



Regionale Klimamodelle - Potentiale, Grenzen und Perspektiven -

Impressum

Referenten / Diskussionsteilnehmer

András Bárdossy (Universität Stuttgart)
Kilian Bizer (Georg-August-Universität Göttingen)
Axel Bronstert (Universität Potsdam)
Achim Daschkeit (Umweltbundesamt)
Klaus Eckhardt (Universität Hohenheim)
Jan Eichner (Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft)
Andreas Ernst (Universität Kassel)
Thomas Faist (Universität Bielefeld)
Wolfgang Fennel (Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde)
Frauke Feser (GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH)
Heiko Gerdes (Brandt-Gerdes-Sitzmann Umweltplanung GmbH)
Christoph Görg (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ)
Heike Hübener (Freie Universität Berlin)
Daniela Jacob (Max-Planck-Institut für Meteorologie)
Klaus Keuler (Brandenburgische Technische Universität Cottbus)
Gernot Klepper (Institut für Weltwirtschaft)
Hans-Richard Knoche (Karlsruher Institut für Technologie – IMK-IFU)
Wolfgang Köck (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ)
Barbara Köllner (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen)
Peter Krahe (Bundesanstalt für Gewässerkunde)
Frank Kreienkamp (Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH)
Stefan Kroll (Max-Planck-Institut für europäische Rechtsgeschichte)
Petra Mahrenholz (Umweltbundesamt)
Wolfram Mauser (Ludwig-Maximilians-Universität München)
Udo Melentin (Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft)
Almut Nagel (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit)
Joachim Namyslo (Deutscher Wetterdienst)
Heiko Paeth (Universität Würzburg)
Claudia Pahl-Wostl (Universität Osnabrück)
Andre Paul (MARUM – Zentrum für marine Umweltwissenschaften,
Universität Bremen)
Jörg Priess (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ)
Gunter Pültz (Müller-BBM GmbH)
Luis Samaniego (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ)
Jeanette Schade (Universität Bielefeld)
Martin Schlather (Universität Göttingen)
Ralf Seppelt (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ)
Peter Tobias Stoll (Georg-August-Universität Göttingen)
Frank Thorenz (Nds. Landesbetrieb f. Wasserwirtschaft, Küsten-
und Naturschutz)
Michael Trepel (Landesamt f. Natur- und Umweltschutz)
Uwe Ulbrich (Freie Universität Berlin)
Henk van Liempt (Bundesministerium für Bildung und
Forschung)
Hans Weber (Bayerisches Landesamt für Umwelt)
Sabine Würzler (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen)
Martina Zeller (Kiel Earth Institute, IFM-GEOMAR)

Konzept und redaktionelle Arbeit

Peter-Tobias Stoll
Wolfram Mauser
Michael Schulz
Bettina Höll

Herausgeber

Nationales Komitee für Global
Change Forschung
c/o Institut für Weltwirtschaft
Hindenburgufer 66
24105 Kiel

Tel.: +49 (0) 431 8814 411
Fax: +49 (0) 431 8814 500
Email: nkgcf@ifw-kiel.de
>> www.nkgcf.org <<

© German National Committee
on Global Change Research
(NKGCF), März 2010

ISBN 978-3-9813068-1-1

Layout

Wissenschaftliches Sekretariat des
NKGCF
(Joachim Steven, Ulrike Heine)

Herstellung

hansadruk und Verlags-GmbH
& Co KG

Bilder

Eyjafjörður (Cover)
Ostsee (S. 2)
Freudenberg (S. 5)
Bodensee (S. 9)
Küstenlandschaft Irland (S. 11)
www.clipdealer.de

Regionale Klimamodelle
- Potentiale, Grenzen und Perspektiven -

Vorwort

Regionale Klimamodelle versuchen – wie eine Art Lupe – auf der Grundlage bekannter globaler Klimamodelle für einzelne Regionen Daten mit hoher räumlicher Auflösung zu erzeugen. Regionale Klimamodelle stellen eine wichtige Ergänzung der globalen Modelle dar und werden sich in ihrer eigenständigen Bedeutung auf absehbare Zeit behaupten. In Deutschland wird an verschiedenen Orten mit unterschiedlichen Ansätzen und Methoden an solchen Modellen gearbeitet.

Es liegt auf der Hand, dass die regionale Klimamodellierung rasch auf großes Interesse seitens der Öffentlichkeit, des gesamten Spektrums der Umweltwissenschaften, von Politik und Verwaltung sowie der Wirtschaft gestoßen ist. Die Aussicht, Aussagen über die Entwicklung des Klimas in vertrauten geographischen Dimensionen zu gewinnen und damit die regionale Problematik zu veranschaulichen, hat zu diesem großen Interesse ebenso beigetragen wie die Erwartung, solche Daten den eigenen Forschungen, Planungen und Investitionsentscheidungen zugrunde legen zu können. Die durch ein beträchtliches Medienecho noch weiter geförderten Erwartungen haben sich im praktischen Umgang mit den Daten in Umweltforschung, Verwaltung und Wirtschaft in vielen Fällen allerdings nicht ohne weiteres erfüllt.

Regionale Klimaprojektionen müssen vielen unterschiedlichen Bedürfnissen aus den Bereichen der Politik, Wirtschaft und Gesellschaft gerecht werden. Die Ansprüche sind hoch und divers, weshalb mit den aktuellen Klimaprojektionen viele Fragestellungen (noch) nicht beantwortet werden können. Trotz großer Forschungsanstrengungen und voranschreitender Verbesserungen herrscht Ungewissheit über die Aussagekraft und Robustheit der Ergebnisse regionaler Klimasimulationen. Da regionale Klimafolgen- und Anpassungsforschung auf den Ergebnissen hochauflösender, aber mit Unsicherheiten behafteter Klimaprojektionen basiert, sind Nutzer aber auch Entscheidungsträger verunsichert hinsichtlich der Verwendung.

In Anbetracht eines zeitweilig intensiven, aber zum Teil bedenklich undifferenzierten Medienechos, und um einer Verunsicherung in den höchst unterschiedlichen Nutzerkreisen zuvorzukommen, hat das

Nationale Komitee für Global Change Forschung (NKGCF) zwei Rundgespräche mit den an der Modellentwicklung Beteiligten und potentiellen Nutzern regionaler Klimaprojektionen veranstaltet. Die Rundgespräche sollten im Interesse einer weiteren Entwicklung der regionalen Klimamodellierung und ihrer Verwendung zum Nutzen von Umweltforschung, Politik und Wirtschaft klären, was die regionale Klimamodellierung leisten kann und muss, und was sie zur weiteren Erforschung und zum gesellschaftlichen Umgang mit dem Klimawandel beitragen kann.

Das im Mai 2008 in Göttingen durchgeführte erste Rundgespräch förderte den Austausch der bisherigen Erfahrungen der Nutzer regionaler Klimaprojektionen und der Klimamodellentwickler. Es wurden Anforderungen und Forderungen seitens der Nutzer und Klimamodellentwickler formuliert, welche im zweiten Rundgespräch (Hamburg, Juni 2009) wieder aufgegriffen wurden. Der Schwerpunkt des zweiten Rundgesprächs lag auf der Diskussion des Umgangs mit der Unsicherheit regionaler Klimaprojektionen. Da in der Forschung zum globalen Wandel ein großer Bedarf an handlungsorientiertem Wissen besteht, dessen erfolgreiche Umsetzung eine fächerübergreifende Herangehensweise erfordert, wurden alle aufgekommene Fragestellungen aus einem inter- und transdisziplinären Blickwinkel betrachtet. Um dies zu erreichen, wurden neben Klimamodellentwicklern, Nutzer von Klimaprojektionen unterschiedlichster Forschungsbereiche (Naturwissenschaften, Sozialwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften), dem Ingenieurwesen und der Verwaltungsebene, auch Vertreter aus Klimaberatungseinrichtungen eingeladen.

Der Inhalt der vorliegenden Broschüre beruht auf den Präsentationen und Diskussionen der Rundgesprächsteilnehmer und gibt einen Einblick in die Thematik sowie Problematik. Zur Unterstützung der im Positionspapier (siehe Beilage) empfohlenen weiteren Vorgehensweise stellte das NKGCF bereits im März 2009 einen Antrag auf Rechenzeit im Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ), mit der Empfehlung weitere regionale Klimasimulationen der Forschung und Entwicklung frei zugänglich zu machen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1. Einführung	1
2. Möglichkeiten und Grenzen regionaler Klimamodelle D. Jacob, K. Keuler, H.-R. Knoche, F. Kreienkamp	3
3. Umgang mit der Unsicherheit regionaler Klimaprojektionen – Bias-Korrekturen: Pro und Kontra F. Kreienkamp, K. Keuler	5
4. Die Nutzer regionaler Klimamodelle: Eine Umfrage S. Kroll	7
5. Aktuelle Anwendungsmöglichkeiten regionaler Klimaprojektionen	
5.1 Hydrologie und Wasserwirtschaft A. Bardossy	9
5.2 Simulation der Küstengebiete A. Paul, M. Schulz	11
5.3 Modellierungen von Landnutzungssektoren J. Priess, D. Haase	13
5.4 Städte im Klimawandel - Simulationen zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen P. Becker, B. Früh, T. Fuchs, J.-D. Hessel, J. Namyslo, M. Roos, U. Wienert	15
5.5 Simulation der Luftqualität R. Forkel	17
5.6 Wirtschaftliche Entscheidungsprozesse G. Klepper	19
5.7 Unterstützung von gesellschaftlichem Handeln durch die Ergebnisse regionaler Klimamodelle A. Ernst	21
6. Handeln unter Unsicherheit als politische und rechtliche Herausforderung C. Görg, P.-T. Stoll	23
7. Identifikation und Möglichkeiten zur Verringerung von Unsicherheiten D. Jacob, W. Mauser	25
8. Literaturverzeichnis	28
9. Glossar	30

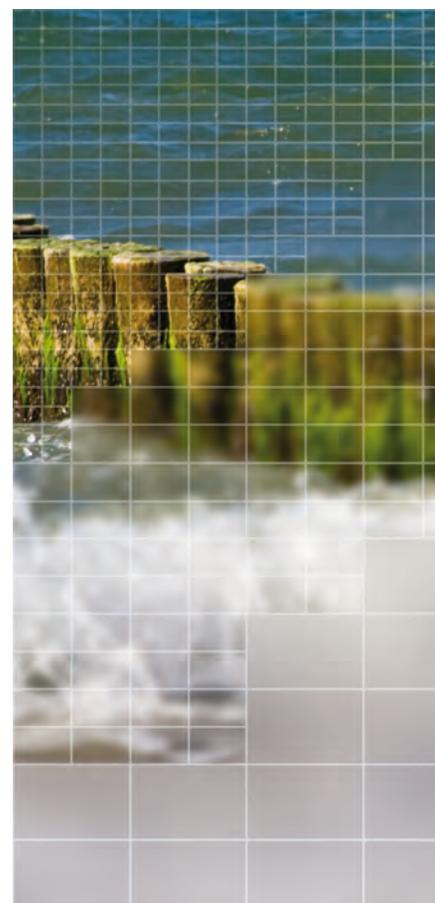
1. Einführung

Um sich vorsorglich an den Klimawandel anpassen zu können, sind Projektionen über die möglichen Auswirkungen und Folgen des Klimawandels erforderlich. Globale Klimamodelle (GCM) leisten Projektionen eines Gebietes im Gitterabstand von etwa 250 x 250 km² bis zu einer maximalen räumlichen Auflösung von derzeit 100 km². Jedoch wurde bereits im Dritten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) darauf hingewiesen, dass sich zukünftig insbesondere die regionalen Klimamuster ändern werden. Dies beinhaltet eine langfristige Änderung der Summen an Niederschlägen, Temperaturen, Windverhältnissen, den Salzgehalten der Ozeane, aber auch eine Veränderung der Intensität und Häufigkeit regionaler (und lokaler) Extremereignisse. Globale Klimamodelle können diese regionalen Klimamuster nicht darstellen, da der Gitterabstand zu grob ist und deshalb kleinere, jedoch für Regionen relevante Strukturen (wie Gebirgszüge, urbane Lebensräume, Eisschilde), nicht genau genug erfasst werden können.

