



Nr. 6

Oliver Walkenhorst, Manfred Stock

Regionale Klimaszenarien für Deutschland

Eine Leseanleitung



Regionale Klimaszenarien für Deutschland

Eine Leseanleitung

E-Paper der ARL Nr. 6

ISBN 978-3-88838-724-1

Alle Rechte vorbehalten • Verlag der ARL • Hannover 2009
© Akademie für Raumforschung und Landesplanung

Abrufmöglichkeiten über das Internet der ARL:
www.ARL-net.de (Rubrik „Publikationen“)

Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL[®])
Leibniz-Forum für Raumwissenschaften
Hohenzollernstraße 11, 30161 Hannover
Tel. (05 11) 3 48 42-0, Fax (05 11) 3 48 42-41
E-Mail: ARL@ARL-net.de

Abbildung auf der Titelseite:

Die Mulde bei Bad Dübén, 15. August 2002

(Bildautor: Marc Zebisch)

Autoren

Walkenhorst, Oliver, Dipl.-Phys., Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam

Stock, Manfred, Prof. Dr., Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam

Die wissenschaftliche Verantwortung für den Beitrag liegt bei den Autoren.

Sekretariat der ARL: WR III „Natürliche Ressourcen, Umwelt, Ökologie“
Leitung: Dr. Gerhard Overbeck (Overbeck@ARL-net.de)

Inhalt

Vorbemerkung.....	1
1 Einleitung	1
2 Wozu braucht man regionale Klimaszenarien?.....	2
3 Wie kommen regionale Klimaszenarien zustande?.....	4
3.1 Schritt 1: Globale Emissionsszenarien	4
3.2 Schritt 2: Globale Klimamodelle.....	5
3.3 Schritt 3: Regionale Klimamodelle (Regionalisierungsverfahren)	6
3.4 Welche Unsicherheiten bestehen bei regionalen Klimaszenarien?	7
4 Welche regionalen Klimaszenarien liegen für Deutschland vor?	10
4.1 Eingesetzte regionale Klimamodelle.....	10
4.1.1 REMO.....	10
4.1.2 CLM	11
4.1.3 STAR.....	11
4.1.4 WettReg.....	11
4.2 Zusammenfassende Darstellung der regionalen Klimaszenarien.....	11
5 Wie kann mit den Unsicherheiten regionaler Klimaszenarien umgegangen werden?	13
Literatur.....	15

Vorbemerkung

Diese Leseanleitung ist für Nicht-Klimatolog/innen geschrieben, die Klimaszenarien in ihrem regionalen oder sektoralen Kontext anwenden. Durch die Vermittlung der fachlichen Grundlagen sollen sie in die Lage versetzt werden, die Aussagen von Klimaszenarien angemessen einschätzen zu können.

1 Einleitung

Im Zuge des anthropogenen Klimawandels verändert sich das Klima nicht überall auf der Erde gleich schnell und in die gleiche Richtung. Im Gegenteil kann der Klimawandel regional sehr unterschiedlich ausgeprägt sein, z.B. können Gebiete zunehmender Trockenheit relativ kleinräumig neben feuchter werdenden Regionen liegen. Da globale Klimaszenarien mit einer horizontalen Auflösung von bislang typischerweise 100 bis 200 km diese Kleinräumigkeit nicht abbilden können, ist in den letzten Jahren die Erstellung regionaler Klimaszenarien stark gefördert und – nicht zuletzt durch die zunehmende Leistungsfähigkeit von Computern und das wachsende Verständnis klimatischer Prozesse – auch ermöglicht worden. Mit einer horizontalen Auflösung von wenigen Kilometern wurden so detaillierte Aussagen über mögliche Klimaentwicklungen einzelner Länder und Regionen in den nächsten 100 Jahren möglich und die entsprechenden Kartendarstellungen fanden, auch in der Öffentlichkeit, weite Verbreitung. Bei weniger mit der Materie Vertrauten treten dabei allerdings oftmals Missverständnisse hinsichtlich des Zustandekommens und der Interpretation der Ergebnisse auf. Diese Leseanleitung erläutert zum einen knapp und verständlich, welche einzelnen Schritte für die Erstellung regionaler Klimaszenarien nötig sind und erklärt grundlegende Begriffe. Zum anderen wird aufbauend auf diesem Verständnis diskutiert, welche regionalen Klimaszenarien derzeit für Deutschland vorliegen und worin sie sich unterscheiden, wie aussagekräftig und belastbar sie sind und wie, insbesondere in der räumlichen Planung, mit den zugehörigen Unsicherheiten umgegangen werden kann.

Zwei klärende Bemerkungen sollen vorausgeschickt werden, um häufige Missverständnisse zu vermeiden. Die erste betrifft den Unterschied zwischen Wetter und Klima. Immer wieder wird die Frage gestellt, wie es denn sein könne, dass Wettervorhersagen für kaum mehr als 10 Tage möglich sind, während man Klimaprojektionen für die nächsten 100 Jahre macht. Das liegt daran, dass die Vorhersagbarkeit des Wetters aufgrund der chaotischen Natur des Wettersystems stark begrenzt ist: geringe Unterschiede in den Anfangswerten der meteorologischen Parameter können innerhalb kurzer Zeit zu riesigen Differenzen in der weiteren Entwicklung führen – ein Phänomen, das unter dem Begriff „Schmetterlingseffekt“ populär geworden ist. Klima hingegen ist „gemitteltes“ Wetter oder, präziser gesprochen, Klima ist gekennzeichnet durch die langfristige Statistik (Mittelwerte, Varianzen, Wahrscheinlichkeiten von Extremwerten usw.) der meteorologischen Elemente an einem Ort oder in einer Region, wobei mit „langfristig“ ein Zeitraum von typischerweise 30 Jahren gemeint ist. Diese Mittelwerte hängen primär von den längerfristigen *Randbedingungen* des Energie- und Stofftransports (Strahlung, Luftmassen, Wasserdampf usw.) in eine Region ab und kaum von den für einen konkreten Wetterverlauf relevanten *Anfangsbedingungen* der atmosphärischen Felder zu einem bestimmten Zeitpunkt. Daher ist das Klima prinzipiell besser vorhersagbar als das Wetter.

Die zweite Bemerkung betrifft eine Tatsache, die die Vorhersagbarkeit des Klimas wiederum erheblich erschwert: die unbekannt zukünftige Entwicklung der globalen Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen (Schmutzpartikel wie Staub und Ruß) sowie unbekannt zukünftige Landnutzungsänderungen. Diese Entwicklungen werden durch vielfältige Faktoren bestimmt, wie etwa die demographische, ökonomische, politische und technologische Entwicklung, die sich kaum vorhersagen lassen. Im Unterschied zu Wetterprognosen, die das

Wetter unter der Annahme deterministischer meteorologischer Prozesse – trotz „Schmetterlingseffekt“ – mittlerweile kurzfristig recht genau vorhersagen können, sind Klimaszenarien deshalb keine *Prognosen*, sondern *Projektionen* verschiedener möglicher zukünftiger Veränderungen der Klimaparameter. Klimaszenarien sind also gewissermaßen plausible klimatische Zukunftswelten, die auf der Basis von Emissionsszenarien mit Hilfe von Klimamodellen berechnet werden. Eine Prognose der klimatischen Verhältnisse in einem bestimmten Jahr oder gar an einem bestimmten Tag in der Zukunft (z. B. feuchter oder trockener als der Mittelwert) ist also aufgrund der Unvorhersagbarkeit der Emissionen *und* aufgrund des oben beschriebenen statistischen Charakters des Klimas prinzipiell nicht möglich.

