



Publikationen des Umweltbundesamtes

**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**

Forschungsprojekt im Auftrag des
Umweltbundesamtes
FuE-Vorhaben
Förderkennzeichen 204 41 138

Januar 2007

**Arne Spekat
Wolfgang Enke
Frank Kreienkamp**

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt



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

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: "Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland - Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland" des Umweltbundesamtes.

Förderkennzeichen 204 41 138

Arne Spekat, Wolfgang Enke und Frank Kreienkamp

Januar 2007

Ausführende

Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
Telegrafenberg A31
14473 Potsdam

Disclaimer

Die in diesem Bericht gezeigten Darstellungen beruhen auf Basisdaten, die von Dritten erzeugt wurden (Reanalysen, globale Klimamodell-Szenarienrechnungen und Beobachtungsdaten). Die Firma Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH übernimmt keine Verantwortung oder Haftung für deren Qualitätskontrolle und geht bei der Anwendung der Regionalisierungsmethode und der Interpretation der Resultate von einer höchstmöglichen Qualität der Basisdaten aus.

Die mit den globalen Klimamodellen errechneten Szenarien basieren ihrerseits auf Szenarien der Entwicklung der Weltbevölkerung, der Wirtschaft und anderer Globalisierungsfaktoren, für deren Richtigkeit oder Eintreffen keine Garantie übernommen werden kann. Diese Annahmen entsprechen aber dem aktuellen Stand der Wissenschaft, so dass eine bestmögliche Eintreffens-Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann.

Somit gilt auch für die ausgelieferten Daten, dass deren Aussagekraft in Relation mit der Qualität der Basisdaten zu sehen ist. Die Resultate der statistischen Regionalisierung sind nach bestem Wissen und Gewissen entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft gewonnen worden.

Kurzfassung

Mit dem WETTREG-Verfahren wurde im Rahmen des Vorhabens eine statistische Methode entwickelt, die, basierend auf den IPCC-Szenariorechnungen des ECHAM5-Modells bis zum Jahr 2100, Einblicke in regionale Klimaänderungen ermöglicht. Zudem wurde eine Methode entwickelt, mit der auf einheitliche Weise WETTREG-Resultate für ganz Deutschland erstellt werden können. Dieser Endbericht stellt vielfach die Resultate in der *Bandbreite* der Szenarios dar.

In der ersten Projektphase (Zwischenbericht aus dem April 2006) erfolgte die Anwendung von WETTREG zunächst auf das IPCC-Szenario **A2**; in der zweiten Projektphase, zu der dieser Bericht vorgelegt wird, auch auf **A1B** und **B1**. Die WETTREG-Methode wird kurz umrissen. In der Diskussion der vorliegenden Ergebnisse wird ausführlich auf die Feinstruktur und die Bandbreite der regionalen Klimaänderung eingegangen. Diese hat jahreszeitliche und räumliche Spezifika. Die Entwicklung von Temperatur und Niederschlag wird für die Naturräume/Hauptklimaregionen Deutschlands interpretiert. Die Temperatur zeigt dabei einen Anstiegstrend, der eine Erwärmung um bis zu 3 Grad zum Ende des 21. Jahrhunderts nahe legt. Beim Niederschlag ist eine Neigung zu gegenläufigen Trends in den Jahreszeiten zu verzeichnen: Der Winterniederschlag nimmt zu – mit regionalen Unterschieden in der Ausprägung – und im Sommer stellt sich, den Szenarios zufolge, verbreitet eine Neigung zu steigender Trockenheit ein. Mit Bezug auf die Entwicklung der Extreme wird anhand der Untersuchung ausgewählter, für die Hauptklimaregionen Deutschlands charakteristischer Stationen, gezeigt, wie sich Zahl von Kenntagen (Eistage, Frosttage, Sommertage, heiße Tage und Tropennächte), die mit Schwellwerten in Verbindung stehen, unter den SRES Szenariobedingungen von **A1B**, **A2** und **B1** verändert.

Inhaltsverzeichnis

I	Hauptteil	1
1	Einleitung	3
1.1	Grundlagen	3
1.2	Modellierung des Klimawandels mit hoher Auflösung	4
1.3	Problemstellung	5
1.4	Ziel des Vorhabens	5
1.5	Über das Vorhaben	6
1.5.1	Im ersten Projektteil erzielte Ergebnisse	6
1.5.2	Im zweiten Projektteil erzielte Ergebnisse	6
1.5.3	Der abschließende Projektteil	7
1.6	Aufbau dieses Berichts	7
2	Datenmaterial	9
2.1	Reanalysen	9
2.2	Globales Klimamodell	10
2.3	Messdaten	10
3	Modell/Verfahrensbeschreibung	11
3.1	Grundlagen	11
3.2	Klassifikationsschritt	13
3.3	Herstellung der lokalen Zeitreihen	13
3.4	Extreme	14
3.5	Ausgewählte Bereiche aus den Simulationen	14
4	Validierung	17
4.1	Temperatur	18
4.2	Niederschlag	23
4.2.1	Saisonale Validierung	23
4.2.2	Validierung von Schwellwertüberschreitungen	25
4.2.3	Anmerkungen zur Teststatistik V	28

5	Szenariovergleich	29
5.1	Jahresgang	29
5.1.1	Temperatur	29
5.1.2	Niederschlag	31
5.2	Vergleich der räumlichen Muster	32
5.2.1	Temperatur	32
5.2.2	Niederschlag	35
5.3	Zeitlicher Vergleich	38
5.3.1	Temperatur	40
5.3.2	Niederschlag	44
5.4	Zeitliche Entwicklung abgeleiteter Größen	51
5.4.1	Tageshöchsttemperatur	51
5.4.2	Kenntage	53
5.4.3	Hitzewellen	56
5.4.4	Jahresgang des Niederschlags	57
5.4.5	Extremniederschlag	57
6	Zusammenfassung und Bewertung	63
6.1	Übersicht	63
6.2	Validierung	63
6.3	Stärke des Klimasignals	65
6.4	Zeitlicher Verlauf des Klimasignals	66
6.5	Unterschiede zwischen den Szenarios	67
6.6	Extremgrößen	67
6.7	Bewertung der Resultate in Naturräumen	67
6.7.1	Küste	69
6.7.2	Nordwestdeutsches Tiefland	72
6.7.3	Nordostdeutsches Tiefland	74
6.7.4	Westdeutsche Tieflandsbucht	76
6.7.5	Zentrale Mittelgebirge und Harz	77
6.7.6	Südostdeutsche Becken und Hügel	80
6.7.7	Links- und Rechtsrheinische Mittelgebirge	83
6.7.8	Ober rheingraben	86
6.7.9	Alp und Nordbayerisches Hügelland	88
6.7.10	Erzgebirge, Thüringer und Bayerischer Wald	92
6.7.11	Alpenvorland	93
6.7.12	Alpen	95
6.8	Beurteilung weiterer Klimaparameter	96
6.8.1	Bedeckungsgrad	96
6.8.2	Tagesmittel der Windgeschwindigkeit	100
7	Ausblick	103
	Literaturverzeichnis	106

II	Anhänge	I
A	Erläuterung der SRES-Szenarios	III
B	Äquidistante Gitterpunkte	VII
C	Interpolationsverfahren	IX
C.1	Höheninterpolation	IX
C.2	Horizontale Interpolation	IX
D	Erläuterung der potenziellen Prediktoren	XI
D.1	Aus einer Fläche extrahierte Größen: Geopotenzial und Tempera- tur – Nr. 1–8	XII
D.2	Horizontale Differenzen – Nr. 9–12	XII
D.3	Vorticity – Nr. 13–16	XII
D.4	Schichtdicke und vertikale Temperaturdifferenz	XIII
D.5	Stabilitätsindex nach Enke – Nr. 21	XIII
D.6	Stabilitätsindex nach Showalter – Nr. 22	XIII
D.7	Thermischer Wind – Nr. 23–31	XIV
D.8	Frontenneigungswinkel nach Margules – Nr. 32	XIV
D.9	Advektion von Temperatur und relativer Feuchte – Nr. 33 und 34	XV
D.10	Gradienten – Nr. 35–42	XV
D.11	Pseudopotentielle Temperatur – Nr. 43	XV
E	Darstellung der Wetterlagen	XVII
F	Beispiele für die Bandbreite der WETTREG-Simulationen	XIX
G	Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten	XXV
H	Kartendarstellung der Klimasignalstärke	XXVII

Teil I

Hauptteil

Abschnitt 1

Einleitung

1.1 Grundlagen

Der Klimawandel, Teil des Globalen Wandels, stellt jeden von uns vor große Herausforderungen. Seine Analyse benötigte und benötigt auch weiterhin umfangreiche Forschungsaktivität, sowohl zum besseren Verständnis der Prozesse, als auch zu den Impakten des Wandels und möglichen Adaptationsmaßnahmen. Parallel zum Fortschritt des IPCC-Prozesses im vergangenen Jahrzehnt [IPCC 1996], [IPCC 1998], [IPCC 2001a] – der jüngste Stand wird im 2007 erscheinenden vierten IPCC-Sachstandsbericht dokumentiert – erfolgte auch eine Weiterentwicklung der globalen Klimamodelle. Diese sind unverzichtbare Basis aller Regionalisierungsstudien, seien es dynamische oder statistische Ansätze (s.u.). Eine Übersicht des Kenntnisstands findet sich in [Salinger 2005], eine Übersicht zur Vorhersagbarkeit von Klimaänderungen findet sich in [Giorgi 2005] und ein Vergleich von Klimamodellen, die im IPCC-Bericht 2007 verwendet werden, ist in [Lucarini u. a. 2006] publiziert. Dynamische Regionalisierungsmodelle wurden im EU-Projekt PRUDENCE einander gegenübergestellt [PRUDENCE 2005].

Auch die statistischen Regionalisierungsverfahren wurden weiterentwickelt. So ist mit der Fertigstellung der neuesten Fassung der statistischen Methode WETTREG zur Erzeugung regionalisierter Klimaszenarios auch auf diesem Gebiet ein hoher Standard erreicht worden. Die Entwicklung wurzelt in Studien und Projekten, die seit dem Jahr 1994 im Rahmen des BMBF-Schwerpunkts Klimavariabilität und Signalanalyse durchgeführt und vorgestellt wurden [Enke und Spekat 1994], [Enke und Spekat 1996], [Enke und Spekat 1997], [Enke u. a. 1999]. Zu dieser Zeit entstand eine statistische Regionalisierungsmethode, deren Aussagen allerdings auf Monatswerte eingegrenzt war. Es folgten Studien, die auf regionale Besonderheiten einzelner Bundesländer eingingen, Statistiken auf Tageswertbasis erzeugten und mit denen auch zunehmend komplexere Aussagen, wie beispielsweise zu Extremen sowie mit längeren Zeithorizonten möglich wurden [Enke 2001], [Enke 2002], [Enke 2003d], [Enke 2003c], [Enke 2003b], [Enke 2003a] und [Enke 2004]. Parallel zur Weiterentwicklung der Methodik und der Erstellung immer detaillierterer Szenarios erfolgten zahlreiche Präsentationen der Vorhaben auf nationalen und internationalen Tagungen (Deutsche Kli-

matagung, DACH-Meteorologentagung, Jahrestreffen und Fachkonferenzen der American Meteorological Society, Jahrestagungen der European Meteorological Society). Außerdem erfolgte 2005 eine Dokumentation des Entwicklungsstands in begutachteten Zeitschriftenartikeln [Enke u. a. 2005b], [Enke u. a. 2005a].

Dieser Bericht präsentiert Ergebnisse des Vorhabens *Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland*, das zur Phase I des Programms *Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland* des Umweltbundesamts gehört. In dessen Rahmen wurde sowohl eine statistische Regionalisierung für die Gesamtfläche Deutschlands als auch ein Vergleich dieser Regionalisierung mit dem dynamischen Ansatz REMO erreicht. Die Ergebnisse bilden wichtige Bausteine zu einem Kompetenzzentrum, das in Phase II des Programms aufgebaut wird.

1.2 Modellierung des Klimawandels mit hoher Auflösung

Bei allem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt sind auch die am weitesten entwickelten globalen Klimamodelle derzeit nicht in der Lage, Daten hinreichender Qualität in einer horizontale Auflösung von mehr als rund 200×200 km zur Verfügung zu stellen. Da dies zum Beispiel für hydrologische oder Klima-Impaktmodelle bei weitem nicht genügt, ist eine Vielzahl von Regionalisierungsverfahren entwickelt worden, mit deren Hilfe angestrebt wird, in Regionen von Interesse entsprechende Studien vorzunehmen. Es gibt zwei Grundtypen bei den Herangehensweisen:

- Dynamische Verfahren fokussieren auf Teilgebiete des globalen Modells (so genannte Nesting-Strategie) und rechnen in diesen Gebieten mit deutlich höherer räumlicher Auflösung, wobei an der Berandung des jeweiligen Teilgebiets die Antriebsdaten aus einem globalen Klimamodell zum Einsatz kommen. Dabei ist es beispielsweise notwendig, die Behandlung der physikalischen Vorgänge an das feinere Gitter anzupassen. Wünschenswert, aber derzeit noch nicht realisiert, ist es, dass eine echte Zwei-Wege-Kopplung vor sich geht, bei der nicht nur die Berechnungen des globalen Modells in das genestete Regionalmodell einfließen, sondern das Regionalmodell auch seine Ergebnisse in das Globalmodell überträgt. Hochentwickelte dynamische Regionalisierungen sind sehr aufwändig und haben einen hohen Bedarf an Computer-Ressourcen.
- Statistische Verfahren gehen vom Postulat aus, dass die globalen Modelle im großräumigen Scale sehr wohl in der Lage sind, die Strukturen der atmosphärischen Zirkulation treffend zu beschreiben. Bei den meisten dieser Verfahren werden statistische Beziehungen zwischen den großräumigen Mustern/Wetterlagen und den lokalen Auswirkungen identifiziert, wobei die aus der Vergangenheit oder der Jetztzeit gewonnenen Beziehungen auf die Vorausrechnungen der globalen Modelle (angetrieben von den Treibhausgas-Emissionsszenarios), in denen sich auch Änderungen der atmosphärischen

Zirkulationsgrößen manifestieren, angewandt werden. Statistische Verfahren benötigen deutlich weniger Rechnerkapazität. Im vorliegenden Bericht wird zur Beschreibung des regionalen Klimawandels ebenfalls eine statistische Methode (WETTREG) eingesetzt.

Mit den von WETTREG erzeugten simulierten Zeitreihen für das zukünftige Klima lassen sich Studien für eine breite Palette von Bereichen durchführen, so unter anderem

- Klima
- Naturschutz
- Zivilschutz
- Versicherungswirtschaft
- Tourismus

1.3 Problemstellung

Es wurden in der Vergangenheit Klimastudien für einzelne Bundesländer oder Flusseinzugsgebiete mit den Verfahren WETTREG auf der Basis der Klimaszenarios **B2** und **A2** und Verwendung von ECHAM4-OPYC3 globalen Klimasimulationen erstellt. Die Fokussierung des Verfahrens auf unterschiedliche Regionen in Deutschland erzeugte in den Übergangszonen Brüche zwischen den Ergebnissen der Teilstudien.

1.4 Ziel des Vorhabens

Die Brüche in den Übergangsbereichen zwischen den Einzelstudien sollen beseitigt oder mindestens abgemildert werden. Zudem soll eine einheitliche regionalisierte Simulation der Szenarios für ganz Deutschland entstehen. Die mit der statistischen Regionalisierungsmethode erzeugten Szenarios sollen, auf der Basis der ECHAM5-Szenariorechnungen mit den IPCC SRES-Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**, die Änderung von Klimaparametern bis zum Ende des 21. Jahrhunderts beschreiben.

Prämissen

1. In Deutschland gibt es deutliche, regional gegliederte klimatologische Unterschiede.
2. Die verwendeten Wetterlagen beschreiben die regionalen klimatologischen Unterschiede in guter Weise.

