for the Philosophy of Science* 67(2). <https://doi.org/10.1093/bjps/axu048>.

- Werndl, C. 2018. Initial Conditions Dependence and Initial Conditions Uncertainty in Climate Science. *The British Journal for the Philosophy of Science* 70(4). <https://doi.org/10.1093/bjps/axy021>.
- Weisberg, Michael. 2006. Robustness Analysis. *Philosophy of Science* 73:730–742.
- Wilby, R.L., und S. Dessai. 2010. Robust Adaptation to Climate Change. *Weather* 65(7):180–185.
- Winsberg, E. 2012. Values and Uncertainties in the Predictions of Global Climate Models. *Kennedy Institute of Ethics Journal* 22:111–127.
- Winsberg, E. 2018. *Philosophy and Climate Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Winsberg, E. and William M. Goodwin 2016. The adventures of climate science in the sweet land of idle arguments. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 54: 9–17.
- Worrall, J. 2010. Error, Tests, and Theory Confirmation. In *Error and Inference: Recent Exchanges on Experimental Reasoning, Reliability, and the Objectivity and Rationality of Science*, Hrsg. von D. G. Mayo und A. Spanos, 125–154. Cambridge: Cambridge University Press.

Literaturempfehlungen

- Frigg, R., E. Thompson, und C. Werndl. 2015b. Philosophy of Climate Science Part I: Observing Climate Change. *Philosophy Compass* 10:953–964.
- Frigg, R., E. Thompson, und C. Werndl. 2015c. Philosophy of Climate Science Part II: Modelling Climate Change. *Philosophy Compass* 10:965–977.
- Parker, Wendy. 2018. Climate Science. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Summer 2018 Edition, Hrsg. von Edward N. Zalta. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/climate-science>.
- Maslin, M. 2021. *Global Warming. A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press.