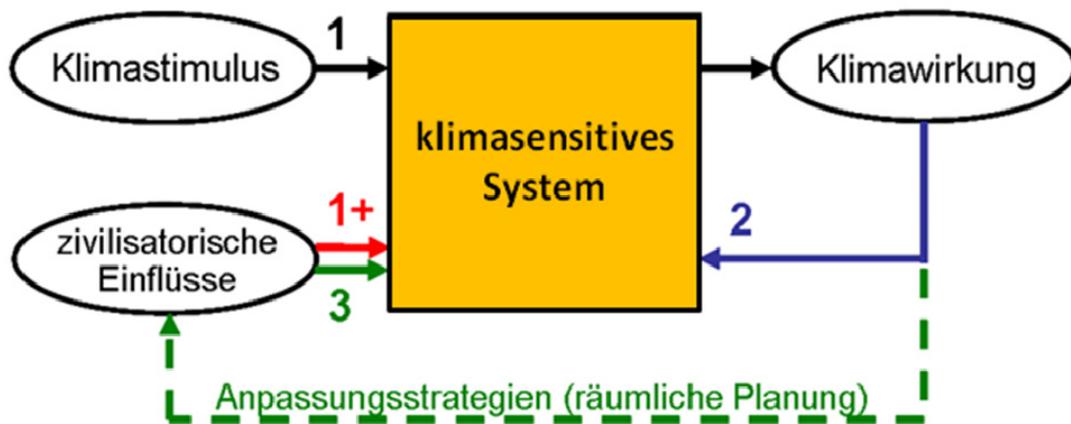
Zudem ist es eine Illusion, präzise Klimaszenarien mit einer so hohen räumlichen Auflösung erhalten zu können, wie man es von einigen Geodaten (z. B. Geländehöhe, Landnutzung) gewohnt ist. Die in dynamischen Klimamodellen abgebildeten physikalischen Prozesse, wie der genannte Energie- und Stofftransport, entsprechen den realen Prozessen notwendigerweise nur annähernd. Insbesondere kleinskalige dynamische Vorgänge, wie z. B. Wolkenbildung, werden dabei pauschal parametrisiert und raum-zeitlich gemittelt. Das kann sogar bedeuten, dass eine Erhöhung der Auflösung die enthaltenen Fehler vergrößert. Eine sinnvolle Grenze der horizontalen Auflösung liegt derzeit bei 10 x 10 km.

2 Wozu braucht man regionale Klimaszenarien?

Regionale Klimaszenarien liefern die Grundlage zur Abschätzung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf regionaler Ebene. Bei dieser Abschätzung spielt das Konzept der Vulnerabilität eine herausragende Rolle. Unter Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel wird die Verwundbarkeit bzw. Anfälligkeit eines klimasensitiven Systems – z. B. wirtschaftliche Sektoren, natürliche Ressourcen oder die Bevölkerung einer Region – gegenüber klimatischen Veränderungen verstanden. Die Vulnerabilität eines solchen Systems hängt von drei Faktorenbündeln ab: der Größenordnung und Rate des Klimawandels (Klimastimulus), der Sensitivität des betrachteten Systems (Empfindlichkeit gegenüber dem Klimastimulus) und dessen Anpassungsmöglichkeiten und Anpassungsfähigkeit.¹ Als Klimastimulus bezeichnen wir eine regionale Klimaänderung (z. B. Zunahme von Starkniederschlägen), die bestimmte – oftmals nachteilige – Klimawirkungen zur Folge hat (z. B. Gebäudeschäden infolge von Überschwemmung). Diese Ursache-Wirkungs-Beziehung mitsamt verschiedenen Rückkopplungsschleifen, die bei Vulnerabilitätsanalysen mit einbezogen werden müssen, ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

¹ Dies ist das in der Klimafolgenforschung verbreitete Verständnis von Vulnerabilität. In anderen Forschungsfeldern, wie z. B. der Katastrophen- und Risikoforschung, werden teilweise davon abweichende Vulnerabilitätskonzepte verwendet, die oftmals keine Stimulus- und Anpassungsdimension enthalten, sondern nur die „Sensitivität“ umfassen.

Abb. 1: Analyseschema der Vulnerabilität klimasensitiver Systeme: (1) ein Klimastimulus wirkt auf ein klimasensitives System und hat eine Klimawirkung zur Folge; (1+) parallel dazu wirken zivilisatorische Einflüsse auf das klimasensitive System, z.B. Landnutzungsänderungen; (2) Rückwirkungen von Klimawirkungen auf das klimasensitive System ergeben sekundäre Klimawirkungen; (3) Anpassungsstrategien, z. B. in der räumlichen Planung, an zukünftig erwartete Klimawirkungen (modifiziert nach Stock et al. 2009).



In Vulnerabilitätsanalysen sind Ursachen und Wirkungen nach Abbildung 1 wie folgt verknüpft:

- (1) Klimasensitive Systeme sind gegenüber Klimastimuli unterschiedlich empfindlich (sensitiv) und zudem hat ein Klimastimulus je nach gegenwärtigem Zustand eines Systems unterschiedliche Klimawirkungen zur Folge. Bisher beschränken sich Klimafolgenanalysen weitgehend auf diesen linearen Teil des Wirkungsgefüges, wobei als Klimastimuli Veränderungen der regionalen Klimaparameter (z. B. Anstieg der Temperatur, jahreszeitliche Verschiebung der Niederschläge usw.) aus Klimaszenarien verwendet werden.
- (1+) Zusätzlich zum Klimawandel verändern andere zivilisatorische Einflüsse (z. B. Veränderungen der forst- und landwirtschaftlichen Nutzung, Versiegelung von Flächen, Bebauung von hochwassergefährdeten Gebieten) die Umweltbedingungen und den Zustand des Systems und beeinflussen damit die Sensitivität gegenüber Klimastimuli. Die Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren in Form von regionalen Indikatoren erlaubt wesentliche Aussagen über die Sensitivität gegenüber Klimastimuli auch dort, wo die Klimaszenarien noch unsichere Daten liefern.
- (2) Die Klimawirkung eines Klimastimulus hat wiederum ökologische und soziale Veränderungen des klimasensitiven Systems zur Folge, z. B. eine verringerte Wasseraufnahmekapazität von Böden nach einer Trockenperiode oder ein unterschiedliches Ausmaß von Hochwasserschäden für verschiedene Bevölkerungsgruppen. Dies kann die Sensitivität gegenüber darauf folgenden Klimastimuli, wie z. B. Starkniederschlägen, erhöhen und wiederum sekundäre Klimawirkungen mit kritischeren Folgen nach sich ziehen, als dies ohne Vorschädigung der Fall wäre.
- (3) Aus bereits eingetretenen Klimawirkungen kann gelernt werden, so dass durch Vorsorge und Reparaturmaßnahmen zukünftige Schäden vermieden bzw. vermindert werden können. Hier setzen auch proaktive Anpassungsstrategien an den Klimawandel an, die unter Berücksichtigung der zukünftig zu erwartenden Klimastimuli die Sensitivität gegenüber diesen und damit mögliche zukünftige Schäden zu verringern suchen. Der

räumlichen Planung als „zivilisatorischem Einfluss“ kommt bei der Anpassung an den Klimawandel – wie auch beim Klimaschutz, d. h. der Vermeidung von Klimawandel – große Bedeutung zu, etwa durch die Ausweisung von Hochwasserschutzgebieten, im Küstenschutz oder beim Schutz vor Überhitzung durch klimaangepasste Gestaltung von Bebauung und Siedlungsentwicklung.

Die Vulnerabilität und die Anpassungsmöglichkeiten verschiedener Sektoren, Bereiche und Regionen in Deutschland sind z. B. in Zebisch et al. (2005) und Bundesregierung (2008) übersichtsartig dargestellt. Bei solchen Vulnerabilitätsanalysen muss stets die soziale Differenziertheit von Vulnerabilität im Blick behalten werden: nicht alle Akteure in einem klimasensitiven System sind dem Klimastimulus gleichermaßen ausgesetzt, nicht alle sind gleich empfindlich (sensitiv) und schließlich ist auch die Anpassungsfähigkeit ungleich verteilt (wer z. B. Gefahren weniger wahrnimmt oder über geringere finanzielle Mittel verfügt, wird sich weniger anpassen können). Für Raum- und Fachplanungen sind regionale Klimaszenarien unerlässlich, um generelle Gefahrenfelder abschätzen und planerische Eingriffsmöglichkeiten entwickeln zu können. Auch im Bereich der Planung ist zu berücksichtigen, dass Klimawandel sozial differenziert wirkt, und den damit zusammenhängenden Verteilungsfragen kann durch partizipatorische Verfahren und Elemente demokratischer Planung – z. B. indem Betroffene mehrheitsbasiert Planungsentscheidungen treffen – Rechnung getragen werden. Zur Ermittlung der Auswirkung bestimmter planerischer Maßnahmen auf die Sensitivität gegenüber Klimawandel ist das relative Verhältnis zwischen *Klimawirkung mit* und *Klimawirkung ohne* geplante Maßnahme – bei gleichbleibendem Klimastimulus – von primärem Interesse, d. h. die Genauigkeit bzw. Unsicherheit der Klimaszenarien ist hier unter Umständen zunächst gar nicht von entscheidender Bedeutung.

