

Wolfgang Enke, Arne Spekat, Frank Kreienkamp

Entwicklung von regional hoch aufgelösten regionaler Klimaszenarien auf der Basis von globalen Klimasimulationen WETTREG

1. Einführung

Die Entwicklung einer statistischen Methode zur Erzeugung regionalisierter Klimaszenarien, die mit der Erstellung des WETTREG-Verfahrens [Enke 2006a] einen hohen Entwicklungsstand erreicht hat, begann mit einem Projekt, das im Jahre 1998 im Rahmen des BMBF-Schwerpunkts Klimavariabilität und Signalanalyse an die Freie Universität Berlin vergeben wurden [Enke u. a. 1999]. Es folgten Studien, die auf regionale Besonderheiten einzelner Bundesländer eingingen und mit denen auch zunehmend komplexere Aussagen, wie beispielsweise zu Extremen sowie die Simulation längerer Zeithorizonte möglich wurden [Enke 2001], [Enke 2002], [Enke 2003d], [Enke 2004], [Enke u. a. 2005b], [Enke u. a. 2005a]. Zwischen den Studien für benachbarte Bundesländer traten in den Randbereichen Brüche auf, die bei übergreifender Interpretation der Ergebnisse zu Irritationen führten.

Die Brüche in den Übergangsbereichen wurden im Rahmen des Vorhabens [Enke u.a. 2006a] beseitigt. Zugleich entstand eine einheitliche regionalisierte Simulation der Klimaszenarien für ganz Deutschland.

Prämissen des statistischen Regionalisierungsverfahrens

1. In Deutschland gibt es deutlich regional gegliederte klimatologische Unterschiede, die durch Fokussierung des Regionalisierungsverfahrens WETTREG auf diese Regionen herausgearbeitet wurden.
2. Die verwendeten Wetterlagen beschreiben die regionalen klimatologischen Unterschiede in guter Weise.
3. Eine Fokussierung auf unterschiedliche Klimaregionen verbessert den Detailliertheitsgrad der regionalen Klimastudien.
4. Eine gewichtete Mittelung der Einzelstudien erlaubt glatte Übergänge zwischen den Einzelstudien.

2. Datenquellen

In die Rechnungen des Regionalisierungsverfahrens gehen drei Datenquellen ein:

1. ERA40-Reanalysen [Uppala u. a. 2005], Es handelt sich um Analysen meteorologischer Größen für verschiedene Druckflächen die nach einer einheitlichen Methode, rückwirkend bis ca. 1951 erstellt wurden. Aus diesen Feldern werden potenzielle Prediktorenfelder berechnet, die u. a. die Basis für die Entwicklung objektiver Wetterlagen bilden.
2. ECHAM5/MPI-OM T63L31 globale Klimasimulationen [Roeckner u. a. 2003] und [Roeckner u. a. 2004] für die Jahre 1951 bis 2100, für die Jahre bis 2000 als Control-Run, danach als Szenarienrechnungen für A1B, A2 und B1.
3. 282 Klimastationen des DWD, verteilt über ganz Deutschland, der Jahre 1981/2000; und 1695 Niederschlagsstationen (insgesamt 1977 Stationen). Es handelt sich um die Wetterelemente:

Nr. Meteorologisches Element Einheit

- 1 Maximum der Temperatur [°C]
- 2 Tagesmittel der Temperatur [°C]
- 3 Minimum der Temperatur [°C]
- 4 Tagessumme des Niederschlages [mm]
- 5 Tagesmittel der relativen Feuchte [%]
- 6 Tagesmittel des Luftdrucks [hPa]
- 7 Tagesmittel des Dampfdrucks [hPa]
- 8 Tagessumme der Sonnenscheindauer [h]
- 9 Tagesmittel des Bedeckungsgrades [octas]
- 10 Tagesmittel der Windstärke [Bft]

3. Von globalen Klimasimulationen zu wetterlagenkonsistenten Zeitreihen und deren Extremen

Zunächst erfolgte die Definition von 14 Boxen mit einem Einzugsbereich von 3° in meridionaler und 4° in zonaler Richtung. Für jede der 14 Einzelboxen werden getrennt Simulationen durchgeführt, die erst in einem späteren Schritt zu einer Gesamtsimulation vereinheitlicht werden. Die Boxen sind in Abb. 1 dargestellt.

