
Zwischenbericht im Forschungsvorhaben

Ökonomie des Klimawandels – Integration ökonomischer Modellierungen und institutioneller Analyse auf verschiedenen Skalenebenen

AP 1.1: Klimawandel, Szenarien, Daten

FKZ 01LA1137C

Forschungsvorhaben gefördert durch das BMBF

Thomas Drosdowski

Ulrike Lehr

Christian Lutz

Anne Nieters



Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH

Heinrichstr. 30

D - 49080 Osnabrück

Ulrike Lehr (lehr@gws-os.com)

Tel.: +49 (541) 40933-120

Fax: +49 (541) 40933-110

Internet: www.gws-os.com

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	II
1 EINLEITUNG.....	1
2 KLIMASZENARIEN	2
2.1 GLOBALE KLIMASZENARIEN UND MODELLE	2
2.2 REGIONALE KLIMASZENARIEN UND MODELLE MIT FOKUS AUF DEUTSCHLAND.....	4
3 ERGEBNISSE REGIONALER KLIMASTUDIEN FÜR DEUTSCHLAND.....	8
3.1 REMO	9
3.2 COSMO-CLM.....	9
3.3 STARS	10
3.4 WETTREG.....	10
3.5 ERGEBNISSE FÜR DIE ZIELREGIONEN	11
3.6 VERFÜGBARE KLIMADATEN UND –KARTEN	12
4 KLIMAWIRKUNGEN	13
4.1 SEKTORALE WIRKUNGEN	16
4.2 BEREICH WASSERHAUSHALT, WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND MEERESSCHUTZ	16
4.3 HITZEWELLEN.....	18
4.4 KLIMAWIRKUNGEN IN DEN ZIELGEBIETEN	18
5 VERBINDUNG ZWISCHEN KLIMASZENARIEN UND KLIMAWIRKUNGEN.....	19
5.1 SCHADENSFUNKTIONEN DER IAM	19
5.2 DEUTSCHLAND-STUDIEN	21
6 FAZIT UND AUSBLICK.....	22
LITERATURVERZEICHNIS	26

1 EINLEITUNG

Der Klimawandel wird zunehmend international als Tatsache akzeptiert, ebenso wie aus den Beobachtungen der Vergangenheitswerte wichtiger Indikatoren auf einen Zusammenhang zwischen menschlichen Aktivitäten und Klimaveränderungen seit Beginn der Industrialisierung geschlossen wird. Im 20. Jahrhundert wurde beispielsweise in Deutschland ein Anstieg der mittleren Lufttemperatur festgestellt, wobei die letzte Dekade am wärmsten war (Bundesregierung 2008, vgl. auch Walkenhorst & Stock 2009). Auch zu Beginn des 21. Jahrhunderts blieb es überdurchschnittlich warm. Der Anstieg ist insbesondere im Südwesten erfolgt, im Saarland um etwa 1,2° C. Dagegen fiel der Anstieg im Nordosten relativ gering aus, in Mecklenburg-Vorpommern um 0,4°C. Die jährliche Niederschlagsmenge ist seit Beginn des 20. Jahrhunderts im Mittel um 9% gestiegen, in den letzten Jahren war sie überdurchschnittlich hoch. Der Niederschlag hat besonders im Frühjahr zugenommen; für die Sommer ist kein Trend erkennbar, doch die Verteilung innerhalb der Monate hat sich verschoben – es wurde mehr Niederschlag im Juni, weniger im Juli/August gemessen. Im Winter war eine Steigerung erkennbar. Auf's Jahr gesehen war v.a. Westdeutschland betroffen, im Osten erfolgte eine Niederschlagszunahme im Winter, eine Abnahme hingegen im Sommer. Eine Fortschreibung des Status Quo kann aller Voraussicht nach dramatische Konsequenzen für Mensch und Natur auf der Erde mit sich bringen.

Wenngleich sich aus diesen Entwicklungen eine Verschärfung der weltweiten Treibhausgasreduzierungsstrategien ergeben sollte, rücken zunehmend die zukünftigen Folgen der sich aus der heutigen Situation anscheinend unvermeidbar ergebenden Erderwärmung in den Fokus. Vor diesem Hintergrund hat ein Konsortium aus dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), der Humboldt-Universität Berlin (HU) und der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) ein Forschungsvorhaben initiiert, das sich mit Aspekten der Ökonomie der Anpassung an den Klimawandel befasst. Das Ziel des Gesamtvorhabens besteht darin, die ökonomischen Auswirkungen von Klimawandel und Anpassungsstrategien in Deutschland modellgestützt abzubilden, die Verteilung von Kosten und Nutzen der Anpassung zu analysieren und die institutionellen Rahmenbedingungen des Anpassungsprozesses zu untersuchen. Daraus werden für den weiteren Prozess der Ausgestaltung der Deutschen Anpassungsstrategie ökonomische Daten und geeignete institutionelle Ansätze zu ihrer Umsetzung beitragen. Modellierung, Kosten-Nutzen-Analyse und institutionelle Analyse setzen dabei auf verschiedenen Skalenebenen - von der regionalen bis zur nationalen Ebene - an und haben dabei jeweils auch die verschiedenen Wirtschaftssektoren im Blick.

Klimafolgenanpassung lässt sich nur vor dem Hintergrund von Szenarien zum globalen Klimawandel und seinen regionalen Auswirkungen untersuchen und verstehen. Im Folgenden werden daher zunächst die projizierten Klimaentwicklungen für Deutschland dargestellt. Dabei wird sowohl auf die globalen als auch auf die regionalen Klimaszenarien und Modelle eingegangen. Im weiteren Verlauf werden die potenziellen Klimaauswirkungen für Deutschland mit einem besonderen Augenmerk für die im Forschungsvorhaben „Ökonomie des Klimawandels – Integration ökonomischer Modellierungen und institutioneller Analyse auf verschiedenen Skalenebenen“ schwerpunktmäßig analysierten Bereiche und Zielgebiete diskutiert.

2 KLIMASZENARIEN

Um bessere Vorkehrungen gegen schädliche Folgen des Klimawandels treffen zu können, bedarf es einer möglichst genauen Vorstellung des Zustands der Welt in der Zukunft. Um dies zu erreichen, müssen geeignete analytische und prognostische Instrumente entwickelt und eingesetzt werden, die der Komplexität der klimatischen Veränderungen und deren Wechselwirkungen mit der menschlichen Sphäre am besten gerecht werden können. Diese Instrumente sind Klimamodelle, die mit Hilfe spezieller Algorithmen auf Grundlage von Treibhausgasemissionen künftige Klimarealisationen berechnen und auf kleinere räumliche Skalen übertragen. Die Modelle lassen sich entsprechend in globale und regionale unterteilen. Der folgende Abschnitt befasst sich zunächst mit globalen Klimamodellen und den Szenariorechnungen, die mit ihrer Hilfe durchgeführt werden.

2.1 GLOBALE KLIMASZENARIEN UND MODELLE

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlicht in seinen periodischen Berichten Einschätzungen über künftiges Klimageschehen. Grundlage der letzten beiden Sachstandsberichte (IPCC 2001, 2007) waren die sog. SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios, Nakicenovic & Swart 2000), die mit sogenannten Integrated Assessment Modellen (IAM) erstellt wurden. Die im Auftrag von IPCC verwendeten IAM projizierten deterministische Zeitpfade künftiger Treibhausgasemissionen nach Maßgabe von projizierten Entwicklungen sozioökonomischer Größen wie BIP, Bevölkerung oder Energieverbrauch, die sich auf abgestimmte Narrative/Storylines bzgl. der künftigen Entwicklungen stützten.

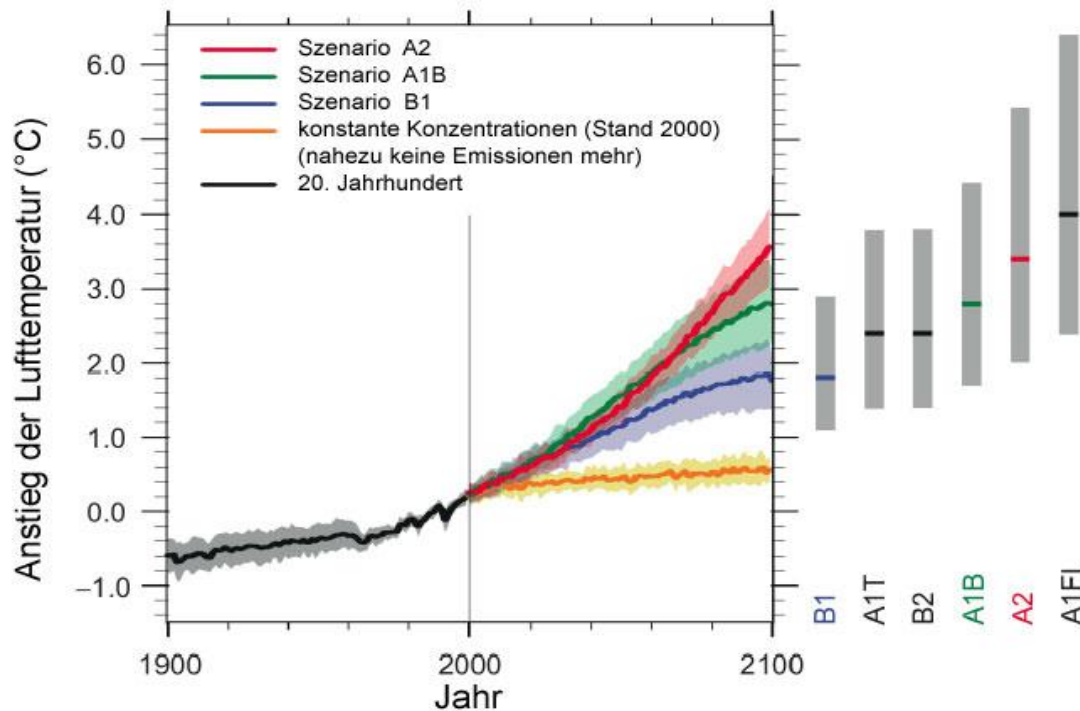
Die etwa 40 Szenarien gliedern sich in vier Familien. Die ökonomiezentrierten SRES werden mit dem Buchstaben A bezeichnet, im Gegensatz zu auf Nachhaltigkeit abzielenden Ansätzen (B). Zu den Buchstaben kommen noch mindestens die Zahlen 1 (global konvergierende Entwicklung) oder 2 (regionale Divergenz), so dass letztlich die SRES-Familien die Bezeichnungen A1, B1, A2 und B2 tragen. Unter den A1-Szenarien werden je nach Annahmen zur Energienutzung häufig die Varianten A1FI (fossiler Schwerpunkt), A1B (ausgeglichener Mix) und A1T (weitgehend nicht-fossil) verwendet.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft den projizierten Anstieg der globalen Lufttemperatur bis 2100 auf Basis der SRES-Szenarien. An der dargestellten Bandbreite wird deutlich, dass die Ergebnisse mit großer Unsicherheit behaftet sind, insbesondere was die Entwicklungen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts betrifft.

Die SRES werden seit einiger Zeit als überholt betrachtet, denn sie beschreiben eine Zukunft, die 2001 beginnt und die tatsächlichen Entwicklungen der letzten Dekade in ihren Einschätzungen verfehlen. Die reale Entwicklung der globalen Emissionen übertraf z.B. selbst die pessimistischsten Projektionen (Stock & Walkenhorst 2009, S. 10). Nach Moss et al. (2010), zitiert auch in van Vuuren et al. (2011b), liegen drei weitere Gründe für die Notwendigkeit neuer Szenarien vor. Zum einen vernachlässigten die SRES die Kosten und Nutzen von Vermeidungsstrategien. Zweitens benötigen verbesserte Klimamodelle detailliertere Informationen z.B. in Bezug auf Aerosolemissionen. Und schließlich müsse für eine konsistente Nutzung dieser Szenarien eine stärkere Zusammenarbeit der IAM-For-

scher mit den Forschergruppen, die sich mit Klimawirkungen, Anpassung und Vulnerabilität befassen (IAV), erfolgen. Da die SRES jedoch nicht in ihrer derzeitigen Form aktualisiert werden, bilden sie bis heute die Hauptgrundlage der Berechnungen künftiger globaler und regionaler Klimaveränderungen.