Regionale Klimamodelle sind daher von großer Bedeutung, um für Regionen entscheidungsträgerrelevante Ergebnisse zu liefern. Aussagen über die Veränderung der zukünftigen Anzahl aufeinander folgender Frosttage, Hitzetage oder die Wasserverfügbarkeit einer Region können als Hilfe für zukünftige Entscheidungen unterschiedlicher Sektoren dienen. Verändern sich beispielsweise die Niederschlagssummen der Jahreszeiten, könnten hinsichtlich der Trinkwasserversorgung rechtzeitig Vorsorgemaßnahmen getroffen bzw. die Bevölkerung informiert werden. Auch Wirtschaftszweige wie die Containerschifffahrt oder Landwirtschaft einer Region können von Wasserknappheit betroffen sein. Folglich können auf

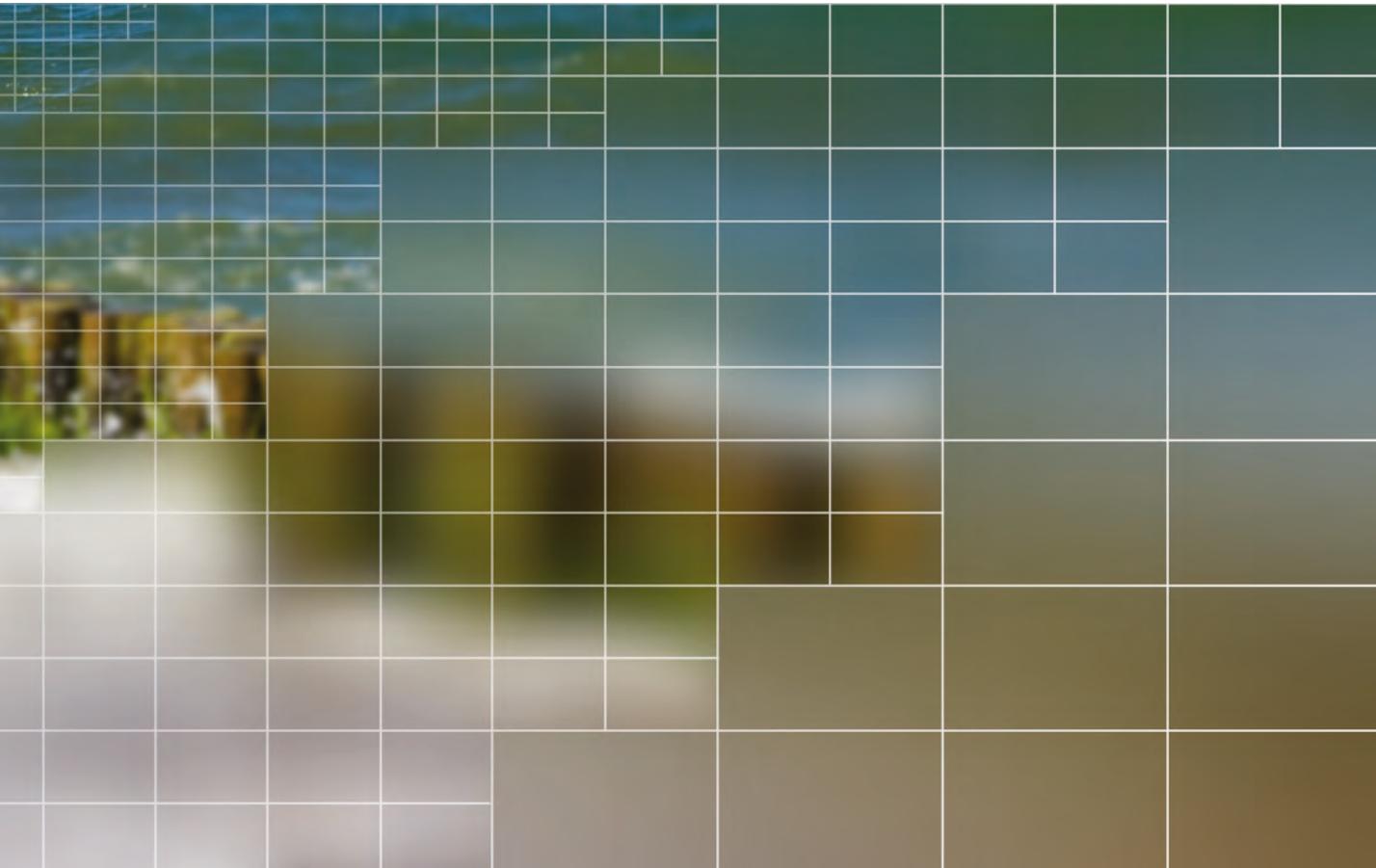
Basis regionaler Klimasimulationen vorsorglich Alternativen erarbeitet und langfristige Investitionen überdacht werden.

Zur Erstellung der für Deutschland notwendigen regionalen Klimaprojektionen vergab unter anderem das Umweltbundesamt den Auftrag zur Berechnung dreier regionaler Simulationen mit Hilfe unterschiedlicher Modellierungsverfahren (dynamische, statistische Verfahren). Die Klimaprojektionen wurden online zur Verfügung gestellt und fanden in der Öffentlichkeit großes Interesse.



Die regionalen Klimaprojektionen sind nach dem aktuellen Stand des Wissens jedoch mit hohen Unsicherheiten behaftet und liefern teilweise unplausible Ergebnisse. Dies kann durch die inhärente stochastische Eigenschaft des Klimasystems hervorgerufen werden oder an der Auswahl der exogenen Treiber der globalen Modelle liegen. Denn unabhängig vom angewandten Verfahren (statistisch oder dynamisch) sind alle regionalen Modelle von den Ergebnissen der globalen Klimamodelle abhängig. Die aktuellen Ergebnisse der regionalen Klimamodelle stellen daher nur eine exemplarische Simulation mit meist unbekannter Eintrittswahrscheinlichkeit dar.

Die Broschüre fasst in den folgenden Kapiteln den aktuellen Stand der Forschung zusammen, welcher in Zusammenarbeit von Modellentwicklern mit Anwendern von Folge-Modellen unterschiedlichster betroffener Fachbereiche erstellt wurde. Neben der Auswertung des Nutzerverhaltens regionaler Klimamodelle werden die politischen und rechtlichen Herausforderungen sowie der Umgang mit den Unsicherheiten regionaler Klimaprojektionen im Hinblick auf statistische Nachbearbeitungsverfahren und deren Möglichkeiten zur Verringerung diskutiert. Im Positionspapier (siehe Beilage) wird abschließend Stellung zum Thema bezogen und Handlungsmöglichkeiten eröffnet.



2. Möglichkeiten und Grenzen regionaler Klimamodelle

Gekoppelte globale Atmosphäre-Ozean-Modelle sind zurzeit noch nicht in der Lage, regionale Strukturen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu modellieren. Somit entsteht ein großer Bedarf an der Anwendung dynamischer und statistischer Methoden, um die Ergebnisse globaler Klimamodelle detailliert in einzelnen Regionen darzustellen. Generell handelt es sich bei der dynamischen und der statistischen Modellierung um zwei grundlegend verschiedene Ansätze, die nur sehr schwer miteinander zu vergleichen sind. Die statistische Methode verwendet grundsätzlich Beobachtungsdaten lokaler Messstationen, um die tatsächlich beobachteten Verhältnisse einer Region möglichst detailliert reproduzieren zu können. Bei der dynamischen Methode wird hingegen versucht, die beobachteten Zustände über die Nachbildung physikalisch konsistenter Prozesse zu generieren, ohne dass dem Modell die tatsächlichen Beobachtungsreihen bekannt sind bzw. in die Erstellung einfließen. Hinzu kommt, dass alle dynamischen regionalen Klimamodelle dem gleichen Ansatz folgen. Bei den statistischen Modellen hingegen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher methodischer Ansätze mit ihren individuellen Stärken und Schwächen, die einen generellen Vergleich der Vor- und Nachteile beider Methoden nicht zulassen. Somit wird deutlich, dass die Aussagen unterschiedlicher numerischer oder statistischer regionaler Klimamodelle häufig nicht einheitlich sind. Daher ist zur Bewertung der Bandbreite der zu erwartenden Klimaänderungen für Deutschland und insbesondere einzelner Regionen neben vertieftem Fachwissen ein möglichst umfassendes und ausgewogenes Ensemble von regionalen Klimaprojektionen notwendig.

Dynamische regionale Klimamodellierung

Klaus Keuler (*Brandenburgische Technische Universität Cottbus*),
Hans-Richard Knoche (*Karlsruher Institut für Technologie – IMK-IFU*),
Daniela Jacob (*Max-Planck-Institut für Meteorologie*)

Bei der dynamischen Modellierung werden regionale Vorhersagemodelle verwendet, die auf physikalischen Grundgleichungen und parametrisierten Prozessbeschreibungen basieren. Die heutigen Modelle erfassen die Abläufe in Atmosphäre, Boden und teilweise auch in Ozeanen und Binnenseen in einem horizontal begrenzten Gebietsausschnitt mit einer räumlichen Auflösung zwischen derzeit ca. 7 und 50 km. Die Modelle sind in der Lage, den regionalen Witterungsverlauf kontinuierlich über Zeiträume von mehr als einhundert Jahren zu simulieren. Allerdings benötigen diese Modelle hierzu die Vorgabe zeitabhängiger seitlicher Rand-

werte, die dem regionalen Modell die Entwicklung in den unmittelbar benachbarten Bereichen außerhalb des betrachteten Teilgebietes vorgeben. Diese Randdaten werden aus Simulationen eines übergeordneten globalen Klimamodells ermittelt.

Die regionalen Simulationen liefern in der Regel die relevanten physikalischen Größen in Atmosphäre und Boden in stündlicher Auflösung. Daraus lassen sich Tagesgänge, Tagesmittel, Monatsmittel, Jahresgänge, mehrjährige Klimamittel, zwischenjährliche Schwankungen sowie zeitliche und räumliche Varianzen einer Vielzahl von Klimakennzahlen ableiten.

Statistische regionale Klimamodellierung

Frank Kreienkamp

(Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH)

Auch die Häufigkeit bestimmter Einzelereignisse (Extremereignisse) und deren zeitliche Veränderung können so ermittelt werden.

Die Ergebnisse sind abhängig von der jeweiligen Modellformulierung und -komplexität, den verwendeten Näherungen, der räumlichen Auflösung und den bereits erwähnten Randwerten. Bei der Rekonstruktion von Klimazuständen aus der Vergangenheit treten in der Regel Abweichungen von klimatologischen Beobachtungen auf, deren Größe räumlich und jahreszeitlich variieren kann. Zudem stoßen die verfügbaren Modelle bei Auflösung im Kilometerbereich derzeit sowohl technisch (unzureichende Computerleistung) als auch physikalisch (z. B. unangepasste Parametrisierungen) an ihre Grenzen. Auf dieser sehr hohen horizontalen Auflösung ergeben sich stärkere räumliche Inhomogenitäten, die von den derzeit verwendeten Parametrisierungen nicht adäquat erfasst werden können und Modellannahmen zunehmend verletzen.

Die Modelle bedürfen daher auch weiterhin einer stetigen Überprüfung und Weiterentwicklung. Das gilt insbesondere für die Wiedergabe von Tagesgängen, die Kopplung verschiedener Systemkomponenten (z. B. Biosphäre-Atmosphäre, Wolken-Strahlung, Verdunstung-Wasserdampftransport) und die Erfassung extremer Einzelereignisse (Starkniederschläge, Tageshöchst- und -tiefsttemperaturen, Windspitzen). Trotz der erwähnten Defizite stellen die Modelle ein unverzichtbares Hilfsmittel zur Verbesserung des physikalischen Prozessverständnisses dar. Darüber hinaus ermöglichen sie quantitative Regionen bezogene Aussagen (Angaben) zu künftigen klimatologischen Veränderungen (Trends) und zu prinzipiellen Auswirkungen von Eingriffen in das Klimasystem (Sensitivitätsstudien).

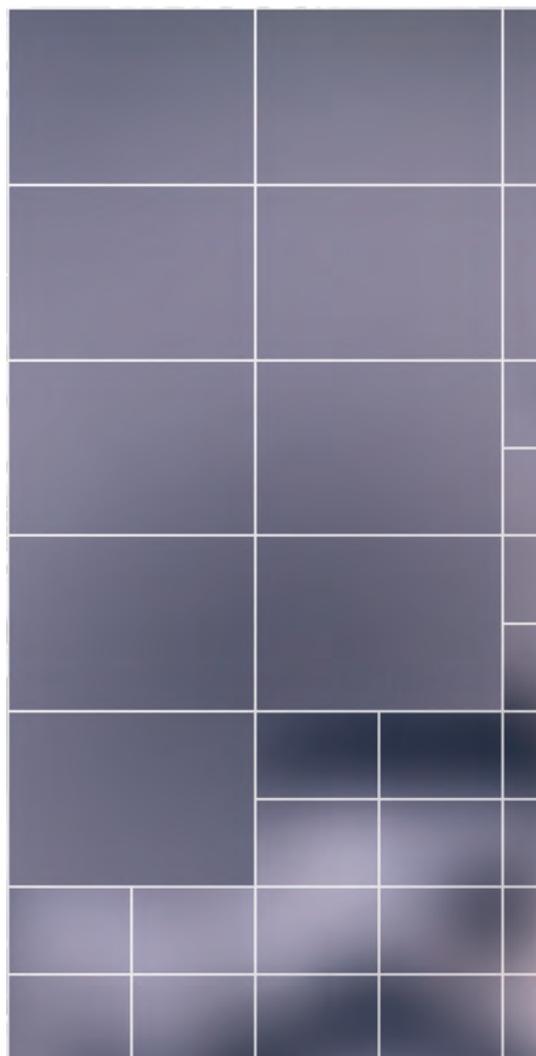
Diese Methoden basieren auf der Analyse des statistischen Zusammenhanges zwischen beobachteten großräumigen atmosphärischen Strukturen und dem lokalen Wettergeschehen. Wenn in erster Näherung postuliert wird, dass diese Zusammenhänge auch in Zukunft gültig bleiben, so muss der wesentliche Grund für eine modellierte lokale Klimaänderung in der sich ändernden Häufigkeit und Ausprägung großräumiger meteorologischer Strukturen mit den daraus resultierenden lokalen Folgen gesehen werden. Von großer Bedeutung für die Güte der statistischen regionalen Klimamodellierung ist daher die Fähigkeit der regionalen und globalen dynamischen Modelle, die großräumige Zirkulation und die Rückkopplungen mit der Land- und Wasseroberfläche treffend wiederzugeben. Statistische Methoden sind für sich allein nicht in der Lage, sich ändernde regionale Klimate zu erzeugen. Sie benötigen immer die Vorgaben von globalen dynamischen Klimamodellen – optional zusätzlich mit hochauflösenden dynamischen Modellen regionalisiert. Treten großräumige Änderungen der klimatischen Verhältnisse auf, beispielsweise durch eine sich ändernde Albedo, so können diese Änderungen jedoch über entsprechende Parametrisierungen aus den genutzten Vorgaben der globalen und regionalen dynamischen Modelle extrahiert und in ein sich änderndes regionales Klimasignal umgesetzt werden.

Statistische Methoden erzeugen systembedingt Klimaprojektionen mit geringem systematischem Fehler. Durch den geringen Rechenaufwand sind statistische Methoden in der Lage eine Vielzahl an Realisierungen zu erstellen. Nachteilig ist, dass nicht gewährleistet werden kann, dass die für eine Referenzperiode ermittelten Parametrisierungen auch unter veränderten Klimabedingungen einen möglichen Modellfehler in gleicher Weise geeignet kompensieren.