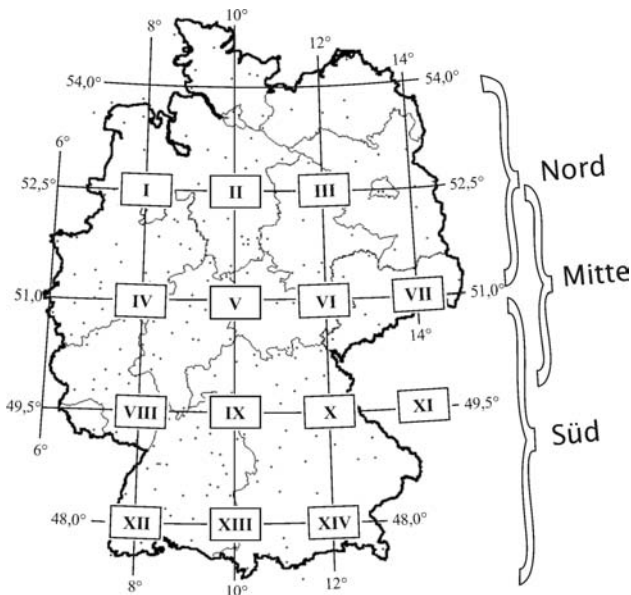


Abb. 1: Einteilung der Gesamfläche in 14 Boxen von $3^\circ \times 4^\circ$ Größe. Dargestellt sind außerdem die drei Breitenkreisstreifen in denen die Klassifikation fokussiert durchgeführt wird.

Danach werden optimierte Zirkulationsmuster für den Norden, die Mitte und den Süden Deutschlands abgeleitet, wobei generell zwischen Zirkulationstypen, die auf den Niederschlag optimiert wurden und solche, die auf die Temperatur optimiert wurden unterschieden wird.

3.1 Der Weg zur Bildung von Wetterlagen

- Definition einer Leitgröße (Temperatur, bzw. Niederschlag), die über die Fläche einer Box aus den darin befindlichen Messreihen der Klimastationen gemittelt wird.
- Klasseneinteilung (von extrem kalt nach extrem warm, bzw. extrem trocken bis extrem nass) und Zuordnung jedes Tages zu „seiner“ Temperatur- bzw. Niederschlagsklasse. Die Klassenintervalle sind von der Jahreszeit abhängig.
- Erzeugung von äquidistanten Feldern atmosphärischer Kenngrößen aus ERA40 Reanalysen.
- Bildung von Composites der Felder für jede der Temperatur- bzw. Feuchteklassen. Diese Verteilungen werden mittlere Zirkulationsmuster für die jeweilige Klasse genannt.

Klassifizierung bei WETTREG

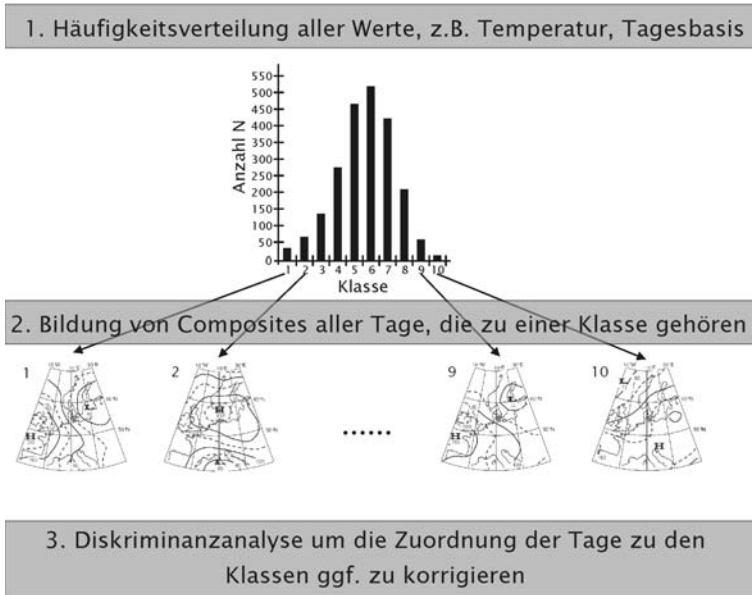


Abb. 2: Prinzip der Erzeugung der Zirkulationsmuster

3.2 Von der globalen zur regionalen Klimaänderung

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie die benötigten lokalen Zeitreihen eines Szenarios entstehen. Dabei sind folgende Anforderungen an die simulierten lokalen Zeitreihen eines Szenarios zu stellen:

- Die statistischen Eigenschaften der Reihen (z.B. Mittelwert, Spannweite, Variabilität) müssen realistisch sein;
- der zeitliche Verlauf der Reihen muss möglichst realitätsnah sein;
- die Wiedergabe von Extremen sollte realistisch sein: In der Jetztzeitsimulation müssen die synthetischen Reihen die derzeitigen Extreme reproduzieren. In einem Zukunftsszenario muss es möglich sein, dass neue Extreme auftreten.

Annahmen für die Synthetisierung der Zeitreihen:

- In jeder Box werden Witterungsabschnitte/Episoden definiert, die durch positive bzw. negative Anomalien einer so genannten Leitgröße (z.B.

Temperatur oder Niederschlag) gekennzeichnet sind. Dazu wird an jeder Station der Jahresgang dieser Leitgröße eliminiert.