Abbildung 1: Projizierter Anstieg der Lufttemperatur bis 2100 in SRES-Szenarien



Quelle: IPCC 2007 (WGI-AR4, Summary for Policymakers, Feb. 2007).

Für den im Jahr 2014 erwarteten fünften Sachstandsbericht des IPCC (AR5) werden die SRES nicht mehr als Ausgangspunkt der Klimamodellierungen genutzt, auch wenn die IAV-Studien im Rahmen des Berichts immer noch weitgehend darauf aufbauen (Arnell et al. 2011). Als solcher Ausgangspunkt gelten alternative Zeitpfade der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen (Representative Concentration Pathways, RCP), die sich aus bestimmten Strahlungsantrieben ergeben, was die Berechnung von Erdoberflächentemperaturen erlaubt. Die RCP wurden in vier Ausprägungen auf Basis von Treibhausgasemissionen aus jeweils vier IAMs verschiedener internationaler Forscherteams bestimmt. Mit Hilfe weiterer Modelle erfolgten zusätzliche Harmonisierungen der historischen Inputdaten sowie Berechnungen, die zur Ermittlung der RCP führten. Die unterschiedlichen Pfade entsprechen in ihren Bezeichnungen dem Anstieg des Strahlungsantriebs um 2,6 bis 8,5 W/m² im Jahre 2100. RCP2.6 entspricht einem Verlauf, der bis zu einer Konzentration von 490 ppm in CO₂-Äquivalenten steigend ist, wonach eine Absenkung auf 450 ppm erfolgt. Die beiden mittleren Pfade RCP4.5 und RCP6 sind steigend und erreichen eine Stabilisierung bei 650 ppm respektive 850 ppm. Im Fall von RCP8.5 steigt die CO₂-Konzentration auf 1370 ppm in 2100 und darüber hinaus (van Vuuren et al. 2011a).

Für diese festgesetzten Zeitpfade erarbeiten Forscherteams parallel zum einen konsistente sozioökonomische Szenarien, zum anderen Klima- und Impactszenarien für den Zeitraum 2005-2100 und darüber hinaus. Diese Vorgehensweise bedeutet eine Abkehr von der bisherigen sequentiellen Prozedur, die aufgrund von unterschiedlichen Zeit- und Ar-

beitsintensitäten einzelner Schritte zu erheblichen Verzögerungen bei iterativen Arbeitsprozessen führen würde. Nichtsdestotrotz ist nach gegenwärtigem Stand nicht damit zu rechnen, dass ein integrierter und abgestimmter Satz an neuen IPCC-Szenarien mit dem nächsten Bericht geliefert wird. Dieser Prozess soll noch nach seinem Erscheinen fortgesetzt werden. Im Bereich der sozioökonomischen Szenarien wurde ein Rahmen für deren Erstellung zum Zwecke weitergehender IAV-Analysen vereinbart (Arnell et al 2011). Demnach sollen zunächst sogenannte Shared Socioeconomic Reference Pathways (SSP) nach festgelegten qualitativen („narrativen“) und quantitativen Kriterien (abgestimmte Treibervariablensets, allerdings keine Klimapolitikvariablen für die IAM) berechnet werden. Je nach unterstellten Herausforderungen der Szenarien für Vermeidung (mitigation) und Anpassung (adaptation) wird zwischen fünf SSP unterschieden: Nachhaltigkeit (niedrige Herausforderungen), „Middle of the Road“ (mittlere Herausforderungen), Fragmentierung (hohe Herausforderungen), Ungleichheit (dominierende Anpassungsherausforderungen) und konventionelle Entwicklung (dominierende Vermeidungsherausforderungen) (O’Neill et al. 2012). Perspektivisch sollen die SSP an die RCP angeglichen werden.

Globale Klimamodelle benutzen die IPCC-Szenariovorgaben (RCP) zur Generierung künftiger Zeitpfade von Größen wie Temperatur oder Niederschlag unter Berücksichtigung von Interaktionen zwischen Ozeanen und der Atmosphäre. Sie projizieren sie für die ganze Erde, aufgeteilt in Gitterpunkte mit horizontalen Abständen von ca. 200 km, was für kleinere Regionen eine sehr grobe räumliche Skala darstellt. Den deutschen Beitrag zur Erstellung neuer Klimaszenarien wird wie in der Vergangenheit das Max-Planck-Institut für Meteorologie leisten, dessen globales Modell ECHAM5-MPIOM die klimatologischen Vorgaben für die regionalen Modelle für Deutschland liefert. Die kürzlich entwickelte Variante des Atmosphärenmodells ECHAM6 wurde zu diesem Zweck zusammen mit dem Ozeanmodell MPIOM, dem Landbiosphärenmodell JSBACH und dem Biogeochemiemodell HAMMOCC zu einem Erdsystemmodell namens MPI-ESM zusammengeschlossen. Das Modell berechnet die atmosphärischen Veränderungen in einer horizontalen Auflösung von etwa 200 km und 47 oder 95 vertikalen Schichten. Bis jetzt wurden Modellläufe auf Basis von RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 ausgewählt (DKRZ 2013). Es liegt ein Modelloutput für zumindest RCP8.5 vor.

2.2 REGIONALE KLIMASZENARIEN UND MODELLE MIT FOKUS AUF DEUTSCHLAND

Regionale Klimamodelle basieren auf Vorgaben globaler Modelle, die für die Regionen bedeutsame klimatische Entwicklungen in einer nicht ausreichend detaillierten Weise nachzeichnen. Somit gelten für die Regionalmodelle auch die SRES-Storylines im kleineren Maßstab. Dieser ist gleichbedeutend mit horizontalen Gitterabständen von 10-20 km, womit recht präzise räumliche Aussagen über deutsche Regionen gemacht werden können. Die nötige Übertragung der großräumigen Muster auf die regionale Ebene wird als Downscaling bezeichnet. In Deutschland werden gegenwärtig vier regionale Klimamodelle benutzt: COSMO-CLM, REMO, STARS (vormals STAR) und WETTREG.

Die ersten beiden der genannten Modelle sind sog. dynamische oder numerische Modelle. Darunter werden komplexe und aufwendige Rechenwerke verstanden, die die physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre auf Basis von dynamischen Gleichungen simulieren. Sie sind prinzipiell in der Lage Rückkopplungen mit den globalen Modellen einzugehen und neue Klimazustände zu erzeugen, deren Auftreten bisher nicht in den

historischen Daten registriert wurde. Unter den dynamischen Modellen wird zwischen hydrostatischen und nicht-hydrostatischen Modellen unterschieden. Die ersteren vereinfachen die modellierten physikalischen Atmosphärenprozesse durch das Ausblenden der Vertikalbeschleunigung von Luftteilchen, die in nicht-hydrostatischen Modellen durch eine Bewegungsgleichung berücksichtigt wird, wodurch im Prinzip beliebig kleinskalige Phänomene beschrieben werden können.

STARS und WETTREG werden hingegen als statistische Modelle bezeichnet, die auf statistischen Beziehungen zwischen globalen und lokalen bzw. regionalen Klimavariablen basieren und auf Grundlage von Beobachtungen von Klimastationen parametrisiert werden. Diese Modelle sind kurz- und mittelfristig zuverlässiger als die dynamischen Modelle, zudem weniger rechenintensiv und flexibler. Allerdings können sie normalerweise keine neuen Wetterbegebenheiten jenseits der historischen Erfahrungen simulieren.

Im Folgenden werden die regionalen Klimamodelle für Deutschland etwas genauer vorgestellt. Danach werden die Ergebnisse der langfristigen Simulationsrechnungen thematisiert.

Das dynamische nicht-hydrostatische Modell **COSMO-CLM** wird vom ECHAM5/MPIOM-Modell angetrieben und liefert hoch aufgelöste (18 km Gitterabstand) regionalisierte Klimadaten für Europa, die je nach Variable/Parameter Stunden- bis Tageswerte sind.

Das Lokale Modell (LM) für Wettervorhersagen wurde von 1996 bis 1999 vom DWD betrieben, bevor die Entwicklungsarbeiten im Rahmen eines europaweiten Konsortiums COSMO (Consortium for Small-scale Modelling), bestehend aus 25 Institutionen, fortgesetzt wurden. Die für Langzeitsimulationen erweiterte Version heißt COSMO-CLM (Climate Local Model). Seit 2005 gilt es als „Community Model“. Die Koordination obliegt der BTU Cottbus. Modellarbeiten werden von M&D aus Hamburg durchgeführt auf Rechnern des DKRZ.

Im Gegensatz zu anderen COSMO-Anwendungen, die Wettervorhersagen dienen, wird COSMO-CLM für langfristige Zeiträume verwendet, wobei die Abhängigkeit von den Anfangswerten relativ gering ist. Die Beobachtungsdaten werden nicht verwendet; Vegetation, CO₂, Ozon sind zeitvariabel. Die Modellphysik, Rand- und Anfangsbedingungen sowie Datenassimilation sind voneinander getrennt. Es werden klimatologische Größen wie hydrologischer Zyklus, Bodeneigenschaften und Erhaltungseigenschaften abgeschätzt. Es gibt Module für Aerosole, Biosphäre oder Meeresoberflächentemperatur.

Das Downscaling wird derart durchgeführt, dass das regionale Modell in das Gitter des globalen Modells eingebettet wird, indem die antreibenden Daten auf das horizontale Gitter des Modells sowie auf dessen (32) vertikale Levels interpoliert werden. Dadurch werden aus Daten aus vier historischen Dekaden die Anfangs- und Randbedingungen (Felder) generiert. Die eigene Modelldynamik wird auf Grundlage der zeitabhängigen Informationen des globalen Modells für eine „Randzone“ des Untersuchungsgebietes entwickelt. Ein Feedback vom regionalen zum globalen Modell findet dabei nicht statt. Die Eigenschaften der Erdoberfläche und Bodenschichten werden vom DWD übernommen. Das Modell basiert auf thermo-hydrodynamischen Gleichungen, formuliert in rotierten geografischen Koordinaten. Die Parameter berücksichtigen zahlreiche physikalische Größen.

Es wurden bislang jeweils drei Realisationen für die Historie (1960-2000) berechnet; für die modellierte Zukunft wurden auf Basis der SRES-Szenarienläufen A1B und B1 von ECHAM5 je zwei Realisationen erstellt.

REMO (Regionales Modell) ist ein „dreidimensionales hydrostatisches, atmosphärisches Zirkulationsmodell, das die relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet“ (Jacob et al. 2008, S. 22). Dadurch können nichtlineare Zusammenhänge betrachtet werden, während physikalische Prozesse, die nicht vom Modell auflösbar sind, durch adäquate physikalische Parametrisierungen berechnet werden können. Letztere werden von ECHAM5/MPIOM übernommen, das wie REMO am Max Planck Institut in Hamburg entwickelt wird. Entstanden ist das Modell aus dem Europa Modell des DWD.

Das globale Modell liefert Vorgaben bezüglich Temperatur, Wind, Bodendruck und Feuchtigkeit in atmosphärischen Schichten als Anfangs- und Randbedingungen für die seitlichen Ränder des REMO-Untersuchungsgebietes (Deutschland, Österreich, Schweiz), dessen regionale Begebenheiten bei den Modellrechnungen berücksichtigt werden. Auf Basis dieser Vorgaben wird auf dem regionalen Gitter eine Vielzahl von Outputgrößen berechnet, in Stunden- oder Monatsintervallen.