3. Umgang mit der Unsicherheit regionaler Klimaprojektionen – Bias-Korrekturen: Pro und Kontra

Frank Kreienkamp (*Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH*),
Klaus Keuler (*Brandenburgische Technische Universität Cottbus*)

Die statistische Nachbearbeitung von Ergebnissen regionaler Klimasimulationen ist eine häufig angewandte Methode, systematische Abweichungen zu identifizieren und zu korrigieren. Insbesondere die Bias-Korrektur einzelner meteorologischer Elemente ist eine verbreitete Methodik dies zu erreichen. So werden beispielsweise durch Bias-Korrektur die modellierten Temperaturen oder Niederschläge an die mittleren beobachteten Verhältnisse angepasst. Für die Nutzung eines einzelnen meteorologischen Elements ist dieses meist unproblematisch. Sollen jedoch mehrere Elemente in Kombination, zum Beispiel in einem Wirkmodell, durch die Bias-Korrektur „nutzbar“ gemacht werden, so geht sehr oft die physikalische Konsistenz verloren. Eine solche Konsistenz, etwa in Form der Energie- und Massenerhaltung, ist jedoch für viele auf regionalisierten Klimasimulationen aufsetzenden Wirkmodelle von fundamentaler Bedeutung. Dafür sind Verfahren notwendig, die die physikalische Konsistenz bestmöglichst erhalten. Außerdem sind die Korrekturen räumlich und zeitlich nicht konstant, also nicht universell anwendbar. Somit kann nicht gewährleistet werden, dass die für eine Referenzperiode ermittelten Korrekturwerte auch unter veränderten Klimabedingungen einen möglichen Modellfehler in gleicher Weise geeignet kompensieren. Da es jedoch keine Möglichkeit gibt, Modellfehler zu prognostizieren, ist die Verwendung von Korrekturfeldern die bestmögliche Näherung an die Realität. Um die mit den Bias-Korrekturverfahren verbundenen Unsicherheiten und ihren möglichen Einfluss auf die Klimasensitivität der Modellsysteme zu untersuchen, sind weitere Forschungen auf diesem Gebiet (z. B. im Bereich der Ensemble-Simulationen) unbedingt notwendig.





4. Die Nutzer regionaler Klimamodelle: Eine Umfrage

Stefan Kroll (*Max-Planck-Institut für europäische Rechtsgeschichte*)

Bisher ist kaum klar geworden, welche Bereiche und Branchen ein Interesse an regionalen Klimamodellen haben und wie sie mit deren Ergebnissen umgehen. Ein Hinweis auf das bestehende Interesse an den Modellen ist die große Zahl an Abrufen der Modelldaten, die frei zum Download (<http://cera-www.dkrz.de/>) zur Verfügung stehen. Um erste Anhaltspunkte über Interessenten, Hintergründe, Beweggründe und Erfahrungen mit der Nutzung regionaler Klimamodelle zu erhalten, wurden, mit freundlicher Unterstützung des Umweltbundesamtes, einzelne Personen und Institutionen befragt, die Modelldaten heruntergeladen haben. Die im Frühjahr 2008 durchgeführte Umfrage kann für sich zwar keine Repräsentativität in Anspruch nehmen, zeigt jedoch in einem ersten Überblick wesentliche Tendenzen auf.

In der Diskussion um die Unsicherheit der Ergebnisse regionaler Klimamodelle sind die Fragen, welche Institutionen und Personen die Modelle nutzen, welche Zwecke sie damit verbinden und welche Schlussfolgerungen und Entscheidungen sie auf Grundlage ihrer Ergebnisse treffen, von zentraler Bedeutung.

Eine Evaluation der Nutzerperspektive birgt das Potential, Hinweise für die Weiterentwicklung und Modifizierung der Klimamodelle zu erhalten. Darüber hinaus, und für die Bewertung der sozialen Relevanz der Modelle entscheidend, ergeben sich Informationen darüber, inwieweit die Nutzer Unsicherheitspotentiale der Modelle sensibel einschätzen und in ihrem Umgang mit den Modelldaten berücksichtigen. Ganz grundsätzlich stellt sich aus gesellschaftswissenschaftlicher Sicht die Frage, ob die Ergebnisse regionaler Klimamodelle von Wissenschaftlern (aus den Natur- und Ingenieur-

wissenschaften) und Entscheidungsträgern als entscheidungsrelevant angesehen werden.

In Bezug auf die im vorhergehenden Beitrag erläuterte Unterscheidung dynamischer und statistischer Klimamodelle verfügt nur ein Teil der Nutzer über klare Präferenzen. Während die wissenschaftlichen Nutzer überwiegend mit Blick auf ihre eigene Fragestellung einen der beiden Ansätze oder beide wählen, ist die Wahl der Entscheidungsträger rein angebotsorientiert. Sie verwenden regelmäßig beide Modelle. Dies deutet darauf hin, dass regionale Klimamodelle, unabhängig von ihren technischen Eigenschaften und der Güte ihrer Ergebnisse, bereits jetzt eine gesellschaftspolitische Einflussgröße darstellen. Zugleich bedeutet dies, dass die Modellentwickler sich ihrer Verantwortung bewusst sein müssen, dass die von ihnen verbreiteten Daten von einem Teil der Nutzer unmittelbar verwendet werden.

Das Interesse der Modellnutzer gilt neben den möglichen Folgen des Klimawandels im Allgemeinen hydrologischen Fragestellungen zur Grundwasserdynamik, Hochwasserereignissen oder Niederschlagsveränderungen. Die Anwendungsfelder der Modelle lassen sich durch die in der Umfrage erhobenen Daten nur sehr grob bestimmen. Festzustellen ist ein gesteigertes Interesse der Land-, Energie- und Bauwirtschaft, aber ein eher marginales Interesse der Tourismusbranche. Auffällig ist, dass kein Unternehmen der Versicherungswirtschaft sich als Nutzer der Modelle zu erkennen gegeben hat.

Die Aussagekraft und die Anwendungsmöglichkeiten der regionalen Klimamodelle werden von den Nutzern differenziert eingeschätzt. Entweder haben sie konkrete Unsicherheiten der Modelle im Hinblick auf ihre eigenen Fragestellungen

identifiziert, oder aber, sie sind sich im Allgemeinen der Unsicherheiten von Klimamodellierungen bewusst und schätzen daher die Aussagekraft der Modelle entsprechend vorsichtig ein. Insgesamt sehen die Modellnutzer die Notwendigkeit, dass die Unsicherheiten der regionalen Klimamodelle weiter erforscht werden und Fachwissenschaftler ihre Einschätzungen hierzu zur Verfügung stellen. Diese Forderung ist bemerkenswert, da die Umfrageergebnisse ergaben, dass die Nutzer die Aussagekraft der Modelle überwiegend selbst bewerteten und nur in begrenztem Umfang eine Validierung durch Dritte erfolgte.

Die Schlussfolgerungen der Nutzer der Modelle lassen sich in vier Gruppen zusammenfassen. In erster Linie verwenden die Nutzer die Daten als Eingangsdaten für nutzerspezifische Wirkmodelle. Zweitens sehen sie in der Modellvalidierung die Hauptschlussfolgerung, die von ihnen aus den Daten gezogen wurde. Drittens interpretieren Nutzer die Modelldaten in Hinblick auf ihre eigenen Fragestellungen. Eine vierte Gruppe gibt an, bisher keine Schlussfolgerungen aus den Daten gezogen zu haben.

Was Entscheidungen betrifft, die von den Modellnutzern auf Grundlage der Daten getroffen wurden, so ist eine eindeutige Tendenz festzustellen. Bisher stellen die Modelldaten für die Nutzer überwiegend keine entscheidungsrelevante Größe dar. Eine deutliche Mehrheit der Befragten gab an, auf Grundlage der Daten noch keine Entscheidungen getroffen bzw. keine neuen Produkte entwickelt zu haben. Auch Organisationsstrukturen und Verfahren wurden nur in geringem Maße geändert oder neu geschaffen.

Warum dies so ist, kann mit Rückgriff auf die hier durchgeführte Befragung nicht abschließend beantwortet werden. Es ergeben sich aller-

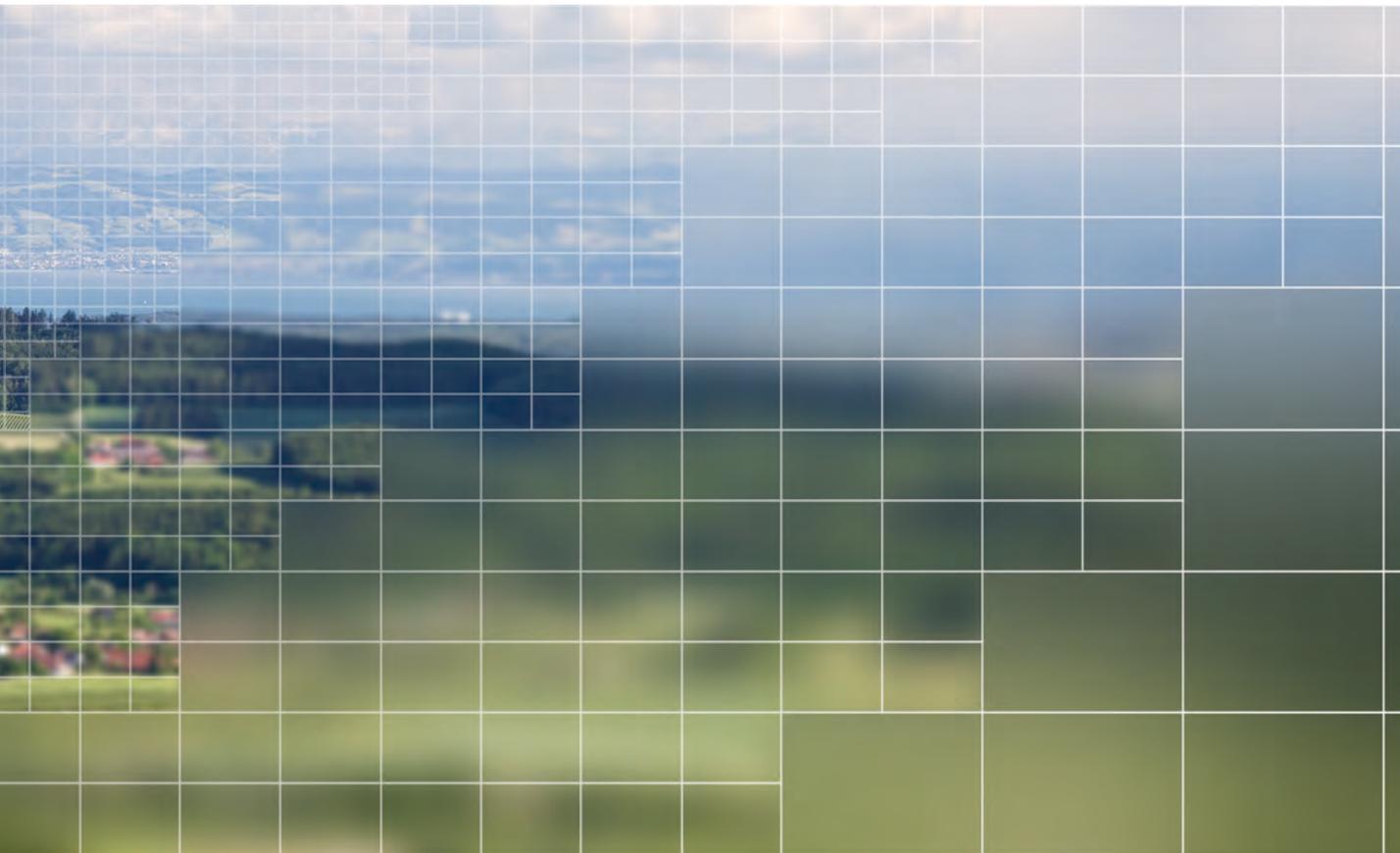
dings Anhaltspunkte, die als Anregung für weitere Nutzerevaluationen dienen könnten. Einerseits sind es in der Tat die von den Nutzern realistisch eingeschätzten Unsicherheitspotentiale, welche die Relevanz der regionalen Klimamodelle in Entscheidungsprozessen senken. Andererseits bestehen nicht selten Probleme bei der Verknüpfung der Modelldaten mit den fachspezifischen Fragestellungen, Projekten und Wirkmodellen der Nutzer. Eine Intensivierung der Kommunikation zwischen Modellentwicklern und -nutzern könnte diesen Aspekt bereits minimieren.

In Bezug auf die Wirkung der Unsicherheit der regionalen Klimamodelle erscheint es notwendig, eine stärker nach Nutzergruppen differenzierte Untersuchung durchzuführen. Während die naturwissenschaftlichen Nutzer sich zum Teil zu eigenen Einschätzungen in der Lage sehen, fordern die stärker an der Anwendung orientierten Nutzer (Ingenieure und Entscheidungsträger) transparente Beschreibungen der Fachwissenschaften. Daher wäre es zu empfehlen, nutzergruppenspezifische Informationssets zur Verfügung zu stellen.

Im Hinblick darauf, wie Entscheidungsträger mit den Modelldaten umgehen, sind darüber hinaus Dynamiken politischer Prozesse stärker zu berücksichtigen. Wie bereits betont wurde, sind die Modelle bereits jetzt als gesellschaftspolitische Einflussgrößen zu betrachten, ganz einfach durch ihre Existenz und unabhängig von der Güte ihrer Ergebnisse. Dies belegt nicht zuletzt die große Gruppe der Entscheidungsträger unter den Modellnutzern. Zu klären wäre nun, wie das große Interesse der Entscheider mit dem Ausbleiben von Entscheidungen zusammenpasst.

5.1 Hydrologie und Wasserwirtschaft

András Bárdossy (*Universität Stuttgart*)



Der Wasserkreislauf ist ein zentraler Teil des Klimasystems und ist deshalb von einer Klimaänderung stark betroffen. Regional ist das hydrologische System in einem quasi-Gleichgewicht – kleine Änderungen können zu großen Folgen führen.

Es gibt grundsätzlich zwei Vorgehensweisen bei der Anwendung der Ergebnisse regionaler Klimamodelle (RCM) für die Bestimmung der Folgen einer Klimaänderung.

Der erste Weg ist:

- 1 Aufstellung eines hydrologischen Modells für das zu beurteilende Problem.
- 2 Anwendung des Modells mit dem Kontrolllauf des RCMs.
- 3 Anwendung des Modells mit dem Resultat des RCMs für das geänderte Klima.
- 4 Vergleich der Ergebnisse aus Schritt 2 und 3 und Übertragung auf die Beobachtungen.