3. Eine Fokussierung der Diagnosen auf unterschiedliche Klimaregionen verbessert den Detailliertheitsgrad der regionalen Klimastudien.
4. Eine gewichtete Mittelung der Einzelstudien, das sind regionale Studien auf einem Maßstab kleiner als die Gesamtfläche Deutschlands, erlaubt glatte Übergänge zwischen den Einzelstudien.

Dieses Vorhaben wurde begleitet von einem Projekt, in dessen Verlauf ein einheitliches, leistungsfähiges und leicht zu bedienendes Softwarewerkzeug zur explorativen Datenanalyse und zur Darstellung der Ergebnisse in Form von Karten, Diagrammen und Histogrammen, IDP2006, entstand [Kreienkamp und Spekat 2006]. Die Software wurde von der Firma CEC Potsdam GmbH im Auftrag der Bundesländer Sachsen, Thüringen, Hessen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern entwickelt.

1.5 Über das Vorhaben

Das Projekt *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* findet nunmehr seinen Abschluss. Die einzelnen Entwicklungs-Stationen sind in der Folge kurz umrissen.

1.5.1 Im ersten Projektteil erzielte Ergebnisse

In dieser im August 2005 abgeschlossenen Phase stand die Methodenentwicklung im Vordergrund. Diese ist im Bericht [Enke 2005] ausführlich dokumentiert. Dazu gehören:

- Entwicklung des Boxenkonzepts.
- Ableitung optimierter Wetterlagen für das engere Mitteleuropa.
- Bereitstellung eines Wettergenerators zur Erzeugung zukünftiger Zeitreihen aus Segmenten gegenwärtiger Zeitreihen.
- Bereitstellung von Werkzeugen zur Beschreibung zukünftiger Extreme.

1.5.2 Im zweiten Projektteil erzielte Ergebnisse

In dieser im April 2006 abgeschlossenen Phase wurden die Klimasimulationen durch ein in [Enke u. a. 2006] geschildertes Verfahren erstmals auf einheitliche Weise für ganz Deutschland regionalisiert. Das Verfahren nutzt eine aktualisierte Datenbasis, wozu bei den Reanalysen der Übergang von NCEP- zu ERA40 und bei den Szenariorechnungen von ECHAM4 zu ECHAM5 gehören. In [Enke u. a. 2006] wurden erste Resultate des Szenarios **A2** vorgestellt.

1.5.3 Der abschließende Projektteil

Diese Phase erstreckte sich über den Zeitraum April–Oktober 2006. In ihr wurden die regionalisierten Szenarios **A1B** und **B2** entwickelt und analysiert. Zudem erfolgte ein direkter Ergebnisvergleich mit der dynamischen Regionalisierungsmethode REMO, die auf einem Workshop des UBA am 17.10.2006 der Öffentlichkeit vorgestellt wurde¹.

1.6 Aufbau dieses Berichts

In Abschnitt 2 des Berichts wird kurz auf die benötigten Datenquellen sowie die verfügbaren Klimaparameter eingegangen. Die statistische Regionalisierungsmethode WETTREG wird in Abschnitt 3 beschrieben. Abschnitt 4 validiert die mit WETTREG – angetrieben vom ECHAM5-Kontrolllauf – erzeugten Resultate für die Jetztzeit mit Hilfe von Klimadaten. In Abschnitt 5 erfolgt der Übergang zu den Zukunftsprojektionen der ECHAM5-Szenarios; hier wird insbesondere auf die Bandbreite der Resultate, die durch die Auswertung der Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** entsteht eingegangen. Abschnitt 6 fasst die Erkenntnisse zusammen und gibt eine regional gegliederte Bewertung der Klimaänderungen. Im Anhang werden die SRES-Szenarios erläutert; dort sind auch Angaben zu Methodendetails von WETTREG, wie dem äquidistanten Gitter, der Höheninterpolation, den potentiellen Prediktoren, der Berechnung der Zirkulationsmuster, der Bandbreite der Resultate in den WETTREG-Einzelsimulationen, der Bestimmung von Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten, der Darstellung von Jahresgängen in Form von Ringdiagrammen und Übersichtskarten der Klimasignalstärke zu finden.

Disclaimer

Die in diesem Bericht gezeigten Darstellungen beruhen auf Basisdaten, die von Dritten erzeugt wurden (Reanalysen, globale Klimamodell-Szenarienrechnungen und Beobachtungsdaten). Die Firma Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH übernimmt keine Verantwortung oder Haftung für deren Qualitätskontrolle und geht bei der Anwendung der Regionalisierungsmethode und der Interpretation der Resultate von einer höchstmöglichen Qualität der Basisdaten aus.

Die mit den globalen Klimamodellen errechneten Szenarien basieren ihrerseits auf Szenarien der Entwicklung der Weltbevölkerung, der Wirtschaft und anderer Globalisierungsfaktoren, für deren Richtigkeit oder Eintreffen keine Garantie übernommen werden kann. Diese Annahmen entsprechen aber dem aktuellen Stand der Wissenschaft, so dass eine bestmögliche Eintreffens-Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann.

Somit gilt auch für die ausgelieferten Daten, dass deren Aussagekraft in Relation mit der Qualität der Basisdaten zu sehen ist. Die Resultate der statistischen Regionali-

¹Informationen dazu unter <http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz>

sierung sind nach bestem Wissen und Gewissen entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft gewonnen worden.

Abschnitt 2

Datenmaterial

Für die Anwendung der WETTREG-Regionalisierungsmethode sind drei Datenkomponenten notwendig: Reanalysedaten für die Beschreibung des Klimas der Jetztzeit, Ergebnisse von Szenariorechnungen mit einem globalen Klimamodell und Messdaten von Klimastationen zur Herleitung der statistischen Beziehungen. In den folgenden Unterabschnitten werden diese Datenarten kurz beschrieben.

2.1 Reanalysen

Atmosphärische Messdaten wurden und werden in einer Vielzahl von Verfahren, die sich über die Zeit verändert haben analysiert, so dass es nicht bruchlos möglich ist, Analysen aus unterschiedlichen Quellen und für unterschiedliche Perioden zu betrachten. Erst durch ihr Re-Analysieren ist ein auf homogenen Daten beruhendes dreidimensionales Bild des Klimas der Jetztzeit möglich. Eine sehr gute und ausführliche Darstellung der Reanalyse-Philosophie sowie der Entwicklungsphasen insbesondere beim European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) findet sich in Kapitel 14 (S. 167–182) von [Woods 2006].

In Vorläufer-Projekten, in denen die WETTREG-Methode entwickelt wurde kamen die NCEP/NCAR Reanalysen [Kalnay u. a. 1996] der Jahre 1961/2000 für den Bereich „erweitertes Mitteleuropa“ mit den daraus abgeleiteten Wetterlagen für die jeweilige Region zum Einsatz. Seit 2005, und auch in diesem Vorhaben, sind die Rechnungen auf die ERA40-Reanalysen [Uppala u. a. 2005] gestützt, durch die u.a. eine höhere räumlichen Auflösung erzielt wird. Sowohl NCEP- als auch ERA40-Daten sind in Bereichen mit guter Datenbelegung nur geringfügig unterschiedlich [Greatbatch und Rong 2006] und [Wang u. a. 2006]. Aus den Feldern werden potenzielle Prediktoren bestimmt, die in Anhang D beschrieben sind. Es sei angefügt, dass ERA40-Reanalysen nur bis 2001 produziert wurden, die nicht so fein aufgelösten NCEP-Reanalysen werden jedoch im tägliche Routinebetrieb weiterhin erzeugt.

Der Vorrat der Prediktoren wurde im Rahmen des Vorhabens gegenüber den Vorgängerversionen deutlich vergrößert; insbesondere wurde die Absicht verfolgt, der Screening-Regressionsanalyse noch mehr Größen anzubieten, die von hoher physikalischer Relevanz sind. Die Prediktoren werden im Anhang D vorgestellt.

2.2 Globales Klimamodell

Nachdem rund 10 Jahre lang das ECHAM4-OPYC3 [Cubasch u. a. 1995] des MPI-Hamburg mit globalen Klimasimulationen eine solide Grundlage für Klimastudien war, sind seit 2005 die Szenariorechnungen des Nachfolgermodells ECHAM5/MPI-OM T63L31 (dokumentiert in [Roeckner u. a. 2003] und [Roeckner u. a. 2004]) verfügbar. Der Zeithorizont umfasst die Jahre 1961 bis 2100, bis 2000 als Control-Run, danach als Rechnungen für die SRES-Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**. Aus den Feldern werden potenzielle Prediktoren bestimmt, die in Anhang D beschrieben sind.

2.3 Messdaten

Im der ersten Projektteil wurden 270 Klimastationen des DWD, verteilt über ganz Deutschland, der Jahre 1981/2000 benutzt; im zweiten und dritten Projektteil wurden 282 Klimastationen und 1695 Niederschlagsstationen (insgesamt 1977 Stationen) verwendet. Die an den Klimastationen verfügbaren Wetterelemente sind in Tab. 2.1 aufgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Niederschlagsdaten um *unkorrigierte* Werte handelt.

Anmerkung: Wenn im Bericht von Messdaten, Klimamessungen oder Beobachtungsdaten die Rede ist, so handelt es sich in allen Fällen um instrumentelle Messungen von Wetterelementen (s.u.) an Boden-Messstationen. Klimadaten aus der freien Atmosphäre entstammen den Reanalysen (s. Abschnitt 2.1).

Tabelle 2.1: Wetterelemente in den bereitgestellten Klimastationszeitreihen.

<i>Nr.</i>	<i>Wetterelement</i>	<i>Einheit</i>
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]

Abschnitt 3

Modell/Verfahrensbeschreibung

3.1 Grundlagen

WETTREG ist ein statistisches Verfahren, das die Vorteile der dynamischen Modelle mit den Möglichkeiten eines statistischen Wettergenerators zur Erzeugung von Stationszeitreihen verbindet. Die räumliche Auflösung ist dabei so groß, wie Messreihen von Klima- bzw. Niederschlagsstationen zur Verfügung stehen.

Die Strategie von WETTREG beruht auf folgenden Annahmen:

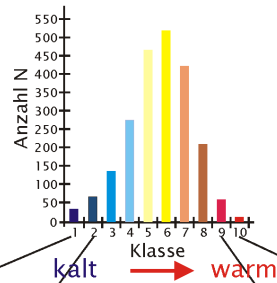
- Globale Klimamodelle sind in der Lage, das Klima großräumig in hinreichender Qualität zu beschreiben;
- es gibt semi-stabile Muster in den atmosphärischen Feldgrößen (z.B. Zirkulation, Feuchte, Vorticity, u.v.a.m., s. Anhang D), die wiederkehrend eine bestimmte Klasse von lokalen Konsequenzen (hohe/niedrige Temperatur, starker/geringer Niederschlag, etc.) hervorrufen;
- unter dem Antrieb von Emissions-Szenarios verändert sich die Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Muster, wie sie von einem globalen Klimamodell errechnet wird;
- die Beziehungen der Klassen lokaler Konsequenzen zu den atmosphärischen Mustern ist auch in der Zukunft der derzeit bestehenden Beziehung sehr ähnlich,
- die Repräsentation des sich ändernden Klimas in den von WETTREG erzeugten lokalen Simulationszeitreihen ist statistisch zutreffend, so dass Aussagen über Mittelwerte, Varianz und Extreme von Wetterelementen an den Orten der Klimamessreihen möglich sind; für die Übertragung der Punktwerte in die Fläche wird zur Interpolation das Inverse-Distance-Weighting (IDW)-Verfahren (s. Anhang C) eingesetzt.

Die Details der Methode, inklusive der Zusammenschau und räumliche Homogenisierung der einzelnen Teilregionen, sind ausführlich in [Enke 2005] und

in [Enke u. a. 2006] beschrieben. Es sei daher in den folgenden Unterabschnitten nur kurz auf das Wesentliche eingegangen.

Anmerkung: Die in diesem Bericht benutzten Begriffe Muster, Zirkulationsmuster und Wetterlage beschreiben das Gleiche: Semi-stabile Strukturen, die im Strömungsregime der Atmosphäre auftreten.

1. Häufigkeitsverteilung aller Werte, z.B. Temperatur, Tagesbasis



2. Bildung von Composites aller Tage, die zu einer Klasse gehören



Abbildung 3.1: Prinzip der Bildung von Zirkulationsmustern.

Tabelle 3.1: Jahreszeitenabhängige Wertebereiche der Tagesmitteltemperatur für die Einteilung in Temperaturklassen.

Klasse	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
1	< -6.0	< 9.0	< -5.0	< -14.0
2	-2.8	11.0	-1.9	-11.1
3	0.5	13.0	1.2	-8.1
4	3.8	15.0	4.2	-5.2
5	7.0	17.0	7.3	-2.2
6	10.2	19.0	10.4	0.7
7	13.5	21.0	13.5	3.6
8	16.8	23.0	16.5	6.6
9	20.0	25.0	19.6	9.5
10	> 20.0	> 25.0	> 19.6	> 9.5

Tabelle 3.2: Wie in Tab. 3.1 aber für die Niederschlagsklassen.

<i>Klasse</i>	<i>Frühjahr</i>	<i>Sommer</i>	<i>Herbst</i>	<i>Winter</i>
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.2	0.2	0.2	0.2
3	0.5	0.6	0.5	0.5
4	1.2	1.5	1.2	1.2
5	2.8	3.8	2.8	2.7
6	6.5	9.3	6.5	6.1
7	15.0	23.0	15.0	14.0
8	> 15.0	> 23.0	> 15.0	> 14.0

3.2 Klassifikationsschritt

Am Anfang steht das Herstellen von räumlichen Mustern atmosphärischer Größen. Dazu werden aus den Messwerten an Klimastationen für das Temperaturregime 10 und für das Feuchteregime 8 Größenklassen gebildet, in denen sich von kalt nach warm, bzw. von trocken nach niederschlagsreich die entsprechenden Tage wiederfinden. Die Jahreszeiten-spezifischen Wertebereiche für die Klasseneinteilungen finden sich in Tab. 3.1 bzw. 3.2. Danach werden klassenweise Komposita der atmosphärischen Felder gebildet (Abb. 3.1). Dieser Prozess findet zudem nach Jahreszeiten differenziert statt. Außerdem werden die räumlichen Muster in drei Breitenkreisstreifen separat erzeugt, so dass die unterschiedlichen Ausprägungen der Zirkulation im Norden, der Mitte und im Süden Deutschlands Eingang finden. Alle Felder werden auf ein äquidistantes Gitter (s. Anhang B) transformiert. Der Verfahrensschritt, in dem die Klassen und die Komposita gebildet werden ist in [Enke u. a. 2005b] und in [Enke u. a. 2006] beschrieben.

Nachdem die 10 (bzw. bei der Feuchte 8) atmosphärischen Muster für das Klima der Jetztzeit identifiziert wurden, wird dekadenweise analysiert, an welchen Tagen und wie häufig diese unter Szenariobedingungen in den Rechnungen des globalen Klimamodells auftreten; dazu werden die identifizierten Muster mit Hilfe des Euklidischen Distanzmaßes (s. Anhang E) im Szenario wiedererkannt. Es sei hinzugefügt, dass das Klimamodell natürlich keine Wetterprognosen für konkrete Tage in der Zukunft erzeugt, jedoch die Atmosphäre mit ihrem Strömungsverhalten realistisch abzubilden anstrebt. Der Antrieb (Emissionsszenarios) bewirkt Szenario-spezifische Verschiebungen in der Häufigkeit der Muster.