Zur Reduzierung des Skalenunterschiedes zwischen 200 km und 10 km wird ein zweistufiges Verfahren vorgenommen: Zuerst werden die Parameter des globalen Modells auf eine Europasimulation (50 km Gitter) übertragen, die wiederum Rand- und Anfangswerte für das Untersuchungsgebiet liefert.

Die Arbeitsweise der Modellierung bezieht die Validierung der historischen Daten, Qualitätskontrollen, Erstellung eines konsistenten beobachtungsnahen Datensatzes, Kontrollläufe für die Jetztzeit und schließlich regionale Szenarioläufe ein. Das Modell rechnet auf Basis von antreibenden Daten für den Zeitraum 1950-2100; die horizontale Auflösung beträgt ca. 10 km in 27 vertikalen Schichten.

Es wurde bisher insbesondere im Auftrag des UBA zur Regionalisierung der SRES-Szenarien A1B, A2 und B1 eingesetzt. Vor kurzem erfolgte eine Studie für die Bundesanstalt für Gewässerkunde, die Gleiches für das Szenario A1B leistete, allerdings auf Basis eines alternativen ECHAM5-Laufes.

WETTREG (WETTERlagenbasierte REGionalisierungsmethode) ist ein statistisches Regionalmodell für Deutschland, entwickelt von CEC Potsdam (s. z.B. Spekat et al. 2007). Die regionalen Simulationen wurden auf Grundlage von Annahmen berechnet, dass in Deutschland regionale Klimaunterschiede vorliegen und dass das Klima von Großwetterlagen globaler Modelle, die lokalen Einfluss haben, hinreichend gut beschrieben wird. Zunächst wurden die Rohdaten (Zeitreihen für 10 Klimavariablen oder „Wetterelemente“) aller Wetterstationen für den historischen Zeitraum 1961-2000 aufgearbeitet. Die Daten für die Jetztzeit werden dann für jede Jahreszeit aufgrund der Häufigkeitsverteilung in Klassen („Felder“) geteilt (10 für Temperatur, 8 für Feuchte), die Zirkulationsmustern entsprechen. Zusammen mit räumlichen Mustern werden die Felder auf ein Gitter transformiert. Dem Schritt folgt eine dekadenweise Analyse dieser Muster im Hinblick auf Tage und Häufigkeit des Auftretens in Szenarien des globalen Modells.

Die in den historischen Zeitreihen auftretenden Anomalien werden mit Hilfe eines Wettergenerators zu fiktiven Zeitreihen rekombiniert, so dass sie die Häufigkeitsverteilungen der Klassen abbilden, wobei die Übergangswahrscheinlichkeiten einzelner Abschnitte denen zwischen den Klassen entsprechen. Auf diese Weise wird das Klima der Jetztzeit in

die Zukunft übertragen, dessen Häufigkeitsverteilung sich nach Szenariovorgaben verschiebt. Um auch die Amplitude der Werte zu berücksichtigen (Extremwerte), werden durch Regressionsbeziehungen und Verteilungsanpassungen die erzeugten Zeitreihen verfeinert. Für eine bessere Abbildung des Niederschlags werden ferner trockene, normale und feuchte Abschnitte (zusammenhängende 10-Jahresabschnitte) identifiziert und in den Simulationen verwendet. Insgesamt werden für jede Klimastation 10 Realisierungen (für 10 Klassen) für 7300 Modelltage (20 Jahre) verwendet.

Zur Modellvalidierung werden die von ECHAM5 angetriebenen und über die Realisationen gemittelten Simulationen für den Zeitraum von 1971 bis 2000 mit den Mittelwerten gemessener Werte für einzelne Dekaden dieses Zeitraums verglichen. Bei Temperatur gibt es unwesentlich wärmere Werte, für den Winter etwas niedrigere. Beim Niederschlag gibt es eine leichte prozentuale Abweichung nach unten im Winter.

WETTREG wurde insbesondere vom UBA im Rahmen einer Vergleichsstudie mit dem dynamischen Modell REMO eingesetzt. Dort wurde die Regionalisierung für ganz Deutschland (Daten von knapp 2000 Wetterstationen) bei einer horizontalen Auflösung von 10 km auf Grundlage der SRES-Szenarien A1B, A2 und B2 bis 2100 durchgeführt (Spekat et al. 2007). Die aktuelle Modellversion heißt WETTREG2010. Mit deren Hilfe wurden bisher Simulationen auf Grundlage des SRES-Szenarios A1B berechnet.

Das statistische Regionalmodell STAR (STATistisches Regionalisierungsmodell) wurde in den 1990er Jahren am PIK entwickelt und wird von CEC Potsdam betreut. Es dient zur Abschätzung künftiger regionaler Klimaentwicklungen in hoher Auflösung (horizontaler Gitterabstand von 10 km). Zuletzt wurde die Version STAR II verwendet, bevor das Modell in **STARS** (STATistical Analogue Resampling Scheme) umbenannt wurde. Die Besonderheit des Modells besteht in minimalen Anforderungen an den aus globalen Modellen stammenden Antrieb. Dieser beschränkt sich auf zwei Parameter einer linearen Regressionsgeraden für die in Szenarien festgelegte künftige Entwicklung der interessierenden Größe, etwa der Durchschnittstemperatur, d.h. den Mittelwert und Zunahme im Verlauf des Prognosezeitraums. Das Modell berechnet Zeitreihen für 11 Größen.

Durch die Anpassungsfähigkeit des Modells kann eine große Anzahl von Szenarien in relativ kurzer Zeit regionalisiert werden. STARS nutzt Temperaturdaten aus über 2300 Klima- und Niederschlagsstationen in Deutschland, für welche es Simulationen berechnen kann. Aus Tageswerten werden Jahresdurchschnitte (oder saisonale Durchschnitte) gebildet, die wiederum zur Berechnung von langfristigen (30-jährigen) Durchschnitten für die Vergangenheit dienen. Die Beobachtungen der Vergangenheit werden per Zufallsgenerator jahrweise den Zukunftsjahren zugeordnet, so dass die Jahresmittelwerte möglichst nah an der vorgeschriebenen Regressionsgeraden liegen (Rekombination der Jahresmittelwerte). In einer Clusteranalyse werden Jahressegmente, deren Mittel von der Regression abweichen, identifiziert und mit neuen Blöcken ersetzt, wobei Parameterkombinationen einzelner Tage der Simulation denen der Vergangenheitsdaten entsprechen. Diese Prozedur wird iterativ vollzogen bis zur Übereinstimmung mit der Regressionsgeraden. Da bei Anwendung dieses Verfahrens auf eine Größe (z.B. Temperatur) die anderen Modellgrößen segmentweise mit übertragen werden, wird physikalische und räumliche Konsistenz des Klimas gewährleistet. Heuristische Verfahren stellen zudem sicher, dass Zyklen etc. in den Zeitreihen auf realistische Weise vorkommen. Für jedes Szenario kann eine Reihe von Läufen aufgrund von verschiedenen Rekombinationen gerechnet werden, was eine Band-

breite von verschiedenen Realisationen erzeugt. Als mittlere Variante wird typischerweise diejenige mit einem mittleren Trend der Klimatischen Wasserbilanz gewählt (Lüttger et al. 2011).

Nach Orłowsky et al. (2008) erzielte eine Validierung dieser Methode durch eine Simulation einer Vergangenheitsperiode mit Daten einer noch früheren Zeitperiode ein besseres Ergebnis als eine Kontrollsimulation mit REMO. Im Gegensatz zu anderen deutschen Klimamodellen rechnete STAR II nur bis zum Jahr 2060. Von den SRES-Szenarien wurde bisher mit der mittleren Variante A1B (aus ECHAM5/MPIOM) kalkuliert; möglich sind ferner Simulationen mit Temperaturunterschieden von $+0,5^{\circ}\text{K}$ in einem Bereich zwischen 0°K und $+3^{\circ}\text{K}$. Das Modell wurde kürzlich in einer Simulationsstudie für die Region Havelland-Fläming in Brandenburg eingesetzt (Lüttger et al. 2011). Vor kurzem wurden erste Modellläufe mit STARS auf Basis der RCP8.5-Simulationen des deutschen GCM MPIO-ESM erstellt, womit die Regionalisierung in eine Post-SRES-Phase eingetreten ist. Es fand eine Aktualisierung der historischen Daten bis 2010 und eine Verlängerung des Simulationszeitraums bis 2100 statt.

3 ERGEBNISSE REGIONALER KLIMASTUDIEN FÜR DEUTSCHLAND

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse der vier regionalen Klimamodelle für Deutschland wurde vom DWD vorgenommen (s. Bundesregierung 2008, Walkenhorst & Stock 2009).

Je nach SRES-Szenario (A1B, A2, B1) und Modell (ECHAM5, REMO, WETTREG) wurde dabei ein durchschnittlicher Anstieg der Jahrestemperatur um $0,5^{\circ}\text{C}$ - $1,5^{\circ}\text{C}$ in 2021-2050 und $1,5^{\circ}\text{C}$ - $3,5^{\circ}\text{C}$ in 2071-2100 verglichen mit der „Klimanormalperiode“ 1961-1990 festgestellt. Eine sich nach Süden hin verstärkende Erwärmung wurde auf Basis von Szenario A1B mit REMO, COSMO-CLM und STAR berechnet. Mit STAR wurde ein Anstieg von 2°C (2021-2050) berechnet, bei den anderen zwei Modellen lediglich die Hälfte dieses Anstiegs. WETTREG-Analysen ergaben eine sich von Osten nach Westen verstärkende Erwärmung um $0,5^{\circ}\text{C}$. Für den Zeitraum 2071-2100 fand keine STAR-Berechnung statt, bei WETTREG ergab sich nur ein Zuwachs von 2°C , bei den dynamischen Modellen jedoch einer von bis zu $3,5^{\circ}\text{C}$. Eine Erwärmung wird besonders im Winter erwartet.

Bei Niederschlag bleiben die projizierten Jahresmengen eher konstant, es findet jedoch eine Verschiebung der jahreszeitlichen Muster statt. In allen Modellen wird eine Abnahme um bis zu 40% im Sommer projiziert, im Südwesten besonders stark. Im Winter wird hingegen eine Zunahme um bis zu 40% auftreten, sie variiert je nach Modell. Mit WETTREG wurde ein hoher Anstieg im Winter im Mittelgebirge (Rheinland-Pfalz, Hessen, Bayern) um bis zu 70% für 2071-2100 berechnet. Bei den dynamischen Modellen tritt ein zusätzlicher, nicht so starker Niederschlagsanstieg im Frühjahr auf.

Bei Extremereignissen projizieren REMO und WETTREG einen Anstieg (bis hin zu einer Verdopplung) der Sommertage mit über 25°C und eine Verdreifachung derjenigen mit über 30°C bis 2100. Es wird ferner eine Zunahme von Starkniederschlägen erwartet. Bei Sturmtagen wurden in den Modellergebnissen bisher keine Änderungen festgestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der jeweiligen Modelle präsentiert.

3.1 REMO

Mit Hilfe von REMO erfolgte eine Studie für das UBA (Jacob et al. 2008, s. auch Jacob 2009). Je nach Emissionsszenario wurde dabei ein unterschiedlicher Temperaturanstieg ermittelt, insbesondere im Süden und Südosten. Im Sommer wird weniger Niederschlag in Deutschland erwartet, im Winter dafür mehr im Süden und Südosten, wobei mit weniger Schnee aufgrund der Erwärmung gerechnet wird. Im langfristigen Mittel wird sich eine in etwa gleichbleibende Jahresniederschlagsmenge einstellen.