Das Problem bei dieser Vorgehensweise ist, dass die regionalen Klimamodelle für das Ist-Klima systematische Fehler (zeitlich-räumlich und in der Variabilität) aufweisen. Das nicht-lineare Verhalten des Wasserkreislaufs kann dann diesen Fehler unkontrollierbar modifizieren und damit das Klimasignal verfälschen. Zum Beispiel die systematische Unterschätzung des Niederschlags kann ein energie-limitiertes hydrologisches System als wasserlimitiert erscheinen lassen. Dadurch verändert sich die Reaktion auf eine Niederschlags-erhöhung vollständig.

Die zweite Vorgehensweise benötigt eine Korrektur der Ergebnisse regionaler Klimamodelle (Ist-Klima und zukünftiges Klima) vor der hydrologischen Modellierung:

- 1 Aufstellung eines hydrologischen Modells für das zu beurteilende Problem.
- 2 Korrektur der systematischen Fehler des RCM Resultats für das Ist-Klima (statistische Nachbearbeitungsverfahren, Bias-Korrekturen).
- 3 Anwendung des Modells für die Ergebnisse aus Schritt 2.
- 4 Korrektur des RCM Resultats für das zukünftige Klima (wie in Schritt 2).
- 5 Anwendung des Modells für das zukünftige Klima (Ergebnis aus Schritt 4).
- 6 Vergleich der Ergebnisse aus Schritt 3 und 5.

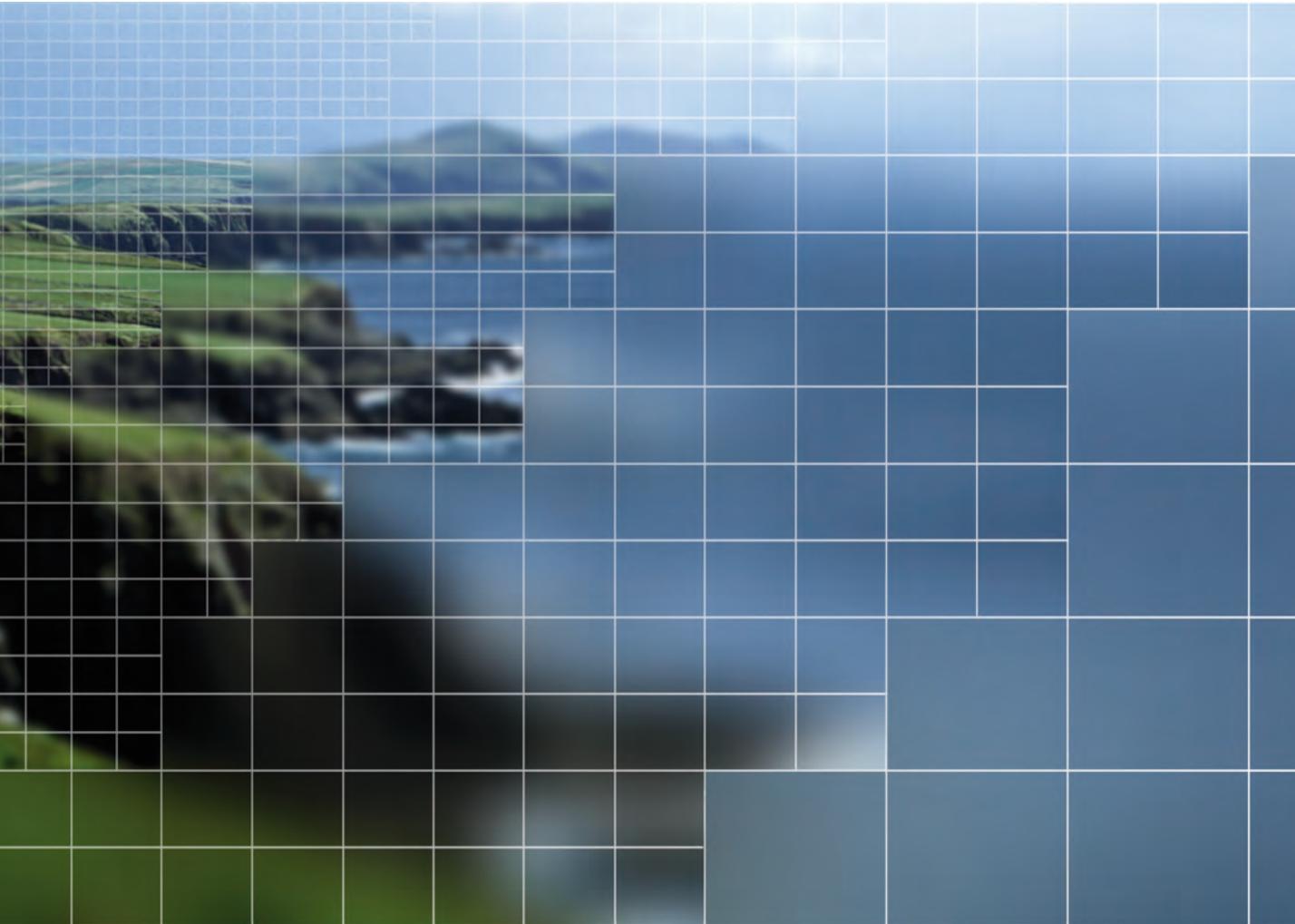
Problematisch bei diesem Verfahren ist die sinnvolle Korrektur der zukünftigen Ergebnisse regionaler Klimamodelle.

Um die hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Folgen quantifizieren zu können, muss neben der beschriebenen Korrektur ebenfalls die Signalfähigkeit der Modelle geprüft werden. Viele Modellansätze sind für ein stationäres Klima entwickelt worden und können keine realistischen Reaktionen auf Änderungen bestimmen. Physikalische Plausibilitätskontrollen und systematische Untersuchungen über klimatisch unterschiedliche Zeiträume sind notwendig um belastbare Ergebnisse zu erreichen. Diese können mittels Vergleichsrechnungen für vergangene kalte, warme und trockene, nasse Zeitperioden durchgeführt werden.

5.2 Simulation der Küstengebiete

André Paul und Michael Schulz

(MARUM -Zentrum für marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen)



Der Ozean nimmt aktiv am Klimageschehen teil. Auf Grund seines langen „Gedächtnisses“ für Klimaanomalien spielt er auf der Zeitskala von Jahren bis Jahrzehnten eine wichtige Rolle in Klimaschwankungen wie ENSO (El Niño-Südliche Oszillation) im pazifischen Raum und NAO (Nordatlantische Oszillation) im nordatlantischen Raum. Entsprechend üben Nord- und Ostsee sowie das Mittelmeer einen großen Einfluss auf das Klima in Mitteleuropa aus.

Beispielsweise werden für die kommenden Jahrzehnte nicht nur weitreichende Änderungen in den regionalen Temperatur- und Niederschlagsverteilungen erwartet, sondern auch im regionalen Windfeld. Daher wird vermutlich die Häufigkeit von Sturmfluten an der Nordseeküste zunehmen. Auch die Stärke und Häufigkeit der sporadischen Salzwassereinbrüche in die Ostsee können sich ändern. Diese sind unabdingbar für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr und damit essentiell für das Ökosystem der Ostsee.

Einem tiefgreifenden Wandel sind auch die Küsten von Schwellen- und Entwicklungsländern unterworfen. Ein Beispiel hierfür sind Änderungen im westafrikanischen Küstenauftriebsregime, von dem Nährstoff- und Fischreichtum in engster Weise abhängig sind.

Um die regionale Klimaentwicklung der Küstengebiete und maritim beeinflusster Regionen abschätzen zu können, sollten also regionale Klimamodelle eingesetzt werden, in denen die Kopplung atmosphärischer und ozeanischer Dynamik ausdrücklich berücksichtigt wird.

Für Europa wurden bereits regionale Klimamodelle verwendet, um Projektionen der zukünftigen Klima- und Umweltbedingungen zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde bislang aber nur selten ein regionales Ozeanmodell an ein regionales Atmosphärenmodell gekoppelt. Dabei haben gekoppelte regionale Klimamodelle den großen Vorteil, dass sie auf zukünftige Änderungen der klimatischen Randbedingungen mit einer dynamischen Entwicklung der Meeresoberflächentemperatur und der Meeresströmungen reagieren können.

Dringenden Handlungsbedarf gibt es im Hinblick auf folgende Fragen: Inwieweit führt ein gekoppeltes regionales Klimamodell tatsächlich zu einer verbesserten Darstellung von historischen Extremereignissen (Stürme, Sturmfluten, Starkregenfälle) an den Küsten von Nord- und Ostsee? Lassen sich mit einem gekoppelten regionalen Klimamodell die operationellen Projektionen klimatischer und ökologischer Bedingungen in den Küstengebieten auf Zeitskalen von Monaten bis zu einigen Jahren entscheidend verbessern? Welche Auswirkungen haben zukünftige Änderungen der Sturmhäufigkeit und -stärke auf das Auftreten von Sturmfluten, den Sedimenttransport im Küstenbereich (insbesondere die Sedimentumlagerung im Bereich der Nordseeinseln) und damit den Küstenschutz?

5.3 Modellierungen von Landnutzungssektoren

Jörg Priess und Dagmar Haase (*Helmholtz Zentrum für Umweltforschung-UFZ*)

Regionale Landnutzungsänderungen wurden und werden angetrieben von einer Reihe sehr unterschiedlicher Faktoren. Sie umfassen, mit zum Teil sehr unterschiedlicher Gewichtung, Demographie, Lebensstile, Wirtschaft und Klima. Für die Abschätzung der Auswirkungen der Klimakomponente, die praktisch alle gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Sektoren beeinflusst, sind Ergebnisse aus regionalen Klimamodellen unverzichtbar. Die Mehrzahl der deutschen Bundesländer lässt seit einigen Jahren die Auswirkungen des Klimawandels auf wichtige Landnutzungssektoren erforschen (Agrar-, Weide- und Forstflächen, Siedlungs-, Industrie- und Gewerbeflächen, Verkehrsnetze, Schutz- und Feuchtgebiete usw.; wie im integrierten Klimaschutzprogramm der hessischen Landesregierung (INKLIM 2012)). Mit der Nutzung regionaler Klimamodelle in Projekten zur Klimafolgenabschätzung zielen beteiligte (Landes-)Behörden auf die Abschätzung der unter Umständen notwendigen Klimaanpassungsmaßnahmen ab (wie im Bereich der Stadtplanung, Gesundheitswesen, Wasserver- und -entsorgung etc.). Inwieweit auf Grundlage der Ergebnisse bereits Entscheidungen getroffen wurden ist unklar (siehe Kapitel 4).

Landnutzungsänderungen werden mit sehr unterschiedlichen Modellansätzen simuliert, die aber unabhängig vom methodischen Ansatz zunehmend versuchen, die wichtigen Rückkopplungsmechanismen zwischen den gesellschaftlichen und den Umweltkomponenten von Landsystemen zu berücksichtigen (Schaldach und Priess (2008)). Im Kontext Klimawandel und regionale Klimasimulationen sind wichtige Zusammenhänge zum Beispiel

- der Einfluss des Wetters/Klimas auf die Produktivität bzw. Nutzungsmöglichkeiten von landwirt-

schaftlich und forstlich genutzten Flächen, oder damit in engem Zusammenhang stehend die Frage,

- ob ausreichend Wasser für alle konkurrierenden Landnutzungssektoren zur nachhaltigen Nutzung zur Verfügung steht (Landwirtschaft, Industrie, Energie, Haushalte, Vegetation, Feuchtgebiete), oder
- inwieweit der Klimawandel die Lebensqualität und Nutzung urbaner Räume und/oder Verkehrsnetze beeinflusst (rural-urbane Migration, Handel und Industrie, Naherholung und Tourismus usw.).

Wie die genannten Beispiele nahe legen, ergeben sich aus dem Landnutzungskontext sehr unterschiedliche Anforderungen an regionale Klimamodelle. Im Folgenden werden aus bisherigen Arbeiten bekannte Anforderungen unterschiedlicher Nutzergruppen (Ministerien, Behörden, Kommunen, Verbände, NGOs, Interessengruppen) soweit wie möglich mit berücksichtigt. Landnutzungssektoren werden in regionalen Studien oft in 1 – 10 km Auflösung simuliert. Klimadaten mit hoher Auflösung sind besonders für Untersuchungen in urbanen Gebieten notwendig; für viele regionale Landnutzungsstudien ist hingegen eine Auflösung von 10 km oft ausreichend. Jedoch stehen bislang kaum oder gar keine Klimadaten in entsprechender räumlicher Auflösung zur Verfügung.

Im Landnutzungskontext verwendete Ertrags- bzw. Pflanzenwachstumsmodelle rechnen typischerweise in Tages- bzw. Monatsschritten, so dass die zeitliche Auflösung der Klimamodelle meist mehr als ausreicht. Ein generelles Problem entsteht bei oft benötigten Vergleichen historischer mit zukünftigen Zeiträumen (z. B. Produktivität von Feldfrüchten, Wasserbedarf in Sektor X,

Eignung für Landnutzungstyp Y), für die eine Korrektur der systematischen Fehler unerlässlich ist (siehe Kapitel 3), da prozessbasierte Boden-, Vegetations- oder Ertragsmodelle sehr sensitiv auf Temperatur-, Niederschlags- und/oder Strahlungsänderungen reagieren.

Die Zeiträume bzw. Perioden, welche für verschiedene Nutzergruppen in Landnutzungsfragen relevant sind, variieren in Abhängigkeit von Anwendungsbereichen bzw. Planungshorizonten erheblich. Während von einem Großteil der Nutzer Aussagen bis 2050 als hinreichend betrachtet werden (z. B. sind für den urbanen Bereich kürzere Zeiträume ausreichend, da die Halbwertszeiten der Kenntnisse von beispielsweise Lebensstilen, sozialer Segregation oder gruppenspezifischer Vulnerabilität gering und deren Dynamiken hoch sind), sind andere Nutzergruppen auch an Abschätzungen über das Jahr 2100 hinaus interessiert (Wiederaufforstung nach Kyrill, allg. Waldumbau, langlebige Sonderkulturen wie Weinbau).