3.3 Herstellung der lokalen Zeitreihen

Am Anfang dieses Schrittes steht die Einteilung der Zeitreihen einer Größe aus dem Klima der Jetztzeit in *Anomalien*, d.h. der Identifikation von über- resp. unternormal warmen oder niederschlagsreichen (je nach Leitgröße) Witterungs-

abschnitte. Danach wird ein Wettergenerator gestartet, der die positiven und negativen Anomalieperioden zu einer Realisierung (d.h. einer fiktiven Reihe) kombiniert. Dieses Resampling entspricht der kombinatorischen Technik der Stichprobenentnahme mit Zurücklegen. Die Klimaänderung findet sich in der rekombinierten Reihe dergestalt wieder, dass die zu kombinierenden Witterungsabschnitte die Häufigkeitsverteilung der 10 (resp. 8) Muster widerspiegeln müssen. Zudem wird für synoptisch plausible Abfolgen von Witterungsabschnitten gesorgt, indem ein Abschnitt nur zur Verwendung in der neuen Reihe zugelassen wird, wenn die Übergangswahrscheinlichkeit zum vorausgehenden Abschnitt im Rahmen der im Klima der Jetztzeit gefundenen Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Klassen liegt. Die statistische Sicherheit wird auf zwei Weisen erhöht: (i) Es werden mehrere Realisierungen (für die vorliegende Studie sind dies zehn) für jede Dekade erzeugt und (ii) in jeder Realisierung befinden sich 7300 Tage (also 20 Jahre), deren statistisches Verhalten dem Klima einer korrespondierenden Dekade im zukünftigen Klima entspricht. Der Wettergenerator ist ebenfalls in [Enke u. a. 2005b] beschrieben.

3.4 Extreme

Die vorausgegangenen Schritte erzeugen zwar tägliche Reihen, da diese jedoch durch Rekombination von Anomalie-Abschnitten aus dem Klima der Jetztzeit entstanden sind, geben sie natürlich auch nur den gegenwärtigen „Ereignishorizont“ wieder. Da aber in einem geänderten Klima auch neue Extremwerte entstehen sollten, ist ein weiterer Bearbeitungsschritt notwendig, bei dem mit Hilfe von Regressionsbeziehungen und Verteilungsanpassungen ein lokaler Messwert aus einer Kombination von Einflussgrößen synthetisiert wird. Die physikalische Motivation für diesen Schritt ist zudem, dass die Herstellung der lokalen Zeitreihen nur einen Teil der Information auswertet: die sich ändernde *Häufigkeit* der Muster. Es ist zu erwarten, dass sich darüber hinaus auch die *Amplitude* der Muster ändert, und genau dieser Annahme trägt die gesamte Methode Rechnung.

Eine Anwendung der Methode (damals noch mit ECHAM4-Daten) in Form von mehreren Bundesländerstudien ist in [Enke u. a. 2005a] beschrieben.

3.5 Ausgewählte Bereiche aus den Simulationen

In den Analysen und Abbildungen des Berichts wird an einigen Stellen auf die trockenen, normalen und feuchten Teilabschnitte Bezug genommen. Diese werden wie folgt bestimmt: Die Simulationen von WETTREG erzeugen, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, Zeitreihen an den Positionen der Stationen. Jede Simulation umfasst 7300 Tage, also 20 „Modell-Jahre“, deren statistisches Verhalten dem Klima in einer Szenario-Dekade entspricht. Zusätzlich ergeben 10 Simulationen zu 7300 Tagen eine bessere Abschätzung der Modellvariabilität. Um für die Analysen die Bandbreite des Klimas in den Simulationen systematisch zu erfassen, werden in ihnen zusammenhängende 10-jährige Bereiche identifiziert, in

3.5 Ausgewählte Bereiche aus den Simulationen

denen der Niederschlag im Mittel besonders hoch, besonders niedrig bzw. durchschnittlich ist. Diese erhalten die Bezeichnungen „trocken“ (tro), „feucht“ (feu) und „normal (nor)“. Man könnte also von der Isolierung niederschlagsarmer, nasser bzw. normaler Klimaverläufe sprechen.

In Abb. 3.2 und 3.3 ist das an einem konkreten Beispiel dargestellt. Es wird in den zehn Realisierungen, die das Klima einer Dekade für eine Station synthetisieren (Abb. 3.2) nach zusammenhängenden Bereichen gesucht, die die oben genannten Kriterien erfüllen und zusätzlich an einem 1. Januar beginnen¹. Im Beispielsfall ist dies bei den Simulationen 5 (für tro), 7 (für nor) und 9 (für feu) der Fall (s. Abb. 3.3). Die Datenbankstruktur erfordert 20-jährige Perioden, weswegen im Fall der Varianten tro, nor und feu eine identifizierte Zeitreihe dupliziert wird.

Es geht bei der Bildung der Varianten tro, nor und feu um die Repräsentativität und die Gesamtniederschlagsmenge, weswegen z.B. durchaus im gefundenen nor-Zeitraum höhere Einzelwerte auftreten können als in den feu-Zeitraum [vgl. Abb. 3.3 (d) und (f)].

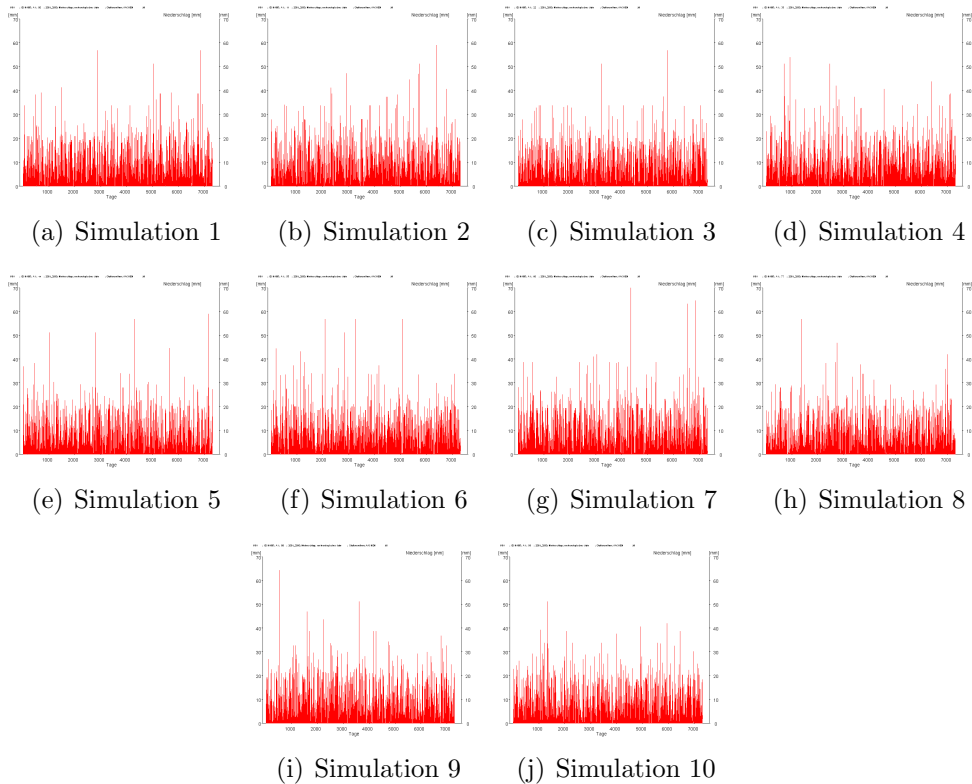


Abbildung 3.2: Beispiel für die zehn WETTREG-Simulationen des Klimas einer Dekade. Element: Niederschlag. Jahreszeit: Sommer. Zeitraum: 2081–2090. Szenario: **A1B**. Station: Aachen. Die Beschriftungen unter den Teilfiguren geben an, welche Realisierung dargestellt ist.

¹Würde die identifizierte Periode an einer anderen Position im Jahr beginnen wären z.B. Jahreszeitenuntersuchungen nicht möglich

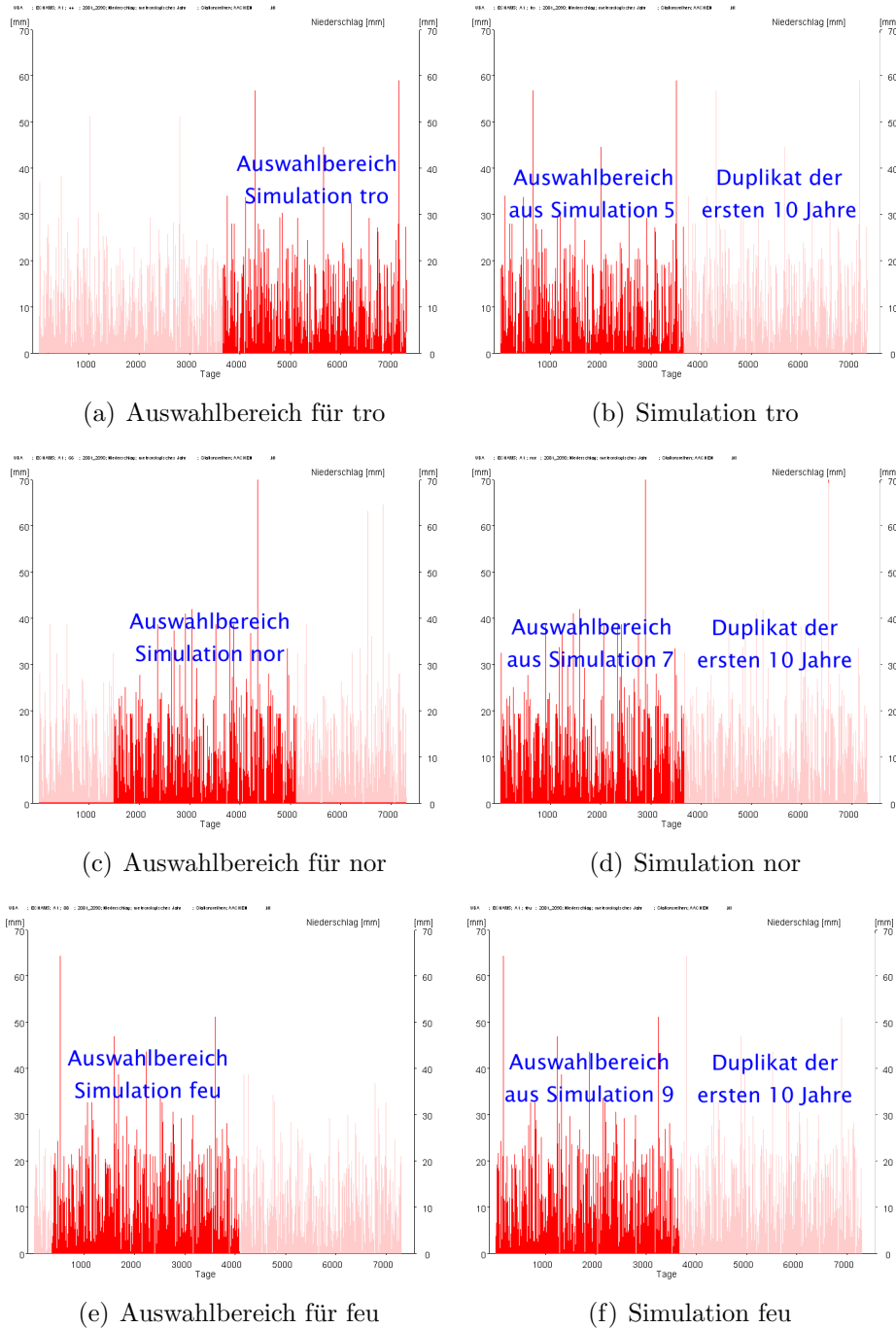


Abbildung 3.3: Identifikation der Auswahlbereiche für die Varianten tro (Teilbereich von Simulation 5), nor (Teilbereich von Simulation 7) und feu (Teilbereich von Simulation 9) der in Abb. 3.2 dargestellten Realisierungen.

Abschnitt 4

Validierung

In diesem Abschnitt wird beschrieben und verglichen, wie die Bodenbeobachtungen durch die Modellsimulation von WETTREG für die Jetztzeit beschrieben werden¹. Die dabei benutzten WETTREG-Simulationen hatten den Kontrolllauf von ECHAM5 (1971–2000) als Antrieb. Die zehn in Tab. 2.1 aufgelisteten Größen stehen als Kartendarstellungen zur Verfügung, so dass beispielsweise ein Vergleich der räumlichen Verteilungen von Tagesmitteltemperatur (Abb. 4.2) und Niederschlag (Abb. 4.3 und 4.4) erfolgen kann.

Die Wetterelemente (s. Tab. 2.1) sowie abgeleitete Größen, wie die Zahl der Sommertage (Tageshöchsttemperatur ≥ 25 °C) oder der Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von Niederschlagsschwellwerten, wurden für alle meteorologische Stationen berechnet. Zur Validierung dieser Größen (Abb. 4.1) wurden 12 Stationen in bekannten Städten der klimatischen Hauptregionen Deutschlands (s.a. Abb. 6.1 auf Seite 68) ausgewählt, die in Tab. 4.1 zusammengefasst sind.

Die Validierung zeigt, ob das Modell in der Lage ist, unter den gegebenen Randbedingungen die Beobachtungsdaten im Mittel abzubilden. Dies gilt als eine der Grundvoraussetzungen dafür, dass das Modell für Szenariorechnungen eingesetzt werden kann. Im weiteren Sinne dieses Konzepts ist auch die modellinterne Variabilität angesiedelt. WETTREG liefert für jede Dekade an jeder Station 10 synthetisierte Datenreihen von 7300 Tagen Länge, die dem statistischen Verhalten des Klimas in der Dekade entsprechen. Wie im Anhang F gezeigt, sind die räumlichen Muster selbst in einer Dekade sehr stabil, wiewohl die dahinter stehenden Zeitreihen eine große Variabilität besitzen.

Die Beschreibung der *Klimaentwicklung* im Validierungszeitraum ist nicht primäre Aufgabe der Validierung. Sehr umfangreiche Untersuchungen, die das Klima und seine Extreme in Deutschland im 20. Jahrhundert analysieren finden sich im UBA-Bericht [Jonas u. a. 2005].

¹Wegen der Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten und ECHAM5-Modellläufen innerhalb des Projekts und der Forderung, die Validierung sollte auf einem möglichst langen Vergleichsintervall beruhen, wurde für die Validierung der Zeitbereich 1971–2000 benutzt, während in späteren Kapiteln die, auch zum Vergleich mit dem REMO Modell verbindliche Periode 1961–1990 bei der Bildung 30-jähriger Mittel der Jetztzeit zum Einsatz kam.

Anmerkung zu den Tabellen mit Flächenmitteln (z.B. Tab. 4.2): Die dort tabellierten Werte wurde aus einer Bildschirm-Kartendarstellung mit der von CEC-Potsdam erstellten Analysesoftware IDP2006 berechnet. Die Bildschirmdarstellung umfasst einen mehreckigen Rahmen, der z.B. in Abb. 4.2 (b) besonders deutlich erkennbar ist und in dem sich die Gesamtfläche Deutschlands befindet. Die Berechnung des Flächenmittels berücksichtigt alle Bildpunkte innerhalb des mehreckigen Rahmens.

Tabelle 4.1: Ausgewählte, für Naturräume repräsentative Klimastationen, zur Validierung der Zahl der Sommertage und der Niederschlags-Überschreitungswahrscheinlichkeiten.

<i>Name</i>	<i>Klimaregion</i>
Arkona	Küste
Hannover	Nordwestdeutsches Tiefland
Berlin-Dahlem	Nordostdeutsches Tiefland
Köln	Westdeutsche Tieflandsbucht
Leipzig	Südostdeutsches Becken
Kassel	Zentrale Mittelgebirge
Dresden	Südostdeutsches Hügelland
Koblenz	Links- und rechtsrheinische Mittelgebirge
Karlsruhe	Obererrheingraben
Ulm	Alp und Nordbayerisches Hügelland
München	Alpenvorland
Garmisch-Partenkirchen	Alpen

4.1 Temperatur

Für die Tagesmitteltemperatur ist in Abb. 4.2 und 4.3 dargestellt, in welchem Maße das mit ECHAM5-Kontrolllauf-Daten angetriebene WETTREG-Verfahren das Klima des Zeitbereichs 1971–2000 beschreibt. Dabei erfolgt der Vergleich in den Teilfiguren von Abb. 4.2 mit WETTREG-Daten, die auf zwei Weisen aggregiert wurden: (i) Mittelung über das Ensemble der zehn WETTREG-Realisierungen je Dekade (insgesamt 7300 Tage) und (ii) Mittelung über die drei Dekaden 1971–80, 1981–90 und 1991–2000. Die Teilfiguren von Abb. 4.3 zeigen den Verlauf der Abweichungen für die über das Jahr gemittelte Tagestemperatur nach Dekaden differenziert, wobei Abb. 4.2 (c) und 4.3 (d) identisch sind.