Es wurde eine Erwärmung zwischen 2,5°C (Szenario B1) und 3,5°C (A-Szenarien) berechnet. Die Ähnlichkeit der Ergebnisse der beiden Letzteren liegt an unterschiedlichen zugrundeliegenden Emissionen, so dass die Kühlung durch Schwefelaerosole in A1B schneller schwindet als in A2, weshalb die Temperaturwirkung der SO₂-Abnahme diejenige von CO₂ ausgleicht. In Szenario B1 verläuft der ansteigende Trend auch saisonal am schwächsten (im Frühjahr +1,5°C, in allen anderen Jahreszeiten etwa +3°C). In A1B wird im Winter ein Anstieg von über +4°C bis 2100 gegenüber 1961-1990 erwartet (im Süden und Südosten). Im Frühjahr tritt eine geringe Erwärmung bis Mitte des Jahrhunderts in allen Szenarien auf, auch in der zweiten Hälfte wird sie relativ gering werden. In den anderen Jahreszeiten wird es eine stärkere Erwärmung in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts geben. Die Erwärmung an der Ostseeküste wird bis 2100 etwas stärker (+2,8°C) als an der Nordseeküste (+2,5°C) ausfallen.

Beim Jahresniederschlag wird kein ausgeprägter Trend gesehen, allerdings treten dekadeweise Schwankungen auf. Unterschiedliche Verläufe werden jetzt auch zwischen Szenarien A1 und A2 deutlich. Im Frühjahr und Herbst können Niederschläge in allen Szenarien um 10% im Mittel steigen. Im Sommer wird eine großflächige Abnahme um bis zu 20% möglich, vereinzelt auch um über 30%, besonders in Süd- und Südwestdeutschland sowie im Nordosten. Im Winter wird es feuchter, v.a. in den Mittelgebirgen im Süden und Südwesten (um etwa 30%). Der Niederschlag wird in den Alpen wegen steigender Temperaturen häufiger die Form von Regen als Schnee annehmen (jetzt 1/3, später 1/6). Schneebedeckte Flächen werden dabei im Frühjahr stärker schrumpfen.

In den Szenarien wird eine Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Temperatur-Extremereignissen deutlich.

Die UBA-Studie enthält Ergebnisse nach Bundesländern (Jacob et al. 2008, S. 45-46). Aufs Jahr gesehen werden die stärksten Niederschlagszunahmen (2071-2100 zu 1961-1990) in Hamburg und Schleswig-Holstein, die stärksten Abnahmen in Baden-Württemberg und im Saarland erwartet. Bei den Temperaturen wurde der größte Anstieg in Bayern, Baden-Württemberg und Saarland ausgewiesen, die stärksten Abnahmen wurden für Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein berechnet.

3.2 COSMO-CLM

Für Deutschland werden Temperaturzunahmen zwischen 1°C und 1,4°C in Szenario A1B für 2021-2050 gegenüber 1961-1990 projiziert; bis 2080 zwischen 2,2°C und 2,8°C und bis 2100 zwischen 2,7°C und 4,5°C. In Süddeutschland sind sie stärker als an den Küsten, v.a. im Sommer. Im Spätsommer/Herbst beträgt der Anstieg in 2051-2080 gegenüber der Normalperiode zwischen 2,6°C und 3,9°C, im Winter zwischen 2°C und 3°C. Im

Frühjahr tritt die geringste Erwärmung auf: bis 2050 unter 1°C, bis 2080 zwischen 0,8°C und 2,8°C, d.h. sie ist unterdurchschnittlich, jedoch verbunden mit höchster Variabilität.

Der Jahresniederschlag ist weitgehend konstant für Deutschland, es wird eine leichte Zunahme bis 2050 erwartet (um 0% bis 6%), v.a. in West- und Norddeutschland. In Süddeutschland bleibt der Jahresniederschlag eher unverändert oder nimmt ab. Nach 2050 findet, durch eine Abnahme im Sommer, eine saisonale Verschiebung statt (12%-28% bis 2080). Abweichungen der Jahressummen in 2051-2080 betragen zwischen -4% und +1%.

In der Region Brandenburg wird ein Temperaturanstieg von 1°C bis 1,4°C bis 2050 erwartet, 2,1°C bis 2,8°C bis 2080. Das saisonale Maximum wird im Spätsommer erreicht (+2,5°C bis +3,7°C). Die Schwankungen beim Niederschlag werden zwischen -4% und +3,5% bis 2080 erwartet; nach 2050 findet ein starker Rückgang der Sommerniederschläge statt, Zunahme hingegen in anderen Jahreszeiten.

3.3 STARS

Für Szenarien, die mir Hilfe von STAR (II) regionalisiert wurden, liegen kaum publizierte Ergebnisse vor. Ausnahme bilden Zahlen aus dem GLOWA-ELBE-Projekt (Gerstengarbe 2009). Auf Grundlage von auf SRES-Szenario A2 bezogenen Berechnungen für das Elbeeinzugsgebiet für den Zeitraum 2004-2055 ergibt sich ein Temperaturanstieg gegenüber dem Zeitraum 1951-2003 um 2°C bis 2,8°C. Der berechnete Jahresniederschlag ist insgesamt leicht sinkend, als Konsequenz eines starken Rückgangs im Sommer und einer leichten Zunahme im Winter. Extremwetterereignisse treten in Zukunft häufiger auf.

Werner & Gerstengarbe (2007) berichten einige Resultate für ganz Deutschland: Auf Basis des Szenarios A1B wurden Berechnungen für den Zeitraum 2004-2055 durchgeführt. Beim Vergleich des Zeitraums 2046-2055 mit der Kontrollperiode 1951-2003 steigt die Temperatur um 1,6°C bis 2,4°C, im Norden am geringsten, zunehmend in Richtung Süden/Südosten. Die Höchstwerte werden für das Gebiet zwischen nordöstlichem Baden-Württemberg und Südostbrandenburg erwartet. Der Niederschlag nimmt in seiner Jahressumme meistens ab, eine Zunahme erfolgt in einigen Gebieten in West- und Norddeutschland.

Es wurden, wie weiter oben berichtet, neue regionale Simulationen für Deutschland mit Hilfe von STARS berechnet. Diese beziehen sich auf die Dekaden nach 2010. Mangels veröffentlichter Publikationen werden an dieser Stelle noch keine Ergebnisse dieser Läufe berichtet.

3.4 WETTREG

Das Modell wurde im Rahmen einer UBA-Studie eingesetzt (Spekat et al. 2007). Es wurden dabei Vergleiche der Dekaden 2091-2100 und 1981-1990 in allen drei dort untersuchten Szenarien angestellt. Danach sind durchgehend die größten Temperatur- und Niederschlagszunahmen im Szenario A1B, gefolgt von A2 und B1 festgestellt worden.

Im Winter ergab sich ein Temperaturanstieg um über 3,5°C, in manchen Monaten bis 4°C. Im Frühjahr wird eine Zunahme von unter 1°C erwartet, in übrigen Jahreszeiten und Gesamtjahr um 2°C bis 2,5°C. Regionale Unterschiede wurden im Vergleich zwischen 2071-2100 und 1961-1990 sichtbar. Im Mittel steigt die Temperatur um 2,3°C bei A1B,

2,1°C bei A2 und 1,8°C bei B1. Die stärkste Tendenz wurde für den gesamten Norden (außer an der Küste) sowie im Voralpenraum festgestellt. Dazu gehören die Täler von Rhein und Mosel, die Kölner Bucht, das südwestliche Niedersachsen, Teile von Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen. Eine geringe Zunahme wird es an der Küste, in den zentralen Mittelgebirgen und im Osten Bayerns geben. Am schwächsten wird sie im Südwesten sein (+1,5°C in Szenario B1).

Beim Niederschlag wurden gegenläufige Tendenzen im Winter (Zunahme) und Sommer (Abnahme) ermittelt. Eine kleinere Spannweite der Schwankungen als in anderen Szenarien ergab sich beim Szenario B1. Beim Jahresniederschlag gibt es eine Abnahme von 2%-4% im Mittel, am stärksten im Osten und Süddeutschland. Eine Zunahme wird zwischen den Zentralen Mittelgebirgen und dem Benelux erwartet. Im Sommer werden Abnahmen im Mittel von 22% (A1B), 21% (A2) und 17,7% (B1) erwartet. Am stärksten im Nordosten (v.a. in Vorpommern bis 40%), wo bereits wenig Niederschlag vorkommt. Im Winter werden Zunahmen von 30,3% (A1B), 22,3% (A2) und 19% (B1) erwartet, insbesondere in den Mittelgebirgen und an der Küste, weniger stark in Brandenburg, Sachsen und im Alpenraum. Dazu zählen die Nordseite vom Harz, das Rheinische Schiefergebirge, der Thüringer Wald, das Erzgebirge, der Spessart, der Odenwald und die Schwäbische Alb sowie der Schwarzwald und der Alpenbereich. Der stärkste Winteranstieg erfolgt im Hunsrück (bis 80%) und in Unterfranken (bis 70%).

Es werden auch Resultate für Naturräume ausgewiesen. Dabei werden zeitliche Vergleiche getätigt – ebenfalls mit Werten für die Zeiträume 2011-2040 und 2041-2070. Ferner wird eine Vielzahl abgeleiteter Größen diskutiert.

Nach einer Weiterentwicklung von WETTREG (Kreienkamp et al. 2010) wurden neue Simulationsergebnisse erzeugt. Auf Basis von Szenario A1B wurden neue Berechnungen u.a. für 2071-2100 gegenüber 1961-1990 gemacht. Die mittlere Temperaturzunahme beträgt etwa 3,5°C, wobei sie im Frühjahr und Herbst 2,5°C-3°C, im Sommer und Winter 4°C-4,5°C beträgt. Ein geringerer Anstieg wird wieder an der Küste festgestellt, ein stärkerer im Westen und Süden (im Frühjahr und Herbst) sowie im Osten (Winter). Es gibt weiterhin schwache Niederschlagssignale im Jahresdurchschnitt; im Sommer einen Rückgang an der Küste; im Winter eine Zunahme in Mittelgebirgsregionen von Rheinland-Pfalz, Hessen, Thüringen und Nordbayern sowie im Norden und einen leichten Rückgang im Voralpenland und Erzgebirge. Die Temperatursignale sind stärker als bei WETTREG2006, womit ein Anschluss an die Temperaturen der dynamischen Modelle zum Ende des 21. Jahrhunderts hin geschieht. Gleiches gilt für den Niederschlag.

3.5 ERGEBNISSE FÜR DIE ZIELREGIONEN

Für die Untersuchungsgebiete des Projekts, d.h. dem Mündungsbereich Elbe/Nordseeküste sowie Rhein/Raum Köln, liegen in den publizierten Modellergebnissen keine detaillierten Auskünfte über die künftigen Klimafolgen vor. Allerdings geben die verfügbaren Informationen über die sie einschließenden Räume einige Einblicke in die erwarteten Klimaänderungen. Die Ergebnisse der REMO-Simulationen (Jacob et al. 2008) nach Bundesländern z.B. zeigen einige der Veränderungen für die Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein, in denen sich die Zielregion Mündungsbereich Elbe/Nordseeküste befindet. Die durchschnittliche Temperatur für den Zeitraum 2021-2051 verglichen mit der Klimanormalperiode wird demnach in den Szenarien A1B, A2 und B1

in diesen Bundesländern um 0,5°C bis 1,5°C ansteigen. Beim Jahresniederschlag ergeben sich im analogen Vergleich Zuwächse um 4% bis 8% in Hamburg, in den anderen beiden nördlichen Bundesländern ergeben sich je nach Szenario Steigerungen um 1% bis 8%. Saisonale Unterschiede sind etwas größer. Bis 2100 soll die Erwärmung an der Nordseeküste bei einer nahezu konstanten Niederschlagsmenge um 2,5°C steigen, bei der es ebenfalls saisonale Verschiebungen gibt. Die Ergebnisse von WETTREG (Spekat et al. 2007) beziehen sich auf deutsche Naturräume. Bis 2100 erfolgt demnach ein moderater Temperaturanstieg um 1,5°C bis 2,1°C an der Küste. Die Zahl der Frosttage sinkt dabei um zwei Drittel, während die Anzahl der Sommertage sich verdoppelt. Beim Niederschlag erfolgt eine überdurchschnittliche Zunahme im Winter (um 30% bis 50%). Sie sinkt hingegen im Sommer, wobei die Abnahme in Schleswig-Holstein stärker als in Ostfriesland ausfällt. Entlang der Elbmündung wird ein überdurchschnittlicher Rückgang (um 20% bis 25%) erwartet, in Hamburg nimmt der Niederschlag jedoch um 5% bis 15% zu.

