

MODELLIERUNG DES KLIMASYSTEMS

WAS IST KLIMA, WELCHE KOMPONENTEN UMFASST DAS KLIMASYSTEM UND AUF WELCHEN ZEITSKALEN KÖNNEN SICH VERÄNDERUNGEN ABSPIELEN?

Dieser Artikel ist ein stark vereinfachter Auszug einer Veröffentlichung des Deutschen Wetterdienstes, der in der Ausgabe 99 „promet“ Anfang 2017 veröffentlicht wurde. Der Titel der promet-Ausgabe lautet: Regionale Klimamodellierung 1 – Grundlagen.

Was ist eigentlich Klima?

Klima wird laut WMO ¹⁾ als mittleres Wetter bezeichnet. Es ist definiert als ein Maß für den mittleren Zustand der Atmosphäre und deren Variabilität über einen längeren Zeitraum. Charakterisiert wird das Klima durch die statistischen Eigenschaften der Atmosphäre, wie z.B. Mittelwert, Häufigkeiten, Andauerverhalten und Extremwerte von meteorologischen Größen (z.B. Temperatur, Wind oder Niederschlag). Als Zeitspanne empfiehlt die WMO mindestens 30 Jahre, aber auch Betrachtungen über längere Zeiträume wie Jahrhunderte und Jahrtausende sind bei Klimafragen gebräuchlich.

Was beeinflusst Klima?

Der Zustand der Atmosphäre wird durch vielfältige Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Atmosphärenschichten, zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre (Ozeane, Wasserkreislauf), Biosphäre (Fauna, Flora), Lithosphäre (feste, unbelebte Erde) und Kryosphäre (Eis, Gletscher, Permafrost) bestimmt. Die Gesamtheit dieser Komponenten wird Klimasystem genannt (Bild 1). Der Hauptantrieb des Klimasystems ist die Energie der Sonne. Der Beitrag von Wärme aus dem Inneren der Erde ist dagegen sehr klein. Die einzelnen Komponenten des Klimasystems – Atmosphäre, Land, Ozean, Meereis – stehen in Wechselwirkung zueinander, d.h. es findet Energie-, Masse- und Impulsaustausch über die Grenzflächen statt. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Komponenten kommt es zu Wechselwirkungen auf unterschiedlichen Zeitskalen, die dann wiederum Rückkopplungen und weitere Reaktionen auslösen können. Das Klimasystem weist also durch den

Einfluss seiner eigenen inneren Dynamik Klimaschwankungen oder -variabilität auf verschiedenen Zeitskalen auf.

Das Klima als System

Das Klimasystem ist ein offenes System. Das bedeutet, dass noch weitere, externe Einflussfaktoren eine Rolle spielen, wie z.B. Vulkanausbrüche, Schwankungen der Sonnenaktivität, Änderung der Erdbahnparameter oder menschliche Einflüsse – wie die Emission von Treibhausgasen oder Landnutzungsänderungen. Es gibt also gewissermaßen kein „normales“ Klima, da sich das Klima auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen verändert. Klimaänderung oder Klimawandel wird von der WMO als statistisch signifikante Veränderung des mittleren Zustands des Klimas oder seiner Variabilität beschrieben, die für einen längeren Zeitraum, typischerweise Jahrzehnte oder länger, anhält.

Die einzelnen Komponenten beeinflussen das Klimasystem auf unterschiedlichen Zeitskalen. Die Troposphäre reagiert sehr schnell – in einem Zeitraum von Minuten bis Tagen – auf Veränderungen und weist die größte Variabilität auf kurzen Zeitskalen auf. Die Variabilität im

trägeren, tiefen Ozean hingegen, in den Eisschilden und in der Biosphäre mit dem Kohlenstoffspeicher im Erdboden tragen zu den langen Zeitskalen des Klimasystems bei, da sie Reaktionszeiten von Jahrhunderten bis Jahrtausenden haben. Selbst auf geologischen Zeitskalen treten Schwankungen des Klimasystems auf, wie z.B. durch Gebirgsbildung oder die Speicherung von Kohlenstoff in der Lithosphäre.

