

WELCHE KLIMAÄNDERUNGEN SIND IN DEUTSCHLAND ZU ERWARTEN?

Peter C. Werner und Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe, Potsdam

1. Einleitung

Wenn man die Aussagen der globalen Modelle für größere Regionen (z.B. Europa) inzwischen als gut gesichert betrachten kann, gilt dies noch nicht für Aussagen im regionalen Bereich (z.B. Deutschland). Auch bei einem Gitterpunktabstand von nur 100 km fallen eine Reihe klimatisch wichtiger Prozesse (z.B. die Verdunstung von Waldregionen oder Gewässern) immer noch durch die Maschen des Modells. Da aber vor allem die regionalen Auswirkungen zukünftiger Klimaänderungen von Bedeutung für Mensch und Umwelt sind, wird seit einigen Jahren versucht, eine Antwort auf diese Problematik zu finden.

Hier kommt eine weitere Möglichkeit, Aussagen über das zukünftige Klima zu erstellen, zum Tragen. Dabei handelt es sich um die Kopplung der globalen dynamischen Klimamodelle mit regionalen dynamischen Modellen, die vom Prinzip her die gleiche Modellphysik und -struktur wie die globalen Modelle aufweisen. Außerdem ist der Einsatz von Modellen möglich, die mit statistischen Methoden eine Auflösung von der globalen zur regionalen Skala realisieren.

2. Regionale Klimamodelle

Bei den regionalen dynamischen Modellen wird die Maschenweite soweit verkleinert, dass auch kleinskalige Klimaprozesse erfasst werden. Danach wird das regionale Modell an der entsprechenden Stelle in ein globales unter Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen eingebettet. Dabei treten eine Reihe neuer Probleme auf (z.B. beim Übergang von großen zu kleinen Maschenweiten), die durch entsprechende mathematische Ansätze gelöst werden müssen. Außerdem steigt der Bedarf an Rechenzeit mit sich verringernder Maschenweite an. Inzwischen wird dieser Modelltyp zu Szenarienrechnungen für eine Zeitskala von einem Monat bis zu mehreren Dekaden eingesetzt. Es gibt zwei Arten dieses Modelltyps, den hydrostatischen und den nicht-hydrostatischen Typ. Hydrostatisch bedeutet, dass die Vertikalbeschleunigung eines Luftteilchens = 0 gesetzt wird. Dieser Ansatz ist auf größeren Skalen berechtigt, da die horizontalen Beschleunigungen wesentlich größer als die vertikalen sind. Allerdings ist

auf kleiner Skala (z.B. Gewitterwolke) diese Annahme nicht mehr gültig. Um solche Phänomene zu erfassen, benötigt man den nicht-hydrostatischen Ansatz.

Als Beispiel für ein hydrostatisches Modell kann das Regionalmodell (REMO) des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg dienen (*Jacob, 2001*). Es ist aus dem zur Wettervorhersage entwickelten Europa-Modell des Deutschen Wetterdienstes hervorgegangen (*Majewski, 1991*). Vorhergesagt werden die horizontalen Windkomponenten, der Luftdruck, die Temperatur, die Luftfeuchte sowie der Wassergehalt der Atmosphäre. Eingebettet wird das Modell in das globale Modell des Hamburger Instituts. Es wird für Berechnungen mit Maschenweiten von 50 x 50 km bis zu 10 x 10 km eingesetzt.

Nicht-hydrostatische Modelle kommen zum Einsatz, wenn Prozesse, die unterhalb einer Auflösung von 10 x 10 km ablaufen, berücksichtigt werden sollen. Ein Beispiel für diese Modellkategorie ist das Climate Local Model (CLM). Es ist die Klima-Version des Lokalen Modells (LM) des Deutschen Wetterdienstes. Es beinhaltet einen nicht-hydrostatischen, komplett kompressibel formulierten dynamischen Kern ohne Skalenapproximationen und kann deshalb auf räumlichen Skalen von 50 km bis zu ca. 3 km Gitterauflösung verwendet werden. Prognostische Variablen sind die horizontalen Windkomponenten, die Temperatur, die Druckabweichung von einem hydrostatischen, konstanten Hintergrunddruck, die spezifische Feuchte und der Wolkenwassergehalt. Optional können weiterhin die turbulente kinetische Energie, Wolkeneis, der Regen-, Schnee- und Graupelgehalt der Atmosphäre prognostiziert werden. Physikalische Parametrisierungen subskaliger Prozesse sind z.B. für die Strahlung, die Konvektion, den skaligen Niederschlag, die turbulenten Flüsse von Impuls, Wärme und Feuchte sowie für die Bodenprozesse implementiert.