Für die zweite zu untersuchende Region – Rhein/Raum Köln – gibt es in der ausgewerteten Literatur ebenfalls keine direkten Ergebnisse bezüglich der zukünftigen Klimafolgen. Hinweise geben auch hier die oben genannten REMO- und WETTREG-Ergebnisse. Erste-re weist einen Temperaturanstieg um 0,5°C bis 1,4°C in 2021-2050 in Nordrhein-Westfalen aus, verbunden mit einem Anstieg des Niederschlags um 2% bis 9%. Die WETTREG-Studie weist einen moderaten Temperaturanstieg um 2,3°C für die Westdeutsche Tieflandsbucht aus. Dort soll auch die Anzahl der Frosttage um 55% bis 75% ab- und der Hitzestress zunehmen. Ferner wird eine überdurchschnittlich steigende Niederschlagsmenge im Winter erwartet, während sie im Sommer leicht sinken soll.

3.6 VERFÜGBARE KLIMADATEN UND –KARTEN

Alle deutschlandweiten Regionalszenarien, die mit Hilfe der vier oben beschriebenen Modelle generiert wurden, sind frei verfügbar. Die Daten sind in der Datenbank CERA (Climate and Environmental Retrieval and Archive) abgelegt und können nach einer Anmeldung kostenlos heruntergeladen werden. Die Ausgabeintervalle der Daten sind Stunden, Tage oder wie im Falle von REMO auch Monate. Bei WETTREG sind lediglich Werte für einzelne Dekaden berechnet und zugänglich. Im Gegensatz zu den anderen Modellen, deren Output bis 2100 vorliegt, lieferte STAR nur Daten bis 2070. Nach der Umbenennung in STARS und der Erstellung neuer Simulationen liegen nun Daten bis 2100 vor.

Aufgearbeitete CERA-Rohdaten dienen als Hauptgrundlage einfacher grafischer Darstellungen in Klimaatlas-Form. Der Deutsche Klimaatlas des DWD präsentiert die regionalisierten Modellergebnisse für das Szenario A1B als Mittelwerte für 30-jährige Zeitabschnitte, z.B. 2011-2040, in Relation zur Klimanormalperiode. Aus den Werten aller verwendeten Studien werden für die ausgewiesenen Variablen (Temperatur, Niederschlag, heiße Tage, Frosttage etc.) Verteilungen gebildet und außer den Mittelwerten auch die Werte für das 15. und 85. Perzentil gezeigt. Eine Auswahl zwischen den einzelnen Monaten des Auftretens ist möglich.

Von der Helmholtz Gesellschaft stammt hingegen der Regionale Klimaatlas Deutschland, der auch größtenteils auf den CERA-Daten basiert, insbesondere denen der dynamischen Regionalmodelle. Für die Variablen Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit etc. werden Mittelwerte auf Basis verschiedener Szenarien grafisch dargestellt. Einen mit dem

Regionalen Klimaatlas verbundenen Atlas stellt der Norddeutsche Klimaatlas des Norddeutschen Klimabüros, in dem Minima, Mittelwerte und Maxima relevanter Klimavariablen dargestellt werden. Es besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse für einzelne Jahreszeiten zu betrachten.

Seit Ende 2012 stehen auf der Internetseite www.klimafolgenonline.com die Ergebnisse der neuesten STARS-Simulationen in Kartenform zur Verfügung, die nicht nur aus der Visualisierung reiner Klimadaten, sondern darüber hinaus verschiedener Impacts bestehen.

4 KLIMAWIRKUNGEN

Die Bundesregierung reagiert auf den Klimawandel mit Vermeidungsstrategien und einer Anpassungsstrategie, deren Eckpunkte im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) (Bundesregierung 2008, 2011) 2008 von der Bundesregierung beschlossen wurden. Im Rahmen der DAS werden Untersuchungen zu den Auswirkungen der Klimaanpassung durchgeführt und hierbei die beschriebenen Regionalmodelle eingesetzt. Die Ergebnisse bilden Bandbreiten möglicher künftiger Entwicklungen ab. Die Strategie differenziert zwischen 15 Handlungsfeldern:

- Menschliche Gesundheit
- Bauwesen
- Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz
- Boden
- Biologische Vielfalt
- Landwirtschaft
- Wald- und Forstwirtschaft
- Fischerei
- Energiewirtschaft
- Finanzwirtschaft
- Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
- Industrie und Gewerbe
- Tourismuswirtschaft
- Raum-, Regional-, u. Bauplanung
- Bevölkerungsschutz

Diese Handlungsfelder bilden einen sehr umfassenden Katalog von Bereichen, die auf vielfältige Weise durch den Klimawandel betroffen werden können. Sie sind jedoch nicht ohne weiteres mit einer sektoralen Abgrenzung aus ökonomischer Perspektive, z.B. der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen, gleichzusetzen. Die beiden letztgenannten Handlungsfelder sind bspw. Querschnittsbereiche, die eine gemeinsame Schnittmenge mit den übrigen Feldern bilden.

Die Deutsche Anpassungsstrategie wurde im Aktionsplan Anpassung (Bundesregierung 2011) konkretisiert. Darin werden zahlreiche Initiativen und Projektvorhaben zur Intensivierung der Vulnerabilitätsforschung in Deutschland angestoßen. Die geplanten Maßnahmen umfassen u.a. folgende Schritte:

- Im Bereich der Klimaforschung wird eine Weiterentwicklung der dynamischen Regionalmodelle COSMO-CLM und REMO angestrebt. Ferner wird ein neues globales Klimamodell als Nachfolge von ECHAM-MPIOM vorbereitet.
- In Ergänzung zu den langfristigen Klimaprojektionen werden unter BMBF-Federführung mittelfristige Klimaprognosen (MiKlip) bis 2015 entstehen.
- Im Zuständigkeitsbereich des UBA soll ein deutschlandweites und sektorenübergreifendes „semi-quantitatives“ Vulnerabilitäts-Gesamtbild bis 2014 entstehen.
- Parallel dazu soll an der Entwicklung einer Methode für eine integrierte Vulnerabilitätsbewertung Deutschlands im Rahmen der KomPass-Initiative des UBA bis 2013 erarbeitet werden.
- Zur Abschätzung der Schadenspotenziale soll bis Ende 2014 ein Fortschrittsbericht verfasst werden, der eine Analyse und Bewertung der Vulnerabilität beinhalten soll.
- Weitere Erkenntnisse werden bis 2014 aus den laufenden Projekten KLIWAS und KLIMZUG erwartet.
- Es sollen schließlich Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie veröffentlicht werden.

Die bisher einzige umfangreiche Untersuchung der Klimawirkungen mit einem explizit qualitativen Fokus war die im Auftrag des UBA vom PIK erstellte „Vulnerabilitätsstudie“ von 2005 (Zebisch et al. 2005). Die wesentlichen Erkenntnisse der Studie wurden aus den Vorarbeiten im Rahmen des europäischen Projekts ATEAM bezogen. In sektoraler Hinsicht wurde zwischen sieben „klimasensitiven Bereichen“ unterschieden, die auch Entsprechungen in der DAS fanden:

- Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft
- Landwirtschaft
- Forstwirtschaft
- Biodiversität und Naturschutz

- Gesundheit
- Tourismus
- Verkehr.

Als zusätzliche Dimension wurden in der Ausarbeitung 13 Naturräume thematisiert. Als Ergebnis entstand aufgrund verschiedener quantitativer und qualitativer Erkenntnisse, gewonnen u.a. durch Diskussionsprozesse unter Beteiligung regionaler Stakeholder, eine Bewertungsmatrix der Vulnerabilitätssituation in Deutschland (s. Abbildung 2).

Abbildung 2: Klimawirkungen in Deutschland nach Naturräumen und Bereichen

Bereich Naturraum	Wasser		Landwirtschaft	Forstwirtschaft	Biodiversität und Naturschutz	Gesundheit		Tourismus		Verkehr	Alle Bereiche
	Hochwasser	Dürre				Hitzebelastung	Vektor übertragene Krankheiten	Wintersporttourismus	Sonst. Tourismusformen		
Küste	-- ⁽¹⁾	~	~	~	--?^(2)	~	-?	k.A.	-	-	-
Nordwestdeutsches Tiefland	--	~	~	~	--?^(2)	~	-?	k.A.	-	-	-
Nordostdeutsches Tiefland	--	--	--	--	--?^(2)	-	-?	k.A.	-	-	--
Westdeutsche Tieflandsbucht	--	-	-	-	--?^(2)	--	--?	k.A.	-	-	-
Zentrale Mittelgebirge und Harz	--	-	~	-	--?^(2)	-	-?	--	-	-	-
Südostdeutsche Becken und Hügel	--	--	--	--	--?^(2)	--	--?	k.A.	-	-	--
Erzgebirge, Thüringer und Bayerischer Wald	--	-	-	-	--?^(2)	-	--?	--	-	-	-
Links- und rechtsrheinische Mittelgebirge	--	-	-	-	--?^(2)	-	--?	--	-	-	-
Oberheingraben	--	-	-	--	--?^(2)	--	--?	k.A.	-	-	--
Alp und nordbayerisches Hügelland	--	-	-	-	--?^(2)	-	--?	--	-	-	-
Alpenvorland	--	-	-	--	--?^(2)	-	--?	k.A.	-	-	-
Alpen	--	~	~	-	--	~	-?	--	-	-	--
Deutschland gesamt	--	-	-	-	--?^(2)	-	--?	--	-	-	-

Bewertung:

-- hohe Vulnerabilität

- mäßige Vulnerabilität

~ geringe Vulnerabilität

? Hohe Unsicherheit bzw. Schwierigkeit bei der Einschätzung

k.A. keine Angaben

Bewertung „alle Bereiche“:

hohe Vulnerabilität, wenn mehr als 2 Bereiche hoch

mäßige Vulnerabilität, wenn 1-2 Bereiche hoch

geringe Vulnerabilität, wenn kein Bereich hoch

(„halbe“ Bereiche zählen nur halb)

Bewertung „Deutschland gesamt“: Mittelwert

(1) Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg

(2) Vulnerabilität abhängig von Schutzziel.

- Schutz des Status Quo: hohe Vulnerabilität

- Prozessschutz: mäßige Vulnerabilität

Quelle: Zebisch et al. 2005.

4.1 SEKTORALE WIRKUNGEN

Neben den im letzten Abschnitt vorgestellten Studien existieren gegenwärtig drei, die über den Status von Einzelstudien hinausgehen. Während sich BBSR (2011) auf verschiedene Arten der Raumnutzung stützt, nutzen zwei Studien mit Beteiligung von Ecologic und INFRAS die sektorale Abgrenzung in Anlehnung an Bundesregierung (2008) – Bräuer et al. (2009) diskutieren neun Bereiche, Tröltzsch et al. (2011) übernehmen die 15 Handlungsfelder der DAS.