3 Wie kommen regionale Klimaszenarien zustande?

Die Erstellung eines regionalen Klimaszenarios erfolgt in drei Schritten:

- (1) die Auswahl eines Szenarios der Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen (und weiterer anthropogener Einflussgrößen auf das Klima, wie Aerosolemissionen und Landnutzungsänderungen),
- (2) die Simulation der zugehörigen globalen und somit räumlich grob aufgelösten Klimaentwicklung unter Verwendung eines globalen Klimamodells (GCM) und
- (3) die Erhöhung der räumlichen Auflösung der simulierten Klimaentwicklung mit Hilfe eines regionalen Klimamodells.

Im Folgenden werden diese drei Schritte beschrieben.

3.1 Schritt 1: Globale Emissionsszenarien

Globale Emissionsszenarien erfordern Annahmen über die demographische, sozioökonomische, politische und technologische Entwicklung (wie z. B. Annahmen über Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum, Energieverbrauch, Art der Energiegewinnung und Landnutzungsänderungen). Um ein breites Spektrum möglicher Entwicklungen bis zum Jahr 2100 zu repräsentieren, wurden vom IPCC² die sogenannten SRES-Szenarien erarbeitet (Na-

² Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wird von der WMO (World Meteorological Organisation) und dem UNEP (United Nations Environment Programme) getragen. Im IPCC sind weltweit mehrere Tausend Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler organisiert, die in drei Arbeitsgruppen (Klimatologie, Klimawirkungen und Anpassung, Klimaschutz) den jeweiligen Stand des Wissens zur Klimaproblematik zusammentragen und etwa alle sechs Jahre einen sogenannten Sachstandsbericht verfassen. Dazwischen erscheinen in loser Folge Sonderberichte zu speziellen Themen.

kicenovic et al. 2000). Sie liegen den vom IPCC erstellten globalen Klimaszenarien und auch allen darauf beruhenden regionalen Klimaszenarien zugrunde.³

Die SRES-Szenarien basieren auf vier verschiedenen sogenannten Storylines (A1, A2, B1, B2). Die Storylines sind grobe narrative Beschreibungen von nach Weltregionen aufgeschlüsselten Entwicklungen und spannen einen Möglichkeitsraum divergierender Grundtendenzen auf. Ihre Bezeichnung leitet sich von ihrer Positionierung auf zwei Achsen ab: zum einen, ob die globale zukünftige Entwicklung vorwiegend ökonomisch orientiert ist (A) oder ob sie zunehmend auf einen ökologischen Umbau hin orientiert ist (B); zum anderen, ob Globalisierungsprozesse zu einer Homogenisierung der Welt mit einer Angleichung von Lebensweisen und Konsumniveaus führen (1) oder ob weiterhin große regionale Differenzen bestehen bleiben und eher nach lokalen und regionalen Lösungen gesucht wird (2). Tabelle 1 illustriert die Positionierung der vier Storylines, wobei innerhalb von A1 noch drei verschiedene mögliche Entwicklungspfade der Energieversorgung unterschieden werden (A1T = vorwiegend nicht-fossil, A1B = ausgeglichene Mischung aus fossil und nicht-fossil, A1FI = vorwiegend fossil).

Tab. 1: Schematische Positionierung der SRES-Storylines auf den zwei Achsen homogene/heterogene Welt und wirtschaftsorientierte/umweltorientierte Entwicklung (nach Nakićenovic et al. 2000).

	homogene Welt	heterogene Welt
wirtschaftsorientierte Entwicklung	A1T, A1B, A1FI	A2
umweltorientierte Entwicklung	B1	B2

Die vier Storylines wurden – u. a. mit Hilfe demographischer und ökonomischer Modelle – in 40 quantitative Emissionsszenarien „übersetzt“ (jedes Emissionsszenario ist dabei eine spezifische Interpretation und Quantifizierung einer der vier Storylines). Alle Szenarien, die zu derselben Storyline gehören, werden zu einer Szenariofamilie zusammengefasst. Innerhalb jeder Szenariofamilie wurde jeweils ein – bzw. im Falle von A1 drei verschiedene – sogenanntes illustratives Szenario bestimmt, das repräsentativ für die jeweilige Szenariofamilie ist. Diese insgesamt sechs illustrativen Emissionsszenarien dienen typischerweise als Input für globale Klimamodelle, die die Emissionsentwicklung in eine daraus resultierende Klimaentwicklung übersetzen und somit ein Klimaszenario liefern. Für alle sechs illustrativen Emissionsszenarien ist die Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen bis 2100 in Abbildung 2 (links) dargestellt: die niedrigsten globalen Treibhausgasemissionen im Jahr 2100 ergeben sich bei B1, die höchsten bei A2, während etwa A1B ein „mittleres“ Emissionsszenario darstellt.

3.2 Schritt 2: Globale Klimamodelle

Ein globales Klimamodell (General Circulation Model, kurz GCM) ist ein Computermodell, das eine dreidimensionale Repräsentation der Atmosphäre enthält und die in ihr ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse beschreibt. Es basiert in der Regel auf einem Meteorologiemodell, wie es auch bei der (numerischen) Wettervorhersage zum Einsatz kommt und das zum Zweck der Klimamodellierung erweitert und dessen räumliche Auflösung vergrößert

³ Neben den SRES-Emissionsszenarien (benannt nach dem Special Report on Emissions Scenarios), die von keiner expliziten globalen Klimapolitik ausgehen, hat der IPCC noch sogenannte „Klimaschutz“-Emissionsszenarien erstellt, die verschiedene globale Emissionsreduktionspfade bis 2100 mit der zugehörigen Erhöhung der globalen Mitteltemperatur verknüpfen (2007b, 22). Diese „Klimaschutz“-Emissionsszenarien dienten bislang noch nicht als Grundlage regionaler Klimaszenarien für Deutschland.

werden muss, um die langen Zeiträume in der verfügbaren Rechenzeit zu modellieren. Da die Atmosphäre nicht als isoliertes System betrachtet werden kann, wird üblicherweise ein Ozeanmodell angekoppelt (man erhält dann ein sogenanntes Atmosphäre-Ocean GCM, kurz AOGCM) und zudem ein Schnee- und Eismodell für die Kryosphäre und ein Vegetationsmodell für die Biosphäre angekoppelt. Die das globale Klima bestimmenden Größen – insbesondere die solare Einstrahlung, die Zusammensetzung der Atmosphäre (einschließlich Aerosol- und Treibhausgaskonzentration) und die Art der Bedeckung der Erdoberfläche – gehen als Eingangsgrößen in globale Klimamodelle ein. Dabei werden Rückkopplungseffekte so weit wie möglich berücksichtigt – z. B. führt die Erderwärmung zum Abschmelzen polarer Eismassen und damit dort zu erhöhter Strahlungsabsorption der Meeresoberfläche und somit zu noch stärkerer Erwärmung.

Da die Entwicklung globaler Klimamodelle sehr aufwändig ist und Klimasimulationen leistungsfähige Großrechner benötigen, ist die Anzahl der weltweit betriebenen globalen Klimamodelle überschaubar. Bei der Erstellung globaler Klimaszenarien für den Vierten Sachstandsbericht des IPCC (2007b) kamen weltweit etwa 20 verschiedene AOGCMs zum Einsatz, die die Entwicklung wichtiger klimatischer Parameter bis zum Jahr 2100 mit einer horizontalen Auflösung zwischen 125 und 400 km auf der Basis verschiedener Emissionsszenarien berechneten. Diese relativ grobe räumliche Auflösung hat zur Folge, dass kleinräumige Phänomene wie etwa Wolkenbildung oder Niederschläge in GCMs nur ungenau abgebildet werden können.