Eine weitere Methodik, um zu plausiblen Aussagen zur zukünftigen regionalen Klimaentwicklung zu kommen, besteht in der Verwendung statistischer Methoden. Dabei lassen sich zwei von ihrer Philosophie her unterschiedliche Herangehensweisen unterscheiden. Die erste Methode wird im allgemeinen mit dem Begriff des „downscaling“, also des „Herabskalierens“ verbunden. Wie der Name besagt, wird hier versucht, aus den großskaligen oder weitmaschigen Ergebnissen eines Klimamodelllaufes auf die zwischen den Gitterpunkten ablaufenden Prozesse zu schließen. Dies geschieht über statistische Zusammenhänge, die vorher aus den Beobachtungen groß- und kleinskaliger Vorgänge in der Atmosphäre abgeleitet wurden. Solche Beziehungen existieren, so dass ein derartiger Ansatz gerechtfertigt ist (*Bürger, 1996*). Die Qualität dieser Vorgehensweise

hängt im wesentlichen von der Güte der Ergebnisse des jeweils verwendeten globalen Klimamodells ab. Hier liegt auch die Problematik dieses Ansatzes, da die globalen Klimamodelle zur Zeit nur die großräumigen Strukturen hinreichend genau simulieren können. Abweichungen von mehreren Gitterpunkten, die im Vergleich zu den beobachteten Strukturen auftreten, werden noch nicht als Fehler betrachtet.

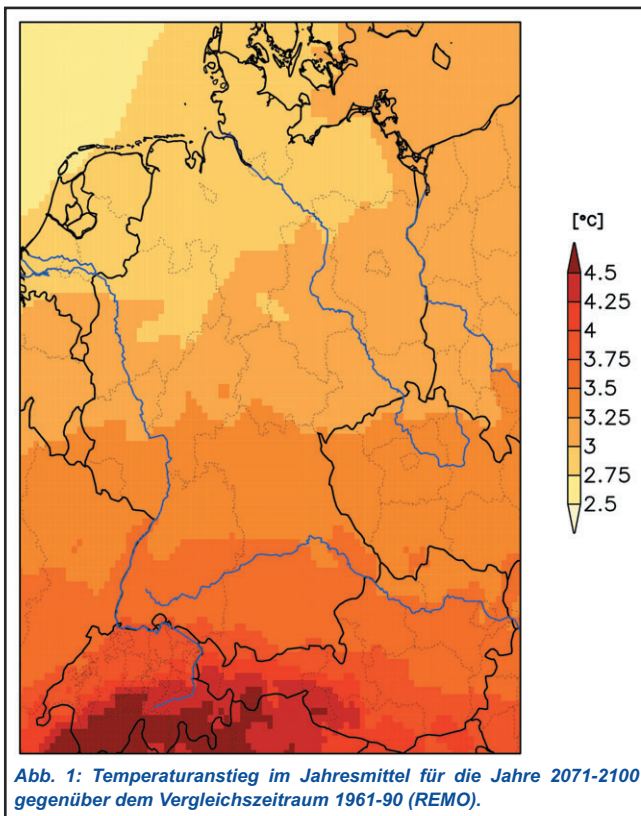
Geht man von dem Postulat aus, dass die globalen Modelle in der Lage sind, die Strukturen der atmosphärischen Zirkulation zufriedenstellend zu beschreiben, kann man einen weiteren Modelltyp entwickeln. Hierzu werden statistische Beziehungen zwischen den großräumigen Mustern (Wetterlagen) und den lokalen Auswirkungen aus der Vergangenheit identifiziert. Diese werden auf die Muster der Zukunftsszenarien der globalen Modelle übertragen, so dass man letztlich die für eine Region zu erwartenden neuen klimatischen Bedingungen erhält. Ein Beispiel für diesen Modelltyp ist das wetterlagenbasierte Regionalmodell WETTREG (Spekat et al., 2007).