Die Ähnlichkeit der beiden Datenarten ist groß – wegen der Symmetrie des Wertebereichs wurde in Abb. 4.2 und 4.3 ein Intervall von ± 0.9 K verwendet. Die Flächenmittel finden sich in Tab. 4.2. In den Sommermonaten [Abb. 4.2(a)] werden die Temperaturwerte dabei in der Nordhälfte Deutschlands vom Modell

4.1 Temperatur

Tabelle 4.2: Mittelwert der Abweichungen der Tagesmitteltemperatur im Vergleich von Kontrolllauf minus Beobachtungsdaten in Abb. 4.2. Positive Werte: Modell ist zu warm; negative Werte: Modell ist zu kalt.

	Sommer	Winter	Jahr
ΔT_{mit} [K]	+0,1	−0,4	−0,1

als ganz leicht zu warm abgeschätzt, aber mit einer weitgehenden Kompensation durch die übrigen Regionen, während in den Wintermonaten [Abb. 4.2(b)] eine generelle leicht zu kalte Einschätzung des Modells mit Schwerpunkt im Osten Deutschlands vorliegt – die Abweichungen eind jedoch an keiner Stelle Werte mehr als 0,6 K. Die Werte für das Jahr [Abb. 4.2(c)] sind praktisch ausgeglichen.

Während es beim Niederschlag wegen dessen Variabilität nicht sinnvoll ist, Einzeldekaden zu validieren kann dies bei der Tagesmitteltemperatur zumindest versucht werden. Die in Abb. 4.3 gezeigten Karten beinhalten für das WETTREG-Modell Werte, die über das Ensemble der zehn Simulationen jeder Dekade aggregiert sind. In Tab. 4.3 finden sich die Flächen-Mittelwerte der vier Teilfiguren von Abb. 4.3.

Tabelle 4.3: Mittelwert der Abweichungen der Tagesmitteltemperatur im Vergleich von Kontrolllauf minus Klimamessungen in Abb. 4.3. Positive Werte: Modell ist zu warm, negative Werte: Modell ist zu kalt.

	1971–1980	1981–1990	1991–2000	1971–2000
ΔT_{mit} [K]	+0,4	0,0	−0,7	−0,1

Es zeigt sich eine charakteristische dekadische Temperaturwelle: 1971–80 war das Modell wärmer als die Messungen, 1981–90 waren beide etwa gleich und 1991–2000 war das Modell kälter als die Messungen. Für den gesamten 30-jährigen Zeitraum kompensieren sich die Muster. Der Grund dafür liegt in einem Phänomen, das im Kontrolllauf des ECHAM5-Modells auftritt²: Dort ist eine mit den WETTREG-Ergebnissen gleichsinnige Welle vorhanden, die ihren Weg in die WETTREG-Regionalisierung über die daraufhin veränderten Häufigkeiten der Zirkulationsmuster (vgl. Abschnitt 3.2) im globalen Klimamodell findet. Obwohl das dynamische REMO-Modell auf völlig andere Weise an das ECHAM5-Modell gekoppelt ist, zeigen dessen Rechnungen ebenfalls diese Temperaturwelle.

²Es wurde sowohl bei WETTREG als auch bei REMO der selbe Lauf (Nr. 1) des ECHAM5-Modells verwendet.

Mit anderen Worten: Die Temperaturwelle zwischen 1971 und 2000 ist systemimmanent korrekt³ und gibt einen Hinweis darauf, dass für Temperaturgrößen die Resultate stabiler werden, wenn Mittelungsperioden von mehr als 10 Jahren Länge verwendet werden.

Eine zusätzliche, spezielle Validierung zeigt Abb. 4.1. In ihr wird verglichen, wie häufig Tage mit einer Maximumtemperatur von mindestens 25 °C (Sommertage) pro Jahr im Mittel in den simulierten Zeitreihen aus dem WETTREG-Kontrolllauf sind und wie häufig Sommertage in den Stationsreihen beobachtet wurden.

Klar tritt hervor, dass in der Dekade 1971–80 Sommertage im Modell häufiger als in den Beobachtungen auftreten (Quadrate in Abb. 4.1), während es sich in der Dekade 1991–2000 umgekehrt darstellt (Dreiecke in Abb. 4.1). Dies ist konsistent mit dem Verhalten der Tagesmitteltemperatur (vgl. Abb. 4.3). Der Nettoeffekt ist (große Stundenglassymbole in Abb. 4.1), dass für den gesamten Zeitraum 1971–2000 auch die Zahl der Sommertage pro Jahr mit sehr hoher Realitätsnähe vom Modell reproduziert wird.

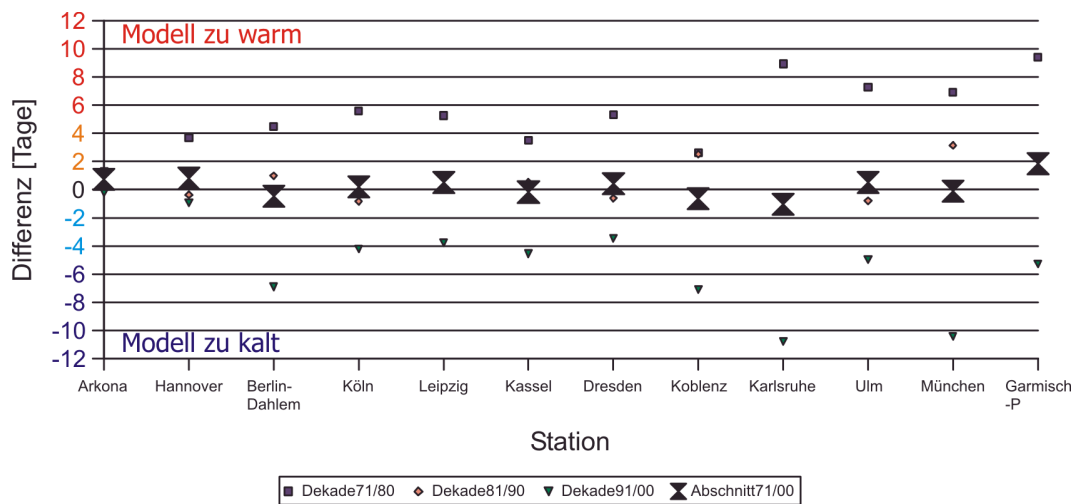


Abbildung 4.1: Validierung der Anzahl der Sommertage ($\text{Maximum} \geq 25\text{ °C}$) für die Modellsimulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit Klimamessungen in den Perioden 1971–80, 1981–90, 1991–2000 und 1971–2000. Ausgewählt wurden zwölf repräsentative Stationen für die einzelnen Naturräume (s. Tab. 4.1). Positive Werte: Sommertage treten im Kontrolllauf des Modells häufiger auf (Modell ist zu warm); negative Werte: Sommertage treten in den Klimamessungen häufiger auf (Modell ist zu kalt). Die großen Symbole zeigen die Abweichungen für die komplette Validierungsperiode 1971–2000.

³Sie ist lediglich in dieser Form nicht in den Klimadaten enthalten. Klimamodelle haben nicht als Ziel, den konkreten zeitlichen Verlauf des Klimas zu reproduzieren, sondern deren *mittleren Zustand*. Daher muss eine Mittelung über längere Zeiträume (wo möglich 30 Jahre) erfolgen.

4.1 Temperatur

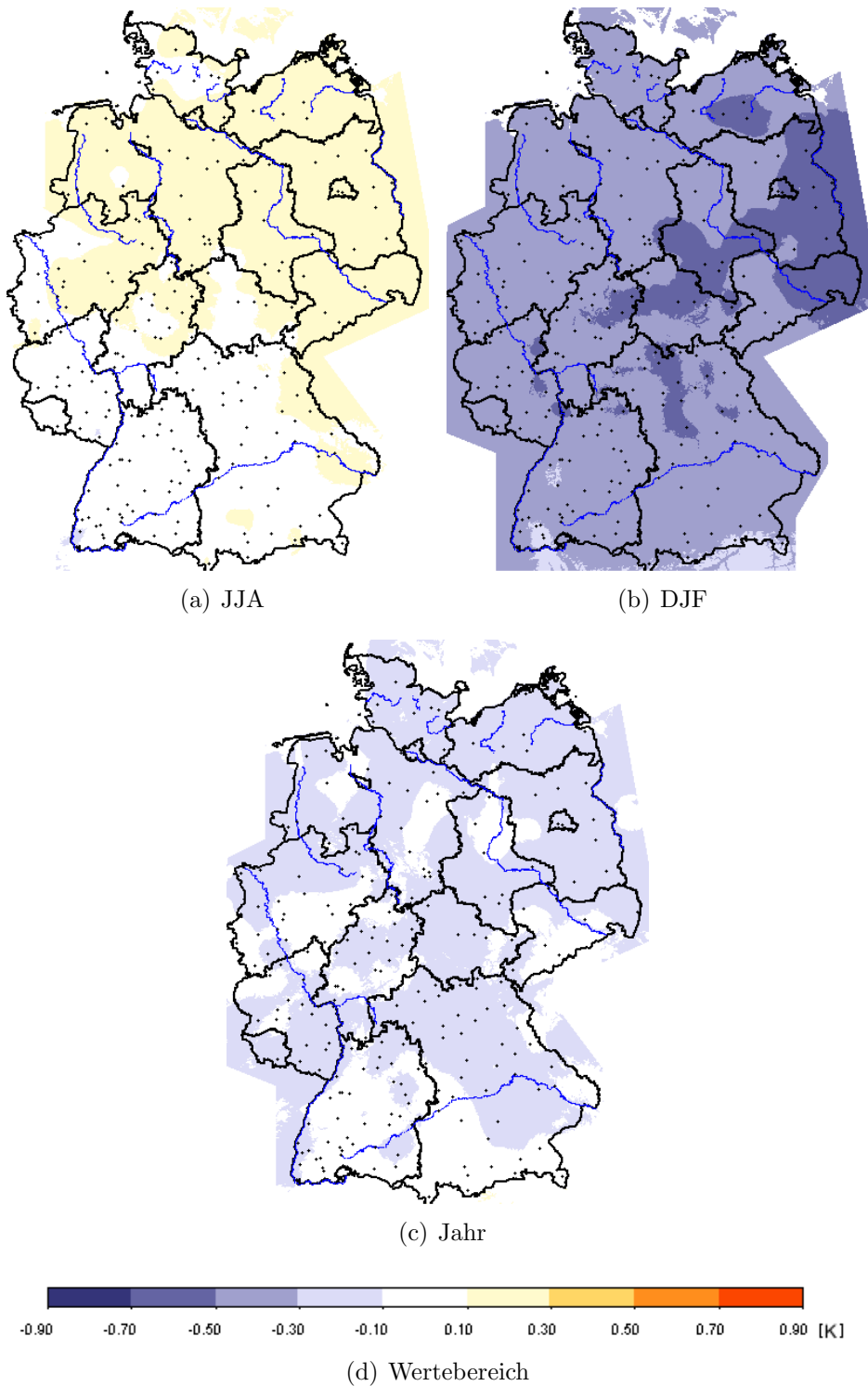


Abbildung 4.2: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit für die Sommermonate (Juni-Juli-August), die Wintermonate (Dezember-Januar-Februar) und das Jahr. Element: Tagesmitteltemperatur. Periode: 1971–2000. Blautöne: Modell zu kalt, Rottöne: Modell zu warm.

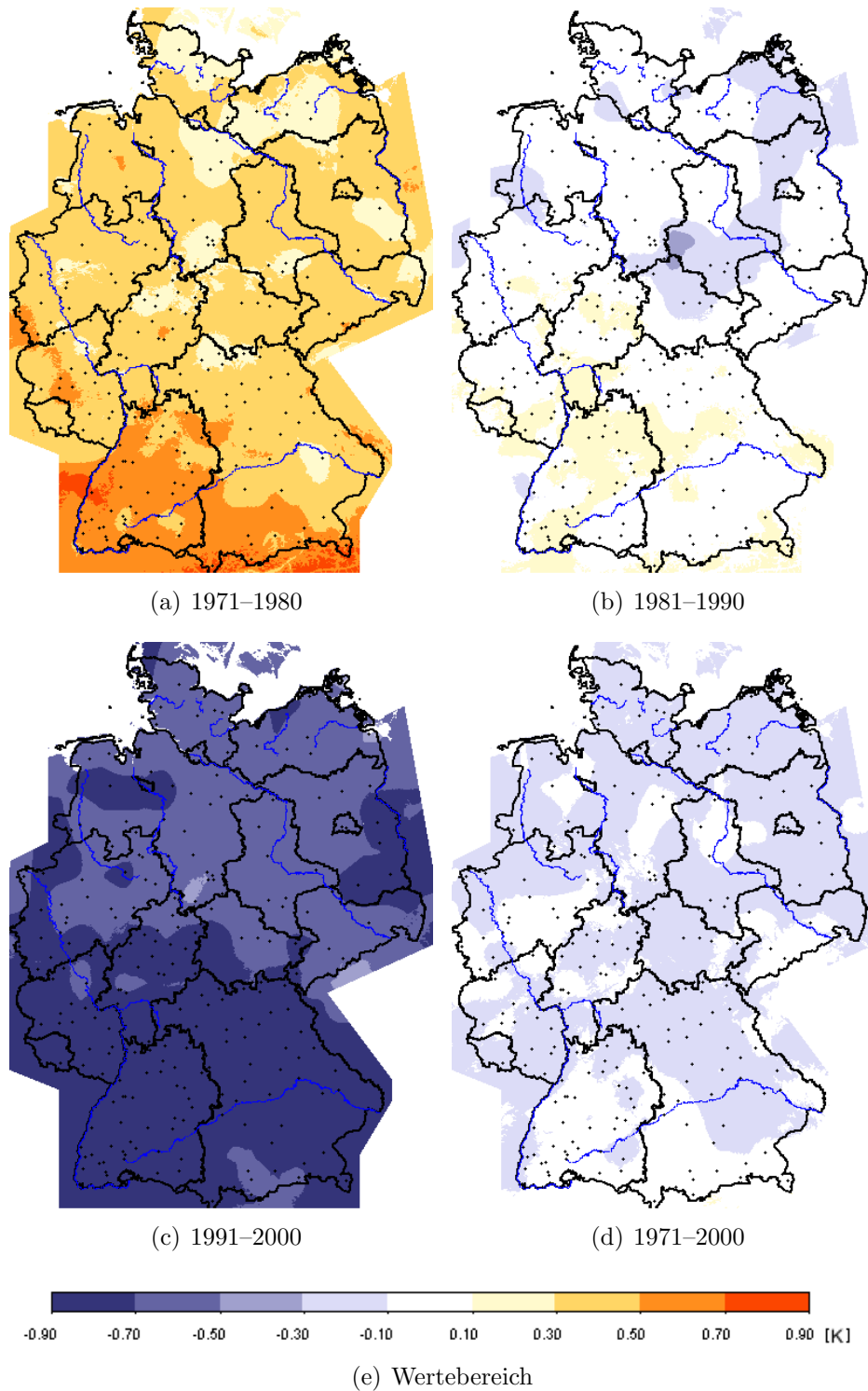


Abbildung 4.3: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Dargestellt sind die Resultate für das Jahr in den Perioden 1971–1980, 1981–1990, 1991–2000 und 1971–2000. Element: Tagesmitteltemperatur. Blautöne: Modell ist zu kalt, Rottöne: Modell ist zu warm.