Der Ozean ist im Klimasystem von großer Bedeutung, da er Wärmeenergie von der Atmosphäre aufnimmt, meridional umverteilt und über längere Zeit speichern kann. Er ist die größte Quelle für den atmosphärischen Wasserdampf. Ebenso findet im Ozean durch die ozeanische Zirkulation, biologische Aktivität, Absinken und Ablagerung im Sediment eine Aufnahme, Umverteilung und Speicherung von Kohlenstoff statt. Aus den verschiedenen Speichern wird ein kleiner Anteil des Kohlenstoffs an die Atmosphäre zurückgegeben. Auf längeren Zeitskalen gelangt Kohlenstoff aus Böden ebenso wie aus Gesteinen durch Remineralisierung und Verwitterungsprozesse zurück in den Kreislauf. Der Kohlenstoffkreislauf ist eines der anschaulichsten

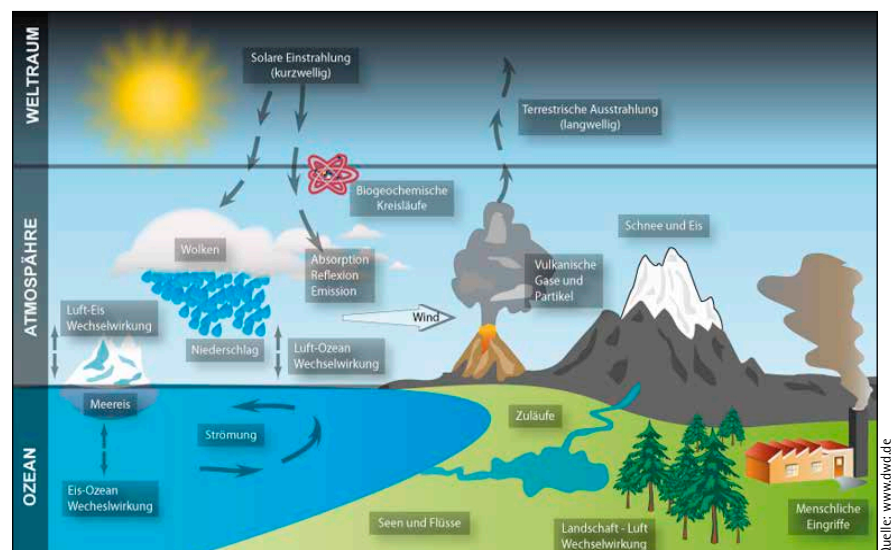


Bild 1: Das Klimasystem

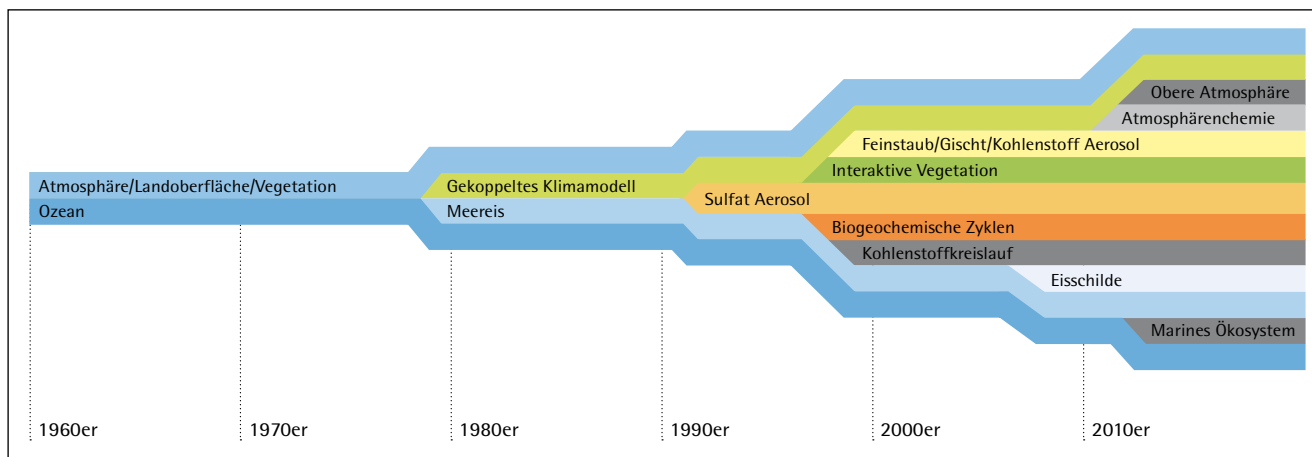


Bild 2: Berücksichtigung der Prozesse in der Klimamodellierung im Laufe der Zeit. Adaptiert nach C. Jakob (2014): Going back to basics. Nature Climate Change