Mit zunehmender Rechnerleistung kann in Zukunft die räumliche Auflösung globaler Klimamodelle weiter erhöht werden. Ein schon heute möglicher Ansatz sind sogenannte globale Atmosphäre-only GCMs, bei denen die Ozeane nicht angekoppelt sind, sondern deren klimarelevante Einflüsse als Randbedingung aus einem räumlich gröber aufgelösten AOGCM erhalten werden. Solche Modelle erreichen eine horizontale Auflösung bis hinunter zu 20 km und zeigen vielversprechende Ergebnisse, allerdings muss der Fehler durch Weglassen der Ozean-Rückkopplung noch genauer abgeschätzt werden. Eine weitere Alternative sind GCMs mit regional variabler horizontaler Auflösung (IPCC 2007a, 918f). Trotz dieser Bemühungen ist die Erstellung regionaler Klimaszenarien mit einer horizontalen Auflösung unterhalb von 100 km heute in der Regel noch auf regionale Klimamodelle angewiesen, die die GCM-Ergebnisse für eine ausgewählte Region verfeinern.

3.3 Schritt 3: Regionale Klimamodelle (Regionalisierungsverfahren)

Um die räumliche Auflösung der Ergebnisse von GCMs zu erhöhen, stehen mit dynamischen und statistischen Modellen prinzipiell zwei Ansätze zur Verfügung. Regionale *dynamische Klimamodelle* repräsentieren – wie globale Klimamodelle – die Dynamik der physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre. Da sie nur einen regionalen Ausschnitt der Atmosphäre modellieren, ist ihre horizontale Auflösung – bei gleichbleibendem Rechenaufwand – größer als bei globalen Klimamodellen, so dass ihre Auflösung typischerweise bei unter 50 km bis hinunter zu wenigen Kilometern liegt. Wie auch bei globalen Klimamodellen müssen Prozesse, die auf feinerer Skala als die räumliche Auflösung stattfinden, parametrisiert werden. Regionale dynamische Klimamodelle benötigen die Ergebnisse globaler (oder größerer regionaler) Klimamodelle, da sie in ozeanische und laterale atmosphärische Randbedingungen an den Modellrändern eingebettet werden müssen. Im Gegensatz dazu beruhen regionale *statistische Klimamodelle* auf der Ermittlung skalenübergreifender Beziehungen zwischen Klimaparametern, d. h. Beziehungen zwischen großskaligen Klimavariablen (z. B. globale Mitteltemperatur) und lokalen/regionalen Klimavariablen (z. B. mittlere Januartemperatur an einem bestimmten Ort). Diese Beziehungen werden aus langjährigen Messdatenreihen abgeleitet und sind in der Regel für jede Region unterschiedlich.

Dynamische Modelle haben im Vergleich zu statistischen folgende Vorteile (vgl. IPCC 2007a, 918):

- (1) Da sie direkt die atmosphärischen Prozesse abbilden, können sie Szenarien berechnen, die weit von den heutigen klimatischen Verhältnissen entfernt sind. Sie sind also prinzipiell auch für die Modellierung fernerer Zukünfte geeignet, da sie nicht wesentlich – wie die statistischen Modelle – auf die Stationarität, d.h. die zeitliche Unveränderlichkeit, von verwendeten statistischen Beziehungen angewiesen sind. In Form der Parametrisierungen subskaliger Prozesse (d.h. Prozesse, die unterhalb der räumlichen Auflösung des Modells stattfinden) verwenden allerdings auch die dynamischen Modelle statistische Beziehungen (von denen dann ebenfalls angenommen werden muss, dass sie in verändertem Klima weiter gültig sind).
- (2) Die Kohärenz zwischen verschiedenen Klimavariablen ist automatisch gewährleistet, d.h. alle Klimavariablen passen zueinander, da die modellierten Prozesse u.a. von vornherein bestimmten physikalischen Erhaltungssätzen genügen. Diese Kohärenz ist bei statistischen Verfahren nicht notwendigerweise gegeben.

Umgekehrt haben statistische Modelle im Vergleich zu dynamischen folgende Vorteile:

- (1) Sie liefern für ähnliche klimatische Verhältnisse wie diejenigen, aus denen die statistischen Beziehungen abgeleitet sind, in der Regel zuverlässigere Ergebnisse als dynamische Modelle und eignen sich daher besonders für kurz- bis mittelfristige Klimaprojektionen. Allerdings müssen dafür langjährige und flächendeckende Messdatenreihen zur Verfügung stehen, die in Europa jedoch meist verfügbar sind.
- (2) Der Arbeitsaufwand zur Erstellung statistischer Modelle ist üblicherweise geringer. Zudem erfordern sie meist nur relativ geringen Rechenaufwand und sind folglich auch nicht – wie dynamische Modelle in der Regel – auf leistungsfähige Großrechner angewiesen.
- (3) Mit statistischen Modellen ist theoretisch eine beliebig hohe räumliche Auflösung erreichbar, die nur die Verfügbarkeit entsprechend hochaufgelöster langjähriger Messdatenreihen voraussetzt.

3.4 Welche Unsicherheiten bestehen bei regionalen Klimaszenarien?

Die einzelnen Schritte beim Zustandekommen regionaler Klimaszenarien sind mit Unsicherheiten behaftet. Dabei lassen sich vier Quellen von Unsicherheit unterscheiden⁴ (vgl. IPCC 2007a, 873):

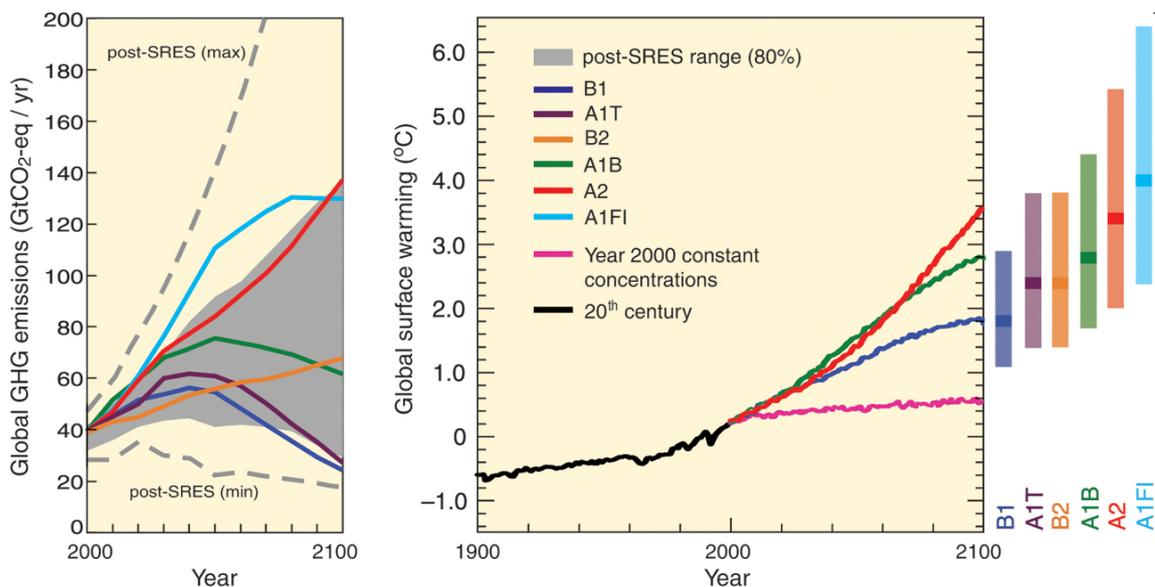
- (1) Die Unsicherheit der zukünftigen *Treibhausgasemissionen*, oder allgemeiner, der zukünftigen Entwicklung der das Klima bestimmenden natürlichen und anthropogenen Größen (darunter auch regional spezifische Einflussgrößen wie z.B. die Art der Landnutzung und Aerosolemissionen).
- (2) Die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den *globalen Klimamodellen*, deren Ergebnisse als Randbedingungen für regionale Klimamodelle dienen.
- (3) Die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den *regionalen Klimamodellen*.
- (4) Die sogenannte *Sampling-Unsicherheit*, die dadurch entsteht, dass das modellierte Klima immer aus einer begrenzten Anzahl von Modell-Jahren geschätzt werden muss.⁵

⁴ Zusätzlich zu diesen Unsicherheiten der Klimaszenarien sei nochmal auf den Unterschied zwischen Wetter und Klima und die damit zusammenhängende Tatsache hingewiesen, dass der tatsächlich eintretende Wetterverlauf der nächsten Jahrzehnte aufgrund des „Schmetterlingseffekts“ prinzipiell nicht vorhersagbar ist. Klimamodellierungen erlauben immer nur Aussagen über die Wahrscheinlichkeit, mit der konkrete Wetterverläufe eintreten können.