Da Klimaveränderungen nicht als gleichförmiger Trend verlaufen, sind für die meisten Studien Endpunktbetrachtungen nicht ausreichend, sondern es werden von den Nutzern aus Wissenschaft und Praxis mehrere Zeitscheiben bzw. transiente Berechnungen der Klimaveränderungen benötigt. Gerade in Städten, wo die Folgen von Klimaveränderungen mit anderen Dynamiken (wie demographischer Wandel, selektive Armut oder Verarmung) zusammenfallen und eher als kumulierter Effekt auftreten, ist eine transiente Berechnung für das Erkennen von so genannten „tipping points“ (bezeichnet Punkte oder Phasen fundamentaler/irreversibler Systemänderungen (Ball (2004), Nicolis und Prigogine (1999), Gladwell (2000)) unerlässlich.

Für viele Fragestellungen im Zusammenhang mit landwirtschaftlicher, wie auch urbaner oder touristischer Nutzung, ist die Analyse von Extremwerten von großer Bedeutung (im Wesentlichen Temperatur und Niederschlag, für Städte evtl. auch Evapotranspiration). Gerade alte Menschen – welche einen steigenden Anteil der Stadtbevölkerung weltweit ausmachen – transpirieren weniger, weswegen sich Hitze und geringe Luftfeuchte deutlich auf die Mortalitätsrate auswirken können. Für Studien in Bezug auf urbane Gesundheit sind Zeitspannen extremer Werte, d.h. nicht Einzeltage sondern Phasen von bis zu einer Woche, von großer Bedeutung.

Um möglichst zuverlässig die Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen mit geeigneten Prozessmodellen oder empirischen Modellen berechnen zu können, sind für urbane, wie auch für die vorher erwähnten Fragestellungen, Ergebnisse aus gekoppelten Modellansätzen (Multi-Modell/Multi-Szenarien-Ensembles) unerlässlich. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind diese Berechnungen jedoch noch nicht im notwendigen Umfang möglich.

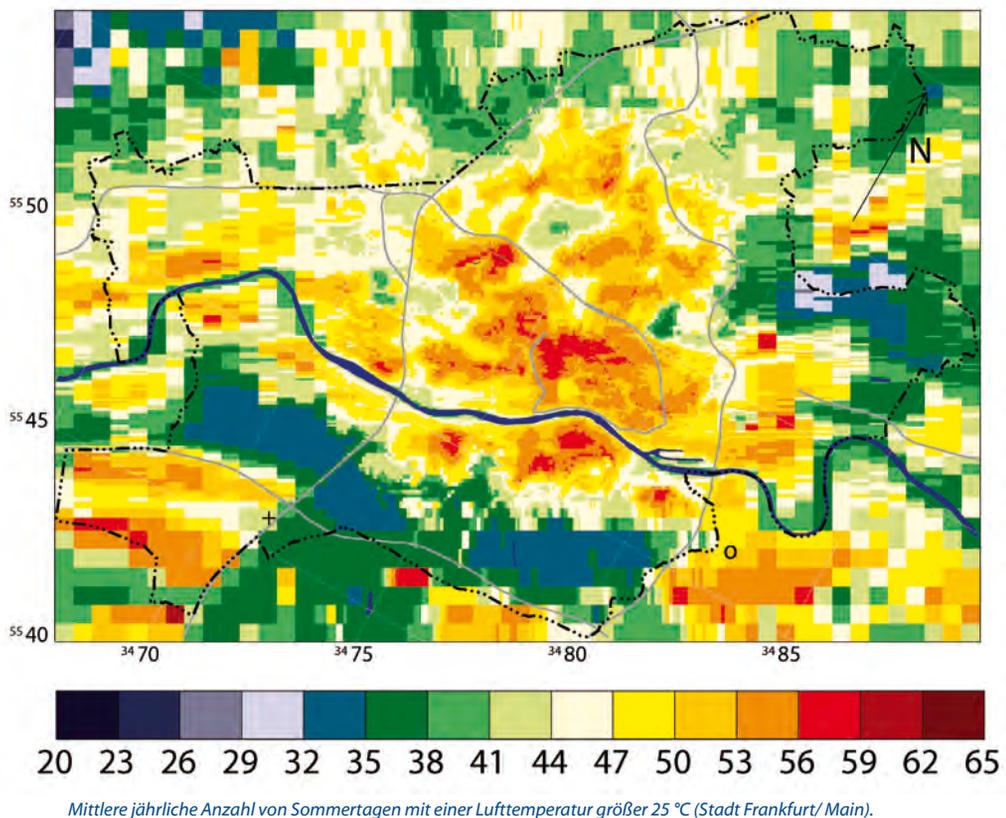
Die gemachten Aussagen beziehen sich auf regionale Landnutzungsstudien in Deutschland, für die regionale Klimaprojektionen mit den genannten Einschränkungen zur Verfügung stehen. Seit vielen Jahren finden jedoch auch außerhalb Deutschlands Untersuchungen zur Landnutzungs- und/oder Vegetationsdynamik statt, für die die Fragestellungen des Klimawandels von derselben Bedeutung sind wie oben beschrieben (z. B. SFB 552 (Storma), SFB 564 (Nachhaltige Landnutzung in den Bergregionen Südostasiens), IWRM-MoMo (Integriertes Wasserressourcenmanagement in Zentralasien – Modellregion Mongolei). Jedoch bleibt der Bedarf an qualitativ hochwertigen regionalen Klimaprojektionen in diesen Regionen oft ungedeckt.

5.4 Städte im Klimawandel – Simulationen zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen

Paul Becker, Barbara Früh, Tobias Fuchs, Johann-Dirk Hessel, Joachim Namyslo, Marita Roos, Uwe Wienert
(Deutscher Wetterdienst)

Von der globalen Projektion zur Stadtklimasimulation

Aufbauend auf den Ergebnissen der regionalen Klimaprojektionen können die lokalen Auswirkungen des Klimawandels zum Beispiel auf die Wasserwirtschaft, Landwirtschaft oder unsere Städte simuliert und erforscht werden. Hierzu ist in geeigneter Weise aus den regionalen Klimaprojektionen eine „Hintergrundklimatologie“ abzuleiten, welche die (weitestgehend unbeeinflussten) regionalen Verhältnisse der Stadtumgebung wiedergibt. Der wesentliche Vorteil von Simulationen mit solchen computergestützten Wirkmodellen ist die Möglichkeit, die Auswirkungen eventueller Eingriffe in das System „Stadt“ gezielt untersuchen zu können, ohne diese in der Realität umsetzen zu müssen. So können zur Beschreibung eines Planungszustands der Zukunft im Modell ganze Stadtteile aufgebaut oder verändert sowie Grün- oder Wasserflächen angelegt werden. Damit stellt das Modell ein „Labor“ für planerische Maßnahmen zur Unterstützung der Anpassung an den Klimawandel dar. Auf Grundlage dieser „Laborergebnisse“ können gemeinsam mit den städtischen Behörden konkrete Planungsempfehlungen erarbeitet werden, wie auf den Klimawandel stadtplanerisch reagiert werden sollte.



Das Stadtklimamodell als Planungsinstrument

Erste Ergebnisse zu den zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels am Beispiel der Stadt Frankfurt am Main liegen bereits vor. Die mittlere Anzahl von Tagen, welche eine maximale Lufttemperatur von 25 Grad Celsius (°C) überschreiten, ist in der Abbildung (links) dargestellt. Es zeigt sich, dass diese Anzahl von Stadtteil zu Stadtteil variiert. Die Auswertung des verwendeten Ensembles regionaler Klimaprojektionen weist darauf hin, dass bis zum Jahr 2050 die mittlere Anzahl von derzeit etwa 46 Tagen pro Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% um etwa 5 bis 32 Tage ansteigen wird. In dicht bebauten Gebieten dürfte die Zunahme noch höher sein. Auch die Anzahl der heißen Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30°C und der Tropennächte mit Lufttemperaturen von nicht unter 20°C wird deutlich zunehmen.

Stadtplaner müssen sich grundsätzlich an Extremen orientieren. Ob die Bevölkerung in einer Stadt unter den Temperaturen leidet oder nicht, hängt in unseren Breiten nicht von der Jahresmitteltemperatur ab. Gesundheitliche Schäden drohen eher durch längere Hitzeperioden. Diese werden in Frankfurt deutlich zunehmen. So gilt als Faustregel die Forderung, dass Menschen im Freien in Hitzeperioden die Möglichkeit haben, innerhalb von fünf Gehminuten schattige Zonen aufzusuchen. Ist das in heutigen Großstädten und Ballungsräumen immer möglich? Wenn nicht, müssen Stadtplaner nach Lösungen suchen. Arkaden oder auch Sonnensegel könnten solche Lösungen darstellen. Hilfreich wären in den meisten Städten sicher auch mehr Schatten spendende Baumgruppen.

Eine klimaverträgliche Stadt benötigt einen Grünflächenanteil von mindestens einem Viertel ihres

Gebiets. Diese wirken der städtischen Wärmeinsel entgegen. Ein zentraler großer Park ist hierfür aber nicht ausreichend. Es kommt eher darauf an, viele grüne Inseln mit mindestens einem Hektar Fläche zu schaffen. Ein solches Netz an kühlen Inseln hilft auch zu verhindern, dass bei weiter steigenden Temperaturen die überhitzten Bereiche einer Stadt zusammenwachsen. Für die Gesundheit der Bevölkerung ist es zukünftig noch wichtiger diesen Wärmeinselseffekt zu reduzieren.

Die Bewältigung einer Zunahme von Hitzewellen in den Städten erfordert auch eine Verbesserung der Frischluftzufuhr. Es ist daher denkbar, dass wir künftig in europäischen Großstädten eine Renaissance der Grünzüge und Alleen erleben. Über solche Schneisen könnte folglich aus dem Umland – in Frankfurt wäre das zum Beispiel der Taunus – kühlere Luft zugeführt werden. Alleen mit vielen Bäumen bieten Schatten und zusätzliche Abkühlung durch Verdunstung.

Eine klimagerechte Stadtplanung erfordert die Prüfung der Umsetzung dieser Möglichkeiten nicht nur in Frankfurt, sondern in allen Ballungsräumen. Eine Anpassung an den Klimawandel kann z. B. durch Optimierung der Bebauungspläne unterstützt werden.

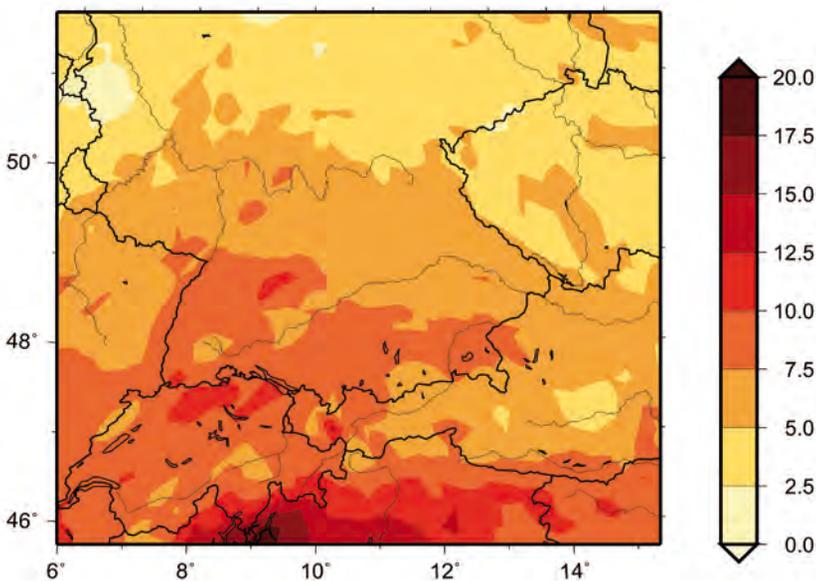
Um die Auswirkungen des Klimawandels bei der Stadtplanung zu berücksichtigen, sind Simulationen des Stadtklimas mittels unterschiedlicher Wirkmodelle mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung bis unter einen Kilometer erforderlich. Dafür verwendet der Deutsche Wetterdienst seine beiden bewährten Stadtklimamodelle, die unter den Namen MUKKLIMO_3 (Mikroskaliges Urbanes KLimaMOdell) und UBIKLIM (Urbanes BioKLimaModell) bekannt sind. Diese Modelle liefern u. a. Ergebnisse zur Lufttemperatur und Wärmebelastung, jedoch nicht zum Niederschlag. Beide Modelle setzt der Deutsche Wetterdienst in Pilotprojekten zur „Stadtplanung im Klimawandel“ in Zusammenarbeit mit den Städten Frankfurt am Main und Berlin ein.

5.5 Simulation der Luftqualität

Renate Forkel (Karlsruher Institut für Technologie, IMK-IFU)

Erhöhte Konzentrationen an Spurenstoffen wie Ozon, Stickstoffoxid und Aerosolpartikeln in der Luft führen zu Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit und können – wie im Falle von Ozon und einigen Aerosolkomponenten – auch negative Auswirkungen auf das Wachstum der Vegetation haben. Die Luftqualität hängt neben der Emission von Luftschadstoffen vor allem von den meteorologischen Bedingungen ab. Die Witterungsbedingungen bestimmen die Verteilung der Spurenstoffe, das Auswaschen durch Niederschläge sowie die Bildung von sekundären Luftschadstoffen (z. B. Ozon) durch photochemische Prozesse. Außerdem können veränderte Ozon- und Aerosolpartikel-Konzentrationen aufgrund ihres Einflusses auf den Strahlungsantrieb auch Rückwirkungen auf das Klima haben.

Wegen der kleinräumigen Muster der anthropogenen und biogenen Emissionen schwankt die Luftqualität zeitlich und räumlich sehr stark. Eine aussagekräftige Beurteilung des Klimaeinflusses auf die Luftqualität macht daher regionale Untersuchungen erforderlich. Diese können teilweise mit Hilfe statistischer Ansätze, welche jedoch aufgrund ihrer eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten nur eine untergeordnete Rolle spielen, durchgeführt werden. Wesentlich häufiger werden Simulationen mit sogenannten Chemie-Transport-Modellen (CTMs) durchgeführt, bei denen – analog zu den dynamischen meteorologischen Modellen – der Transport und die Chemie der Spurenstoffe explizit beschrieben werden. Dabei wird entweder auf (in der Regel stündliche) dreidimensionale Felder der meteorologischen Variablen aus einer vorhandenen regionalen Klimasimulation zurückgegriffen (Offline-Simulation) oder regionale Klimasimulation und Chemiesimulation werden gleichzeitig mit einem



Projektierte Änderung des mittleren Ozonmaximums im Sommer ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) zwischen 1990-2000 und 2030-2039 aus einer regionalen Klima-Chemie-Simulation mit einer horizontalen Auflösung von 20 km (Forkel und Knoche, 2006).