- Durch zufällige Rekombination von positiven und negativen Anomalienepisoden aus einem Referenzzeitraum lässt sich eine neue Reihe in ihren statistischen Eigenschaften reproduzieren. Dies gilt sowohl in der Jetztzeit, als auch unter den Bedingungen eines geänderten Klimas, wenn man nachfolgende Bedingungen einführt.
- Die Häufigkeiten der Zirkulationsmuster, die durch die Reanalysen/Control Runs bzw. durch die globalen Klimamodellszenarien vorgegeben werden, müssen durch die synthetisierten Reihen reproduziert werden. Da die Wetterlagen im Entwicklungskollektiv 1971/2000 für jeden Tag bekannt sind, erfolgt die Selektion der Witterungsabschnitte so, dass eine vorgegebene Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen (Kontrolllauf oder ein beliebiges Szenario) mit jedem Schritt besser angenähert wird.
- Wegen der Kontinuität an den Schnittstellen der Witterungsabschnitte wird zusätzlich gefordert, dass die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen aufeinander folgenden Tagen 10 % nicht überschreitet.

Durch diese Vorgehensweise ist die Simulation beliebiger Klimaszenarien möglich. Es ist lediglich die Rekombination der Anomalie-Segmente mit den geänderten Randbedingungen (aus globalen Klimamodellen abgeleitete Häufigkeitsverteilungen der Wetterlagen) erneut durchzuführen.

3.3 Extreme in den Szenarien

Allen bisher gewonnenen Ergebnissen ist gemeinsam, dass der Wertebereich, aus dem die Anomalie-Abschnitte stammen nicht nach oben oder unten überschritten werden kann, und somit neue Wetterextreme systemimmanent nicht auftreten können. Um nun aber Aussagen über Veränderungen bei den Extremen machen zu können, wird die wetterlagenspezifische Änderung der Beträge der Wetterelemente mit Hilfe einer multiplen Regression bestimmt.

Die Ableitung der Regressionsgleichungen erfolgt an ausgewählten Punkten der schon zur Herleitung der Wetterlagen verwendeten 43 Prediktorenfelder. Bei der Anwendung der multiplen Regressionsgleichung auf ein Szenario wird die aus der Änderung des selektierten Prediktorenfeldes (z.B. Schichtdicke 1000/850 hPa) zwischen Controlrun und Szenario berechneten Änderung des Prediktanden (z.B. Temperatur) täglich auf das simulierte Wetterelement (z.B. Temperatur) aufgeprägt.

Beim Niederschlag ist das großräumige Zirkulationsmuster von deutlich geringerer Relevanz für die Erklärung der Varianz auf der regionalen Skala.

Daher ist, insbesondere bei diesem Wetterelement sowie für die Bestimmung der Änderung im Bereich der Extreme, die Zirkulationsmuster-abhängige Regression nicht zielführend. Ein Ausweg besteht darin, die Verteilung des Niederschlags an eine theoretische Verteilung anzupassen – die Extremwerttheorie zeigt, dass die Gumbel-Verteilung dafür gut geeignet ist. Dazu werden Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Schwellwerten berechnet – die Niederschlagsreihen werden dazu je nach Schwelle binarisiert – und für jede Schwellwertklasse werden die real existierenden Verteilungen an die theoretische Verteilung angepasst. Dieses Verfahren wurde im Rahmen eines Projektes des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie entwickelt und ist im Bericht [Enke u. a. 2006b] beschrieben.

3.4 Synthese: Von der Box zur Gesamtfläche.

Nach den bisherigen Bearbeitungsschritten liegt nun eine Kollektion von 14 „Regionalstudien“ vor, wobei jede „Region“ einer der 14 Boxen entspricht. Dabei ist auf der Basis jeder „Regionalstudie“ der vollständige Satz an lokalen, synthetischen Zeitreihen der Wetterelemente für *ganz Deutschland* vorhanden – ganz gleich wie weit der Stationsort vom Mittelpunkt der Box entfernt ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass die regionalisierten Szenarien für die jeweils in der Box liegenden Stationen präziser sind, als für weiter entfernt liegende Stationen. Dies ist in geringerem Maße z.B. bei der Temperatur und in höherem Maße z.B. beim Niederschlag der Fall.

Der Weg zur Aufbereitung der Daten für ein Deutschland-einheitliches hochaufgelöstes Szenario ist in der Prinzipskizze Abb. 3 dargestellt.

Zunächst werden Boxen zu einem Gesamtwert aggregiert. Dazu wird an jeder Station über alle 14 „Regionalstudien“, die ja über sie Aussagen machen, gemittelt. Dies geschieht abstandsgewichtet mit relativ starker Mittenbetonung.

Es zeigt sich, dass die Mittenbetonung die lokale und die großräumige Information am besten ausnützt. In einem weiteren Schritt wird berechnet, wie die Zentralbox (Box Nr. 5 Abb. 1) allein die Gesamtfläche beschreibt. Aus diesem Muster werden ebenfalls Saison- oder Monatsmittel gebildet. Daraus werden Differenzkarten zur oben beschriebenen Aggregation über die Gesamtfläche berechnet. Mit diesen Differenzkarten werden schließlich die täglichen Werte korrigiert. Bei der Temperatur ist die Anpassung damit abgeschlossen.