4.2 Niederschlag

4.2.1 Saisonale Validierung

Für den Niederschlag ist in Abb. 4.4 dargestellt, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Klimabeobachtungen der Periode 1971–2000 und der Modellierung des Klimas aus diesem Zeitabschnitt bestehen. Die Karten stellen prozentuale Änderungen dar, wie sie sich aus der Differenz zwischen dem Kontrolllauf und den Beobachtungsdaten ergeben. Das WETTREG-Verfahren erzeugt mit seinem stochastischen Wettergenerator pro Dekade zehn Simulationen zu 7300 Tagen Länge, die ein Ensemble fiktiver „Versionen“ des Klimas dieser Dekade und dessen statistische Eigenschaften darstellen. Für die Darstellung in den Teilfiguren von Abb. 4.4 ist beim Kontrolllauf das Mittel über diese zehn Simulationen verwendet worden.

Der Niederschlag besitzt eine sehr hohe zeitliche und räumliche Variabilität. Daher ist es nicht sinnvoll, diese Größe einem Vergleich von modellierten und gemessenen Werten *auf Dekadenbasis* zu unterwerfen. Stabilere und repräsentativere Aussagen werden möglich, wenn, wie in der Aufbereitung der Daten für Abb. 4.4 und die Tabellen 4.5 bis 4.7 geschehen, drei Dekaden gemittelt werden.

Tabelle 4.4: Mittelwert der prozentualen Abweichungen des Niederschlags im Vergleich von Kontrolllauf minus Beobachtungen in Abb. 4.4. Positive Werte: Modell ist zu niederschlagsreich. Negative Werte: Modell ist zu trocken.

	Sommer	Winter	Jahr
$\Delta \text{Nied} [\%]$	+0,1	–1,4	0,0

Wie Abb. 4.4 und Tab. 4.4 zeigen, sind die Unterschiede zwischen Modell und Beobachtungsdaten zwar nachweisbar, aber nicht sehr groß. Sie übersteigen in keinem Gebiet einen Wert von 10% und sollten daher nicht überinterpretiert werden. Etwas *zu niedrig* schätzt das Modell den beobachteten Niederschlag im Nordwesten Deutschlands ein – dieses Signal tritt sowohl in den Sommer– [Abb. 4.4 (a)] als auch in den Wintermonaten [Abb. 4.4 (b)] in Erscheinung und findet sich, etwas abgeschwächt, ebenfalls beim Jahresniederschlag [Abb. 4.4 (c)] wieder. Regionen, in denen das Modell den beobachteten Niederschlag als leicht *zu hoch* einschätzt finden sich im Südwesten (im Sommer stärker ausgeprägt) und im Nordosten (im Winter stärker ausgeprägt) Deutschlands. Die Tatsache, dass der *Jahresniederschlag* Muster zeigt, die schwächer und leicht abweichend von denen der Sommer bzw. Wintermonate sind liegt darin begründet, dass (i) die Muster in Sommer und Winter nicht deckungsgleich sind und (ii) sich im Frühjahr (hier nicht dargestellt) Bereiche negativer Anomalie in der zentralen Mittelgebirgsregion und im Herbst (hier ebenfalls nicht dargestellt) solche Bereiche verstärkt im Südosten finden, die auch die in Tab. 4.4 ersichtliche positive Anomalie im Sommer kompensieren.

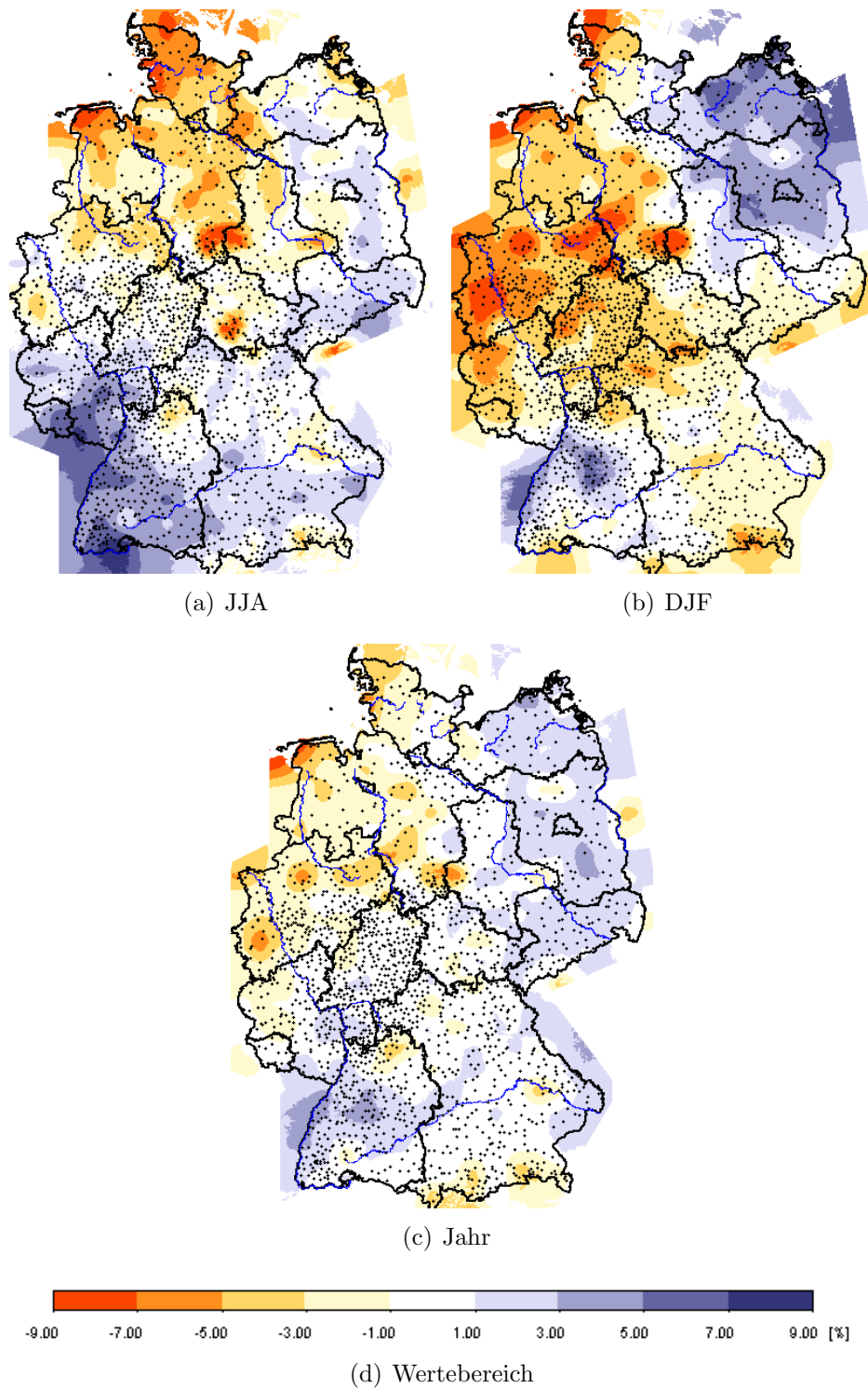


Abbildung 4.4: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit Beobachtungsdaten der Jetztzeit für die Sommermonate (Juni-Juli-August), die Wintermonate (Dezember-Januar-Februar) und das Jahr. Element: Niederschlag. Periode: 1971–2000. Dargestellt ist die prozentuale Änderung zwischen den Datensätzen – Blautöne: Modell ist zu feucht, Rottöne: Modell ist zu trocken.

4.2.2 Validierung von Schwellwertüberschreitungen

In den Tabellen 4.5 bis 4.7 wird ein Schlaglicht auf die Validierung im Bereich der extremen Niederschlagsereignisse geworfen. Es werden dazu die Wahrscheinlichkeiten miteinander verglichen, dass der Niederschlag bestimmte Schwellwerte überschreitet (s. dazu auch Anhang G).

Eine Auswertung auf Stationsbasis ist wegen der Charakteristika des Niederschlags nicht das Optimum, aber es lassen sich dennoch wichtige Schlüsse aus den Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ziehen. Anhand der Beispiele für 12 Klimastationen zeigt sich, dass in erster Näherung das Modell die Klimabeobachtungen *qualitativ* reproduziert – die regionalen Unterschiede und auch das Verhalten im Bereich höherer Niederschlagsmengen werden beispielsweise gut wiedergegeben. In Tab. 4.5 erfolgt die Darstellung für den Jahresniederschlag zudem in Form der drei als relativ trocken (tro), normal (nor) und relativ feucht (feu) ausgewählten Abschnitte der Modell-Simulationen des ECHAM5-Kontrolllaufs (zum Auswahlprozess s. Abschnitt 3.5). Daraus ist ersichtlich, welche Ereignis-Bandbreite im Kontrolllauf liegt, aber auch, dass die beste Approximation einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von Station zu Station durch *unterschiedliche* Auswahlen (tro, nor oder feu) erzielt wird.

In den beiden Tabellen 4.6 und 4.7 werden die Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Beobachtungen und Modell im Sommer bzw. Winter einander gegenübergestellt. Dort ist aus Vergleichbarkeits- und Übersichtsgründen die Auswahl „nor“ benutzt worden. Hier wird ebenfalls erkennbar, dass das Modell die regionalen Unterschiede und die Überschreitungswahrscheinlichkeiten für größere Niederschlagsmengen gut beschreibt. Dies gilt auch im Winter, wenn die Anzahl von Starkniederschlagsereignissen insgesamt geringer ist.

Wie oben erwähnt, ist die Beschreibung der Überschreitungswahrscheinlichkeiten in erster Näherung recht gut. In zweiter Näherung ist dies allerdings differenzierter zu betrachten, denn die Überschreitungen von Schwellwerten müssen wegen ihres unterschiedlichen „Ereignisraums“ normiert werden: Wenn beispielsweise das Modell 19% Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten einer Niederschlagsschwelle errechnet und diese Wahrscheinlichkeit in den Beobachtungen 22% beträgt, so sind diese 3% Unterschied anders zu bewerten als die Wahrscheinlichkeiten von 2% im Modell und 5% in den Beobachtungen. Tab. 4.8 stellt diese modifizierte Analyse dar. Es wurde dabei die auch in der Verifikation von Wettervorhersagen gebräuchliche Testgröße V verwendet, die sich aus den Häufigkeiten bei den Beobachtungswerten H_{Kli} und im Kontrolllauf H_{Kon} nach $V = [H_{Kli} - H_{Kon}] \cdot 100 / H_{Kli}$ berechnet, die also die *Anzahlen der Tage*, an denen die Schwellwerte in Modell bzw. Beobachtungen überschritten wurden in Beziehung setzt. Sinn ist, auch Fehler bei der Beschreibung seltener Ereignisse objektiv und gerecht zu bewerten. Es wird klar, dass in der Einzelbetrachtung durchaus hohe Abweichungen bei den Überschreitungswahrscheinlichkeiten für hohe Niederschlagsschwellen auftreten können, was nach der ersten Näherung (vgl. Tab. 4.5–4.7) nicht so offenkundig war.

Tabelle 4.5: Validierung der WETTREG-Ergebnisse für mittlere und stärkere Niederschlagsereignisse. Dargestellt ist für 12 Station die Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Mengennstufen 5 mm, 10 mm, 15 mm und 20 mm an einem Tag. Zeitbereich: 1971–2000. In dieser Tabelle erfolgt ein Vergleich der Wahrscheinlichkeiten für die Klima-Beobachtungen und die mit Kontrolllaufdaten [Untermengen „tro“, „nor“ und „feu“ (vgl. Abschnitt 3.5)] von ECHAM5 angetriebene WETTREG-Simulationen für das gesamte Jahr.

Station	Beobachtungen				Kontrolllauf tro				Kontrolllauf nor				Kontrolllauf feu			
	5mm	10mm	15mm	20mm	5mm	10mm	15mm	20mm	5mm	10mm	15mm	20mm	5mm	10mm	15mm	20mm
<i>Arkona</i>	8,6	2,7	1,2	0,7	7,4	2,6	1,1	0,5	8,1	2,8	1,1	0,7	7,9	2,7	1,2	0,6
<i>Hannover</i>	10,3	3,7	1,5	0,7	9,1	3,4	1,4	0,8	9,7	3,6	1,5	0,7	10,9	4,3	1,9	0,9
<i>Berlin-Dahlem</i>	9,1	2,8	1,3	0,6	8,2	2,6	1,0	0,6	9,1	2,9	1,3	0,5	9,6	3,2	1,3	0,7
<i>Köln</i>	13,6	5,2	2,3	1,1	11,5	4,3	2,0	0,8	12,6	5,2	2,3	1,2	13,9	5,5	2,4	1,2
<i>Leipzig</i>	9,1	3,5	1,6	0,7	8,3	3,1	1,3	0,5	8,9	3,6	1,6	0,7	9,3	3,9	1,8	0,8
<i>Kassel</i>	11,3	4,0	1,8	0,9	8,8	2,7	1,4	0,7	9,7	3,5	1,4	0,8	10,8	3,8	1,7	0,8
<i>Dresden</i>	10,3	4,0	1,8	1,0	9,0	3,7	1,8	0,9	9,8	3,8	1,8	0,9	10,3	4,1	1,9	1,0
<i>Koblenz</i>	9,5	3,5	1,5	0,8	8,3	3,3	1,6	1,0	8,8	3,3	1,5	0,9	9,4	3,7	1,8	1,0
<i>Karlsruhe</i>	12,8	5,4	2,5	1,1	11,0	5,0	2,2	0,9	11,9	5,1	2,5	1,1	13,1	5,8	2,8	1,1
<i>Ulm</i>	12,1	5,0	2,3	1,0	10,5	4,4	2,0	0,9	11,7	4,8	2,3	1,1	13,0	5,1	2,4	1,0
<i>München</i>	18,3	9,6	5,5	3,3	15,6	8,2	4,8	2,8	17,4	9,0	5,2	3,2	17,7	9,2	5,6	3,2
<i>Garmisch-Partenk.</i>	22,1	12,4	6,9	4,2	19,7	10,7	6,0	3,5	21,4	11,8	6,8	4,1	22,0	12,2	6,9	4,0

4.2 Niederschlag

Tabelle 4.6: Wie in Tab. 4.5, jedoch für die Sommermonate (Juni-Juli-August) sowie die Kontrolllauf-Untermenge „nor“ (vgl. Abschnitt 3.5).

<i>Station</i>	<i>Beobachtungen</i>				<i>Kontrolllauf nor</i>			
	<i>5mm</i>	<i>10mm</i>	<i>15mm</i>	<i>20mm</i>	<i>5mm</i>	<i>10mm</i>	<i>15mm</i>	<i>20mm</i>
<i>Arkona</i>	10,0	5,0	2,5	1,7	9,0	4,4	2,4	1,6
<i>Hannover</i>	12,9	5,6	2,2	1,2	10,6	4,1	2,3	1,2
<i>Berlin-Dahlem</i>	11,8	4,8	2,6	1,4	13,2	4,8	2,7	2,1
<i>Köln</i>	15,7	7,3	4,0	2,2	15,7	8,0	4,3	2,8
<i>Leipzig</i>	12,2	5,5	3,0	1,7	11,3	5,3	2,7	1,8
<i>Kassel</i>	12,8	5,5	2,7	1,5	11,2	4,5	1,9	1,1
<i>Dresden</i>	13,7	6,6	3,7	2,2	13,6	6,8	3,6	1,7
<i>Koblenz</i>	12,2	5,2	2,8	1,7	10,4	4,5	2,6	1,8
<i>Karlsruhe</i>	13,9	6,2	3,0	1,5	13,5	6,7	3,2	1,5
<i>Ulm</i>	17,2	8,6	4,3	1,9	17,0	8,4	4,5	1,8
<i>München</i>	25,7	16,1	10,2	6,4	25,7	15,7	10,1	6,5
<i>Garmisch-Partenk.</i>	31,3	19,9	12,9	8,6	31,5	20,9	14,3	9,7

Tabelle 4.7: Wie in Tab. 4.6, jedoch für die Wintermonate (Dezember-Januar-Februar).