Die Studien im Auftrag des UBA (Zebisch et al. 2005) und der Bundeskabinettsbericht zur DAS (Bundesregierung 2008) legen nahe, dass von den analysierten Bereichen insbesondere Wasser (Hochwasser), Gesundheit (vektorübertragene Krankheiten), Tourismus (Winter) sowie möglicherweise Biodiversität durch den Klimawandel bedroht werden würden. Nach BBSR (2011) stellen vor allem die Folgen von Hitzewellen und die Gefährdungen der Infrastruktur Risiken für die meisten Bereiche dar.

Die gesammelten Ergebnisse der wichtigsten Literaturstudien führen zu der Erkenntnis, dass die Vielzahl verschiedener Wirkungen des Klimawandels in zwei große Wirkungsbereiche bzw. Problemkomplexe aufgeteilt werden können. Diese unterscheiden sich im Hinblick auf Art der Klimafolgen (Temperatur, Niederschlag, Extremereignisse), ihr jahreszeitliches Auftreten und regionale Signifikanz. Zum einen handelt es sich um Wirkungen, die mit Winterniederschlägen und -temperaturen, dem Bereich Wasser (Hochwasser, Wasserwirtschaft, Sturmfluten, Starkregen etc.) und regionalen Folgen insbesondere an der Küste und in Norddeutschland zu tun haben. Zum anderen geht es um Wirkungen sommerlicher Temperaturen und Niederschläge (Hitze, Trockenheit, Dürren), die z.B. entlang des Rheins Betroffenheiten auslösen.

Die Unterschiedlichkeit dieser Komplexe rechtfertigt die Festlegung der Zielgebiete im Rahmen von econCCadapt und legt nahe, die analytischen Schwerpunkte weiterer Arbeiten in den Bereichen Hochwasser und Hitzewellen zu bilden. Beide Problemkomplexe und ihre Exponenten haben vielfältige Wechselwirkungen mit den als Handlungsfelder und klimasensitive Bereiche identifizierten „Sektoren“, wie Infrastruktur, menschliche Gesundheit, Biodiversität, Verkehr oder Tourismus. Im Folgenden werden die beiden Wirkungsbereiche, ihre jeweiligen ausgewählten Wirkungsschwerpunkte sowie Wechselwirkungen mit anderen Feldern diskutiert.

4.2 BEREICH WASSERHAUSHALT, WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND MEERESSCHUTZ

Der Klimawandel beeinflusst alle Aspekte des Wasserkreislaufs und dadurch die Umwelt mit ihren sozioökonomischen und ökologischen Dimensionen. Die größten potenziellen Gefahren drohen dabei einerseits durch Hochwasser und andererseits durch langanhaltende Trockenheit, die durch eine Destabilisierung der regulierenden Funktion des Wassers zustande kommen können.

Eine Verstärkung der Häufigkeit, Intensität und Dauer von Hochwasserepisoden wird primär auf die zu erwartende Verschiebung der jahreszeitlichen Niederschlagsmuster vom Sommer in den Winter bzw. ins Frühjahr zurückgeführt. Im Winter wird voraussichtlich das Auftreten von Starkregen zunehmen, was bereits in den letzten Jahren beobachtet wurde. Darüber hinaus wird der verstärkte Winterniederschlag, als Folge steigender Tem-

peraturen, mehr in Form von Regen als Schnee auftreten. Der Temperaturanstieg im Winter wird zu einer weniger massiven und kürzer bestehenden Schneedecke führen, wodurch der Niederschlag unmittelbar einen Abfluss verursacht. Eine Gefahr von Sommerhochwassern ist gegenwärtig unklar. Weitere Faktoren, die Hochwasser begünstigen, sind menschengemacht: die Abnahme von Retentionsflächen sowie die durch Landwirtschaft entstehende Bodenverdichtung, die das Einsickern von Wasser behindert.

Hochwasser kann sowohl kurzfristig und lokal aufgrund von Starkniederschlägen vorkommen, was etwa die Hälfte der Schäden ausmacht, oder es kann in extremer dauerhafterer Form auftreten, wenn Flussläufe betroffen sind und intensiver Niederschlag durch Schneeschmelze verstärkt wird.

Die Schäden betreffen sowohl Personen als auch Sachgegenstände. Außer unmittelbaren Lebensgefahren kann die Wasserqualität aufgrund von Überflutung von Industrie- und Kläranlagen sowie privater Heizöltanks und Mischkanalisationen sinken und die Vermehrung von Krankheitserregern erleichtern. Die Wasserqualität kann ebenfalls aufgrund verstärkter Erosion durch Wind und Niederschläge gemindert werden. Sachschäden können an Gebäuden und Infrastruktur (Brücken, Straßen etc.) auftreten. Es können Kosten für den Katastrophenschutz sowie für Produktionsausfälle entstehen.

Im Hinblick auf die Anpassung wird in Zebisch et al. (2005) konstatiert, dass zwar Schutzmaßnahmen existieren, die Planungen der zuständigen Bundesländer die Klimafolgen bisher aber nicht berücksichtigen, was zu einer relativ hohen Vulnerabilität in diesem Bereich führt.

Der zweite oben genannte Problembereich betrifft die Trockenheit, die zum einen durch die saisonale Verschiebung der Niederschläge, zum anderen durch höhere Temperaturen und stärkere Verdunstung entstehen kann. Das unmittelbar damit verbundene Problem ist eine Reduktion des Wasserdargebots, insbesondere in Ostdeutschland. Es drohen Gefahren von Dürren, Einschränkungen in der Land- und Forstwirtschaft, Engpässe bei der Energieversorgung und der Schifffahrt sowie zeitlich und lokal begrenzte Probleme mit der Trinkwasserversorgung. Regional und jahreszeitlich verschieden kann es zu einer veränderten Wasserführung und verminderter Grundwasserneubildung kommen und das Trockenheitsrisiko im Sommer verschärfen, z.B. aufgrund der früher auftretenden Schneeschmelzen. Der sinkende Wasserstand im Sommer kann neben quantitativen Engpässen auch qualitative Auswirkungen haben, z.B. aufgrund steigender Schadstoffkonzentrationen. Steigende Wassertemperaturen gehen mit sinkendem Sauerstoffgehalt einher, was sich für Tiere und Pflanzen nachteilig auswirkt. Außerdem verursachen sommerliche Hitzeperioden eine Austrocknung von Feuchtgebieten, die bei Starkregen eine regulierende Rolle spielen.

Da potenzielle Wasserknappheit nicht in den Bundesländerplanungen vorkommt, wird dieser Bereich als vulnerabel angesehen.

Neben Hochwasser und Trockenheit sind Meeresspiegelanstieg und Küstenschutz wichtige Problemfelder im Zusammenhang mit Wasser. Der Meeresspiegelanstieg begünstigt das Eindringen von Salzwasser ins Grundwasser, mit möglichen Folgen für die Trinkwasserversorgung und Ökosysteme. In Küstenregionen entstehen zudem Entwässerungskosten und entsprechender Investitionsbedarf (neue Pumpwerke, Brunnen etc.). In Kombination mit Stürmen können an den Küsten Schäden in Form von Landverlust und Produktivitätseinbußen entstehen.

4.3 HITZEWELLEN

Wie oben bereits angesprochen, verursacht der sommerliche Temperaturanstieg in Verbindung mit niedrigen Niederschlägen negative Auswirkungen im Bereich Wasser. In extremen Fällen entstehen dabei Hitzewellen. Im Folgenden wird, gestützt auf Erkenntnisse der Vulnerabilitätsstudie, diese Problematik thematisiert. Ergänzend wird auf BBSR (2011) zurückgegriffen.

Zu den Hitzeextremen zählen Hitzetage (mit Temperaturen über 30°C) und Hitzewellen (Perioden von über drei Tagen, an denen die Tagesmaxima die oberen Temperaturschwellen einzelner Messstationen überschreiten). Sie sind eine direkte Folge des Klimawandels und nehmen laut Beobachtungen deutlich zu. Dieser Trend wird auch für die Zukunft erwartet. Außer der Überschreitung von Schwellenwerten wird die Hitzebelastung durch ihre Dauer, Änderungsgeschwindigkeit und den saisonalen Zeitpunkt begünstigt. Subjektiv werden heiße Tage und Hitzewellen als ein signifikantes Risiko eingeschätzt, wie Befragungen gezeigt haben.

In Abbildung 2 wird die Hitzebelastung dem Bereich Gesundheit zugeordnet, u.a. in der Westdeutschen Tieflandsbucht. In diesem Bereich drohen erhebliche direkte Negativwirkungen. Wie die Hitzewelle von 2003 mit einer geschätzten Anzahl von tausenden Todesopfern gezeigt hat, ist steigende Mortalität eine real drohende Konsequenz dieser Wirkfolge des Klimawandels. Besonders hoch ist die Anfälligkeit älterer Personen, deren sozioökonomische Lage schlecht ist. Es können Herz- und Kreislaufprobleme, Hirngefäß- und Atemwegserkrankungen auftreten. In Ballungsräumen werden die Gebäude aufgeheizt und es entsteht Luftverschmutzung, die auf indirekte Weise gesundheitsgefährdend wirkt. In 2003 ist zudem in manchen Gebieten eine Knappheit an Trinkwasser eingetreten. Die Einschränkungen körperlicher Leistungsfähigkeit können die Arbeitsproduktivität negativ beeinflussen und somit unter extremen Bedingungen das Wirtschaftswachstum schmälern.

Bei Hitze wird ebenfalls die Bildung von Krankheitserregern oder Vektoren wie z.B. Mücken begünstigt. Eine wachsende Anzahl von Schädlingen wird Bäume befallen. Wälder können ferner durch extreme Hitze, Waldbrände und das Aufbrauchen von Wasserreserven in Waldböden in Mitleidenschaft gezogen werden. Besonders die Baumart Fichte wird wegen Trockenheit und Hitze geschädigt. Im Bereich Landwirtschaft entstehen Ertragsminderungen in langen Trockenperioden, z.B. bei geringer Wasserverfügbarkeit. Es kann auch zu Gefährdungen der Artenvielfalt kommen.

Trotz der potenziell günstigen Entwicklung der Tourismusbranche durch sommerliche Erwärmung, muss diese nicht zwangsläufig erfolgen – während der letzten Hitzewelle in Deutschland wurden bspw. Badestrände aufgrund von Algenvermehrung geschlossen. Darüber hinaus wird der Bereich Verkehr samt dazugehöriger Infrastruktur von extremer Hitze betroffen sein. So kann im Straßenverkehr zum einen die Anzahl der Unfälle zunehmen, zum anderen sind Straßenschäden möglich. Ebenso sind Schadenskosten bei der Schieneninfrastruktur nicht auszuschließen.

4.4 KLIMAWIRKUNGEN IN DEN ZIELGEBIETEN

Regional gesehen wären laut Vulnerabilitätsstudie (Zebisch et al. 2005) insbesondere vier Regionen in Deutschland vom Klimawandel betroffen: Das Nordostdeutsche Tiefland (Wasser, Land- u. Forstwirtschaft), das Südostdeutsche Becken u. Hügel (Wasser, Land- u.

Forstwirtschaft, Gesundheit), der Oberrheingraben (Forstwirtschaft, Gesundheit) und die Alpen (Biodiversität/Naturschutz, Wintertourismus).

Auf die Zielgebiete des Projektes econCCadapt bezogen, ergeben sich nach der Vulnerabilitätsstudie Risiken, deren Bewertung in Abbildung 2 dargestellt ist. An der Küste und im Norddeutschen Tiefland wird insgesamt mäßige Vulnerabilität vermutet. Dabei wird jedoch hohe Vulnerabilität im Bereich Hochwasser bescheinigt. Möglicherweise treten auch unerwünschte Entwicklungen im Bereich Biodiversität auf. Dasselbe kann in Bezug auf Biodiversität für die Westdeutsche Tieflandsbucht erwartet werden. Auch dort wird insgesamt mäßige Vulnerabilität gesehen. Zu den erheblichen Risiken im Bereich Hochwasser gesellen sich noch Gefahren durch Hitzebelastung und vektorübertragene Krankheiten.