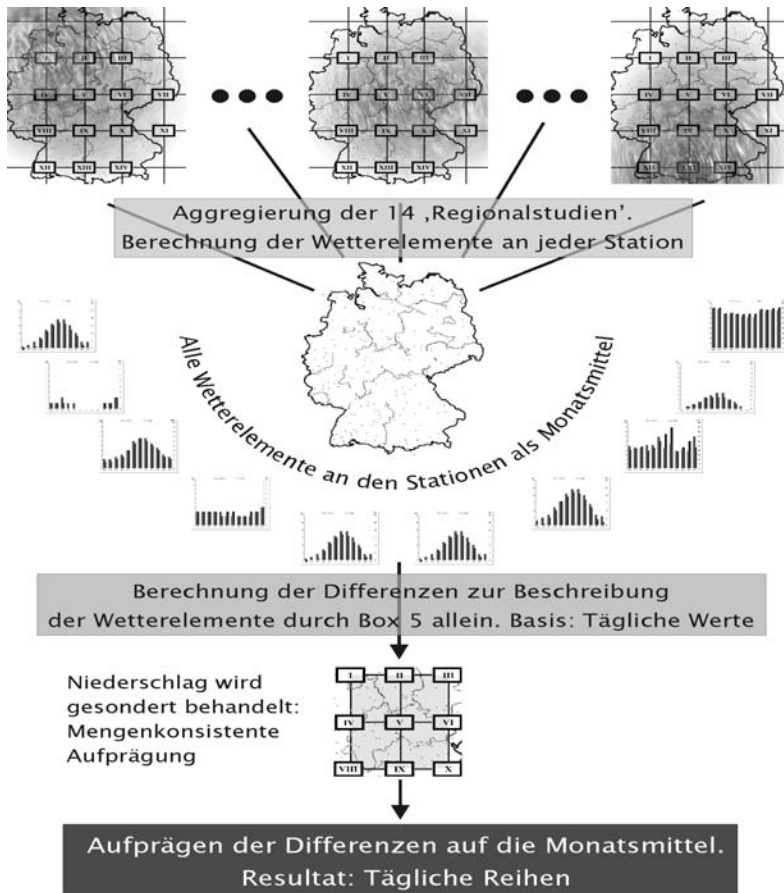


Abb. 3: Veranschaulichung des Bearbeitungsschrittes, in denen die Ergebnisse aus den 14 Boxen zu einem einheitlichen, hochaufgelösten Szenario für ganz Deutschland werden.

Der Niederschlag benötigt eine gesonderte Behandlung: Die Korrektur mit Hilfe der Mittelkarten erfolgt nur an Stationen, an denen auch Niederschlag vorhanden ist; das hat zur Folge, dass die zu korrigierende Niederschlagsmenge ggfs. erhöht werden wenn nur an einigen Stationen Niederschläge simuliert wurden um die zu korrigierende Gebietsmenge zu erreichen.

4. Ergebnisse

Aus der Vielzahl der Ergebnisse sollen nur einige wenige ausgewählt werden:

Zur Verdeutlichung der Modellgüte dient die Simulation des Jetztklimas (1971/2000) auf der Basis des Control-Run von ECHAM5. Wird das derzeitige Klima gut simuliert, so kann man davon ausgehen, dass die statistische Regionalisierungsmethode auch das zukünftige Klima zuverlässig simulieren kann. Wie aus Abb. 4 (links) ersichtlich, liegt die dargestellte Grauskala für den Niederschlag zwischen -5% und 15% und für die Tagesmitteltemperatur Abb. 4 (rechts) zwischen -0.5K und +1K. Die überwiegend vorhandene Graustufe zeigt Differenzen nahe Null Kelvin, d.h. die Differenzen zwischen simuliertem und beobachtetem Klima sind gering. Auch die regionalen Unterschiede für den Niederschlag sind gering, so dass entsprechend die verschiedenen Klimaregionen mit vergleichbarer Güte simuliert werden.

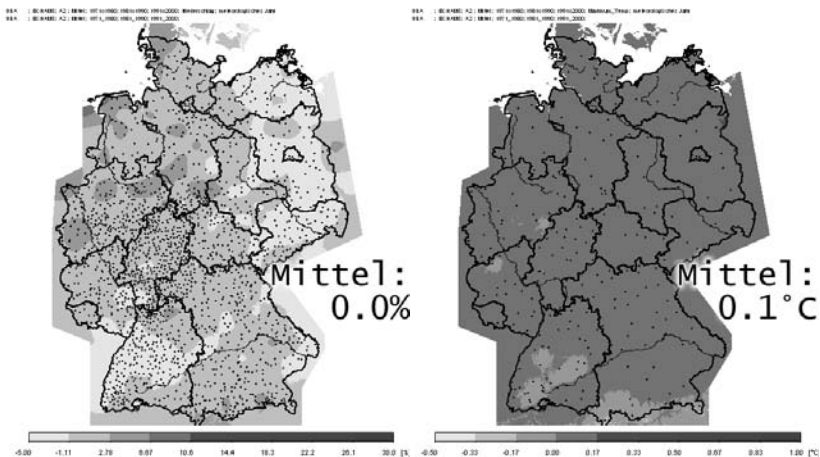


Abb. 4: Vergleich des Niederschlages (links) und der Tagesmaximumtemperatur (rechts) auf der Basis von Messreihen mit dem Control Run von ECHAM5. Periode 1971–2000.