Beispiele für Massenaustausch zwischen den Klimakomponenten auf unterschiedlichen Zeitskalen. Neben den kurzfristigen Reaktionen des Klimasystems auf äußere Einflüsse, wie z.B. Tages- und Jahresgang, gibt es Schwankungen mit längeren Perioden. Prominentestes Beispiel hierfür und für die starke Ozean-Atmosphärenkopplung ist das El Niño-Phänomen im tropischen Pazifik. Hier verändern sich alle 2 bis 10 Jahre das Windregime und die Meeresströmungen im tropischen Pazifik so stark, dass dies dramatische Auswirkungen auf das Niederschlagsverhalten in angrenzenden und entfernteren Regionen hat. Auch der Fischfang vor der südamerikanischen Pazifikküste unterliegt dadurch großen Schwankungen.

In der Paläoklimaforschung konnte aus Klimaarchiven wie Eisbohrkernen oder Sedimentbohrkernen die Temperaturentwicklung auf der Erde in den letzten Jahrmillionen rekonstruiert werden ²⁾. Die Temperaturentwicklung verdeutlicht, dass im Klimasystem durchaus schon starke Schwankungen auftraten. Hier spielen die Land-See-Verteilung, die Gebirgsbildung und die Orbitalparameter eine große Rolle.

Klimamodellierung

In den Anfängen der Klimamodellierung der 1960er Jahre wurden vereinfachte Modelle der Dynamik von Atmosphäre und Ozean entwickelt. Die Vereinfachungen erleichterten das Umsetzen in numerische Algorithmen und ermöglichten ein schnelleres Lösen der Gleichungen mit Hilfe von Computern. Dadurch wurden Klimavorhersagen und -projektionen überhaupt erst möglich. Mit der rasanten Entwicklung im Bereich der Hochleistungsrechner und zunehmendem Verständnis des Klimasystems und seiner Wechselwirkungen nahm auch die Komplexität der Klimamodelle

zu. Dies wird in Bild 2 deutlich, die zeigt, welche Komponenten des Klimasystems im Laufe der Zeit in den Klimamodellen hinzugefügt wurden. Mittlerweile umfassen globale Klimamodelle neben Atmosphäre und Ozean auch die Hydrosphäre, Biosphäre und Kryosphäre. In Erdsystemmodellen wird versucht, das gesamte Erdsystem abzubilden, indem auch komplexere chemische und biologische Prozesse berücksichtigt werden. Als weitere Komponenten der ESMs spielen meist der Kohlenstoffkreislauf, Aerosole und Atmosphärenchemie eine Rolle, gegebenenfalls auch eine dynamische Vegetationskomponente.

Klimamodelle sind unverzichtbare Werkzeuge, die bei vielen Fragestellungen helfen, das Klimasystem besser zu verstehen und zukünftige Entwicklungen vorherzusagen. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten eines Erdsystem-Modells vorgestellt.

Atmosphäre

Die physikalische Beschreibung der dynamischen atmosphärischen Prozesse wird durch einen Satz an Gleichungen realisiert. Dies sind die sogenannten fundamentalen, ursprünglichen oder primitiven Gleichungen für die Annahme einer trockenen, adiabatischen und reibungsfreien Atmosphäre. Die adiabatische Atmosphäre enthält die quasistatische Annahme, nämlich dass der Druck im Inneren eines sich vertikal bewegendes Luftpaketes der gleiche sei wie der seiner Umgebung, womit man einen konstanten adiabatischen Temperaturgradienten erhält.

Der Name „primitive Gleichungen“ wird im meteorologischen Kontext allgemein auf die so vereinfachten Gleichungen angewandt, da deren ursprüngliche Form noch durchscheint. Die Vereinfachung der „flachen Atmosphäre“ zu überwinden, bedeutet, dass kompliziertere geometrische Vorschriften umzusetzen sind,

wenn z.B. die Erde nicht mehr als Kugel angenommen werden kann. Dies muss in Übereinstimmung mit den Erhaltungsgesetzen geschehen und ist Gegenstand der Forschung.