Wegen des hohen Rechenaufwandes – wie bei den regionalen Klimasimulationen müssen die Berechnungen für eine größere Anzahl von Jahren durchgeführt werden, und dies auch noch für deutlich mehr Variablen – ist die Anzahl der bisher durchgeführten regionalen Klima-Chemie-Simulationen relativ klein (Jacob und Winner, 2009). Die Mehrheit der regionalen CTM-Simulationen zum Klimaeinfluss auf die Luftqualität wurde für die USA durchgeführt. In Deutschland wurde eine regionale Klima-Chemie-Simulation zur Untersuchung des Klimaeinflusses auf das bodennahe Ozon erstmalig im Rahmen des Verbundprojektes BayForUV (Bayerischer Forschungsverbund: Erhöhte UV-Strahlung in Bayern – Folgen und Maßnahmen) durchgeführt (Forkel und Knoche, 2006).

Für regionale Simulationen werden Randbedingungen benötigt, die den Transport von Wärme, Wasser und luftchemischen Spurenstoffen in das betrachtete Gebiet hinein beschreiben. In der Vergangenheit wurden in Ermangelung entsprechender Datensätze aus globalen Modellen für die Chemie häufig auf Annahmen basierende Randbedingungen verwendet und nur für die Meteorologie Randbedingungen aus den Ergebnissen globaler Klimasimulationen genutzt. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von globalen Klima-Chemie-Simulationen dürften jedoch künftig vermehrt chemische Randbedingungen verfügbar sein.

gekoppelten Meteorologie-Chemie-Modell durchgeführt (Online-Simulation). Die Verwendung von CTMs ermöglicht es, die Bedeutung einzelner Stoffe oder Prozesse zu quantifizieren, die Folgen veränderter Emissionen und Landnutzungen zu bestimmen, sowie – im Falle von Online-Simulationen – auch Rückkopplungseffekte zwischen Klima und Luftchemie abzuschätzen.

Die in Kapitel 2 aufgeführten Kriterien zur Verwendbarkeit regionaler Klimasimulationen gelten analog auch für regionale Klima-Chemie-Simulationen. Für die Verwendung der Ergebnisse regionaler Klima-Chemie-Simulationen als Eingangsdaten für anwendungsorientierte Folgemodelle (z. B. für Auswirkungen auf die Gesundheit) gelten die Einschränkungen sogar in noch stärkerem Maße, da zusätzlich zu den Unsicherheiten des meteorologischen Modellteils noch die relativ großen Unsicherheiten bei der Bestimmung der chemischen Randbedingungen und der Szenarien für die Emission der anthropogen emittierten Luftschadstoffe zu berücksichtigen sind. Weitere Unsicherheiten ergeben sich bei der Berechnung der biogenen Emissionen aufgrund unsicherer Landnutzungsdaten und Emissionsfaktoren. Trotz der genannten Unsicherheiten können Modell-

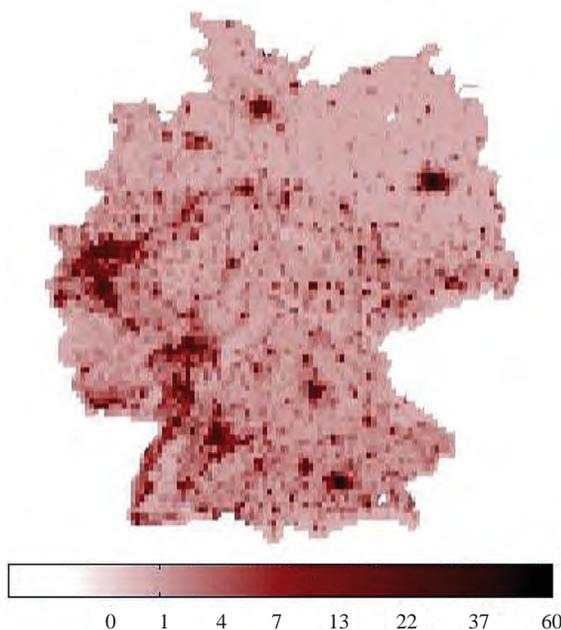
studien aber durchaus schon heute zur Verbesserung des Verständnisses von Zusammenhängen und Wechselwirkungsmechanismen genutzt werden. Mit ihnen ist es möglich, die Folgen von Klimaänderungssignalen abzuschätzen und Hinweise auf potentielle zukünftige Risiken zu geben.

Die Qualität von regionalen Klima-Chemie-Simulationen hängt sehr stark von der Qualität des meteorologischen Modellteils ab. Entwicklungsbedarf und -potential besteht darüber hinaus bei der regionalen Klima-Chemie-Simulation im Hinblick auf die verbesserte Kopplung zwischen globaler und regionaler Skala sowie im Hinblick auf die verstärkte Berücksichtigung von Rückkopplungsmechanismen wie z. B. Aerosol-Strahlung/Niederschlag. Wegen der großen Bedeutung der biogenen Kohlenwasserstoffe für die Bildung von Ozon und sekundärem organischem Aerosol ist außerdem eine verbesserte Beschreibung der biogenen Emissionen, z. B. in Abhängigkeit von der Jahreszeit oder der Bodentrockenheit, notwendig. Großer Bedarf besteht weiterhin im Hinblick auf die Bereitstellung geeigneter Datenbasen und Szenarien für die anthropogenen Emissionen von Luftschadstoffen und die Landnutzung.

5.6 Wirtschaftliche Entscheidungsprozesse

Gernot Klepper (*Institut für Weltwirtschaft*)

Der Klimawandel wird in diesem Jahrhundert nicht nur Auswirkungen auf die natürliche Umwelt und das menschliche Wohlbefinden haben, es werden auch wirtschaftliche Prozesse beeinflusst. Wir wissen heute, dass die Klimaänderungen der Zukunft aus verschiedenen Gründen nicht präzise berechnet werden können. Einerseits ist es mit den heute verwendeten Szenarien gestützten Klimamodellen noch nicht möglich (vgl. Kapitel 2), andererseits ist das Klimasystem selbst ein nicht-lineares System, das präzise Projektionen nicht zulässt. Es wird also auch bei einer weiteren Verbesserung der Klimamodelle keine exakteren Projektionen geben, nur genauere als heute. Die verbleibende Ungenauigkeit gilt insbesondere für die Modellierung kleinskaliger (regionaler, lokaler) Klimaänderungen, die von entscheidender Bedeutung für wirtschaftliche Aktivitäten sind.



Die Bewertung von zukünftigen wirtschaftlichen Prozessen oder die Entscheidung über wirtschaftliche Maßnahmen mit langfristigen Wirkungen durch ein einzelnes Individuum oder durch die Gesellschaft als Ganze, hängt in entscheidendem Maße davon ab, welche Risiken dieses Individuum oder die Gesellschaft zu akzeptieren bereit sind, wenn die erwartete Wirkung nicht eintritt. Im konkreten Fall der regionalen Klimaprojektion stellt sich also die Frage, wie zu bewerten ist, dass ein vorhergesagter Klimaeffekt in geringerem Maße eintritt oder noch stärker ist als erwartet. In jedem Fall sind damit wirtschaftliche Kosten verbunden. Im Falle stärkerer negativer Effekte würde man die heute notwendigen Vermeidungs- oder Anpassungsmaßnahmen nicht ausreichend intensiv einsetzen und damit zusätzliche volkswirtschaftliche Kosten verursachen. Im Falle geringerer Auswirkungen würde man „zuviel des Guten tun“ und auch damit unnötige Maßnahmen einleiten, also auch Kosten verursachen, die nicht nötig wären.

Es ist unbestritten, dass die Mehrzahl der Menschen sich risikoavers verhält, d. h. sie wählt bei gleichem Erwartungswert die Option mit der geringsten Wahrscheinlichkeit von negativen Ereignissen. Dies sollte auch für gesellschaftliche Entscheidungen gelten. Voraussetzung für eine Berücksichtigung von Risikoaversion in Entscheidungen ist allerdings das Wissen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der zukünftigen Ereignisse. Dies bedeutet konkret, dass für Entscheidungen unter Unsicherheit die regionalen Klimaprojektionen

Zusätzliche hitzebedingte Todesfälle pro Jahr und 10x10 km in Deutschland für den Zeitraum 2071-2100 unter Annahme des A1B-Szenarios des IPCC (Hübler et al., 2008).

nicht nur einen Wert liefern dürfen, sondern sie müssten auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Klimasimulation charakterisieren können.

Der Grad der Unsicherheit über die Ergebnisse von regionalen Klimamodellen bestimmt über die Risikoaversion auch die Bewertung der wirtschaftlichen Konsequenzen von Klimaänderung. Je höher die Unsicherheit – zum Beispiel illustriert durch die Varianz der Ergebnisse – desto stärker würden die möglichen negativen Realisierungen in die Bewertung eingehen. Mit anderen Worten, je höher die Unsicherheit über zukünftige Schäden, desto höher wird der Schaden heute bewertet. Daneben gibt es aber auch psychologische Effekte, die dazu führen, dass als bedrohlich erkannte Situationen verdrängt werden, weil man die Konsequenz daraus nicht ziehen will. Größere Unsicherheit wird dann als Vorwand genommen, ein Problem ignorieren zu können. Dies mag für individuelles Verhalten eine Rolle spielen, für gesellschaftliche Entscheidungen wäre es unangebracht. Dies hat beträchtliche Konsequenzen für die Vermeidung von Treibhausgasemissionen wie auch für die Adaptation an den Klimawandel. So verlangen hohe Unsicherheiten über die Wirkung zukünftiger Klimaänderung stärkere Adaptationsmaßnahmen als solche Fälle, in denen diese Wirkungen bekannt sind (ein Beispiel für die Bewertung anhand der Realisierung des Remo-Modells gibt Hübler et al. (2008)). Auch die Klimapolitik würde umso schärfere Eingriffe erfordern, je größer die Varianz der Ergebnisse der Klimamodelle ist.

Die Fähigkeit der Klimamodelle Wahrscheinlichkeitsaussagen mit guter Qualität machen zu können, beeinflusst deshalb in starkem Maße die wirtschaftliche Bewertung von Klimaänderungen bzw. den Nutzen von Vermeidungsmaßnahmen. Je besser die Wahrscheinlichkeitsverteilung der zu erwartenden Klimaänderungen berechnet werden kann, desto besser können ökonomische Entscheidungen unter Risiko abgeleitet werden. Ohne eine hinreichende Aussage über die Qualität der Modellergebnisse müssten nach dem Vorsichtsprinzip die Extremszenarien für die Bewertung und die Maßnahmendiskussion herangezogen werden. Die Investition von beträchtlichen Ressourcen in die Vermeidung von und Anpassung an den Klimawandel wäre die Folge. Umgekehrt würde eine verbesserte Qualität der Ergebnisse – zum Beispiel die Erzeugung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung möglicher Ausprägungen – die Möglichkeit bieten, sich nicht mehr auf Extremszenarien verlassen zu müssen. Damit könnten auch volkswirtschaftliche Ressourcen eingespart werden, da eine rationale Entscheidung über klimapolitische Maßnahmen möglich wird.



Hitzebedingte Einkommensverluste je Bundesland pro Kopf und Jahr in Euro (2004) für den Zeitraum 2071-2100 (Hübler et al., 2008).

5.7 Unterstützung von gesellschaftlichem Handeln durch die Ergebnisse regionaler Klimamodelle

Andreas Ernst (Universität Kassel)

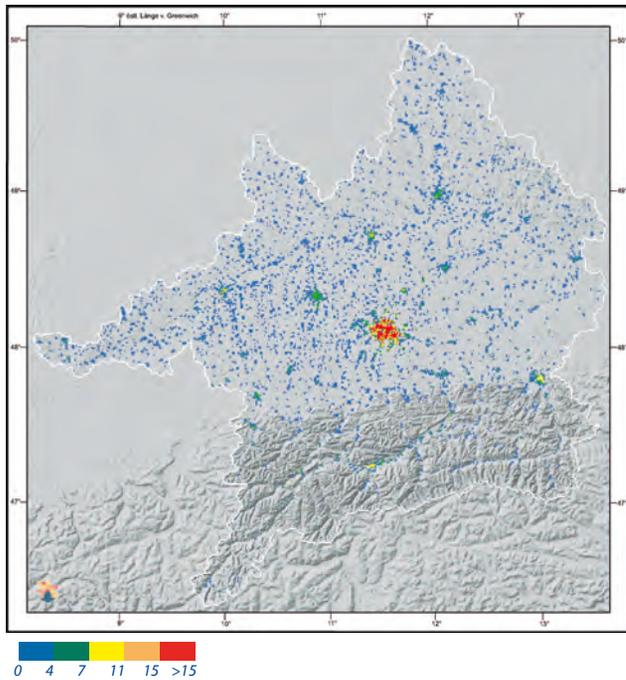
Gesellschaftliches Handeln, vermittelt durch die wissenschaftliche Aufbereitung von relevanten Ergebnissen, kann auf zwei Weisen von den Ergebnissen regionaler Klimamodelle profitieren. Einerseits bietet sich eine „schwache“ Variante der Anbindung für die meisten aktuellen und kurzfristig zu beantwortenden gesellschaftlichen Anforderungen an. Auf der Grundlage von wahrscheinlichen Trends von Temperaturmittelwerten, Höchsttemperaturen, Hitzetagen, Unwetterhäufigkeiten usw. werden für das gesellschaftliche Handeln relevante Interpretationen geliefert, die dann bearbeitet werden. Als Beispiel aus der Anpassungsforschung kann das Verbundprojekt „Anpassungsnetzwerk Nordhessen“ (www.klimzug-nordhessen.de) im KLIMZUG-Programm des BMBF dienen. In den Bereichen Gesundheit, Mobilität, Tourismus, Rechtswissenschaften, Politikwissenschaften und Verwaltung werden aus den projizierten Klimaveränderungen resultierende gesellschaftliche Probleme identifiziert, Lösungen gesucht und wissenschaftlich begleitet. Das bei dieser „schwachen“ Variante der Anbindung von Klimamodellergebnissen auftretende Problem ist, dass für Risikowahrnehmung, Verhaltensänderung oder Akzeptanz durch entscheidende Personen in Verwaltung, Industrie und Bevölkerung genau diese auf die Zukunft bezogenen Mittelwerte oder Wahrscheinlichkeitsaussagen wenig plastische Bedeutung gewinnen und schwer zu verstehen sind.