Hellgraue Färbung: Control Run ist trockner als das Klima; dunkelgraue Färbung: Control Run ist feuchter als das Klima. Bei der Tagesmaximumtemperatur sind die Abweichungen zu vernachlässigen.

Abbildung 5 zeigt die Differenz zwischen dem Klima der Jetztzeit (verwendet wurde der gemittelte Control Run im Zeitraum 1971–2000) und dem Mittel der Klimasimulation (Szenario A2) für die letzte Dekade dieses Jahrhunderts für die Tagesmaximumtemperatur, unterteilt nach den meteorologischen Jahreszeiten.

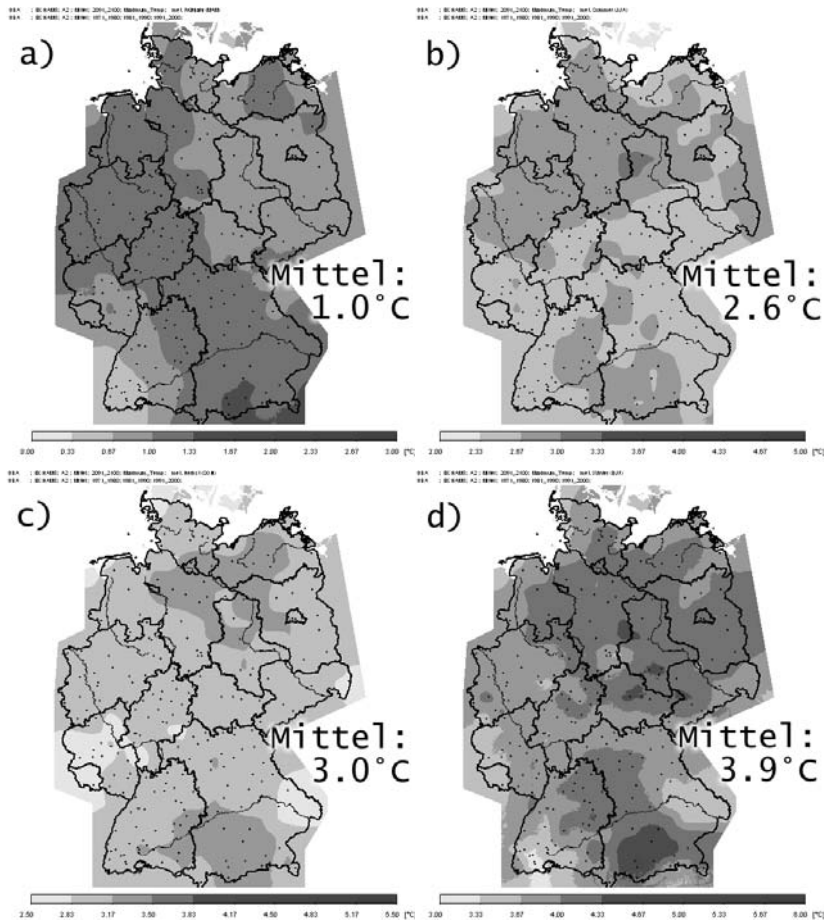


Abb. 5: Differenz zwischen dem Klima der Jetztzeit (verwendet wurde der gemittelte Control Run im Zeitraum 1971–2000) und der letzten Szenario-A2-Periode 2091–2100. Wetterelement: Maximumtemperatur. Dargestellt ist, bei einheitlicher Spannweite der Grauskala (3K), die nach Jahreszeiten differenzierte Entwicklung a) im Frühjahr, b) im Sommer, c) im Herbst und d) im Winter. Zur Darstellung regionaler Unterschiede ist das Niveau der Grauskala je Jahreszeit unterschiedlich, der Wertebereich ist in jeder Abbildung mit 3°C gleich.

Es fällt auf, dass die einzelnen Jahreszeiten von der Klimaerwärmung recht unterschiedlich betroffen sind. Am stärksten fällt der Temperaturanstieg mit ca. 3.9 K im Winter und mit 3.0 K im Herbst bzw. 2.6 K im Sommer aus. Der Frühling ist mit ca. 1.0 K moderat. Die regionalen Unterschiede sind relativ

gering. Etwas niedriger fällt der Temperaturanstieg in den Mittelgebirgsregionen aus.