Die Größe der Unsicherheiten aus diesen vier Quellen lässt sich nur schwer abschätzen. Sie variiert je nach Klimaparameter, Region und Zeithorizont. Trotzdem können einige Hinweise gegeben werden, die ein Gefühl für die Unsicherheiten vermitteln:

- (1) Die Unsicherheit der globalen Emissionsentwicklung kann durch das Spektrum der SRES-Emissionsszenarien näherungsweise erfasst werden. Diese Unsicherheit nimmt zu, je weiter der Zeithorizont in der Zukunft liegt. Für die Zunahme der globalen Mitteltemperatur im Vergleich zu 1990 etwa ergibt sich für die Emissionsszenarien eine Spannbreite von 0,64-0,69 °C für 2020, von 1,3-1,8 °C für 2055 und von 1,8-4,0 °C für 2095, wobei jeweils der Mittelwert der Ergebnisse verschiedener GCMs genommen wurde und sich die Spannbreite allein aus den verschiedenen Emissionsszenarien A1, A2, B1 und B2 ergibt (IPCC 2007a, 749).
- (2) Die aus den globalen Klimamodellen resultierende Unsicherheit kann dadurch abgeschätzt werden, dass die Ergebnisse verschiedener GCMs für ein und dasselbe Emissionsszenario miteinander verglichen werden. Für die globale Mitteltemperatur etwa ergibt sich für das Emissionsszenario A1B als Mittelwert aus verschiedenen GCMs eine Erwärmung von 2,8 °C bis 2095 im Vergleich zu 1990, während die Spannbreite aus verschiedenen GCMs für dieses Emissionsszenario 1,7-4,4 °C beträgt. Für das Beispiel der globalen Mitteltemperatur ist also die Unsicherheit aufgrund der Emissionsentwicklung von der gleichen Größenordnung wie die Unsicherheit aufgrund des globalen Klimamodells. Abbildung 2 (rechts) zeigt die Entwicklung der globalen Mitteltemperatur 1900-2100 für verschiedene Emissionsszenarien (vgl. Abbildung 2, links) sowie rechts außen die Bandbreiten der GCM-Unsicherheit für die einzelnen SRES-Emissionsszenarien.

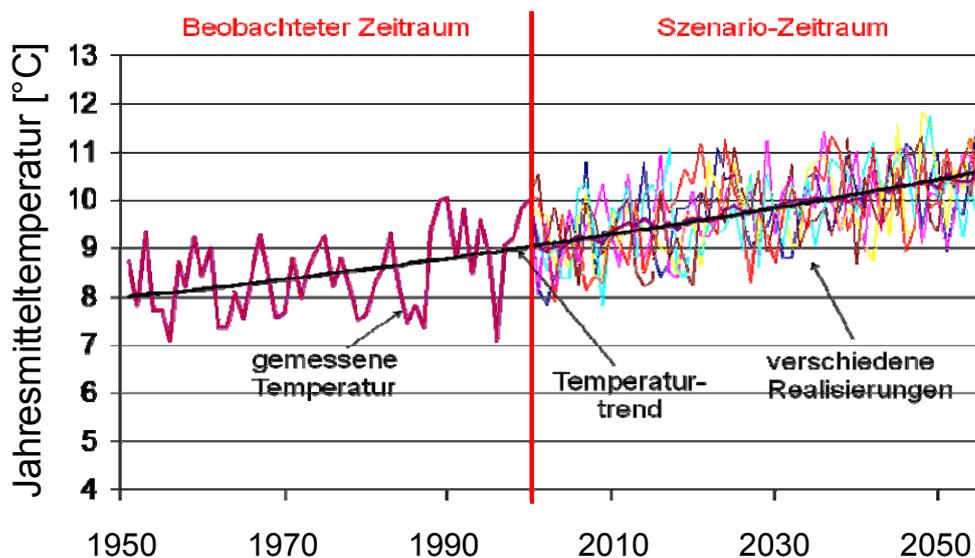
Abb. 2: SRES-Szenarien der globalen Treibhausgasemissionen bis 2100 (links) sowie Beobachtungsdaten 1900-2000 und SRES-basierte Szenarien der globalen Erwärmung 2000-2100 (rechts). Die farbigen Balken rechts außen geben für jedes illustrative SRES-Emissionsszenario die Bandbreite der Unsicherheit aufgrund der Verwendung verschiedener Klimamodelle an (aus IPCC 2007b, Abb. SPM.5).



⁵ Das ist mit dem Problem vergleichbar, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der verschiedenen Würfelaugennummern bei einem Würfel zu schätzen, wenn man mit dem entsprechenden Würfel nur ein paar Mal würfeln darf.

- (3) Zur Abschätzung der aus den regionalen Klimamodellen resultierenden Unsicherheit können die Ergebnisse verschiedener statistischer und dynamischer Modelle miteinander verglichen werden, wenn dasselbe Emissionsszenario und dasselbe GCM zugrunde gelegt werden. So deuten Analysen regionaler Klimaszenarien für Europa bis 2100 darauf hin, dass bei monatlichen und jährlichen Mitteltemperaturen die Unsicherheit durch das regionale Klimamodell im Vergleich zur Emissions- und GCM-Unsicherheit klein ist. Hingegen scheinen z.B. bei den täglichen Minimum- und Maximumtemperaturen sowie bei den Niederschlägen die drei Unsicherheiten von der gleichen Größenordnung zu sein (IPCC 2007a, 925).
- (4) Die Sampling-Unsicherheit hängt ab von der Anzahl unterschiedlicher Realisierungen des projizierten Klimas, d.h. von der Anzahl der unterschiedlichen Rechenläufe eines Klimamodells, die durch Variation der Anfangsbedingungen der meteorologischen Felder zustande kommen. Selbst für ein Emissionsszenario und ein GCM-Ergebnis, d.h. unter gleichbleibenden Randbedingungen, unterscheiden sich verschiedene Rechenläufe je nach Anfangsbedingungen eines regionalen Klimamodells und ergeben so verschiedene Realisierungen der Zukunftsprojektionen. Abbildung 3 veranschaulicht dies am Beispiel des Verlaufs der Jahresmitteltemperatur 2001-2055, berechnet für Brandenburg mit dem statistischen Regionalmodell STAR am PIK. Entsprechend unterscheiden sich die Realisierungen auch bezüglich anderer Klimaparameter wie z. B. der Niederschlagsverteilung oder der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung). Die Sampling-Unsicherheit tritt grundsätzlich bei allen Klimamodellen auf, unabhängig von Typ (statistisch oder dynamisch) und raum-zeitlicher Auflösung. Allerdings kann mit statistischen Modellen in der Regel eine erheblich größere Anzahl von Realisierungen gerechnet werden als mit dynamischen Modellen, so dass die Sampling-Unsicherheit bei statistischen Modellen leichter reduziert werden kann.

Abb. 3: Verlauf der Jahresmitteltemperatur von 1950 bis 2055 in Brandenburg. Den gemessenen Temperaturen im Zeitraum 1950-2000 stehen verschiedene Realisierungen von Temperaturverläufen bei gleichem angenommenen Temperaturtrend (d.h. gleichem Emissionsszenario und gleichem GCM) im Zeitraum 2001-2055 gegenüber, berechnet mit dem statistischen Regionalmodell STAR (modifiziert nach unveröffentlichter Graphik im Rahmen von Arbeiten am PIK 2003).