Die größten Herausforderungen einer guten Modellierung der atmosphärischen Prozesse liegen noch immer in der Beschreibung von Wolkenprozessen und ihrem Einfluss auf die dynamische Zirkulation und damit das Klima. Deshalb ist dieser Prozess einer der „Großen Herausforderungen“ an die Wissenschaft des World Climate Research Programmes (WCRP). Aerosole und die natürlichen und anthropogenen Treibhausgase sind in Klimamodellen als Hintergrundprofile auf klimatologischer Basis für die Vergangenheit bzw. als Szenarium für die Zukunft häufig vorgeschrieben.

Aerosol beschreibt kleine Partikel in der Luft, wie z.B. Mineralstaub, Meeressalz, Zellpartikel oder Partikel aus der Verbrennung fossilen Brennstoffs oder von Vulkanausbrüchen. Sie haben einen direkten Einfluss auf die Strahlung und damit die Energiebilanz der Atmosphäre und indirekte Einflüsse auf die Wolkenbildung. Der Einfluss der Aerosole auf den Klimawandel ist Gegenstand intensiver Forschung.

Land

Landmodelle beinhalten im Allgemeinen eine vereinfachte Darstellung der Landoberfläche und der obersten Bodenschichten. An der Landoberfläche findet der Austausch von Stoffflüssen, Energie und Impuls mit der Atmosphäre statt. Einfachste Bodenmodelle umfassen nur eine Schicht des Bodens, in welcher eine bestimmte Menge an Bodenwasser gespeichert werden kann. Die Temperatur in der Bodenschicht ergibt sich aus der Wärmebilanz an der Oberfläche. Das überschüssige Wasser wird als Abfluss in den Untergrund behandelt.

Eine der Schwierigkeiten bei der Entwicklung der Bodenmodelle ist die korrekte Darstellung von Tages- und Jahresgängen oberflächennaher atmosphärischer Größen wie der Temperatur in 2 m Höhe oder des Taupunktes. Die Bereitstellung der Eigenschaften des Bodens hinsichtlich seiner Beschaffenheit vor jeder Simulation stellt eine weitere Herausforderung dar, da globale dreidimensionale Daten der Bodenparameter schwer zu erheben sind. Bei längerfristigen Betrachtungen des Klimasystems müssen der anthropogene Einfluss wie Landnutzungsänderungen, Effekte wie die Verschiebung von Vegetationsstufen, das Auftauen oder Entstehen von Permafrost und Waldbrände berücksichtigt werden.

Ozean

Die Gleichungen der Ozeanmodelle basieren wie die der Atmosphärenmodelle auf den primitiven Gleichungen. Neben diesen ist hier der Salzgehalt eine Erhaltungsgröße. Zusätzlich gibt es die nicht-lineare Zustandsgleichung für die Dichte in Abhängigkeit von Temperatur, Salzgehalt und Druck. Die Ozeanzirkulation wird einerseits von Wind, Gezeiten, Coriolis- und Schwerkraft dynamisch angetrieben, andererseits thermodynamisch durch die Temperatur- und Salzgehaltsverteilung bestimmt.

Das erste globale Ozeanmodell von 1969 verwendet vereinfachte dynamische Gleichungen. Hierbei wird ein fester, auf dem Ozean liegender Deckel angenommen.

Eine Herausforderung in der Ozeanmodellierung ist die Realisierung der Vermischung. Sie ist in der Horizontalen verantwortlich für den Austausch unterschiedlicher Strömungen und Wassermassen und in der Vertikalen bei Wassermassenbildungsprozessen. Mit zunehmender Rechnerkapazität ist es möglich, auch bei globalen Ozeanmodellen die Gitter so zu verfeinern, dass Prozesse wie mesoskalige Wirbel aufgelöst werden: Es werden wirbel-erlaubende und wirbel-auflösende Simulationen unterschieden. Mit der feineren Gitterweite wird auch die Topographie in den globalen Ozeanmodellen besser wiedergegeben. Die Kopplung eines Wellenmodells erlaubt zudem eine realistischere Darstellung der Vermischung in Ozeanmodellen, wodurch sich Parametrisierungen vereinfachen können.