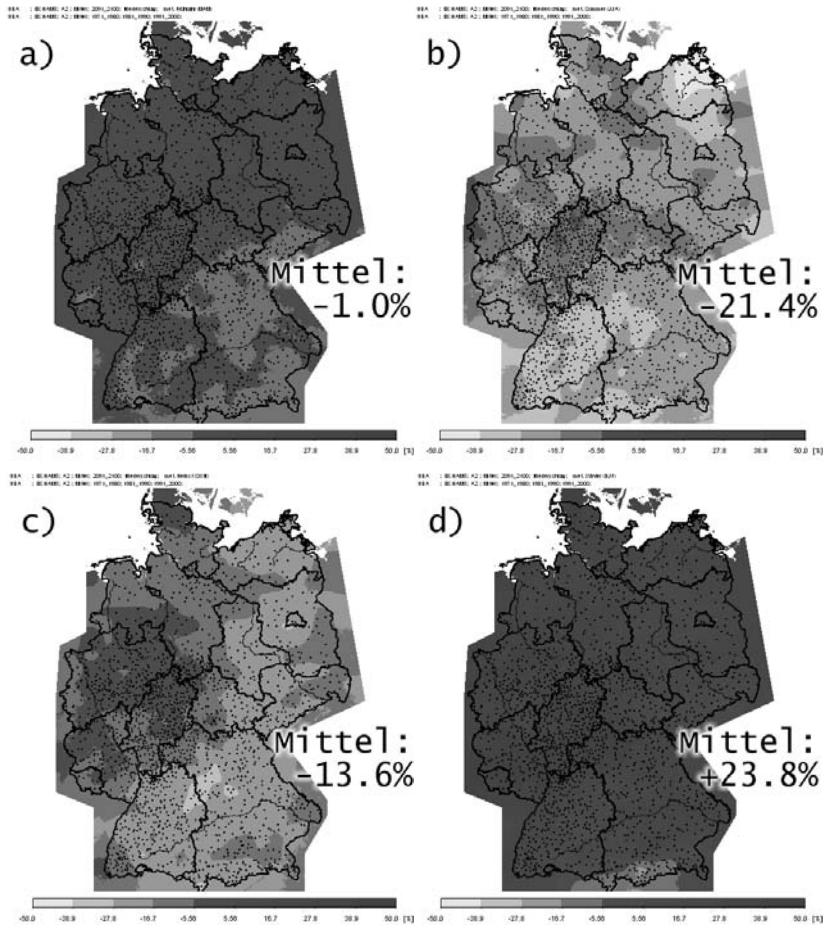


Abb. 6: Wie in Abb. 5, aber für die prozentuale Änderung beim Wetterelement Niederschlag.

Abbildung 6 zeigt die prozentuale Änderung der Niederschlagssumme zwischen dem Klima der Jetztzeit (verwendet wurde der gemittelte Control Run im Zeitraum 1971–2000) das Mittel der Klimasimulation (Szenario A2) für die letzte Dekade dieses Jahrhunderts, unterteilt nach den meteorologischen Jahreszeiten. Die Grauskala der Abbildungen liegt zwischen -50% (hellgrau) und +50% (sehr dunkles Grau)

Es fällt auf, dass die einzelnen Jahreszeiten eine recht unterschiedliche Entwicklung der Niederschläge zeigen. Während die Übergangsjahreszeiten eher geringe prozentuale Änderungen zeigen, wird der Winter (+23.8%) deutlich feuchter und der Sommer (-21.4%) deutlich trockener. Regional und über das Jahr betrachtet wird es im Nordosten Deutschlands und im Voralpenland insgesamt trockener. In Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Nordrhein-Westfalen eher feuchter.

Betrachtet man unterschiedliche Szenarien (A2 als ein extremes Szenario und B1 als ein moderates Szenario), so fällt in Abb. 7 auf, dass bis Mitte dieses Jahrhunderts beide eine nahezu gleichförmige Temperaturentwicklung zeigen. Dies demonstriert die Trägheit des Klimasystems und bedeutet, dass der Temperaturanstieg bis zur Mitte dieses Jahrhunderts durch emissionsmindernde Maßnahmen (Szenario B1) nicht mehr beeinflusst werden kann. Heutige Treibhausgaseinsparungen kämen wohl aber unseren Kindern und Enkeln zu Gute. Die Abbildung verdeutlicht auch, dass der Klimatrend kein gleichförmiger Temperaturanstieg ist, sondern von Dekade zu Dekade größeren Schwankungen unterworfen ist.