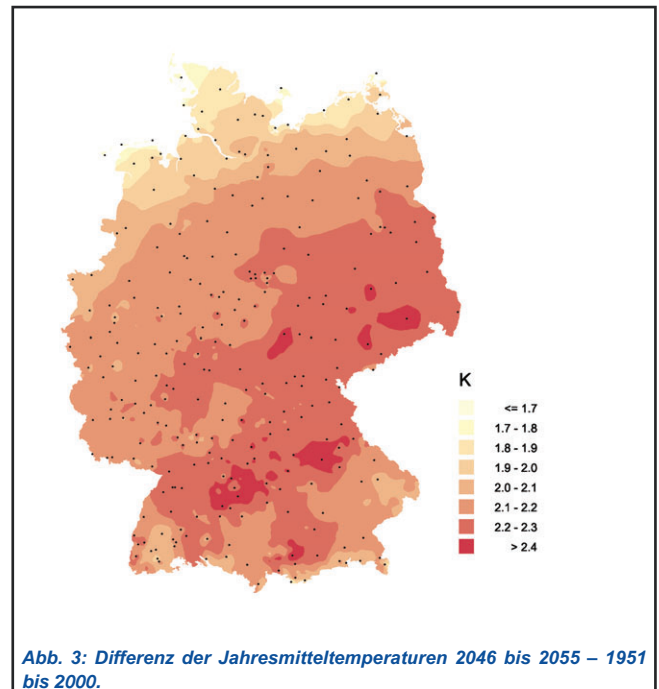
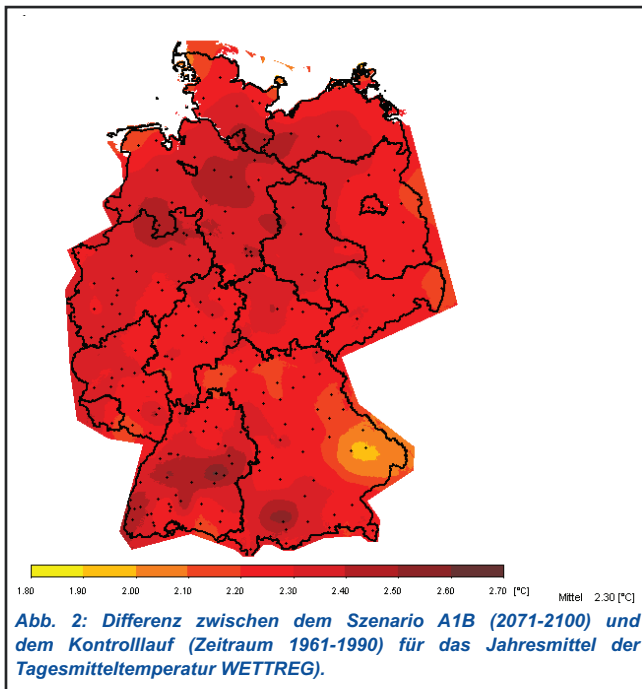
Ein anderer Ansatz besteht darin, eine allgemeine Klimaentwicklung aus einem globalen Klimamodelllauf für eine Region abzuleiten (z.B. einen Temperaturtrend). Auf dieser Basis und unter Verwendung von Beobachtungsdaten werden dann für diese Region die zu erwartenden zukünftigen Klimaent-

wicklungen simuliert (Werner, Gerstengarbe, 1997). Eine Erweiterung dieses Ansatzes macht es nunmehr möglich, auch für Regionen der Größenordnung Deutschlands Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung zu berechnen. Dabei liegt folgende Überlegung zugrunde: Ausgangspunkt ist die Annahme, dass sich das Klima der nächsten Jahrzehnte nicht allzu weit vom heutigen Zustand entfernt. Ist dies der Fall, wird es in der Zukunft Witterungssituationen geben, die bereits in der Vergangenheit beobachtet wurden. Dies bedeutet, dass man die Zukunft unter bestimmten Voraussetzungen aus Teilen der Vergangenheit zusammensetzen kann. Weiß man zum Beispiel, wie sich die Temperatur in den nächsten Jahrzehnten entwickeln wird (z. B. aus einem globalen Klimamodell), kann man die Witterungsperioden so zusammen setzen, dass der zukünftige Temperaturtrend wiedergegeben wird. Die gleichzeitig mitgeführten anderen meteorologischen Größen erlauben dann eine Aussage zur komplexen Klimaentwicklung. Das dazu notwendige Modell beinhaltet u.a. Monte-Carlo-Simulationen, ein Cluster-Analyseverfahren und verschiedene statistische Testmethoden. Eine genaue Beschreibung dieses statistischen Regionalmodells STAR findet sich bei Orłowsky et al., 2007.