Eine weitere Herausforderung in der Ozeanmodellierung ist der Vergleich mit Beobachtungen. Beobachtungen des globalen und tiefen Ozeans sind erst mit Hilfe der Satelliten und einer Vielzahl an Bojen ermöglicht worden. Trotz allem

ist die Datengrundlage im Vergleich mit der Verfügbarkeit der Beobachtungen in der Atmosphäre extrem dünn. Durch die zunehmende Verwendung von Ozeanmodellen mit sehr feinen Gitterweiten werden zudem auch feinmaschigere Beobachtungen zur Evaluierung benötigt.

Kryosphäre

Unter Kryosphäre im Klimasystem versteht man den Anteil der Erdoberfläche, welcher mit Schnee und Eis bedeckt ist. Dazu zählen Meereis, Eis auf Flüssen und Seen, Gletscher, Eisschilde und gefrorener Boden. Eis auf Flüssen und Seen und gefrorener Boden werden in den Landmodellen behandelt. Eine besondere Rolle nimmt Permafrostboden ein, welcher langfristig Kohlenstoff speichern kann.

Das Meereis spielt im Klimasystem eine wichtige Rolle, da es die Albedo der Ozeanoberfläche verändert und durch die veränderte Oberflächenrauigkeit den Impulsaustausch zwischen Ozean und Atmosphäre beeinflusst. Im Ozean ist die Meereisbildung von zusätzlicher Bedeutung, da im Gefriervorgang das reine Wasser zuerst friert, so dass Wasser mit erhöhtem Salzgehalt zurückbleibt. Sie bewirkt, dass das Umgebungswasser schwerer wird und absinkt.

Analog zur Behandlung von Meereis wird auch beim Inlandeis die dynamische Bewegung des Eises und die Thermodynamik der Eisbildung und des Schmelzens simuliert. Bewegt sich das Landeis auf den Ozean hinaus, muss auch dieser Prozess simuliert werden. Durch Schmelzvorgänge im Küstenbereich gewinnt der Ozean an Süßwasser, wodurch sich die lokale Wassermassenzusammensetzung ändert und der Meeresspiegel ansteigt. Das Abbrechen von Eisbergen modifiziert den internen Stress im Eis, wodurch es zu schnellerem Fließen des Inlandeises kommen kann. Die Beschreibung der Schmelzprozesse von Meer- und Landeis und die Wechselwirkung mit dem globalen Klima ist ebenfalls eine der „Großen Herausforderungen“, welche das WCRP an die aktuelle Forschung richtet.

Unsicherheiten in Klimamodellen

Die Ergebnisse der Klimamodelle sind aufgrund ihrer Konstruktion und auf Basis des verwendeten Wissens mit vielen Unsicherheiten verbunden, die bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse bedacht werden müssen.

Allgemein werden folgende Unsicherheiten der Klimamodelle unterschieden:

- **Approximationen:** Durch Vorüberlegungen werden bestimmte, auf allgemeinen Theorien basierende, physikalische Prozesse aus den Gleichungen eliminiert (z.B. Schallwellen), um den rechnerischen Einsatz zu vereinfachen.

- **Diskretisierung:** Da die physikalischen Gleichungen partielle Ableitungen und chaotische Prozesse enthalten, die analytisch nicht gelöst werden können, erhält man durch die numerische Näherung Ungenauigkeiten.
- **Computerungenauigkeit:** Die Technologie der Rechner beschränkt die Rechengenauigkeit, so dass es hier zu Fehlern in den Nachkommastellen kommen kann, die sich auch fortpflanzen können.
- **Empirische Abschätzung oder Modellparametrisierung:** Durch die numerische Lösung der Gleichungen mit einem diskreten Abstand der Gitterpunkte müssen Prozesse, die auf einer kleineren Skala als dem Gitterpunkt ablaufen, parametrisiert werden (z.B. Konvektion). Ein anderes Beispiel für Parametrisierung sind Prozesse, die aus Messungen empirisch abgeleitet wurden, wie z.B. der Austausch von Wärme, Feuchte und Impuls zwischen Ozean und Atmosphäre. In regionalen Klimamodellen werden die Parametrisierungen in den verschiedenen Regionen oft regional angepasst, so dass z.B. ein regionales Modell für Europa andere Parametrisierungen oder Parametrisierungskoeffizienten benutzt als ein regionales Modell für Afrika. Bei jeder Anwendung von Klimamodellen müssen die verwendeten Parametrisierungen hinterfragt und ihre Unsicherheiten diskutiert werden.
- **Tuning:** durch die Parametrisierungen in den Gleichungen gibt