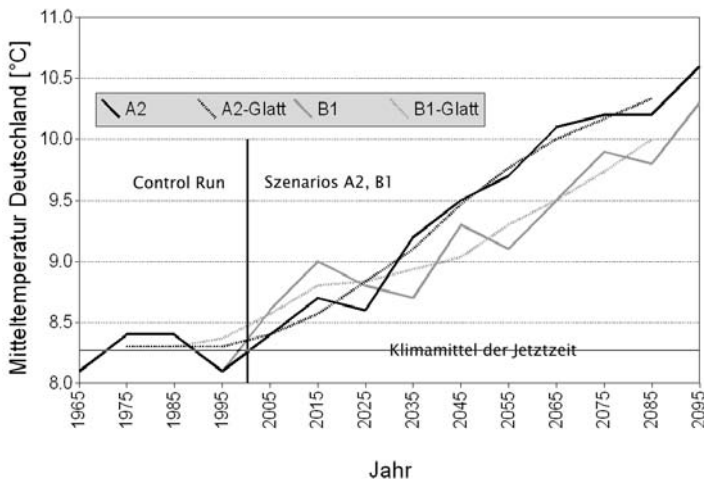
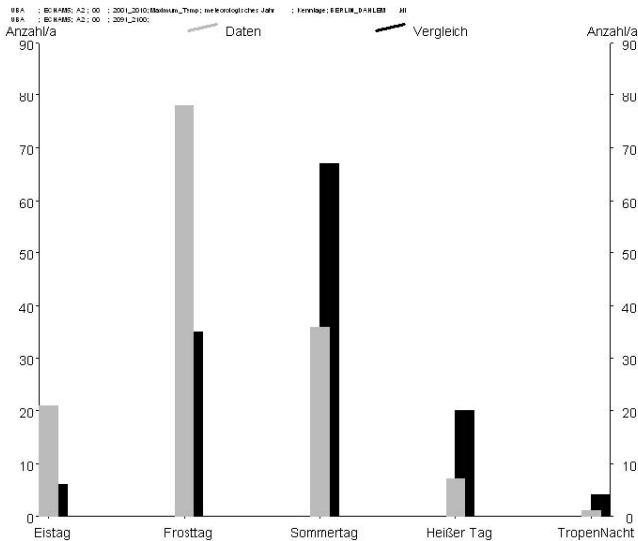


Abb. 7: Entwicklung des Deutschland-Flächenmittels der Tagesmitteltemperatur von 1961–2100. Die Datenpunkte aus dem Zeitraum 1961–2000 stammen aus dem Control Run des ECHAM5-Modells; für den Zeitraum 2001–2100 sind die ECHAM5-Rechnung der SRES-Szenario A2 und B1 dargestellt. Die Datenpunkte befinden sich jeweils in der Mitte der Dekade. Eingezeichnet ist die Entwicklung von Dekade zu Dekade, ein dreifach übergreifendes Mittel (gestrichelt) sowie das Klimamittel der Jetztzeit.

Zur Beschreibung der Änderung der Extremwerte ist in Abb. 8 die Veränderung der Kenntage unter Szenariobedingungen für Berlin-Dahlem dargestellt. Deutlich ist die Abnahme der Zahl der Frosttage und die Zunahme der Sommer- bzw. heißen Tage zu erkennen. Auch die Zahl der Tropennächte, bisher eher eine Ausnahme, steigt auf eine nicht mehr zu vernachlässigende Zahl.



Eistag: Maximumtemperatur < 0°C
 Frosttag: Minimumtemperatur < 0°C
 Sommertag: Maximumtemperatur > 25°C
 Heißer Tag: Maximumtemperatur > 30°C
 Tropennacht: Minimumtemperatur > 20°C

Abb. 8: Veränderung der Kenntage unter Szenariobedingungen im Vergleich der Periode 2001–2010 (hellgrau) mit 2091–2100 (dunkelgrau), Berlin-Dahlem

5. Zusammenfassung

Mit dem WETTREG-Verfahren wurde eine statistische Methode entwickelt, die, basierend auf IPCC-Szenarienrechnungen des ECHAM5-Modells bis zum Jahr 2100 Einblicke in die regionalen Wirkungen der Klimaänderungen ermöglicht. Zudem ermöglicht diese Methode auf einheitliche Weise, WETTREG-Resultate für ganz Deutschland zu erstellen.

Der Artikel stellt die Phasen auf dem Weg zu den regionalisierten Szenarien für Deutschland vor. Die Anwendung von WETTREG erfolgt zunächst auf den Control Run nachfolgend auf das IPCC-Szenario A2, und B1. Die IPCC-Szenarien werden kurz umrissen und die Besonderheiten von A2 beschrieben. In der Diskussion der vorliegenden Ergebnisse wird kurz auf regionale Klimaänderung eingegangen. Diese haben jahreszeitliche und räumliche Spezifika. Bei der Temperatur werden „Hot Spots“ der Änderung im Oberrheingraben, am Niederrhein und im Osten Deutschlands identifiziert. Beim Niederschlag ist eine Neigung zu erhöhtem Winterniederschlag und zunehmender Sommertrockenheit zu verzeichnen. Mit Bezug auf die Entwicklung der Extreme wird anhand der Untersuchung der Klimastation Berlin-Dahlem gezeigt, wie sich Zahl von Kenntagen (Eistage, Frosttage, Sommertage, heiße Tage und Tropennächte), die mit Schwellwerten in Verbindung stehen, unter A2-Szenariobedingungen verändert.