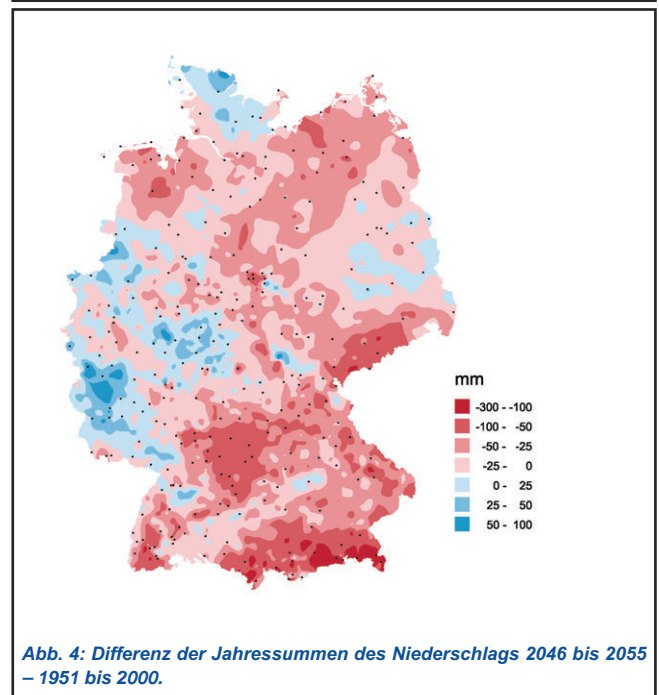
3. Die Klimaentwicklung in Deutschland

Mit allen beschriebenen regionalen Klimamodellen wurden bereits Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung berechnet. Das Umweltbundesamt hat auf seiner Internetseite die Ergebnisse von Szenarienläufen der Modelle REMO und WETTREG veröffentlicht (www.umweltbundesamt.de). Verwendet wurden die Zukunftsszenarien B1, A1B und A2, die vom IPCC definiert wurden. Sie repräsentieren unterschiedliche CO₂-Emissionen. Sie steigen in allen drei Szenarien bis 2050 an (auf 9, 16 und 17 Gt). Danach sinken sie im B1-Szenarium unter den Wert von 1990 und für A1B auf einen Wert von 13 Gt. Im A2-Szenarium hingegen steigen sie bis zum Jahr 2100 auf Werte um 30 Gt an. Es ist klar, dass beide Modelle (Abb. 1 u. 2) einen weiteren Temperaturanstieg simulieren, der allerdings beim REMO deutlich höher ausfällt als beim WETTREG (2071/2100 – REMO > 4 °C, WETTREG 2-3 °C). Beim Niederschlag stimmen die Entwicklungstendenzen beider Modelle nicht überein (Hier nicht dargestellt.). WETTREG simuliert für die letzten 30 Jahre dieses Jahrhunderts einen deutlichen Niederschlagsrückgang. REMO dagegen zeigt, wenn auch jahreszeitlich differenziert, im Gesamtjahr eine etwa ausgeglichene Bilanz. Für das CLM liegen zur





Zeit noch keine belastbaren Ergebnisse vor. Als letztes Beispiel soll eine Szenarienrechnung mit Hilfe des statistischen Regionalmodells STAR vorgestellt werden. Dazu wurden zur Berechnung der zukünftigen Klimaentwicklung in Deutschland Daten von 2342 Klima- und Niederschlagsstationen auf Tageswertbasis für den Zeitraum 1951 – 2003 verwendet. Für die Simulation der möglichen zukünftigen Klimaentwicklung wurde das Emissionsszenarium A1B ausgewählt. Das A1B-Szenarium ist, wie bereits erwähnt, charakterisiert durch eine wirtschaftliche Weiterentwicklung unter den heutigen Bedingungen bei fortschreitender Globalisierung, aber unter gleichzeitiger Berücksichtigung des technischen Fortschritts. Das heißt, dass in den nächsten 50 Jahren mit einer weiteren Zunahme der Treibhausgasemissionen gerechnet werden muss. Aus diesem Grund beziehen sich die Berechnungen auf den Zeitraum 2004 – 2055. Beim Vergleich der mittleren Verhältnisse des Beobachtungszeitraumes 1951/2003 mit den für die Dekade 2046/2055 berechneten ergeben sich für die Temperatur und den Niederschlag folgende mögliche Entwicklungen, die anhand der Differenzen zwischen beiden Zeiträumen dargestellt werden. Wie die Abbildung 3 zeigt, nimmt die Temperatur zwischen 1.6 °C und 2.4 °C zu, wobei die Änderung im Norden am geringsten ausfällt und nach Süden bis Südosten zunimmt. Ihre höchsten Werte erreicht sie in einem Streifen, der vom nordöstlichen Baden-Württemberg bis nach Südostbrandenburg reicht. Wesentlich differenzierter fällt die räumliche Niederschlagsentwicklung