Sofern aus den Klimatrends Aussagen über das zukünftige Wetter getroffen werden (z. B. mit einem statistischen Wettergenerator), kann man von einer „starken“ Variante der Anbindung zwischen Klimamodellen und sozialwissenschaftlichen Anforderungen sprechen. Damit werden aber auch gleichzeitig die Anforderungen an die

sozialwissenschaftlichen Modelle erhöht, um die zeitlich wie räumlich verfeinerte Datenlage auszunutzen. Ideal sind hier die noch seltenen sozialwissenschaftlichen Prozessmodelle, z. B. auf der Basis von agentenbasierter Modellierung. Sie ermöglichen es, in rückgekoppelte Interaktion mit naturwissenschaftlichen Prozessmodellen zu treten. Ein Beispiel hierfür sind die Akteurmmodelle aus dem GLOWA-Danube-Projekt aus dem GLOWA-Programm des BMBF (www.glowa-danube.de). Wassernutzung durch private Haushalte, öffentliche Hand, Industrie und Betriebe der Tourismuswirtschaft, die Entscheidungen der Wasserversorgungsunternehmen sowie die Landnutzungsentscheidungen der landwirtschaftlichen Betriebe, aber auch Innovationsausbreitung, Risikowahrnehmung und Akzeptanz werden mittels Akteuren modelliert, die auf verschiedenen Dimensionen heterogen sind. Die Ergebnisse aus diesen Modellen sind in ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung bereits relativ nah an dem, was man sich für die Unterstützung gesellschaftlichen Handelns wünscht.

Durch das letzte Beispiel werden aber auch grundsätzlichere Probleme deutlich.

Zum einen: Während mit Klimamodellen generell lange Zeiträume (> 50 Jahre) projiziert werden, um Trends deutlich werden zu lassen, müssen sich seriöse sozialwissenschaftliche Projektionen auf einen deutlich kleineren Zeitraum (< 30 Jahre bzw. je nach zu beschreibendem Phänomen noch deutlich kürzer) beschränken. Zu stark sind die kurzfristigen Nicht-Linearitäten in den gesellschaftlich relevanten Phänomenen, wie man erst gerade an der Weltwirtschaftsentwicklung beobachten konnte. Es liegt hier also eine bislang nicht und auch wohl nicht ganz leicht überbrückbare



Die Ergebnisgrafik eines Zeitschritts aus dem Haushaltsmodell des GLOWA-Danube-Projekts: Der unter einem Emissions- (IPCC A1B) und regionalisierten Klimaszenario (REMO) zu erwartende Pro-Kopf-Wasserverbrauch (l/s) in Privathaushalten; räumlich aufgelöst für das Einzugsgebiet der Oberen Donau. In der Mitte ist München zu erkennen.

Nicht-Passung zwischen den Zeithorizonten der regionalen Klimamodelle und der gesellschaftlichen Handlungshorizonte vor.

Zum anderen: Die Unsicherheitsproblematik in den regionalen Klimamodellen setzt sich in den sozialwissenschaftlichen Interpretationen in verschärfter Form fort. Stakeholder in der Gesellschaft verorten sich naturgemäß mit ihrem Verantwortungsbereich sofort hinsichtlich ihres räumlichen Standortes und ihres zeitlichen Entscheidungshorizontes, der bei politischen Entscheidungsträgern wie auch bei Verantwortlichen in der Industrie wenige Jahre nicht übersteigt. Weder die derzeitigen Klimamodelle, und noch viel weniger die sozialwissenschaftlichen Modelle, sind in der

Lage diese Erwartungen unmittelbar zu erfüllen. Was an dieser Stelle nötig sein wird, ist neben einer zunehmenden Konkretheit der Ergebnisse der Klimamodelle (Welche Daten braucht der gesellschaftliche Entscheider?) auch eine klare Benennung der sozial- wie naturwissenschaftlichen Randbedingungen für die zugrunde liegenden Szenarien und eine Bezifferung deren Wahrscheinlichkeit unter diesen Voraussetzungen. Gesellschaftlich relevante Ergebnisse sind z. B. Aussagen über gesundheitliche Auswirkungen bestimmter Wetterlagen, Einschränkungen der Mobilitätsfreiheitsgrade durch Unwetterereignisse, energetische Auswirkungen auf Haushalte, Wasserverfügbarkeit, Konsequenzen für Energiegewinnung durch Wind, Sonne und Wasser, Hochwasserrisiken, Schneesicherheit, Aussaatzeitpunkte, letzter Frost und so weiter. Räumliche Konsistenz der Ergebnisse ist darüber hinaus nötig, da Entscheider auch den geographischen Vergleich suchen.

Der Nutzen der Modellergebnisse für gesellschaftliches Handeln, das sich öffentlich zu rechtfertigen hat, steigt mit den genannten Faktoren. Kann das nicht oder nur mittelfristig geleistet werden, ist eine fundierte Interpretation für Fachfremde mit einem besonderen zeitlichen, räumlichen, aber auch inhaltlichen Blickwinkel mit deutlichem Hinweis auf die Grenzen der Modelle erforderlich, so wie es durch die verschiedenen Kompetenzzentren geleistet werden soll (z. B. KomPass des UBA, das Fachzentrum Klimawandel Hessen des HLUG, die CEC Potsdam GmbH des PIK).

6. Handeln unter Unsicherheit als politische und rechtliche Herausforderung

Christoph Görg (*Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung-UFZ*),
Peter-Tobias Stoll (*Georg-August-Universität Göttingen*)

Regionale Klimamodelle sind, wie die vorstehenden Ausführungen verdeutlichen, in ihrer Aussagekraft aus einer Reihe von Gründen beschränkt. Hier stellt sich mit besonderer Deutlichkeit ein allerdings grundsätzlich bestehendes Problem bei der Verwendung naturwissenschaftlicher Zustandsbeschreibungen oder Projektionen in gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen. Dieses Problem beruht im Kern darauf, dass menschliches Handeln und Erkennen oft anders verläuft, als erwartet. Im Bereich der Wissenschaft, und damit auch im Bereich der regionalen Klimamodellierung, verstehen wir Erkenntnisse grundsätzlich als vorläufig und offen für spätere bessere Einsichten. Gesellschaftliche Entscheidungen müssen demgegenüber zu definierten Zeitpunkten getroffen werden und von eindeutig definierten Entscheidungsgrundlagen ausgehen. Die Hoffnung, in den Wissenschaften eine eindeutige und unhinterfragbare Antwort auf zukünftige Geschehensabläufe zu finden, trägt in jedem Fall. Gesellschaftliche Entscheidungen sind daher auf die Hilfe wissenschaftlicher Erkenntnisse und anderer Hinweise angewiesen um Annahmen über eine mögliche Zukunft und deren Verantwortung entwickeln zu können.

Die sozialwissenschaftliche Forschung beschäftigt sich seit einiger Zeit mit dem Umgang verschiedener Formen der Unsicherheit und angemessenen Weisen damit in gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen umzugehen.

Für den Umgang mit Unsicherheit im politischen und rechtlichen Handeln ist zunächst entscheidend, um welche Art der Unsicherheit bzw. des Nichtwissens es sich handelt (z. B. inwieweit dieses quantifizierbar ist oder nicht, ob die Grenzen des Wissens als solche anerkannt sind oder ob wir es

mit einer völlig unbekanntem Form des Nichtwissens zu tun haben, das radikale Überraschungen generieren kann). Zudem ist es von entscheidender Bedeutung, auf der Basis welcher kulturell verankerten Denkstile und Wahrnehmungsmuster diese Unsicherheiten und Risiken interpretiert werden.

Einige Formen des Nichtwissens sind geradezu konstitutiv für bestimmte Formen des Handelns. Nicht alle Formen des Nichtwissens werden im alltäglichen wie im politischen Handeln als problematisch wahrgenommen. Ob und wie stark diese als Problem wahrgenommen werden, hängt zum einen vom spezifischen Handlungskontext (z. B. Rechtfertigung von Kosten) und den spezifischen Wahrnehmungsmustern bzw. Risikokulturen (Risikofreudigkeit bzw. Risikoaversionen) ab. Unterschiedliche politische Kulturen, verschiedene Handlungsfelder und Regulierungstraditionen stellen verschiedene Anforderungen an den Umgang mit Unsicherheit (so arbeitet z. B. das Hochwassermanagement mit einem Versprechen auf nahezu vollständige Sicherheit, das sich angesichts des Nichtwissens um neuartige Extremereignisse kaum noch begründen lässt) und machen die Berücksichtigung des jeweils spezifischen Kontexts erforderlich. Zudem ist zu berücksichtigen, dass erst die spezifische Nachfrage nach wissenschaftlicher Beratung und die damit verbundenen Erwartungen an die Legitimierung politischer Entscheidungen oder die Kalkulation von Kosten und Nutzen die wissenschaftliche Unsicherheit zum Problem werden lässt. Wenn die Wissenschaft hier spezifische Erwartungen evtl. nicht erfüllen kann, muss dies aber nicht in jedem Fall auch ein Problem sein, da auch politische bzw. Wertentscheidungen erforderlich sein könnten, die nicht allein auf wissenschaftlicher Grundlage getroffen werden können.

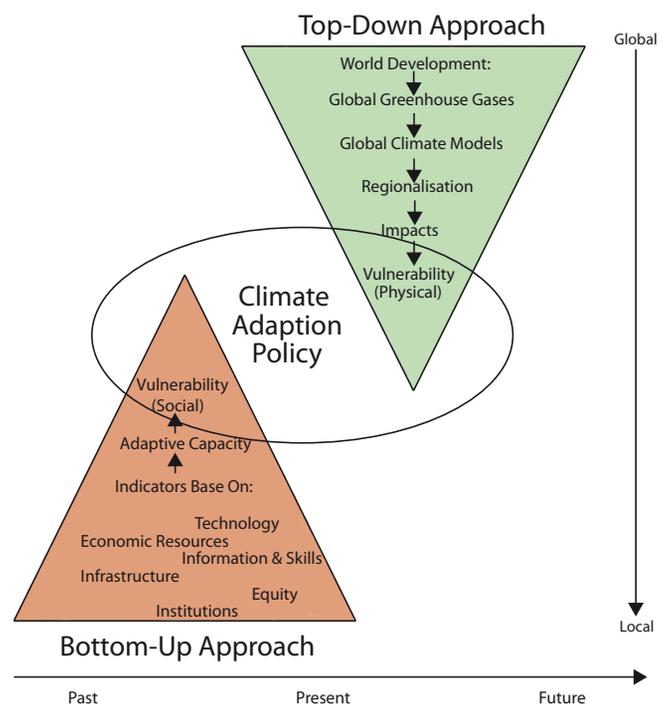
Angesichts dieser Rahmenbedingungen lassen sich zwei sehr unterschiedliche Strategien des Umgangs mit Unsicherheit in Governance-Prozessen unterscheiden (vgl. Abbildung unten):

- Top-Down-Strategien gemäß der Leitlinie: predict then act. Demnach soll erst eine genaue Vorhersage konkrete Entscheidungen begründen.
- Bottom-Up-Strategien, die die soziale Verwundbarkeit bzw. Resilienz in den Vordergrund stellen.

Nur für erstere sind Unsicherheiten ein zentrales Problem und die Reduzierung von Prognoseunsicherheiten eine Notwendigkeit. Bottom-Up-Strategien zielen dagegen auf robuste Strategien der Entscheidungsfindung ab, die gerade mit unvorhersehbaren Überraschungen rechnen. Beide Ansätze haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile (siehe Dessai und van der Sluijs (2007)). So eignen sich an den Resilienz-Ansatz angelehnte Strategien des adaptiven Managements kaum zur Begründung langfristiger, mit hohen Kosten verbundenen Infrastrukturmaßnahmen. Deshalb sind diesen Strategien gemischte Ansätze wie reflexive oder adaptive Governance-Strategien vorzuziehen, die gleichwohl Unsicherheiten in Rechnung stellen (und sie nicht völlig zu reduzieren versuchen). In politischer Hinsicht berücksichtigen diese Ansätze die Möglichkeit von Überraschungen und zielen auf kollektive Lernprozesse ab. Dabei können sie sich auf das Vorsorgeprinzip (precautionary principle) berufen, das explizit festhält, dass Unsicherheit um die genauen wissenschaftlichen Zusammenhänge kein Grund für Inaktivität sein darf.

Da für den Umgang mit Unsicherheit regionaler Klimasimulationen unterschiedliche Anwendergruppen und Anwendungsfelder zu berücksichtigen sind (von natur- und sozialwissenschaftlichen Anwendern bis hin zu Entscheidungsträgern in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft und vom Wassermanagement bis zur Versicherungswirtschaft), sind zudem spezifische Formen der Qualitätskontrolle und -sicherung dieses Wissens angebracht („extended peer review“ mit Anwendern). Zudem muss auch die öffentliche Kommunikation von Risiken der Bedeutung des spezifischen (gesellschaftlichen, politischen und kulturellen) Kontexts gerecht werden und kulturell verankerte Wahrnehmungsmuster berücksichtigen. Der Umgang mit Unsicherheit muss also die nationalen und sektorspezifischen Regulierungstraditionen berücksichtigen und dafür angepasste Lösungsvorschläge entwickeln.

Zur Meinungsbildung in Bezug auf Anpassung an den Klimawandel werden in der Klimapolitik „Top-Down“ und „Bottom-Up“ Ansätze verfolgt (Dessai und Hulme (2004)). Beide Ansätze sind nicht einfach zu verbinden und der vorwiegend angewandte Top-Down-Ansatz kann Unsicherheiten alleine nicht beheben.