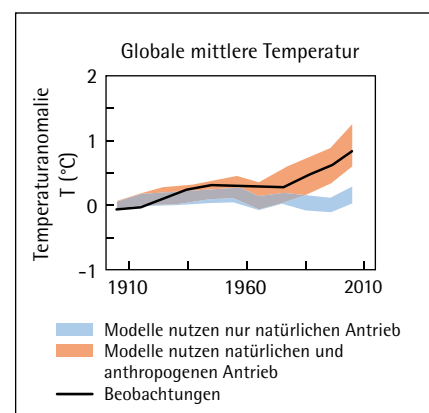


Bild 3: Multi-Modell-Ensemble des globalen Klimas für das 20. Jahrhundert. Die Werte sind dekadische Mittelwerte der Erdoberflächentemperatur relativ zum Zeitraum 1880-1919. Die farbigen Bänder stellen die Konfidenzintervalle von 5 bis 95% dar (nach IPCC 2013)

es Parameter, die angepasst oder „getuned“ werden, um eine möglichst gute Übereinstimmung mit beobachteten Daten zu erreichen. Schlüsselparameter der Globalmodelle sind z.B. die Energiebilanz am oberen Rand der Atmosphäre, die mittlere Oberflächentemperatur oder die zonale Windgeschwindigkeit in den atmosphärischen Jetströmen. Tuning ist sehr aufwendig, da Simulationen mit neuen Parameterwerten innerhalb der physikalisch sinnvollen Variation iterativ wiederholt werden müssen, bis ein gewünschtes Ergebnis erzielt wurde. Parameter-tuning wirkt auf das gesamte Modellklima, so dass mit möglichst objektiven Methoden ein optimaler Zustand gefunden werden muss. Häufig werden globale Klimamodelle für bestimmte Zeitscheiben getuned, z.B. auf den vorindustriellen Zustand. Hierbei entsteht die Unsicherheit, inwieweit die Wahl der Parameter auch bei Zukunftsszenarien realistische Ergebnisse liefern.

- **Komplexität der Modellkomponenten:** Mit jedem Hinzufügen neuer Modellkomponenten kommen neben den modelleigenen Unsicherheiten noch Unsicherheiten durch die Wechselwirkungen untereinander hinzu.
- **Start- und Randbedingungen der Modelle:** Start- und Randbedingungen können Beobachtungsdaten oder Ergebnisse anderer Modellsimulationen sein. Die Qualität und Dichte der Beobachtungsdaten sowie die Methoden, diese dem Modell als Anfangsbedingungen verfügbar zu machen, beeinflussen die Qualität der Vorhersage auf kurzen Zeitskalen entscheidend. Wenn kein Atmosphärenchemiemodell ange-koppelt ist, werden zusätzlich Treibhausgaskonzentration, Ozon- und Aerosolgehalt als Randbedingungen während der Simulation benötigt.
- **Szenarien:** Um die zukünftige Entwicklung des Klimasystems abzuschätzen, wurden verschiedene Szenarien entwickelt. Diese Szenarien dienen den Klimamodellen als Randbedingungen für Klimaprojektionen. Es handelt sich um sogenannte repräsentative Konzentrations-Pfade, die sich deutlich voneinander unterscheiden. Sie umfassen neben den zukünftigen Änderungen der Treibhausgasemissionen und des Strahlungsantriebs auch sozio-ökonomische Faktoren und die Änderung der Landnutzung. Es gibt aktuell 4 Szenarien: Sie stel-

len vier mögliche zukünftige Entwicklungen dar, auf deren Grundlage mit Klimamodellen mögliche Klimaänderungen berechnet werden.

- **Unkenntnis:** Im Gegensatz zum natürlichen Klimasystem sind Klimamodelle geschlossene Systeme. Sie können nur Zusammenhänge und Wechselwirkungen von Komponenten darstellen, die in den Modellen abgebildet sind. Daher ist das Verständnis über die Rückkopplungseffekte und deren realistische Simulation durch numerische Klimamodelle entscheidend für die Güte von Klimasimulationen.