<i>Station</i>	<i>Beobachtungen</i>				<i>Kontrolllauf nor</i>			
	<i>5mm</i>	<i>10mm</i>	<i>15mm</i>	<i>20mm</i>	<i>5mm</i>	<i>10mm</i>	<i>15mm</i>	<i>20mm</i>
<i>Arkona</i>	5,8	1,3	0,3	0,1	5,6	1,5	0,4	0,1
<i>Hannover</i>	9,7	3,0	0,9	0,2	8,5	3,5	1,4	0,3
<i>Berlin-Dahlem</i>	8,7	1,7	0,4	0,1	8,6	2,2	0,8	0,3
<i>Köln</i>	12,6	3,9	1,1	0,5	10,4	3,1	0,9	0,5
<i>Leipzig</i>	7,4	1,8	0,7	0,1	7,2	1,9	1,0	0,1
<i>Kassel</i>	10,7	3,1	1,4	0,5	9,3	3,0	1,3	0,3
<i>Dresden</i>	8,4	2,2	0,6	0,3	8,0	2,0	0,8	0,5
<i>Koblenz</i>	7,4	1,8	0,5	0,2	7,0	2,2	0,2	0,1
<i>Karlsruhe</i>	12,4	4,7	1,9	0,7	11,1	4,6	2,0	0,6
<i>Ulm</i>	8,9	2,7	0,8	0,2	8,2	2,4	0,8	0,2
<i>München</i>	13,3	4,6	2,0	1,0	11,3	3,9	2,0	1,0
<i>Garmisch-Partenk.</i>	16,1	7,7	3,7	2,1	15,3	7,1	3,2	1,7

Tabelle 4.8: Verifikation von Überschreitungen von Niederschlagsschwellwerten für zwei Beispielstationen. Tabelliert sind im Zeitbereich 1971–2000 für das Jahr sowie Sommer und Winter die Anzahl der Tage, an denen die Schwellen 20 mm, 15 mm, 10 mm bzw. 5 mm überschritten werden und zwar sowohl für die Klima-Beobachtungen (H_{Kli}) als auch für den Kontrolllauf (H_{Kon}), wobei Tage mit mehr als 20 mm auch in allen darunter liegenden Schwellen (5, 10 und 15 mm) mitgezählt sind. Die unter den Anzahlzeilen tabellierte Teststatistik ist $V = [H_{Kli} - H_{Kon}] \cdot 100 / H_{Kli}$. Die Anzahl der Tage besitzt eine Nachkommastelle, weil es eine Mittelung über drei Dekaden ist.

Jahr	Berlin-Dahlem				München			
	5mm	10mm	15mm	20mm	5mm	10mm	15mm	20mm
H_{Kli}	848,0	266,7	112,0	49,3	1544,7	796,0	456,0	268,0
H_{Kon}	835,3	266,0	104,0	50,7	1427,3	731,3	447,3	272,0
V	1,5	0,3	7,1	-2,7	7,6	8,1	1,9	-1,5
Sommer								
H_{Kli}	258,7	104,0	52,7	30,0	523,3	326,0	207,3	129,3
H_{Kon}	235,3	90,0	44,0	32,0	532,0	323,3	204,0	132,0
V	9,0	13,5	16,5	-6,7	-1,7	0,8	1,6	-2,1
Winter								
H_{Kli}	211,3	48,0	11,3	3,3	293,3	103,3	42,0	22,0
H_{Kon}	197,3	53,3	18,0	7,0	272,7	120,0	40,0	20,7
V	6,6	-11,1	-58,8	-110,0	7,1	-16,1	4,8	6,1

4.2.3 Anmerkungen zur Teststatistik V

Die Teststatistik V ist ein Indikator, der Bereiche, in denen das Modell die Beobachtungen gut bzw. weniger gut beschreibt, deutlich herausarbeitet. Wenn V große Werte mit Beträgen über 50 erreicht, so bedeutet dies lediglich, dass die Diskrepanzen zwischen Modell und Beobachtungen dort relativ groß sind, also z.B. große Niederschlagsmengen deutlich seltener/häufiger (je nach Vorzeichen von V) modelliert werden. Eine Aussage zu extremen Niederschlagsmengen oder deren Serienverhalten, d.h., ob Tage mit hohen Niederschlagsmengen einzeln oder direkt aufeinanderfolgend auftreten, ist dabei nicht möglich.

Abschnitt 5

Szenariovergleich

Während im vorigen Abschnitt ein Datenvergleich für die Jetztzeit erfolgte, wird in diesem Abschnitt dargestellt, wie sich die drei von den ECHAM5-Szenarios angetriebenen WETTREG-Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** im Verhältnis zum Kontrolllauf ändern. WETTREG erzeugt bekannermaßen 10 Simulationen zu 7300 Tagen Länge pro Dekade, über die für die Analysen jeweils gemittelt wurde. In Teilabschnitt 5.1 wird für die Temperatur und den Niederschlag dargestellt, wie sich in den WETTREG-Szenarios die Veränderungen von der Jetztzeit zum Ende des 21. Jahrhunderts in den einzelnen Monaten und Jahreszeiten darstellt. In Abschnitt 5.2 findet sich ein Vergleich der räumlichen Muster von Temperatur und Niederschlag. Die Referenzgröße ist dabei die Differenz zwischen dem Zeitbereich 2071–2100 der jeweiligen Szenarios und dem Zeitbereich 1961–1990 des Kontrolllaufs. Teilabschnitt 5.3 behandelt den zeitlichen Ablauf und zeigt das sich im 21. Jahrhundert aufbauende Klimasignal. In Teilabschnitt 5.4 wird die zeitliche Entwicklung abgeleiteter Größen wie Kenntagen und Extremen vorgestellt.

5.1 Jahresgang

In diesem Abschnitt finden sich so genannte Ringdiagramme. Sie ermöglichen einen Blick in die Feinstruktur des Klimasignals. Im Unterschied zu vielen anderen Darstellungen in diesem Bericht können auf Grund der Möglichkeiten der Datenauswertesoftware, mit der die Grafiken in diesem Abschnitt produziert wurden immer nur *Einzeldekaden* und nicht 30-jährige Perioden analysiert werden. Dies ist sicher eine Einschränkung, aber die Grundmuster des Klimasignals werden dennoch sichtbar.

5.1.1 Temperatur

In Abb. 5.1 findet sich ein Vergleich der Mitteltemperatur für die Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** als Differenz der Dekaden 2091–2100 minus 1981–1990. Es ist erkennbar, dass der Temperaturanstieg im Laufe des 21. Jahrhunderts bei Betrachtung der Wintermonate relativ stark ist (über 3,5 K, in einzelnen Monaten bis 4 K); auch der dem Herbst zugerechnete November zeigt dieses Verhalten. Das Frühjahr

ist durch besonders geringe Temperaturzunahme charakterisiert: Sie liegt unter 1 K, in einzelnen Monaten sogar unter 0,5 K. Sowohl in den übrigen Jahreszeiten als auch für das gesamte Jahr wird bei diesen Vergleichszeiträumen ein Temperatursignal von 2 bis 2,5 K errechnet.

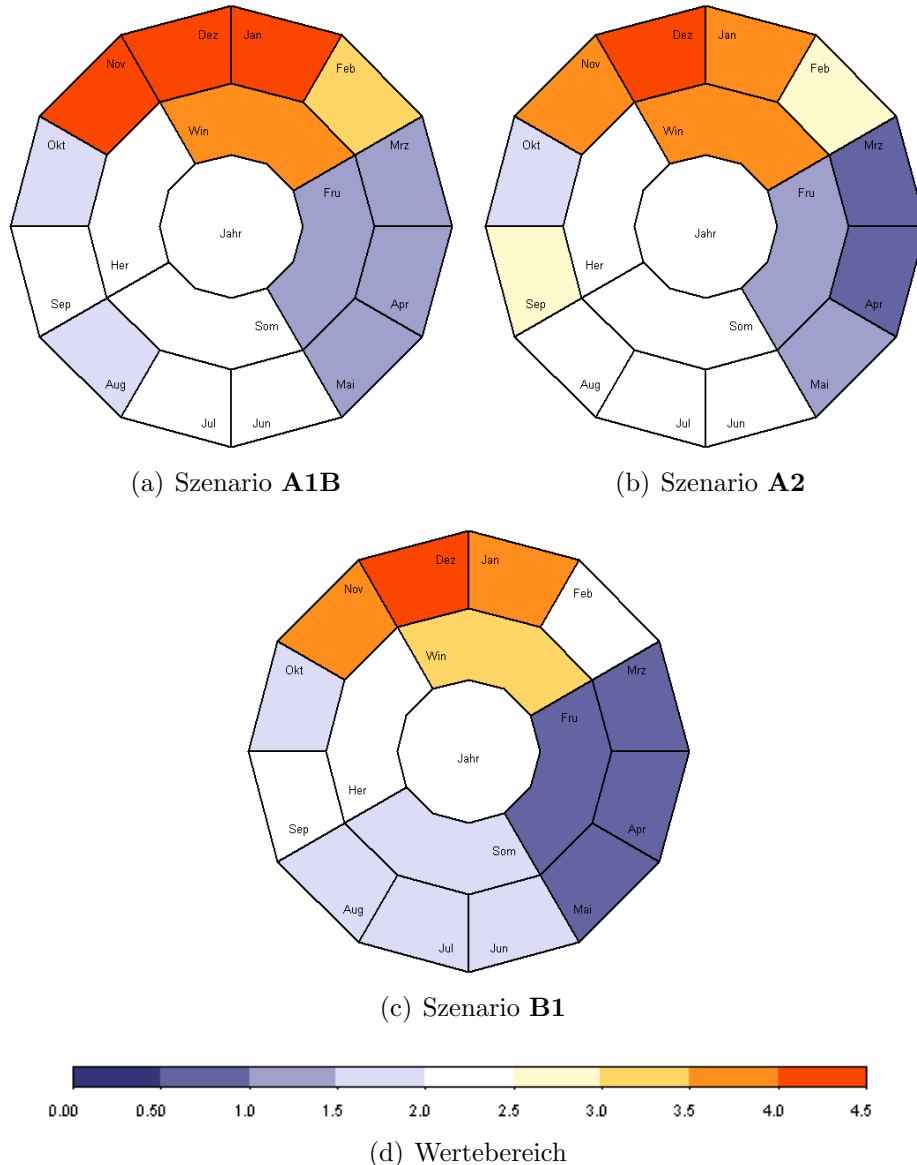


Abbildung 5.1: Ringdiagramme für die WETTREG-Simulationen (Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**) der Tagesmitteltemperatur als Differenz 2091–2100 minus 1981–1990. Der äußere Ring gibt die Monatswerte wieder; der mittlere Ring zeigt die Jahreszeitenwerte und im zentralen Zwölfeck findet sich der Jahreswert.

Die Tendenz, dass unter den Bedingungen von **A1B** die stärkste Erwärmung auftritt hat demnach zwei Gründe: (i) im Winter ist die Erwärmung in mehreren Monaten stärker als in den anderen Szenarios; (ii) im Frühjahr ist der Anstieg zwar auch sehr gering, aber etwas größer als in den anderen Szenarios. Szenario

5.1 Jahresgang

rio **B1** als dasjenige mit der insgesamt geringsten Erwärmung weist sowohl im Winter als auch im Frühjahr und Sommer im Ringdiagramm Werte auf, die eine Halbgradstufe unter denen der anderen Szenarios liegen.

5.1.2 Niederschlag

Die Entwicklung des Deutschlandmittels des Niederschlagstrends (2091–2100 minus 1981–1990) ist in Abb. 5.2 wiedergegeben.

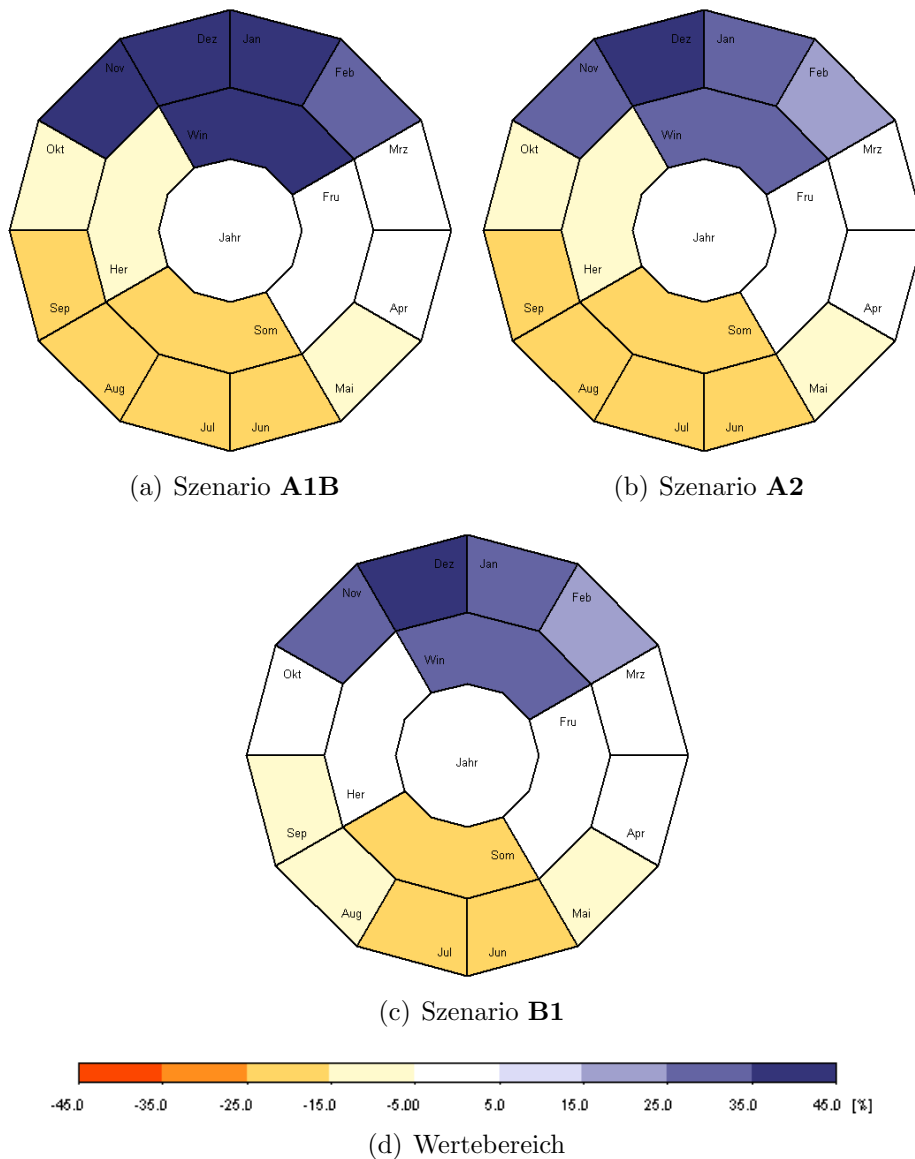


Abbildung 5.2: Wie Abb. 5.1, jedoch für den Niederschlag.

In dieser zeitlichen Auflösung zeigt sich das bereits in Abschnitt 4.2 in Grundzügen dargestellte Verhalten des Niederschlagstrends: Eine saisonale Betrachtung ist notwendig, da die Trendentwicklungen in Winter und Sommer ge-

genläufig sind. Zudem fällt bei der Betrachtung von Abb. 5.2, dass der Monat November in seinem Trendverhalten (deutliche Niederschlagszunahme) dem Wintermonaten ähnlicher als den Herbstmonaten ist. Außerdem ist ein weiterer Unterschied zwischen den **A**-Szenarios und **B1** im Sommer erkennbar: Die Monate August und September weisen bei **B1** einen etwas geringeren Abnahmetrend auf als dies in **A1B** und **A2** der Fall ist.

5.2 Vergleich der räumlichen Muster

Nach der Monats- und Jahreszeiten-spezifischen Betrachtung des Temperatursignals erfolgt in diesem Abschnitt eine ausführliche Beschreibung der regionalen Unterschiede des Klimasignals in Deutschland. Im Unterschied zur nur dekadeweise möglichen Betrachtung der monatlich und jahreszeitlich differenzierten Größen im vorigen Abschnitt kann in den Abschnitten 5.2 und 5.3 für die räumlichen Muster durchgeführten Untersuchungen eine Mittelung von drei Dekaden vorgenommen werden.