Angesichts dieser Unsicherheiten wird zuweilen behauptet, die Klimaszenarien des IPCC würden die Zukunft des globalen Klimas „düsterer“ zeichnen als sie in Wirklichkeit ist. Vermutlich ist das Gegenteil der Fall. Zum einen ist der tatsächliche Anstieg der globalen fossilen Treibhausgasemissionen in den Jahren 2000-2007 (durchschnittlich +3,5% pro Jahr) größer als der Anstieg des „maximalen“ SRES-Emissionsszenarios für diesen Zeitraum (Global Carbon Project 2008). Zum anderen zeigt ein Vergleich der bis 2005 vorliegenden Messdaten der globalen Mitteltemperatur und des Meeresspiegelanstiegs mit den IPCC-Klimaszenarien, dass letztere die reale Entwicklung tendenziell unterschätzen: der gemessene Temperaturverlauf liegt am oberen Rand des von den IPCC-Klimaszenarien aufgespannten Bereichs und der gemessene Meeresspiegelanstieg liegt weit oberhalb des IPCC-Bereichs (Rahmstorf et al. 2007). Insbesondere hinsichtlich des Meeresspiegelanstiegs müssen die IPCC-Klimaszenarien also wahrscheinlich deutlich nach oben korrigiert werden, da u. a. das Abschmelzen des Grönland- und des Westantarktis-Eisschildes – zwei der sogenannten Kippelemente im globalen Klimasystem (Lenton et al. 2008) – nicht ausreichend berücksichtigt wurde. Während der Vierte Sachstandsbericht des IPCC (2007b) für den Meeresspiegelanstieg bis 2100 einen relativ „moderaten“ Bereich von 18-59 cm (alle Emissionsszenarien, alle GCMs) angibt, gehen neuere Forschungen davon, dass dieser Bereich bei Berücksichtigung der Eisschilddynamik erheblich angehoben werden muss, z. B. nach der Studie von Rahmstorf und Vermeer auf 75-190 cm (vgl. Rahmstorf 2009). Aufgrund der Trägheit und Nichtlinearität des Klimasystems ist auch über das Jahr 2100 hinaus mit weiterem Meeresspiegelanstieg zu rechnen. So geht etwa der WBGU bei einer langfristigen Stabilisierung der globalen Erwärmung bei 3°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau von 3 bis 5 Metern Meeresspiegelanstieg bis 2300 gegenüber heute aus (WBGU 2006, 37 f).

4 Welche regionalen Klimaszenarien liegen für Deutschland vor?

4.1 Eingesetzte regionale Klimamodelle

In Deutschland werden derzeit vier regionale Klimamodelle zur Erstellung regionaler Klimaszenarien eingesetzt: die beiden dynamischen Modelle REMO (MPI-M, Hamburg) und CLM (DWD und etwa 25 weitere Institutionen) sowie die beiden statistischen Modelle STAR (PIK, Potsdam) und WettReg (CEC, Potsdam).

4.1.1 REMO

Das hydrostatische⁶ dynamische Modell REMO (RegionalModel) wird vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg (MPI-M) entwickelt und betrieben. In einer Studie für das Umweltbundesamt (UBA) wurden in einem zweistufigen (doppelt genesteten) Verfahren basierend auf den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 regionale Klimaszenarien für Deutschland mit einer horizontalen Auflösung von 10 x 10 km für den Zeitraum 1950-2100 erstellt (Jacob et al. 2008). Die Randbedingungen lieferte das ebenfalls am MPI-M betriebene globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM. Die Outputdaten sind die wichtigsten Klimaparameter (u. a. Temperatur, Niederschlag, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit); diese liegen für jeden Modelllauf je nach Klimavariablen in einer zeitlichen Auflösung von 1 bis 6 Stunden vor. Die Daten der Klimaszenarien sind beim Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung des UBA unter www.anpassung.net frei verfügbar.⁷

⁶ In hydrostatischen Modellen wird die Atmosphäre als sogenannte ideale Flüssigkeit aufgefasst, d. h. sie wird u. a. als inkompressibel angenommen. Dies ist eine grobe, aber nützliche Vereinfachung der Realität. Allerdings können dadurch z. B. vertikale Prozesse in Gebirgsregionen nicht adäquat abgebildet werden. Bei der Beschreibung solcher Prozesse sind nicht-hydrostatische Modelle wie z. B. CLM im Vorteil.

⁷ Weitere Informationen zu REMO finden sich unter www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/ueberblick/atmosphaere-im-erdsystem/reionale-klimamodellierung/remo-uba.html.

4.1.2 CLM

Das nicht-hydrostatische dynamische Modell CLM (Klimaversion des Lokalmodells des Deutschen Wetterdienstes DWD), mittlerweile umbenannt und weiterentwickelt zu COSMO-CLM, ist eine Gemeinschaftsentwicklung von etwa 25 verschiedenen Institutionen. Bisher liegen sogenannte Konsortialläufe (Gemeinschaftsläufe) für die Emissionsszenarien A1B und B1 mit den Randbedingungen aus dem globalen Klimamodell ECHAM5/MPI-OM für 1960-2100 vor. Die Daten der Klimaszenarien sind unter <http://clm.gkss.de> frei verfügbar.⁸

4.1.3 STAR

Das statistische Modell STAR (Statistisches Regionalmodell) wird am Potsdam-Institut für Klimaforschung (PIK) entwickelt. Basierend auf einem großräumig vorgegebenen Temperaturentrend von +1,4 °C für 2001-2055, der sich aus dem globalen Klimamodell ECHAM4 für das Emissionsszenario A1B ergibt, wurde ein regionales Klimaszenario bis 2055 für Deutschland erstellt. Der Output besteht aus Tageswerten für elf Klimavariablen (Mittel-, Maximum- und Minimum-Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Wasserdampfdruck, Sonnenscheindauer, Bedeckungsgrad, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit) für mehr als 2000 Wetterstationen in Deutschland. Die Klimaszenarien sind am PIK in Daten- und Kartenform verfügbar.⁹

4.1.4 WettReg

Das auf einer Typisierung von Wetterlagen basierende statistische Modell WettReg (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode) wird von Climate & Environment Consulting GmbH Potsdam (CEC) entwickelt. In einer Studie für das UBA wurden basierend auf den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 regionale Klimaszenarien für Deutschland für den Zeitraum 1950-2100 erstellt (Spekat et al. 2007). Die Randbedingungen lieferte das globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM. Die Daten der Klimaszenarien sind beim Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung des UBA unter www.anpassung.net frei verfügbar.¹⁰

4.2 Zusammenfassende Darstellung der regionalen Klimaszenarien

Im Folgenden werden die Ergebnisse der für Deutschland bislang vorliegenden regionalen Klimaszenarien in ihrer wesentlichen Grundtendenz zusammenfassend dargestellt (vgl. auch Bundesregierung 2008 und Stock et al. 2009). Abbildung 4 zeigt die Klimaszenarien der vier regionalen Klimamodelle bei zugrunde liegendem A1B-Emissionsszenario für drei Klimaparameter (Jahresmitteltemperatur, Sommer- und Winterniederschlag) und zwei Zeithorizonte in Kartenform.

Nach dem vom DWD durchgeführten Modellvergleich steigt die Jahresmitteltemperatur in Deutschland je nach Emissionsszenario (A1B, A2, B1) und globalem bzw. regionalem Klimamodell (ECHAM5; REMO, WettReg) für den Zeitraum 2021-2050 um 0,5-2°C und für 2071-2100 um 1,5-3,5°C gegenüber der Periode 1961-1990 an. Die Erwärmung fällt in Süddeutschland, v. a. im Voralpen- und Alpenraum, tendenziell stärker aus als im Norden. Im Herbst und Winter wird sie stärker sein als im Frühjahr und Sommer. Damit gibt es eine Ausweitung der Vegetationsperiode sowie eine Veränderung des winterlichen Schnee- und Frostregimes. Auch die warmen Temperaturextreme werden vermutlich häufiger, z. B. wird die Anzahl der heißen Tage ($T > 30^{\circ}\text{C}$) stark zunehmen. Der Jahresniederschlag ist in den meisten regionalen Klimaszenarien nur geringfügig verändert. Allerdings ist zu erwarten, dass

⁸ Kurzbeschreibung von CLM unter www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/CLM/clm.html.

⁹ Kurzbeschreibung von STAR unter www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/STAR/star.html.

¹⁰ Kurzbeschreibung von WettReg unter www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/WettReg/wettreg.html.

sich die schon in den letzten Jahrzehnten beobachtete jahreszeitliche Ungleichverteilung des Niederschlags weiter verstärkt. Das bedeutet mehr Niederschlag im Winter und weniger im Sommer. Zudem deutet sich ein weiter fortgesetzter Trend zu mehr Starkregenereignissen bei abnehmendem Dauerregen an. Bezüglich der Windgeschwindigkeit bestehen noch starke Modellunsicherheiten.