5 VERBINDUNG ZWISCHEN KLIMASZENARIEN UND KLIMAWIRKUNGEN

5.1 SCHADENSFUNKTIONEN DER IAM

Die Bestimmung der Wirkungen des Klimawandels erfolgt oft auf grob regionalisierter (Welt-)Ebene mit Hilfe der bereits erwähnten Integrated Assessment Models (IAM). Diese vereinigen Module, die das Wirtschaftsgeschehen auf der Makroebene (insbesondere die energiewirtschaftlichen Elemente), das globale Klima (in einfacher stilisierter Form) und die Auswirkungen der ökonomischen und klimatischen Veränderungen für das sozioökonomische System und die natürliche Umwelt abbilden. Ziel ist es, die komplexen Beziehungen zwischen den traditionell getrennten Sphären in integrierter Form zu erforschen und eine Abschätzung künftiger Entwicklungen und deren Resultate vorzunehmen, wobei der Fokus dieser Anstrengungen sehr langfristig und daher mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Darüber hinaus werden mittels Simulationen die Auswirkungen alternativer politischer Maßnahmen und demografischer Szenarien untersucht.

Die entscheidende Schnittstelle, an der die IAMs die Klimaveränderungen mit den monetären und physischen Auswirkungen für den Menschen koppeln, sind Schadensfunktionen, die in allgemeinen Gleichgewichtsmodellen üblicherweise nicht vorhanden sind. Typischerweise wird für jede Region mindestens eine aggregierte Funktion unterstellt, die ein nichtlineares Verhältnis zwischen dem Temperaturanstieg seit Beginn der Industrialisierung und dem BIP-Anteil, der dadurch verloren geht, etabliert. Die als Input dienende Temperatur (meistens die durchschnittliche globale Oberflächentemperatur) wird ihrerseits durch eine Funktion ermittelt, deren Kalibrierung auf der unterstellten Klimasensitivität basiert, d.h. der Temperaturreaktion auf eine Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, üblicherweise in 2050. Auf der Outputseite dieser reduzierten Beziehung, die meist eine quadratische Funktion ist, werden monetäre (selten biophysische) Werte ausgewiesen. Zudem wird nur eine Unterauswahl der vorstellbaren Kategorien von Schäden berücksichtigt, da Bereiche wie Politik, bewaffnete Konflikte oder Ressourcenknappheit nicht ohne weiteres modellierbar sind.

Unter den IAM können grob zwei Gruppen gebildet werden, die unterschiedliche Schadensfunktionen und somit Schätzungen künftiger Klimaschäden verwenden. Viele aktuelle Modelle stützen sich in ihrer Kalibrierung auf das RICE-Modell von Nordhaus (s. z.B.

Nordhaus 2010), das Schäden für die Bereiche Landwirtschaft, Meeresspiegelanstieg, sonstige Marktsektoren, Gesundheit, Nichtmarktschäden, Siedlungen und Ökosysteme (als eine Größe) sowie katastrophale Ereignisse in den meisten Fällen anhand einer einzigen funktionalen Beziehung kalkuliert, die sie als Folge von Wirtschaftswachstum und Temperaturanstieg definiert. Die Schätzungen werden aufgrund von Kosten-Nutzen-Analysen aus den USA (Studien zur Zahlungsbereitschaft bzw. zur Akzeptanz) durchgeführt, was zu einem verengten Blick auf die Probleme führt, aber mangels Daten keine wirkliche Alternative übrig lässt. Die bewerteten Schäden vermindern durch eine Rückkopplung die im Produktionsprozess generierten Einkommen.

Die zweite Gruppe von Modellen benutzt Schadensfunktionen, die auf Arbeiten von Tol zurückgehen. Dazu gehört insbesondere sein eigenes FUND-Modell (vgl. Tol 1997, 2007), das vielfältige Impacts sowohl in monetärer als auch biophysischer Form kalkuliert. Die Auswirkungen auf die Landwirtschaft setzen sich dort aus drei additiven Effekten zusammen. Der erste (immer negative) Effekt kommt durch die Veränderungsrate der Temperatur zustande, an die sich Landwirte aufgrund von beschränkter Voraussicht nicht anpassen können. Der zweite Effekt kommt durch das Temperaturniveau zustande: abhängig davon, ob die gegebene Temperatur sich einem Optimum nähert oder davon weiter abweicht, wird er positiv oder negativ. Eindeutig positiv ist dagegen der dritte Effekt: vermehrte Düngung durch steigende CO₂-Konzentrationen. Die Effekte werden als Anteil am BIP gemessen. Sie sind zusammengenommen niedriger als in anderen Studien, da normalerweise der dritte Effekt nicht beachtet wird.

Die Kosten in der Forstwirtschaft (als BIP-Anteil) werden bei Tol als Funktion der BIP-Wachstumsrate (bezogen auf 1990), des Temperaturniveaus und der CO₂-Konzentration gemessen. Die (bewerteten) Wasserressourcen werden ebenfalls durch das Wachstum und die Temperatur beeinflusst. Der Energiekonsum kommt einerseits durch Raumheizung, andererseits durch Raumkühlung zustande. Beide Funktionen sind identisch und hängen von der Temperaturveränderung, dem BIP-Wachstum, dem Bevölkerungswachstum und dem Pfad des exogenen Effizienzparameters für die Energieproduktion ab. Die Schutzkosten vor dem Anstieg des Meeresspiegels werden in Abhängigkeit von der BIP-Wachstumsrate und der Zeitpräferenzrate bestimmt. Zusammen mit dem ähnlich kalkulierten Anstieg des (bewerteten) Verlustes von Feucht- und Trockengebieten bestimmen sie den geschützten Küstenanteil, der in die Berechnung des Landverlustes einfließt. Als damit verbundene sozioökonomische Kosten werden die Folgen der Migration kalkuliert.

In Abhängigkeit vom BIP-Wachstum, Temperaturanstieg, Bevölkerungswachstum und Speziesentwicklung werden die wertmäßigen Ökosystemveränderungen (grobe Größe für ästhetischen Wert von Ökosystemen, Biodiversität, Spezies und Landverlust) kalkuliert. Dabei wird der Wert der Ökosysteme aufgrund der Preisung nach der Zahlungsbereitschaftsmethode und fehlender langfristiger Folgen sowie des fehlenden Speziesaussterbens unterschätzt (Warren et al. 2006). Es ist unklar, ob diese monetäre Größe über ein Feedback in das Modell eingespeist wird. BIP-Wachstum, Temperatur und Bevölkerung bestimmen ebenfalls die Anzahl der Durchfalltoten und die ersten beiden Faktoren bestimmen die Anzahl der Toten durch vektorübertragene Krankheiten. Die Temperatur ist kausal für die Entwicklung der Mortalität im Hinblick auf Gefäß- und Atemkrankheiten. Hitzebedingte Mortalität als urbanes Phänomen ist eine Funktion der Bevölkerungsdichte und des Pro-Kopf-Einkommens. Es werden ferner Schäden durch extreme Wetterereignisse (in Abhängigkeit von Wachstum und Temperatur) sowie dadurch verursachte Mortalität be-

stimmt. Die Feedbacks erfolgen in FUND insgesamt in Bezug auf Konsum, Investitionen und Bevölkerung.

Jedes IAM beinhaltet Technologien, die zur Minderung der entstehenden Umweltschäden eingesetzt werden und dabei selbst Kosten verursachen, die sich in den Budgetgleichungen der repräsentativen Haushalte widerspiegeln. In den optimierenden Modellen wird dabei das optimale (wohlfahrtsmaximierende) Vermeidungsniveau bestimmt, so dass nach dem marginalen Kalkül die Grenzkosten der Vermeidung deren Grenznutzen entsprechen. Dadurch, dass implizit ein wohlwollender Diktator die Wahl der Politikvariablen im sozialen Interesse trifft, wird von politischen Prozessen und Konflikten abstrahiert. Generell werden Fragen von „Governance“ und „Policy“ auf stilisierte Weise in den ökonomisch-energetischen Modulen der IAMs geklärt. Sie betreffen solche Umweltpolitikbereiche wie Besteuerung, Emissionshandel oder Regulierung. In den älteren Modellen tritt die Vermeidung nur in einer undifferenzierten Form auf. Neuerdings aber wird explizit die Anpassung (adaptation) berücksichtigt, und es wird zwischen ihr und der Reduktion (mitigation) unterschieden. Konzeptionell sind beide Formen der Umweltpolitik verschieden – Reduktion meint die traditionellen Maßnahmen, die in ihrer Marktform Steuern und Zertifikate einschließen und beim Klimaschutz kooperative Lösungen verlangen, wogegen die Anpassung nicht der Verhinderung der Klimaschäden dient, sondern deren Wirksamkeit zu begrenzen versucht.

5.2 DEUTSCHLAND-STUDIEN

Die Aufteilung der Weltregionen in den IAM schließt üblicherweise eine separate Ausweisung der Ergebnisse für Deutschland aus. Trotzdem hat Kemfert mit ihrem Modell WIAGEM sowohl Schäden für Deutschland bis 2050 (Kemfert 2007) als auch eine (methodisch weitgehend unklare) weitere Disaggregation dieser Schäden auf 13 bei Spekat et al. (2007) festgelegten Naturräume und Bundesländer vorgenommen (Kemfert 2008), wobei die Schadensfunktionen und Rückkopplungen in WIAGEM auf diejenigen von FUND aufbauen. Es wurden die WETTREG-Ergebnisse für das Szenario A1B bis 2050 verwendet und auf Wirtschaftssektoren Energie, Gesundheit, Tourismus, Land- und Forstwirtschaft, Baugewerbe sowie Verkehr aufgeteilt.

Die anderen verfügbaren Studien zu Klimawirkungen in Deutschland weisen selten Verbindungen zu den regionalen Klimaszenarien auf. Jenseits von Einzelstudien, auf die hier nicht näher eingegangen wird, liegen noch allenfalls die Studien von Bräuer et al. (2009) und BBR (2011) vor.

Bräuer et al. (2009) schätzen die Belastungen für die Tragfähigkeit der öffentlichen Finanzen aufgrund der Folgen des Klimawandels ab. Auf Basis der SRES-Szenarien B1 und A2, erstellt mit REMO und WETTREG, werden einfache Projektionen für Deutschland in 2050 und 2100 erstellt, deren Ergebnisse mit denen einer Basisprojektion des BMF verglichen werden. Dabei werden einerseits Schadenskosten der Extremereignisse der Gegenwart in die Zukunft projiziert und mit der Eintrittswahrscheinlichkeit gewichtet, andererseits aus der Literatur bekannte sektorale Schäden in BIP-Prozentpunkten auf das projizierte Wachstum hochgerechnet. Es wurden die Auswirkungen für insgesamt neun Bereiche (s. oben) in zehn Fallstudien für 2050 bestimmt, aggregiert, und auf 2100 extrapoliert.