Literaturverzeichnis

- [Enke 2001] Enke, W.: Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen. Abschlussbericht / Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Dresden, 2001. – Forschungsbericht
- [Enke 2002] Enke, W.: Abschätzung der zukünftigen Klimatischen Entwicklung in Süddeutschland. 2002 (Werkvertrag B. - Nr. 10029524/43 KLIWA). –Forschungsbericht
- [Enke 2003d] Enke, W.: Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM OPYC3 Klima-Simulationslaufes, bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen/ Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen, Wiesbaden. 2003 (Werkvertrag 2003/00082). – Forschungsbericht
- [Enke 2004] Enke, W.: Abschlussbericht: Erweiterung der Sächsischen Klimaprognose WEREX II für das Zeitfenster 2050 bis 2100 für die Emissionsszenarien B2 und A2 (WEREX 2100) / Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2004. – Forschungsbericht
- [Enke 2005] Enke, W.: Zusammenfassende Bearbeitung und Bewertung der für einzelne Bundesländer vorhandenen Klimaszenarien; im Unterauftrag des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg. UBA-Projekt: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland / Umweltbundesamt. 2005 (204 41 138).– Forschungsbericht
- [Enke u. a. 2005a] Enke, W.; Deuschländer, Th.; Schneider, F. ;Küchler, W.: Results of five regional climate studies applying a weather patter based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. In: Meteorol. Z. 14 (2005), S. 247–257

- [Enke u. a. 2005b] Enke, W.; Schneider, F.; Deutschländer, Th.: A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. In: *Theor. Appl. Climatol.* 82 (2005), S. 51–63
- [Enke und Spekat 1997] Enke, W.; Spekat, A.: Downscaling Climate Model Outputs Into Local and Regional Weather Elements by Classification and Regression. In: *Climate Research* 8 (1997), S. 195–207
- [Enke u. a. 2006a] (Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: „Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“ des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen 204 41 138)
- [Enke u. a. 2006b] Enke, W.; Spekat, A.; Kreienkamp, F.: Analyse und Projektion extremer Wettererscheinungen mit physikalisch-statistischen Methoden/ Abschlussbericht für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie. 2006 (Werkvertrag Nr. 4500165655). – Forschungsbericht
- [Enke u. a. 1999] Enke, W.; Spekat, A.; Wehry, W.: Signalanalyse zur Regionalisierung von Klimamodell-Outputs mit Hilfe der Erkennung Synoptischer Muster und Statistischer Analysemethoden / Abschlussbericht des BMBF-Forschungsschwerpunktes Klimavariabilität und Signalanalyse. 1999 (Teilprojekt 07VKV01/30). – Forschungsbericht
- [IPCC 2001] IPCC; Houghton, J.T. (Hrsg.); Ding, Y. (Hrsg.); Griggs, D.J. (Hrsg.); Noguer, M. (Hrsg.); Linden, P.J. van d. (Hrsg.); Dai, X. (Hrsg.); Maskell, K. (Hrsg.); Johnson, C.A. (Hrsg.): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, U.K. und New York, USA: Cambridge University Press, 2001a
- [Roeckner u. a. 2003] Roeckner, E.; Bauml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kirchner, I.; Kornblueh, L.; Manzini, E.; Rhodin, A.; Schlese, U.; Schulzweida, U.; Tompkins, A.: *MPI-Berichte. Bd. 349: The atmospheric general circulation model ECHAM5 – Part 1: Model Description.* Hamburg : Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2003
- [Roeckner u. a. 2004] Roeckner, E.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Hagemann, S.; Kornblueh, L.; Manzini, E.; Schlese, U.; Schulzweida, U.: *MPI-Berichte. Bd. 354: The atmosphere general circulation model ECHAM5. Part 2: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution.* Hamburg : Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2004
- [Uppala u. a. 2005] Uppala, S.M.; Kállberg, P.W.; Simmons, A.J.; Andrae, U.; Costa Bechtold, V. da; Fiorino, M.; J., J.K. G.; Haseler, Hernandez, A.; Kelly, G.A.; Li, X.; Onogi, K.; Saarinen, S.; Sokka, N.; Allan, R.P.; Andersson, E.; Arpe, K.; Balmaseda, M.A.; Beljaars, A.C.M.; Berg, L. van d.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Caires, S.; Chevallier, F.; Dethof, A.; Dragosavac, M.; Fisher, M.; Fuentes, M.; Hagemann, S.; Hlm, E.; Isaksen, B.J. Hoskins L.; Janssen, P.A.E.M.; Jenne, R.; McNally, A.P.; Mahfouf, J.-F.; Morcrette, J.-J.; Rayner, N.A.; Saunders, R.W.; Simon, P.; Sterl, A.; Trenberth, K.E.; Untch, A.; Vasiljevic, D.; Viterbo, P.; Woollen, J.: The ERA-40 re-analysis. In: *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 131 (2005), S. 2961–3012