Am PIK wurde darüber hinaus untersucht, wie gut die Ergebnisse verschiedener regionaler Klimamodelle für die vergangenen Jahrzehnte mit den Messdaten übereinstimmen. So legt etwa ein statistischer Vergleich von Modellergebnissen und Messdaten für den Zeitraum 1976-2000 für das Elbe-Einzugsgebiet nahe, dass die dynamischen Modelle wie REMO gegenüber den statistischen wie STAR noch größere Unsicherheiten aufweisen – u. a. bei der Wiedergabe von Temperaturen, Starkniederschlägen und Trockenperioden (vgl. Orłowsky et al. 2008). Einige dieser Unsicherheiten können durch die Erhöhung der Anzahl der Realisierungen genauer bestimmt werden. Um die jeweiligen Vorzüge von dynamischen und statistischen Modellen gezielt ausnutzen zu können, koppeln neue Ansätze am PIK daher statistische mit dynamischen Modellen, wobei erstere den Trendverlauf vorgeben und letztere für einen kürzeren Zeitraum viele Realisierungen rechnen. Eine solche Kopplung verspricht v. a. Fortschritte bei der Modellierung von Extremereignissen.

Abb. 4: Von den regionalen Klimamodellen REMO, CLM, WettReg und STAR für das A1B-Emissionsszenario für den Zeitraum 2021-2050 (obere Reihen) und 2071-2100 (untere Reihen) im Vergleich zur Periode 1961-1990 projizierte Änderung der a) Jahresmitteltemperatur, b) Sommer- und c) Winterniederschläge (Auswertung des DWD; Graphiken aus Bundesregierung 2008)

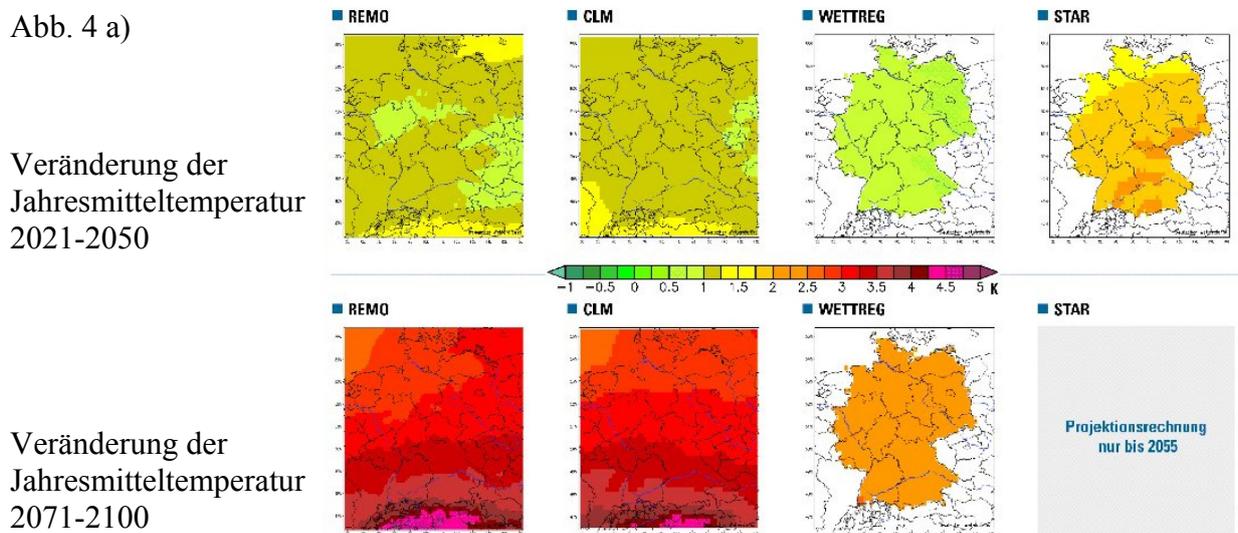
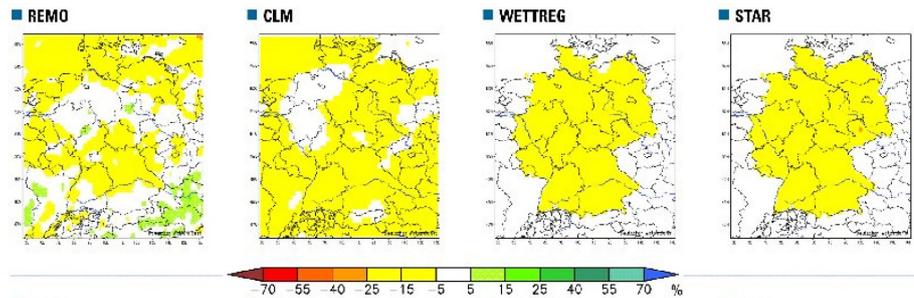


Abb. 4 b)

Veränderung des
Sommerniederschlags
2021-2050



Veränderung des
Sommerniederschlags
2071-2100

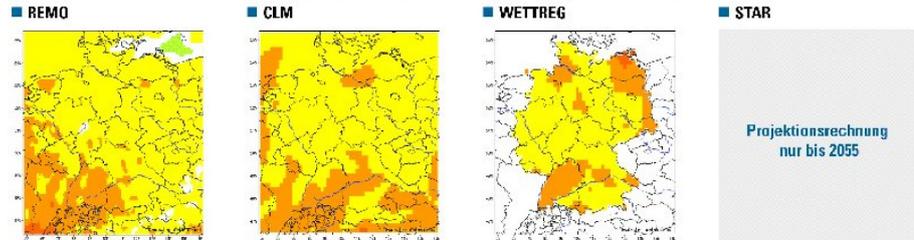
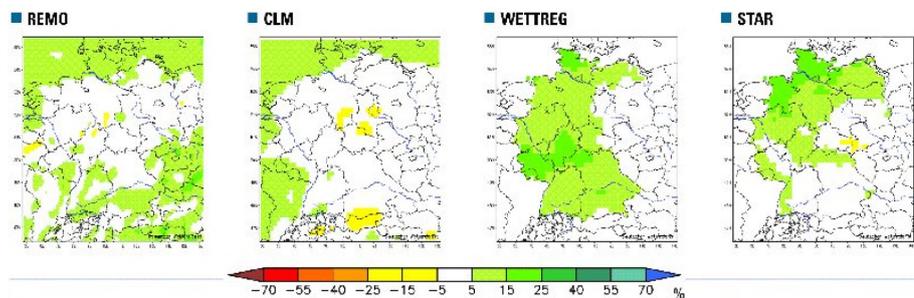
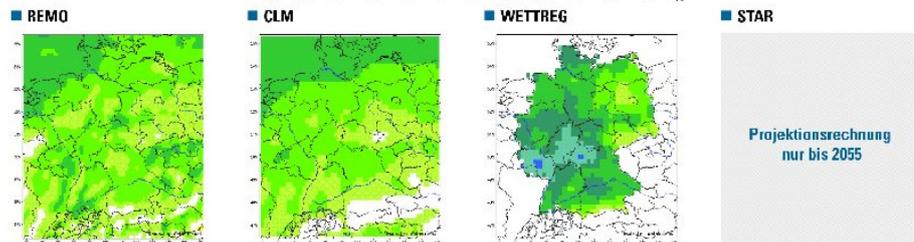


Abb. 4 c)

Veränderung des
Winterniederschlags
2021-2050



Veränderung des
Winterniederschlags
2071-2100



5 Wie kann mit den Unsicherheiten regionaler Klimaszenarien umgegangen werden?

Die sich unterscheidenden regionalen Klimaszenarien für Deutschland legen nahe, Aussagen über die klimatische Zukunft niemals auf nur einem Emissionsszenario, nur einem globalen Klimamodell oder nur einem regionalen Klimamodell zu basieren – vielmehr sollten mindestens zwei oder mehr Emissionsszenarien, globale und regionale Klimamodelle verwendet werden. In der Regel zeigt sich dabei, dass die verschiedenen Klimaszenarien in vielen Grundtendenzen übereinstimmen. Wo sich Aussagen der Klimaszenarien widersprechen, muss im Zweifel mit diametral entgegengesetzten „Klimazukünften“ gerechnet und geplant werden. Dabei sind verschiedene Klimaparameter unterschiedlich unsicher: Temperaturen sind meist mit größerer Sicherheit zu simulieren als Niederschläge oder gar Windgeschwindigkeiten; Mittelwerte können generell zuverlässiger projiziert werden als klimatische Extremwerte. Die größte Unsicherheit besteht bei Extremwetterereignissen wie etwa Starkniederschlägen, Hitzewellen und Stürmen – obwohl gerade diese bei der Planung von Anpassungsmaßnahmen besonders berücksichtigt werden müssen.