In BBR (2011), aufbauend auf BBR (2008), wurden die Ergebnisse der REMO-Szenarien A1B (für die Zeiträume 2011-2040 und 2041-2070 im Vergleich zu 1961-1990) sowie A2 und B1 (für den Zeitraum 2071-2100 gegenüber 1961-1990) dazu verwendet, (qualitative) Klimawirkungen in planungsrelevanten Räumen zu bestimmen. Dabei wird derart verfahren, dass zunächst aufgrund von Mittelwerten für sieben Klimavariablen in einer Faktoranalyse Klimawandel-Regionstypen bestimmt werden. Anschließend werden diese mit „Klimawandel-Auffälligkeits-Raumtypen“, die aufgrund von Indikatoren für die gegenwärtige Vulnerabilität gebildet werden, zu „Klimawandel-Betroffenheits-Raumtypen“ kombiniert. Auf Basis der Ergebnisse kumulierter Wirkfolgen des Klimawandels für einzelne Raumgebiete werden Problemkomplexe definiert, die entweder Sommer-trockenheit, Winterniederschläge oder Infrastruktur im Kern betreffen.

6 FAZIT UND AUSBLICK

In vielen Ländern der Welt sind bereits heute negative Folgen des Klimawandels beobachtbar. Für die Zukunft gilt es, Vorkehrungen zu treffen, die die regionalen Schadensanfälligkeiten für die Folgen des Klimawandels reduzieren. Dies bedarf einer genauen Vorstellung des zukünftigen klimatischen Zustands der Erde. Eine konkrete Vorhersage der klimatischen Veränderungen ist aufgrund der Komplexität und Wechselwirkungen des Klimas mit weiteren Komponenten jedoch nicht möglich. Dennoch wurden in den letzten Jahren mit den sogenannten Klimamodellen geeignete analytische und prognostische Instrumente entwickelt, die auf Grundlage von Treibhausgasemissionen und mit Hilfe spezieller Algorithmen künftige Klimaszenarien berechnen. Dabei lassen sich die Modelle in globale und regionale Modelle differenzieren.

Globale Klimamodelle nutzen IPCC-Szenariovorgaben, um hierdurch Zeitpfade bspw. von Temperatur und Niederschlag unter Berücksichtigung der Interaktionen zwischen Ozeanen und der Atmosphäre zu generieren. Die IPCC-Szenarien basierten in den letzten beiden Sachstandsberichten des IPCC auf SRES-Szenarien, ab dem nächsten Sachstandsbericht bilden jedoch alternative Zeitpfade der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen (RCP) die Grundlage. Diese ergeben bestimmte Strahlungsantriebe, aus denen dann die Erdoberflächentemperaturen resultieren. In Deutschland werden die Klimaprojektionen mit dem Erdsystemmodell MPI-ESM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie erstellt.

Globale Modelle sind die Basis für regionale Klimamodelle, in welchen in kleineren Skalierungen präzise Aussagen über die deutschen Regionen getroffen werden können. Gegenwärtig werden in Deutschland vier regionale Klimamodelle genutzt. Die beiden dynamischen Modelle COSMO-CLM und REMO sowie die statistischen Modelle STARS (ehemals STAR) und WETTREG. Erstere sind sehr komplex und aufwendig und dadurch gekennzeichnet, dass die physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre auf Basis von dynamischen Gleichungen simuliert werden. Letztere basieren auf statistischen Beziehungen zwischen globalen und lokalen bzw. regionalen Klimavariablen und werden auf Grundlage von Beobachtungen parametrisiert. Vorteil der statistischen Modelle ist, dass sie kurz- und mittelfristig zuverlässiger, weniger rechenintensiv und flexibler als dynamische Modelle sind. Allerdings sind sie grundsätzlich nicht in der Lage, Wettergegebenheiten jenseits der historischen Erfahrungen zu simulieren.

Die Regionalmodelle sind von Relevanz, um bspw. den möglichen Handlungsbedarf einzelner Regionen im Hinblick auf den Klimawandel zu benennen, entsprechende Ziele zu definieren und Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Fasst man die Ergebnisse einzelner Studien, in denen die Regionalmodelle zum Einsatz kamen, zu sektoralen Wirkungen des Klimawandels zusammen, können die Wirkungen des Klimawandels für Deutschland in zwei große Problemkomplexe aufgeteilt werden: Dabei handelt es sich einerseits um Folgen, die durch sich verändernde Winterniederschläge und –temperaturen auf den Bereich Wasser vor allen Dingen an der Küste und in Norddeutschland wirken. Andererseits handelt es sich um Folgen aufgrund hoher sommerlicher Temperaturen und wenig Niederschlag, wovon bspw. die Region entlang des Rheins betroffen sein wird.

Für das Projekt econCCadapt rechtfertigen die Ergebnisse die Festlegung der entsprechenden Zielgebiete und empfehlen in weiteren Arbeiten den Fokus auf die Bereiche Hochwasser und Hitzewellen zu legen.

Um die Wirkungen des Klimawandels zu bestimmen, werden sogenannte Integrated Assessment Models (IAM) verwendet. Module, die das Wirtschaftsgeschehen, das globale Klima und die Auswirkungen der ökonomischen und klimatischen Veränderungen für das sozioökonomische System und die natürliche Umwelt abbilden, werden in den IAM vereinigt. Klimaveränderungen können mit den monetären und physischen Auswirkungen für den Menschen in Form einer Schadensfunktion in IAM gekoppelt werden. Diese berechnen die Schäden für die Bereiche Landwirtschaft, Meeresspiegelanstieg etc. als Folge von Wirtschaftswachstum und Temperaturanstieg, wofür Kosten-Nutzen-Analysen notwendig sind. Durch eine Rückkopplung werden die im Produktionsprozess generierten Einkommen durch die bewerteten Schäden vermindert. Die zweite Gruppe der IAM orientiert sich am FUND-Modell (Tol), in welchem zahlreiche Auswirkungen in monetärer, wie auch biophysischer Form kalkuliert werden. Eine ähnliche Vorgehensweise ist bezüglich der Erweiterung des umweltökonomischen Modells der GWS – PANTA RHEI¹ – geplant.

Zunächst werden für die weiteren Arbeiten die Daten des neuen Szenarios RCP 8.5 herangezogen. Bei Veröffentlichung weiterer Datensätze können die Schadensfunktionen auch bei weniger starken Impacts im Modell mitlaufen.

¹ Weitere Informationen über PANTA RHEI sind bspw. in Lehr et al. (2011) zu finden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Arnell, N., Kram, T., Carter, T., Ebi, K., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kriegler, E., Mathur, R., O'Neill, B., Riahi, K., Winkler, H., van Vuuren, D. & Zwickel, T. (2011): A framework for a new generation of socioeconomic scenarios for climate change impact, adaptation, vulnerability and mitigation research. Working Paper. (http://www.isp.ucar.edu/sites/default/files/Scenario_FrameworkPaper_15aug11_0.pdf).
- BBR (2008): Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel – Vorstudie für Modellvorhaben. Zusammenfassung des Zwischenberichts zu den räumlichen Wirkfolgen von Klimaänderungen und ihrer raumordnerischen Relevanz, BBR-Online-Publikation 19/2008.
- BBSR (2010): Klimawandel als Handlungsfeld der Raumordnung: Ergebnisse der Vorstudie zu den Modellvorhaben „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“, Forschungen Heft 144.
- Bräuer, I., Umpfenbach, K., Blobel, D., Grünig, M., Best, A., Peter, M. & H. Lückge (2009): Klimawandel: Welche Belastungen entstehen für die Tragfähigkeit der Öffentlichen Finanzen?, Endbericht, Ecologic Institute, Berlin.
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen.
- Bundesregierung (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel vom Bundeskabinett am 31. August 2011 beschlossen.
- DKRZ (2013): <http://www.dkrz.de/Klimaforschung/konsortial/ipcc-ar5/das-modell>
- Gerstengarbe, F. W. (2009): Das regionale statistische Klimamodell STAR II und seine Anwendung zur Abschätzung der klimatischen Entwicklung im Elbe - Einzugsgebiet. (http://www.glowa-elbe.de/pdf/glowaiii/Stakeholder_WS_jan09/gerstengarbe_lpz_jan2009.pdf).
- IPCC (2001): Climate Change 2001: SynthesisReport. Contribution of the Working group I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change, Cambridge.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Impacts, adaptation and Vulnerability, Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers. Cambridge.
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P. & Sieck, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Climate Change 11/2008, Umweltbundesamt.
- Jacob, D. (2009): Regionalisierte Szenarien des Klimawandels, Raumforschung und Raumordnung 2/2009, S. 89-96.
- Kemfert, C. (2007): Klimawandel kostet die deutsche Volkswirtschaft Milliarden, DIW Wochenbericht 11 /2007, S. 165–169.

- Kemfert, C. (2008): Kosten des Klimawandels ungleich verteilt: Wirtschaftsschwache Bundesländer trifft es am härtesten, DIW Wochenbericht 12-13/2008, S. 137-142.
- Lehr, U., Mönnig, A., Wolter, M. I., Lutz, C., Schade, W. & Krail, M. (2011): Die Modelle ASTRA und PANTA RHEI zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen umweltpolitischer Instrumente - ein Vergleich. GWS Discussion Paper 11/4, Osnabrück. (<http://www.gws-os.com/discussionpapers/gws-paper11-4.pdf>).
- Kreienkamp, F., Spekat, A. & Enke, W. (2010): Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. Aktualisierte Fassung des Berichts vom 22. Juni 2010, CEC Potsdam.
- Lüttger, A., Gerstengarbe F.-W., Gutsch, M., Hattermann, F., Lasch, P., Murawski, A., Petraschek, J., Suckow, F. & Werner, P.C. (2011): Klimawandel in der Region Havelland-Fläming, PIK Report 121.
- Moss, R.H., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M., Rose, S., van Vuuren, D., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stuffer, R., Thomson, A., Weyant, J. & Wilbanks, T. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756. doi:10.1038/nature08823
- Nakicenovic, N. & Swart, R. (2000): Special Report on Emission Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III.
- Nordhaus, W. (2010): Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment, Yale University, mimeo.
- O'Neill, B.C., Carter, T.R., Ebi, K.L., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kemp-Benedict, E., Kriegler, E., Mearns, L., Moss, R., Riahi, K., van Ruijven, B. & van Vuuren, D. (2012): Meeting Report of the Workshop on The Nature and Use of New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research, Boulder, CO, November 2-4, 2011. Available at: <http://www.isp.ucar.edu/socio-economic-pathways>.
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W. & Werner, P.C. (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM, *Theor. Appl. Climatol.* 92, No. 3-4, pp. 209-223, DOI: 10.1007/s00704-007-0352-y.
- 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, Umweltbundesamt.
- Tol, R. (1997): On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND, *Environmental Modeling and Assessment* 2, pp.151-163.
- Tol, R. (2007): The double trade-off between adaptation and mitigation for sea level rise: an application of FUND. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12(5), pp. 741-753.
- Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter M. & Sartorius, C. (2011): Ökonomische Aspekte der Anpassung an den Klimawandel. Literaturlauswertung zu Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel, *Climate Change* 19/2011, Umweltbundesamt.

- van Vuuren D.P., Edmonds, J.A., Kainuma M., Riahi, K., Thomson, A.M., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. & Rose, S. (2011a): The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change* 109, pp. 5-31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- van Vuuren, D., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A.M., Nakicenovic, N., Kram, T., Berkhout, F., Swart, R., Janetos, A., Rose, S. & Arnell, N. (2011b): Developing new scenarios as a common thread for future climate research. *Global Environmental Change*. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2011.08.002.
- Walkenhorst, O. & Stock, M. (2009): Regionale Klimaszenarien für Deutschland. Eine Leseanleitung, E-Paper der ARL Nr. 6, Hannover.
- Warren, R., Hope, C., Mastrandrea, M., Tol, R., Adger, N. & Lorenzoni, I. (2006): Spot-lighting Impacts Functions in Integrated Assessment. Research Report Prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change, Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper 91.
- Werner, P.C. & Gerstengarbe, F.-W. (2007): Welche Klimaänderungen sind in Deutschland zu erwarten? In: Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): *Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin, S. 56-59.
- Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U. & Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme, *Climate Change* 08/2005, Umweltbundesamt.