7. Identifikation und Möglichkeiten zur Verringerung von Unsicherheiten

Daniela Jacob (*Max-Planck-Institut für Meteorologie*),
Wolfram Mauser (*Ludwig-Maximilians-Universität München*)

Ziel weiterer Forschung muss es unter anderem sein, die Unsicherheiten im Gesamtsystem Klimamodell-Klimafolgenmodell systematisch zu identifizieren, zu strukturieren, zu quantifizieren und möglichst weit zu verringern. Hierbei ist es wichtig, die unmittelbar möglichen und Erfolg versprechenden nächsten Schritte herauszuarbeiten und zu priorisieren.

Unsicherheiten bei den Aussagen über die Folgen des Klimawandels und mögliche Anpassungsmaßnahmen ergeben sich vorwiegend in vier Bereichen:

1 Unsicherheiten aus Defiziten im Prozessverständnis der Klimaänderungen und inadäquate Repräsentation der Prozesse in globalen und regionalen Klimamodellen.

2 Unsicherheiten aus Defiziten im Prozessverständnis der Klimawirkung und inadäquate Repräsentation der Prozesse in Wirkmodellen.

3 Unsicherheit über die natürliche Variabilität von Klima und Klimafolgen sowie über die statistischen Eigenschaften der Extreme.

4 Grenzen dessen, was wir wissen und wissen können.

Die Ausgangslage und eine wesentliche Quelle von Unsicherheiten ist in der Regel dadurch gekennzeichnet, dass Klimamodelle (global wie regional) und Klimafolgenmodelle (meist regional und kleinräumig) unterschiedliche räumliche und zeitliche Skalen berücksichtigen und vor allem wegen ihrer historischen Entwicklung bisher weitgehend eigenständig und mit geringem Kopplungsgrad arbeiten. Dabei bezieht sich Kopplung sowohl auf die Abstimmung der wechselseitigen Anforderungen als auch auf die Prozessbeschreibung. In der Regel wird bei letzterer von einer Einwege-Kopplung ausgegangen, in der die Klimamodelle den Klimaantrieb und damit den möglichen Klimawandel vorgeben. Anforderungen an die Resultate der Klimamodelle, die sich für unterschiedliche Fragestellungen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen ergeben, wurden aus dem Bereich der Klimafolgenforschung bisher nur unzureichend wissenschaftlich untersucht und nachvollziehbar formuliert. Dies gilt auch für die Berücksichtigung der natürlichen Variabilität des Klimasystems und der Impaktantwort bei der Quantifizierung der Unsicherheiten. Methoden zur systematischen Identifizierung, Formulierung und Quantifizierung liegen in beiden Fällen nicht vor. Diese können nur in enger Zusammenarbeit zwischen der Klimaforschung und der Klimafolgenforschung erfolgreich entwickelt werden.

Es gilt deshalb zunächst, in systematischen Untersuchungen die verschiedenen Quellen der Unsicherheiten, nämlich

- die natürliche Variabilität des Klimasystems und der Impaktantworten,
- das fehlendes Prozessverständnis und damit unzureichende Repräsentation der Prozesse in den Modellen unter Berücksichtigung von Extremwerten,
- die unzureichende Kopplung sowie unzureichende Berücksichtigung der Skalendifferenzen in den Klimamodellen und Klimafolgenmodellen (weshalb Bias-Korrekturen notwendig sind sowie das Up- bzw. Downscaling der gegenseitig benötigten gekoppelten Modellgrößen und die direkte Kopplung der Klimamodelle und Klimafolgenmodelle unter Annäherung der räumlichen und zeitlichen Auflösung) und
- die prinzipiellen Grenzen der Erkenntnis und Vorhersagbarkeit

systematisch an repräsentativ gewählten Beispielen verschiedenster Disziplinen und Sektoren zu untersuchen. Anhand der dabei gewonnenen Erfahrungen sind Methoden zur Formulierung der gegenseitigen Anforderungen und Kopplungsstrategien zu entwickeln.

Repräsentative Beispiele sollten sowohl aus dem natürlichen Einflussbereich, wie z. B. dem Wasserkreislauf auf der Landoberfläche, als auch aus dem gesellschaftlichen Einflussbereich, wie z.B. die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit, entnommen werden. Im ersten Bereich bestehen direkte Wechselwirkungen zwischen dem Einfluss und den Klimaprozessen sowie Fernwirkungen über große Distanzen hinweg. Eine verbesserte, direkte Kopplung zwischen den Klimamodellen und den Klima-

folgenmodellen ist hier eine Grundvoraussetzung für die verbesserte Untersuchung der natürlichen Variabilität des betrachteten Gesamtsystems und für die Verringerung der Unsicherheiten bei der Berechnung des Wasserkreislaufs. Im zweiten Bereich bestehen nur schwache Wechselwirkungen; er eignet sich daher für eine konsequente Untersuchung der Anforderungen der Klimafolgenmodelle an die Klimamodellierung.

Es macht wenig Sinn, die anspruchsvolle Analyse der Quellen der Unsicherheiten im Rahmen der Klimafolgenforschung sowie der natürlichen Variabilität mit den heute standardmäßig verfügbaren Werkzeugen durchzuführen. Die Untersuchungen haben zunächst exploratorischen Charakter und sollten deshalb unter Nutzung der sich abzeichnenden Modelle der Zukunft auf regionaler Ebene durchgeführt werden.

Für die weitergehende systematische Untersuchung der Unsicherheiten anhand der repräsentativen Fallbeispiele, die so zu wählen sind, dass die entwickelten Methoden und gewonnenen Resultate auf andere Gebiete übertragbar sind, ist deshalb zunächst das geeignete Instrumentarium aus hochauflösenden Klimamodellen (bis zu 1 km), voll koppelbaren Klimafolgenmodellen und geeigneten Kopplungsstrategien zu entwickeln und zu validieren. Das Instrumentarium sollte dazu genutzt werden, die Anforderungen bzgl. räumlicher und zeitlicher Auflösung und Prozessbeschreibung, die die gewählten Fallbeispiele auf verschiedenen Skalen von den beteiligten Modellen fordern, systematisch zu untersuchen. Anhand klar identifizierter und abgrenzbarer exemplarischer Fragestellungen sollten mit dem verfügbaren Instrumentarium die verschiedenen Quellen der Unsicherheiten analysiert und Strategien zu ihrer Reduzierung entwickelt werden.

8. Literaturverzeichnis

Modellierung von Landnutzungssektoren

Ball P. (2004) *Critical Mass: How One Thing Leads to Another*. London: Arrow Books.

Gladwell M. (2000) *The Tipping Point: How Little Things can make a Big Difference*. New York: Little, Brown and Company.

Integriertes Klimaschutzprogramm – INKLIM 2012 (URL: <http://www.hlug.de/klimawandel/inklim/index.htm>) 12.11.09

Nicolis, Prigogine I. (1999) Laws of nature, probability and time symmetry breaking. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 263 (1-4), 528-539.

Schaldach R., Priess J.A. (2008) Integrated Models of the Land System: A review of modelling approaches on the regional to global scale. *Living Reviews on Landscape Research*, 2008-1 (URL: <http://landscaperesearch.livingreviews.org/Articles/lrlr-2008-1/>) 12.11.09

Simulation der Luftqualität

Forkel R., Knoche R. (2006) Regional climate change and its impact on photooxidant concentrations in southern Germany: Simulations with a coupled regional climate-chemistry model. *Journal of Geophysical Research* 111, doi:10.1029/2005JD006748

Jacob D.J., Winner D.A. (2009) Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment* 43, 51-63, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.051

Wirtschaftliche Entscheidungsprozesse

Hübler M., Klepper G., Peterson S. (2008) Costs of Climate Change - The Effects of Rising Temperatures on Health and Productivity in Germany. *Ecological Economics* 68 (1-2): 381-393

Handeln unter Unsicherheit als politische und rechtliche Herausforderung

Dessai S., van der Sluijs J.P. (2007) *Uncertainty and Climate Change Adaptation – A Scoping Study*. Report NWS-E-2007-198, Department of Science Technology and Society, Copernicus Institute, Utrecht University. 95 pp

Dessai S., Hulme M. (2004) Does climate adaptation policy need probabilities? *Climate Policy* 4, 107-128.

9. Glossar

CTM	Chemie-Transport-Modell
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
Downscaling	Verfahren um Projektionen globaler Klimamodelle auf einen regionalen Maßstab zu bringen.
Dynamische Klimamodelle	Bilden die Dynamik des Klimasystems anhand physikalischer Gesetzmäßigkeiten ab.
ENSO	El Niño-Südliche Oszillation
Globale Klimamodelle	Oder globale (atmosphärische) Zirkulationsmodelle (GCM). Simulieren das Klima der gesamten Erdoberfläche mit Hilfe dynamischer Modelle (wie ECHAM5).
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
Klimaprojektion	Klimaprojektionen sind mögliche Klimaentwicklungen der Zukunft. Diese werden mit Hilfe von Klimamodellen unter Annahme von beispielsweise Emissionsszenarien des IPCC, Landnutzungsänderungsszenarien, usw. berechnet.
Modellkette	Verknüpfung von Modellen, wie globales Modell → regionales Modell → anwendungsbezogenes Wirkmodell.
NAO	Nordatlantische Oszillation
NGO	Nicht-Regierungsorganisationen
Resilienz	Ist die Fähigkeit von sozialen und ökologischen Systemen mit Änderungen umzugehen und sich weiter zu entwickeln.
Regionale Klimamodelle (RCM)	Simulieren das Klima bestimmter Gebiete/Regionen mit Hilfe eines statistischen und/oder dynamischen Downscaling-Verfahrens (wie REMO, COSMO-CLM (Consortium for Small-scale Modeling), MM5 (Mesoscale Model 5)).
Statistische Klimamodelle	Leiten die Beziehung der Klimavariablen aus langjährigen Messdatenreihen ab (wie WettReg (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode), STAR).
Wirkmodell	Oder Klimafolgenmodell, Impaktmodell, Integrated Assessment Modell. Sind anwendungsorientierte Folgenmodelle, welche Ergebnisse (z.B. von regionalen Klimamodellen) nutzerspezifisch weiterverarbeiten.

Mitglieder des NKGCF 2009 - 2011

Prof. Dr. Meinrat O. Andreae

Max-Planck-Institut für Chemie
Abt. Biogeochemie
Postfach 3060
55020 Mainz
Tel.: +49 (0)6131 305 421
andreae@mpch-mainz.mpg.de

Prof. Dr. Hans-Georg Frede

Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Landschaftsökologie
und Ressourcenmanagement
Heinrich-Buff-Ring 26-32
35392 Gießen
Tel.: +49 (0)641 99 37380
Hans-Georg.Frede@
umwelt.uni-giessen.de

Prof. Dr. Elisabeth Kalko

Universität Ulm
Institut für Experimentelle Ökologie
Albert-Einstein-Allee 11
89069 Ulm
Tel.: +49 (0)731 50 22661
elisabeth.kalko@uni-ulm.de

Prof. Dr. Frauke Kraas

Universität zu Köln
Geographisches Institut
Albertus-Magnus-Platz
50923 Köln
Tel.: +49 (0)221 470 7050
f.kraas@uni-koeln.de

Prof. Dr. Ulrich Platt

Rupprecht-Karls-Universität Heidelberg
Institut für Umweltp Physik
Im Neuenheimer Feld 229
69120 Heidelberg
Tel.: +49 (0)6221 54 6339
ulrich.platt@iup.uni-heidelberg.de

Prof. Dr. Georg Teutsch

Helmholtz-Zentrum für Umwelt-
forschung – UFZ
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 235 1800
gf@ufz.de

Prof. Dr. Antje Boetius

Max-Planck-Institut
für Marine Mikrobiologie
Celsiusstr. 1
28359 Bremen
Tel.: +49 (0)421 2028 860
aboetius@mpi-bremen.de

Dr. Gisela Helbig (Ex-officio)

Bundesministerium für Bildung
und Forschung
Heinemannstr. 2
53175 Bonn
Tel.: +49 (0)228 9957 2071
gisela.helbig@bmbf.bund.de

Dr. Johannes Karte (Ex-officio)

Deutsche Forschungsgemeinschaft
Kennedyallee 40
53175 Bonn
Tel.: +49 (0)228 885 2319
Johannes.Karte@dfg.de

Dr. Harry Lehmann (Ex-officio)

Umweltbundesamt (UBA)
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau
Tel.: +49 (0)340 21 030
harry.lehmann@uba.de

Prof. Dr. Michael Schulz

MARUM – Zentrum für Marine
Umweltwissenschaften
Universität Bremen
Postfach 330440
28334 Bremen
Tel.: +49 (0)421 218 65444
mschulz@uni-bremen.de

Prof. Dr. Martin Visbeck

Leibniz-Institut für
Meereswissenschaften
IFM-GEOMAR
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel
Tel.: +49 (0)431 600 4100
mvisbeck@ifm-geomar.de

Prof. Dr. Christoph Böhringer

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Institut für Volkswirtschaftslehre
Ammerländer Heerstraße 114-118
26129 Oldenburg
Tel.: +49 (0)441 798 4102
christoph.boehringer@uni-oldenburg.de

Dr. Bettina Höll (Ex-officio)

Wissenschaftliches Sekretariat
Nationales Komitee für Global
Change Forschung (NKGCF)
Institut für Weltwirtschaft
Hindenburgufer 66
24105 Kiel
Tel.: +49 (0)431 8814 316
bettina.hoell@ifw-kiel.de

Prof. Gernot Klepper Ph.D.

Institut für Weltwirtschaft
Hindenburgufer 66
24105 Kiel
Tel.: +49 (0)431 8814 485
gernot.klepper@ifw-kiel.de

Prof. Dr. Wolfgang Lucht

Potsdam-Institut
für Klimafolgenforschung (PIK)
Postfach 601203
14412 Potsdam
Tel.: +49 (0)331 288 2533
wolfgang.lucht@pik-potsdam.de

Prof. Dr. Peter-Tobias Stoll

Georg-August-Universität Göttingen
Institut für Völkerrecht
und Europarecht
Platz der Göttinger Sieben 5
37073 Göttingen
Tel.: +49 (0)551 394661
p.stoll@gwg.de

Prof. Dr. Wolfgang W. Weisser

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Institut für Ökologie
Dornburger Straße 159
07749 Jena
Tel.: +49 (0)3641 949 410
Wolfgang.Weisser@uni-jena.de

NKGC
c/o Institut für Weltwirtschaft
Düsternbrooker Weg 120
24105 Kiel