Evaluierung von Klimamodellen

Bevor es sinnvoll ist, Aussagen über Klimaveränderungen aufgrund von Modellsimulationen zu machen, ist es wichtig, die Modellergebnisse zu überprüfen. Dies erfolgt auf zwei unterschiedliche Arten.

Zum einen werden die Simulationen der Vergangenheit mit Beobachtungsdaten mit möglichst großer Datenabdeckung verglichen. Kriterien für die Beurteilung, wie gut eine Klimagröße im Vergleich zur beobachteten Vergangenheit modelliert wird, sind unter anderem die zufriedenstellende Wiedergabe des Mittelwertes über den Untersuchungszeitraum, die Häufigkeitsverteilung der Werte, die Minimal- und Maximalwerte oder der Jahresganges der räumlichen Verteilung und das Änderungssignals im Untersuchungszeitraum. Darüber hinaus ist wesentlich, ob ein Klimamodell in der Lage ist, die sogenannte Klimasensitivität realistisch zu reproduzieren. Klimasensitivität ist ein Maß für die Erwärmung der Erde durch eine Verdoppelung eines Treibhausgases (meist Kohlendioxid). Diese Klimasensitivität kann aus Beobachtungsdaten errechnet oder mit Klimamodellen abgeschätzt werden. Die Evaluierung der Klimamodelle ist wichtig, einerseits um zu wissen, in welchen Bereichen, räumlich und zeitlich, die Ergebnisse nah an Beobachtungen liegen, andererseits um zu erfahren, wo systematische Fehler im Modell auftreten. Diese Erkenntnis hilft dann, die Modellentwicklung auf diese Bereiche zu konzentrieren, um die Modelle weiter zu verbessern.

Zum anderen werden die Simulationsergebnisse mit anderen Modellergebnissen verglichen. Dort werden globale Klimamodelle genutzt, um zukünftige Szenarien bis zum Jahr 2100 zu simulieren.

Es existiert eine Vielzahl von Metriken zur Bestimmung der Güte einer Modellsimulation. Hier werden die Simulationen mit Klimatologien der Vergangenheit verglichen. Die Metriken fokussieren dabei hauptsächlich auf den mittleren

Fehler, die Varianz, und die Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Anders als bei Wettervorhersagemodellen liefern Klimamodelle keine detaillierten Informationen über den Wetterablauf der Zukunft, sondern Projektionen des künftigen Klimas im Sinne von dessen statistischen Eigenschaften über längere Zeiträume. Die Ergebnisse der Projektionsrechnungen werden als Abweichungen von einem Referenzzeitraum, d.h. 1961-90 oder 1981-2010, angegeben. Die Robustheit der Ergebnisse sollte anhand unterschiedlicher Referenzzeiträume untersucht werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Klimasystem ist ein hochkomplexes, nichtlineares System, welches nur durch Vereinfachungen mit einem Klimamodell abgebildet werden kann. Deshalb gibt es nicht ein einziges Klimamodell, das alle Fragen beantwortet, sondern eine Vielzahl an Modellkombinationen und -konfigurationen für unterschiedliche Anwendungen und Fragestellungen.

Klimamodelle sind unter Berücksichtigung des anthropogenen Antriebs sehr wohl in der Lage, den Temperaturanstieg des vergangenen Jahrhunderts zu simulieren. Darüber hinaus müssen die Klimamodelle jedoch noch weiter optimiert werden, um das Klimasystem mit all seinen Komponenten besser zu beschreiben und das Vertrauen in die Vorhersagen zu stärken. Letztendlich ist klar, dass nur im Zusammenspiel von Verbesserung der Datenerfassung und der Klimamodelle die „Großen Herausforderungen“ bewältigt werden können.

Fußnoten

- 1) www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faqs.php, Stand Oktober 2016
- 2) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_palaeotemps.png

ZU DEN AUTOREN:

► *Dr. Jennifer Brauch*
Deutscher Wetterdienst
jennifer.brauch@dwd.de

► *Dr. Kristina Fröhlich*
Deutscher Wetterdienst
kristina.froehlich@dwd.de

► *Dr. Florian Imberry*
Deutscher Wetterdienst
florian.imberry@dwd.de

Promet, die meteorologische Fortbildungszeitschrift des Deutschen Wetterdienstes, ist hier erhältlich:

■ www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/promet.html