Hinweis zu den Mittelwerttabellen dieses Abschnitts: Die Daten in diesen Tabellen, wie z.B. Tab. 5.3 wurden nach einem in der Anmerkung auf Seite 18 beschriebenen Verfahren berechnet.

5.2.1 Temperatur

Eine für Aussagen der Klimaentwicklung sehr wichtige Größe ist, auch wegen ihrer Robustheit, die Tagesmitteltemperatur. Die Situation im Klima der Jetztzeit (aus dem mit ECHAM5-Kontrolllaufdaten angetriebenen WETTREG-Simulationen) sowie die Bandbreite der Entwicklung zum Ende des 21. Jahrhunderts infolge der drei Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** findet sich in Abb. 5.3. Die Klimatologie [Abb. 5.3 (a)] zeigt die charakteristischen Erscheinungen mit relativ hohen Temperaturwerten in den Tälern von Rhein und Mosel sowie der Kölner Bucht bis zum südwestlichen Niedersachsen. Weitere Gebiete mit höherer Temperatur sind in Teilen Brandenburgs, Sachsen-Anhalts und Sachsens erkennbar. Für das Auftreten relativ niedriger Werte ist die Höhenlage das wichtigste Erklärungsmuster.

In den Teilfiguren (b), (c) und (d) von Abb. 5.3 findet sich, in Gegensatz zu (a), die Temperaturabweichung, mit anderen Worten die auf das Klima der Jetztzeit modulierte Änderung bis zum Jahre 2100. Durch die Kartendarstellung besteht z.B. die Möglichkeit, Gebiete zu identifizieren, die sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts unterschiedlich stark erwärmen.

Die mit Abb. 5.3 korrespondierenden Flächenmittel finden sich in Tab. 5.1. Sie ergänzen die Aussagen hinsichtlich des Szenario-abhängigen Niveaus der Erwärmung.

Die WETTREG-Simulationen zeigen, je nach Szenario, ein Grundmuster, demzufolge die stärkste Erwärmungstendenz im gesamten Norden Deutschlands – mit Ausnahme der Küstenregionen – sowie im Voralpenraum liegt. Der Rotbraunton in Abb. 5.3 (b) und (c) weist auf Bereiche mit Werten bis +2,5 K

5.2 Vergleich der räumlichen Muster

Tabelle 5.1: Mittelwert der Abweichungen der Tagesmitteltemperatur im Vergleich von Szenario (2071–2100) minus Kontrolllauf (1961–1990) für die drei Szenarios in Abb. 5.3.

	A1B	A2	B1
ΔT_{mit} [K]	+2,3	+2,1	+1,8

Erwärmung zum Ende des 21. Jahrhunderts hin. Relative geringe Temperaturzunahme, verbreitet deutlich unter +2 K, findet sich in allen Szenarios neben der Nord- und Ostseeküste in den zentralen Mittelgebirgen und im Osten Bayerns. Die Akzente sind dabei von Szenario zu Szenario leicht unterschiedlich.

A1B Das Gesamtniveau der Erwärmung ist am höchsten. Nur in diesem Szenario findet sich ein relativ hohes Erwärmungsniveau mit +2,5 K im Südschwarzwald.

A2 Ein mittleres Erwärmungsniveau zwischen dem von **A1B** und **B1** tritt auf. Es liegt jedoch dichter an Ersterem als an Letzterem. Relativ hohe Werte im äußersten Südwesten treten in diesem Szenario nicht auf.

B1 Das Gesamtniveau der Erwärmung ist am niedrigsten.

Die Niveau-Unterschiede entsprechen qualitativ den in Kapitel 9 des 3. IPCC-Sachstandsberichts [Cubasch u. a. 2001] dokumentierten Erwärmungstendenzen (vgl. auch Abb. A.4 in Anhang A). Andere Untersuchungen, z.B. mit dynamischen Regionalisierungsmodellen zeigen insbesondere für den Alpenraum etwas höhere Werte der Erwärmung¹; es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass die in Abb. 5.3 dargestellte Größe ein Mittel über die letzten 30 Jahre des 21. Jahrhunderts ist und das sich aufbauende Klimasignal damit zwar robust aber nicht so scharf abbildet, als würden lediglich die Werte der letzten Dekade 2091–2100 verwendet.

¹Untersuchungen mit dem Modell REMO wurden auf einer Veranstaltung des Umweltbundesamtes am 25. April 2006 präsentiert. Die Webadresse ist:
<http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/veranstaltungen/04jacob2.pdf>

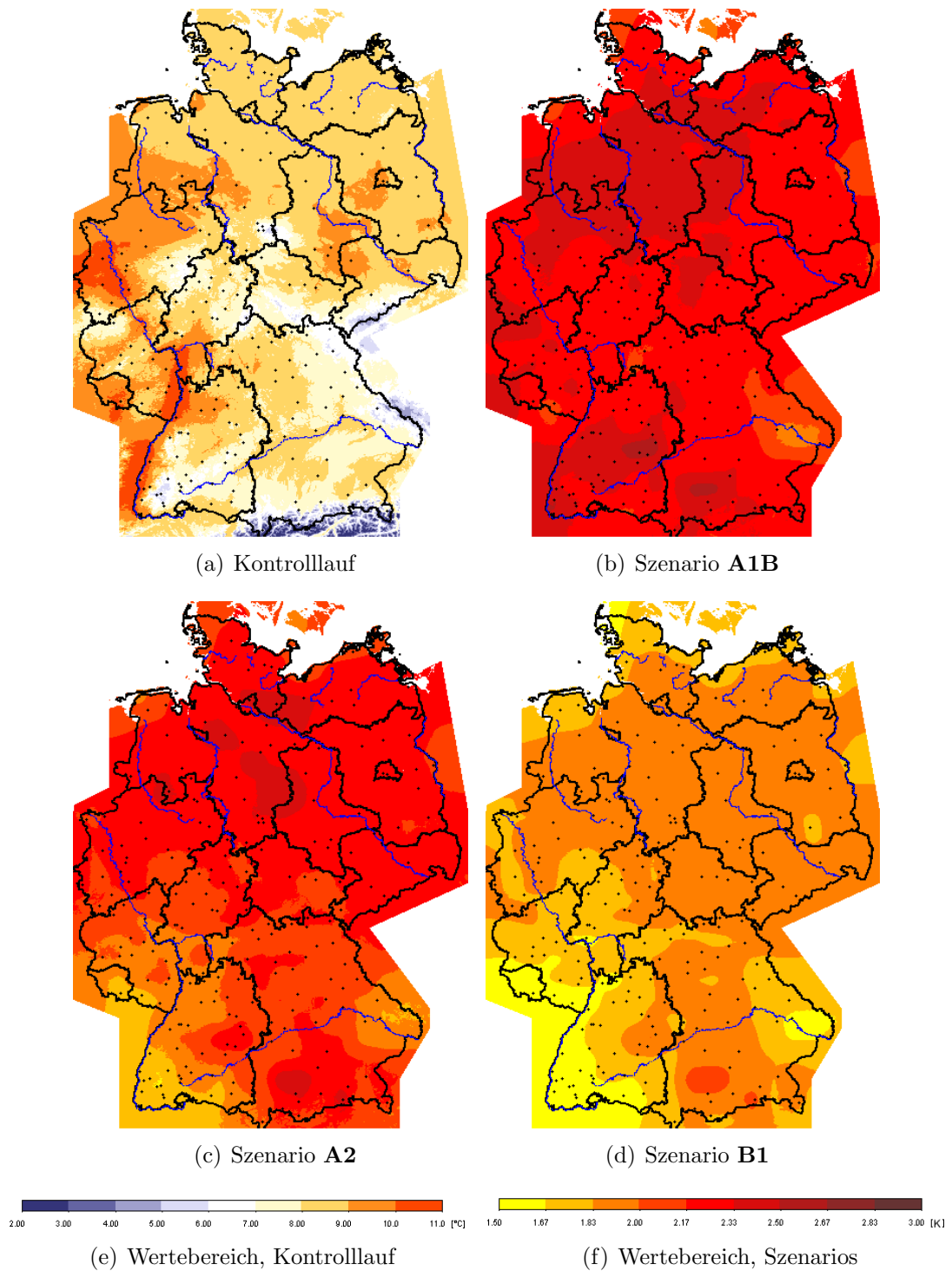


Abbildung 5.3: Kartendarstellung der Tagesmitteltemperatur für das gesamte Jahr. (a) ECHAM5-Kontrolllauf für den Zeitraum 1961–1990; (b)–(d) Differenz zwischen den Szenarios A1B, A2, bzw. B1, Zeitraum 2071–2100 und dem Kontrolllauf 1961–1990.

5.2.2 Niederschlag

Die Analyse des Niederschlags-Klimaänderungssignals zeigt als Grundstruktur, dass eine saisonale Zweiteilung mit gegenläufigen Trends existiert (s.a. die Ringdiagramme in Abschnitt 5.1.2). Daher werden die Interpretationen getrennt nach Sommer und Winter vorgenommen. Der Niederschlag ist eine in hohem Maße stochastische Größe, deren Verhalten von einem globalen Klimamodell mit deutlich geringerer Präzision als beispielsweise das Temperaturverhalten darstellbar ist. Dies wird untermauert durch die Validierung (vgl. Abschnitt 4.2), derzufolge zwischen Klima und Kontrolllauf Unterschiede von bis zu $\sim \pm 10\%$ auftreten. Es ist anzunehmen, dass die in diesem Abschnitt beschriebenen Signale ein vergleichbares „Grundrauschen“ besitzen. Aussagen gewinnen an Gewicht, wenn die Signale hinreichend stark sind, also etwa das 1,5-fache dieses Grundrauschens.

Jahr

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle zunächst kurz auf das Verhalten des Änderungssignals für das gesamte Jahr eingegangen. Dieses ist in der Tat deutlich geringer als das Signal in den Jahreszeiten. Per *Flächenbilanz* ist eine ganz leichte Abnahme von 2–4% zu verzeichnen, je nach Szenario; wie oben ausgeführt sind diese Signale im Grunde zu schwach, um sie interpretieren zu können. Großräumig findet sich in der Osthälfte Deutschlands sowie in Süddeutschland eine Abnahme und in einem Bereich zwischen den Zentralen Mittelgebirgen und den Benelux-Staaten eine Zunahme. Lokal liegt der Wertebereich zwischen einer *Jahresabnahme* von –15% in Mecklenburg-Vorpommern sowie in den Alpen und einer *Jahreszunahme* von +10% in den Mittelgebirgen Hessens und des Rheinlands. All diese Beträge sind jedoch sowohl in der Fläche als auch in den Maxima und Minima von deutlich geringerer Größenordnung als die Änderungen in den Jahreszeiten.

Sommer

Abb. 5.4 zeigt in Teilfigur (a) die Niederschlagsklimatologie für Deutschland im Sommer in Form der mit ECHAM5-Daten des *Kontrolllaufs* angetriebenen WETTREG-Regionalisierung. Dort ist die bekannte geografische Verteilung des Jahresniederschlags erkennbar, mit relativ niedrigen Werten im Nordosten und Osten Deutschlands sowie am Niederrhein und hohen Werten im Südwesten, dem Voralpenraum und den Alpen. Es sei daran erinnert, dass das WETTREG-Modell im Validierungszeitraum 1971–2000 den Sommer-Niederschlag im Südwesten leicht über- und im Nordwesten leicht unterschätzt.

Die Teilfiguren (b) bis (d) von Abb. 5.4 geben das Klimasignal bezüglich des Sommer-Niederschlags in der Bandbreite der drei Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** wieder. Die Flächenmittel dieser Kartendarstellungen finden sich in Tab. 5.2.

Tabelle 5.2: Mittelwert der prozentualen Änderung des Niederschlags im Sommer im Vergleich von Szenario (2071–2100) minus Kontrolllauf (1961–1990) für die drei Szenarios in Abb. 5.4.

	A1B	A2	B1
ΔN_{ied} [%]	–22,0	–21,0	–17,7

Die Grundtendenz ist, dass laut WETTREG-Szenarios zum Ende des 21. Jahrhunderts der Sommer-Niederschlag in der Größenordnung von 20% abnimmt. Quantitative Aussagen zu den *Flächenmitteln* sind wegen der relativ geringen Unterschiede nur eingeschränkt möglich; die Extrema hingegen weisen deutlichere Unterschiede auf. Für die drei Szenarios bedeutet dies:

A1B Das Niveau des Sommerniederschlags ist dem von **A2** ähnlich [Abb. 5.4 (b) und (c)]. Der stärkste lokale Rückgang findet sich im Nordosten Deutschlands, wo in Vorpommern verbreitet Werte unter –40% erreicht werden.

A2 Das Niveau des Sommerniederschlags ist dem von **A1B** ähnlich. Der Rückgang in Vorpommern liegt in einer Größenordnung von maximal –40%.

B1 Der Sommerniederschlag geht im Flächenmittel nicht so stark zurück wie bei den anderen Szenarios [Abb. 5.4 (d)]. In der Region mit dem relativ stärksten Rückgang (Vorpommern) liegt er bei diesem Szenario bei –25%.

Das heißt, dass der sommerliche Niederschlagsrückgang insbesondere dort ausgeprägt ist, wo bereits wenig Niederschlag fällt.

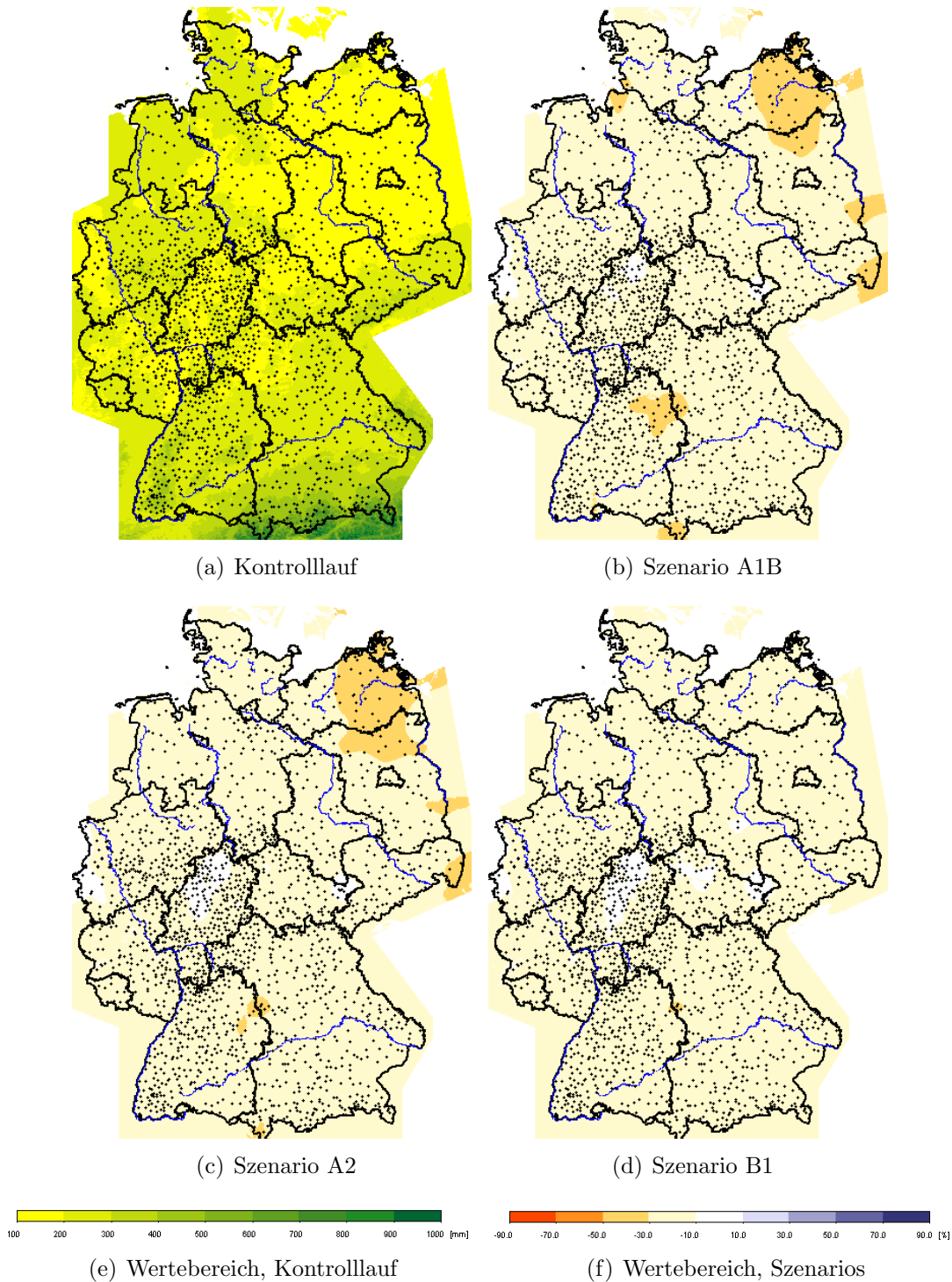


Abbildung 5.4: Kartendarstellung des Niederschlags. Jahreszeit: Sommer. (a) ECHAM5-Kontrolllauf für den Zeitraum 1961–1990; (b)–(d) Prozentuale Veränderung zwischen den Szenarios **A1B**, **A2**, bzw. **B1**, Zeitraum 2071–2100 und dem Kontrolllauf 1961–1990. Rot: Abnahme des Niederschlags zum Ende des 21. Jahrhunderts. Blau: Zunahme des Niederschlags zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Winter

Wie die Klimatologie für den Winter [Abb. 5.5 (a)] zeigt, fällt in dieser Jahreszeit Niederschlag von mehr als 400 mm insbesondere auf der Nordseite von Harz, Rheinischem Schiefergebirge, Thüringer Wald, Erzgebirge, Spessart, Odenwald und der Schwäbischen Alb sowie dem gesamten Schwarzwald und dem Alpenbereich.