Ein angemessener Umgang mit diesen Unsicherheiten in der räumlichen Planung erfordert, dass in vielen Sektoren und Bereichen Einschätzungen der regionalen Verwundbarkeit auf der Basis von Wahrscheinlichkeiten und einer Analyse vergangener Ereignisse in die Planungsgrundlagen einbezogen werden bzw. zu handlungsleitenden Planungsgrundlagen werden müssen. Dies erfordert auch geeignete Verfahren für Entscheidungen unter Unsicherheit. In vielen Fachplanungen können Ergänzungen und Anpassungen von bestehenden planerischen Zielen oder Vorgaben aufgrund des Klimawandels nötig werden. Die Einführung von Risikozuschlägen, z. B. bei der Bemessung von Deichanlagen, ist hierbei ein möglicher Ansatz – dadurch würde allerdings die Vulnerabilität „hinter dem Deich“ nicht verringert, so dass diese Maßnahme durch Strategien zur Verminderung der Sensitivität und zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit ergänzt werden muss. Bei der bergbaulichen Gewinnung von Rohstoffen sowie bei flussbaulichen Maßnahmen – bzw. in den entsprechenden Planungen – ist künftig z. B. die steigende Wahrscheinlichkeit stärkerer Schwankungen des Grundwasserspiegels oder der Flusspegelstände bei der Risikobewertung in der Rohstoffgewinnung sowie beim Gewässerausbau zu berücksichtigen. Bei der Auswahl von Anpassungsmaßnahmen sollten – gerade aufgrund der Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung – solche bevorzugt werden, die eine flexible Nachsteuerung ermöglichen, sowie solche, die jegliche Extremereignisse, z. B. sowohl Hochwasser als auch Niedrigwasser, abmildern. In der Landwirtschaft können v. a. Maßnahmen des Boden- und Gewässerschutzes dazu beitragen, die negativen Folgen sowohl von Trockenperioden als auch von Starkregen zu senken. Die standortabhängige Wahl von Kombinationen von Feldfrucht und zusätzlicher Bodenbedeckung etwa könnte die Sensitivität der landwirtschaftlichen Nutzung gegenüber Extremereignissen reduzieren.

Ein zentraler Unterschied zwischen der Forschung zum Klimawandel und der räumlichen Planung ist der jeweils betrachtete Zeithorizont. Die räumliche Planung erfasst bislang nur relativ kurze Zeiträume: Regionalpläne und Fachplanungen haben einen Zeithorizont von etwa 15 Jahren, die EU-Agrarförderung reicht derzeit bis 2013 und Entwicklungsplanungen für andere Sektoren (Schulen, Krankenhäuser usw.) betreffen teilweise sogar noch kürzere Zeiträume. Die Entfaltung der „vollen“ Wirkungen des anthropogenen Klimawandels hingegen erstreckt sich über das gesamte 21. Jh. und vermutlich noch weit darüber hinaus. Für einen angemessenen Umgang mit dem Klimawandel muss Planung also eine langfristige Perspektive – 2050 oder sogar 2100 – im Auge haben. Dies gilt natürlich besonders bei Planungen von Infrastrukturen, die eine Lebensdauer von 50 oder mehr Jahren haben können.

Generell gilt, dass selbst große Unsicherheiten aufgrund des Vorsorgeprinzips nicht zu Untätigkeit bei Anpassungsmaßnahmen verleiten dürfen. Allerdings müssen diese mit Maßnahmen zum Klimaschutz Hand in Hand gehen. Denn nicht zuletzt könnten bei weiterhin ungebremstem Klimawandel sogenannte Kippelemente im globalen Klimasystem, d. h. Teilsysteme, die durch Schwellwertverhalten und positive Rückkopplungsmechanismen geprägt sind, einmal in Gang gesetzt, zu erheblichen weiteren Klimaveränderungen führen (vgl. www.pik-potsdam.de/infothek/kipp-prozesse für eine einführende Übersicht über die wichtigsten Kippelemente). Die jeweiligen nicht zu überschreitenden Schwellwerte für das Einsetzen solcher irreversiblen Prozesse – wie z. B. das vollständige Abschmelzen des arktischen Meereises und der grönländischen und antarktischen Eisschilde, das Auftauen des sibirischen Permafrostbodens oder der Zusammenbruch der nordatlantischen Ozeanzirkulation – sind mit den derzeitigen globalen Klimamodellen nur schwer abschätzbar. Fest steht aber, dass solche Ereignisse gravierende Folgen hätten und trotz noch bestehender Unsicherheiten ernst genommen werden müssen. Allein z. B. das Abschmelzen des Grönland-Eisschildes würde – obschon vermutlich verteilt auf mehrere Jahrhunderte – zu einem zusätzlichen Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern führen. Ohne sofortigen radikalen Klimaschutz wächst also die Wahrscheinlichkeit, dass eines Tages Klimawirkungen eintreten, gegen die Anpassung nur zu gigantischen

ökologischen, ökonomischen und sozialen Kosten zu haben wäre, die sich womöglich nur die wenigsten leisten können.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Paktprojekts „Anpassung an den Klimawandel durch räumliche Planung – Grundlagen, Strategien, Instrumente“ (2008-2010) der Leibniz-Gemeinschaft entstanden. Für hilfreiche Kommentare danken die Autoren allen Projektmitgliedern, insbesondere Alexander Fekete, Gerhard Overbeck und Karin Schmelmer, sowie Boris Orłowski und Katrin Adler.

Literatur

- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17.12.2008 beschlossen. www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php.
- Global Carbon Project (2008): Carbon budget and trends 2007. www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/07/index.htm.
- IPCC – International Panel on Climate Change (2007a): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm.
- IPCC – International Panel on Climate Change (2007b): Climate Change 2007: Synthesis Report. www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm.
- Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S.; Lorenz, P. & Sieck, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland. Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. UBA, Reihe Climate Change 11/08. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3513.pdf.
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E.; Hall, J.W.; Lucht, W.; Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H.J. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 6, 1786-93. www.pnas.org/content/105/6/1786.full.pdf.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J.; Davis, G.; et al. (2000): IPCC Special Report: Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm.
- Orłowski, B., Gerstengarbe, F.-W.; Werner, P.C. (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology* 92, 3-4, 209-223.
- Rahmstorf, S.; Cazenave, A.; Church, J.A.; Hansen, J.E.; Keeling, K.F.; Parker, D.E.; Somerville, R.C.J. (2007): Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science* 316, 709. www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Nature/rahmstorf_etal_science_2007.pdf.
- Rahmstorf, S. (2009): Sea Level Rise. Vortrag auf dem Climate Change Congress in Kopenhagen, 10.3.2009. <http://climatecongress.ku.dk/speakers/stefanrahmstorf-plenaryspeaker-10march2009.pdf>.
- Spekat, A.; Enke, W. & Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarios B1, A1B und A2. Endbericht, UBA, Dessau. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf.
- Stock, M.; Kropp, J. & Walkenhorst, O. (2009): Risiken, Vulnerabilität und Anpassungserfordernisse für klimaverletzliche Regionen. *Raumforschung und Raumordnung* 67, Heft 2, 97-113.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2006): Die Zukunft der Meere: zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten. www.wbgu.de/wbgu_sn2006.html.
- Zebisch, M.; Grothmann, T.; Schröter, D.; Hasse, C.; Fritsch, U.; Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. UBA, Reihe Climate Change 08/05. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2947.pdf.

Kurzfassung / Abstract

Regionale Klimaszenarien für Deutschland: Eine Leseanleitung

Regionale Klimaszenarien liefern die Grundlage zur Abschätzung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf regionaler Ebene. Die vorliegende Arbeit stellt in knapper Form dar, wie regionale Klimaszenarien erarbeitet werden, welche regionalen Klimaszenarien derzeit für Deutschland vorliegen, wie aussagekräftig und belastbar sie sind und wie – insbesondere in der räumlichen Planung – mit den zugehörigen Unsicherheiten umgegangen werden kann.

Regional Climate Scenarios for Germany: A Guidance

Regional climate scenarios are the basis for the assessment of possible impacts of climate change on the regional level. This paper provides a brief overview of how regional climate scenarios are being developed and which regional climate scenarios are currently available for Germany. Furthermore, the significance and validity of their results are assessed and it is discussed how the uncertainties inherent in regional climate scenarios can be dealt with in spatial planning practice.