aus (Abb. 4). Das weitaus größte Gebiet Deutschlands ist von einem Rückgang der Jahressummen des Niederschlags betroffen, der in einzelnen Fällen bis zu 300 mm aufweisen kann. Deutliche Zunahmen bis 100 mm findet man in einigen Teilen West- und Norddeutschlands. Damit muss unter Einbeziehung der Temperaturentwicklung davon ausgegangen werden, dass sich die Wasserbilanz (Niederschlag – Verdunstung) zukünftig in den meisten Gebieten

erheblich verschlechtert und in einigen Regionen eine zunehmende Gefahr von Dürren besteht. Dies betrifft insbesondere Ostdeutschland, wo die mittleren Niederschlagssummen bereits heute schon relativ niedrig sind, während in Süddeutschland die Abnahme von einem hohen Niederschlagsniveau ausgeht.

Da Szenarien grundsätzlich immer „Wenn-Dann-Entwicklungen“ widerspiegeln, wird keine wahre, sondern eine auf Vorgaben beruhende Zukunft beschrieben. Deshalb muss darauf hingewiesen werden, dass das hier verwendete Szenarium A1B nur eins von vielen möglichen darstellt. Allerdings hat dieses Szenarium eine relativ hohe Wahrscheinlichkeit innerhalb der gängigen Emissionsszenarien (*IPCC, 2007*).

4. Fazit

Schon an Hand der wenigen Szenarienbeispiele zeigt sich, dass eine Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Klimaentwicklung noch von sehr vielen Unwägbarkeiten begleitet ist. Wie wird sich der CO₂-Ausstoß entwickeln, wie die Weltbevölkerung? Welche Energieressourcen können erschlossen werden und welche technischen Entwicklungen sind zu erwarten? Von allen diesen Faktoren (und einigen mehr) hängt die Entwicklung unseres Klimas entscheidend ab. Trotzdem ist es möglich, Tendenzen der Klimaentwicklung abzuschätzen. Geht die Entwicklung für mehrere Klimamodelle in die gleiche Richtung, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass diese dann auch tatsächlich eintritt, deutlich an. In der Entwicklung ist man inzwischen so weit, dass alle Modelle Tendenzen bezüglich der Temperatur in die gleiche Richtung aufweisen. Für andere meteorologische Größen, wie zum Beispiel den Niederschlag, bestehen noch Unterschiede in Raum und Zeit hinsichtlich ihrer zukünftigen Ausprägung. Trotzdem hat sich der Unsicherheitsbereich von Modellgeneration zu Modellgeneration deutlich verringert. Damit ist man erstmals in der Lage, Empfehlungen an die Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft weiterzugeben, um die notwendigen Anpassungsmaßnahmen auch einzuleiten.

Literatur

- Bürger, G., (1996): Expanded downscaling for generating local weather scenarios, *Climate Research*, Vol. 7, 111-128
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis; Summary for Policymakers*. Fourth Assessment Report, Geneva, 18 S.
- Jacob, D. (2001): A note to the simulation of the annual and interannual variability of the water budget over the Baltic

Sea drainage basin. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 77, p. 61-73

- Majewski, D. (1991): The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. Seminar proceedings ECMWF, 2, p. 147-191
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (2007): Past as type case – a resampling scheme for regional climate simulations. *Theor. Appl. Climatol.*, angenommen
- 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 2010-2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Publ. d. UBA, Dessau, 149 S.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W. (1997): Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research*, 8 (3), p. 171-180

Danksagung

Die Autoren danken dem Deutschen Wetterdienst für die Bereitstellung der Daten.