Das Änderungssignal zum Ende des 21. Jahrhunderts [Abb. 5.5 (a)] umfasst, je nach Szenario eine Zunahme von 20% bis 30% des Winter-Niederschlags (s. Tab. 5.3). Lokal kann dies deutlich übertroffen werden.

A1B Wie auch bei **A2** und **B1** ist die Zunahme in der Westhälfte Deutschlands am stärksten, insbesondere im Bereich von Eifel und Hunsrück (dort bis zu +80%), Odenwald, Spessart und Rhön sowie Unterfranken (dort stellenweise über +70%). Dazu kommt eine Verstärkung an der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste und im Donautal. Ein relativ geringes Signal zeigt der Winterniederschlag im Osten Deutschlands, insbesondere in Brandenburg und Sachsen, sowie im Alpenraum. Bei diesem Szenario ist das Änderungssignal stärker ausgeprägt ist als bei **A2**.

A2 Dieses Szenario besitzt in seinem räumlichen Muster größere Ähnlichkeit mit **B1** als mit **A1B**. Die Extrema erreichen im Hunsrück +60% und in Unterfranken +50%.

B1 Das Niederschlags-Zunahmesignal ist bei diesem Szenario am geringsten und dem von A2 ähnlich.

Tabelle 5.3: Deutschlandmittel der prozentualen Änderung des Niederschlags im Winter im Vergleich von Szenario (2071–2100) minus Kontrolllauf (1961–1990) für die drei in Abb. 5.5 dargestellten Szenarios.

	A1B	A2	B1
$\Delta \text{Nied} [\%]$	+30,3	+22,3	+19,0

5.3 Zeitlicher Vergleich

Im Abschnitt 5.2 erfolgte die Beschreibung des Klimasignals eher phänomenologisch, also anhand seiner räumlichen Ausprägung am Ende des 21. Jahrhunderts. In diesem Abschnitt wird der *Prozess* des Klimawandels durch die zeitliche Veränderung des Signals dargestellt. Die Betrachtung des Signals erfolgt in zweifacher Hinsicht: (i) Eindimensional: Entwicklung der Flächenmittel und (ii) zweidimensional: Entwicklung der räumlichen Muster.

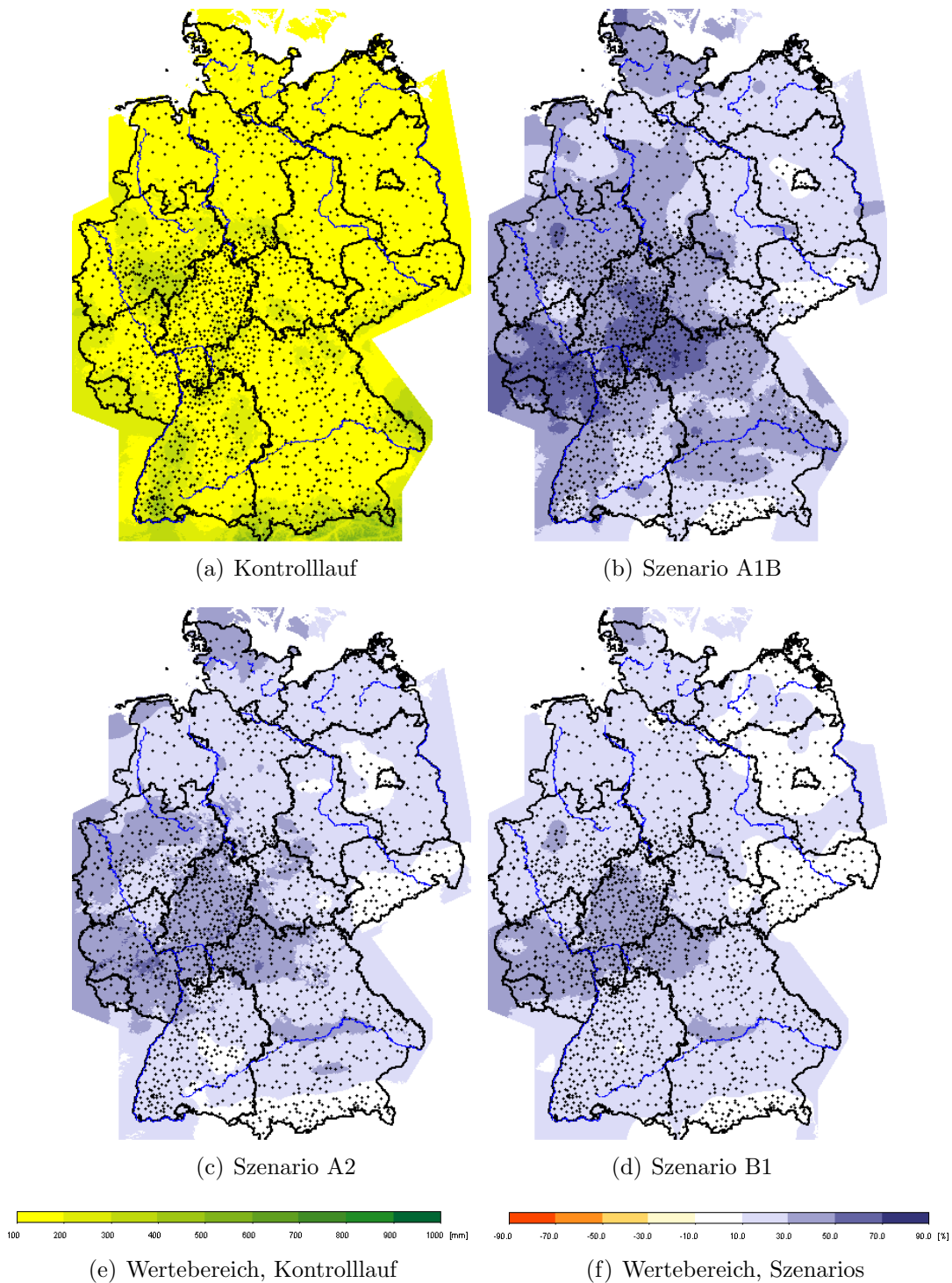


Abbildung 5.5: Wie in Abb. 5.4, jedoch für den Winter.

Es sei noch einmal daran erinnert, dass das statistische Verfahren WETTREG das Klimasignal nicht direkt aus den Szenariorechnungen des globalen Klimamodells herleitet sondern das Signal einzig über die Kausalkette von sich ändernden

Häufigkeiten von Wetterlagen in den täglichen Realisierungen des Klimamodells, die hohe/tiefe Temperaturwerte bzw. geringen/starken Niederschlag verursachen, bestimmt.

5.3.1 Temperatur

Eine gut nachvollziehbare und häufig verwendete Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Klimasignals ist die Veränderung des Flächenmittels im 21. Jahrhundert. Abb. 5.7 liegt eine Auswertung zu Grunde, bei der jeweils das 30-jährige Mittel der Tagesmitteltemperatur (für das gesamte Jahr) gebildet und dieses 3-Dekaden-Fenster in 10-Jahresschritten von 2001–2030 bis 2071–2100 bewegt wurde². Aufgetragen wurde die Differenz dieses 30-jährigen Mittels zum Flächenmittel über die Jahre 1961–1990 des Kontrolllaufs. Es zeigt sich ein klarer, stetiger Temperaturtrend, der zum Zeitraum 2041–2070, je nach Szenario, einen Wertebereich von +1,0 bis +1,6 K erreicht und zum Zeitraum 2071–2100 auf +1,8 bis +2,3 K ansteigt. Zwei Dinge fallen auf: (i) Die Szenarios **A1B** und **A2** liegen im kompletten Zeitbereich des 21. Jahrhunderts dicht beieinander und (ii) das Szenario **B1**, dem ein weltweit ressourcenschonendes Agieren zu Grunde liegt, in den ersten Jahren paradoxerweise mit einem *stärkeren* Temperatursignal verbunden³, was sich auch in den REMO-Untersuchungen findet. Diese Parallelität deutet darauf hin, dass sich hier eine Szenario-spezifische Temperaturentwicklung des sowohl REMO als auch WETTREG antreibenden ECHAM5-Modells auf die beiden Regionalisierungsverfahren „vererbt“. Abb. 5.6 zeigt dies. Dort ist der zeitliche Verlauf der Temperaturabweichung vom Kontrolllauf für die drei Szenarios dargestellt, wie er vom ECHAM5-Modell errechnet wird. Da mit ECHAM5 mehrere Läufe für jedes Szenario durchgeführt wurden⁴ sind nicht Linien sondern Bänder in Abb. 5.6 zu finden, die den Wertebereich der Szenario-Läufe angeben. Es fällt auf, dass die Szenarios **A1B** und **A2** in ECHAM5 bezüglich ihres Verlaufs im 21. Jahrhundert nur wenig unterschiedlich sind. Zudem treten die Unterschiede zwischen den A-Szenarios und **B1** erst ab der Mitte des 21. Jahrhunderts deutlich in Erscheinung und das oben geschilderte Phänomen der relativ starken Temperaturänderung im ersten Drittel des Jahrhunderts beim Szenario **B1** ist ebenfalls erkennbar (in Abb. 5.6 durch ein rotes Oval gekennzeichnet).

Tab. 5.4 stellt die Flächenmittel für die nicht-überlappenden Zeitbereiche 2011–2040, 2041–2070 und 2071–2100 und die drei Szenarios dar. Zudem ist die flächenhafte Entwicklung des Erwärmungssignals in Abb. 5.8–5.10 für die drei

²Eine vergleichbare, wenn auch in kleineren Zeitschritten gerechnete Darstellung wurde im Rahmen einer Veranstaltung des Umweltbundesamtes am 17. Oktober 2006 vorgestellt. In ihr sind Ergebnisse von WETTREG und dem dynamischen Regionalisierungsmodell REMO zu finden. Die Webadresse ist:

<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Anpassung-Klimaaenderung.pdf>

³Es ist jedoch zu beachten, dass dieses Signal in einem Wertebereich der Erwärmung auftritt, der bei Weitem nicht an die Signalstärke am Ende des 21. Jahrhunderts heranreicht

⁴In diesem Projekt wurde für die Auswertungen mit REMO sowie mit WETTREG der Lauf 1 benutzt.

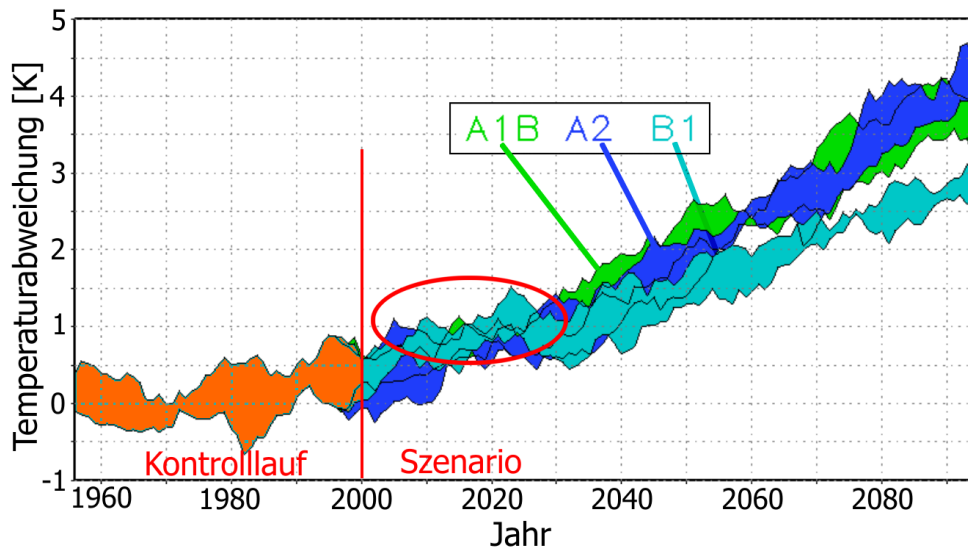


Abbildung 5.6: Zeitlicher Verlauf der Temperatur (Deutschlandmittel) für den Kontrolllauf und die SRES-Szenarioläufe **A1B**, **A2** und **B1** des ECHAM5-Modells. Das rote Oval hebt einen Bereich im ersten Drittel des 21. Jahrhunderts hervor, in dem das Signal von **B1** nicht unterhalb derjenigen von **A1B** und **A2** liegt, wie es für den Rest des Jahrhunderts typisch ist. (Quelle: Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg)

Szenarios dargestellt. Anmerkung: Karten 5.8 (c) und 5.3 (b), sowie die Paa-re 5.9 (c) / 5.3 (c) und 5.10 (c) / 5.3 (d) stellen das selbe dar, auch wenn die Farben nicht identisch sind. Wegen der besseren räumlichen Auflösbarkeit des Signals, berechnet aus der Differenz zwischen dem Kontrolllauf und dem Szenario-Zeitabschnitt 2071–2100 wurde in Abb. 5.3 (b)–(d) der Wertebereich auf +1,5 bis +3,0 K festgelegt, während er in den Abbildungen 5.8–5.10 auf 0 bis +3,0 K gesetzt wurde, um dem sich aufbauenden Erwärmungssignal besser gerecht zu werden.

Die Charakteristika der Signalentwicklung im 21. Jahrhundert sind je nach Szenario unterschiedlich:

- A1B** Zu Beginn des 21. Jahrhunderts ist ein schwacher Ost-West-Gradient mit geringerem Erwärmungstrend in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen erkennbar. Die Strukturen sind jedoch von geringer Intensität und erst zum Ende des Jahrhunderts zeigt sich eine deutliche Ausprägung der Nord-Süd-Unterschiede; diese nehmen dann allerdings höhere Beträge an, als bei den anderen Szenarios.
- A2** Die Nord-Süddifferenzierung des Signals gewinnt zur Mitte des 21. Jahrhunderts Kontur und verstärkt sich zum Ende des Jahrhunderts. Dann wird auch die nicht so starke Erwärmung im Südwesten klarer erkennbar.
- B1** Eine deutlich Nord-Süd-Differenzierung tritt zu keiner Zeit auf. Das bestimmende Muster ist die geringere Erwärmung im Südwesten; es tritt 2041–2070 etwas klarer in Erscheinung als 2071–2100.

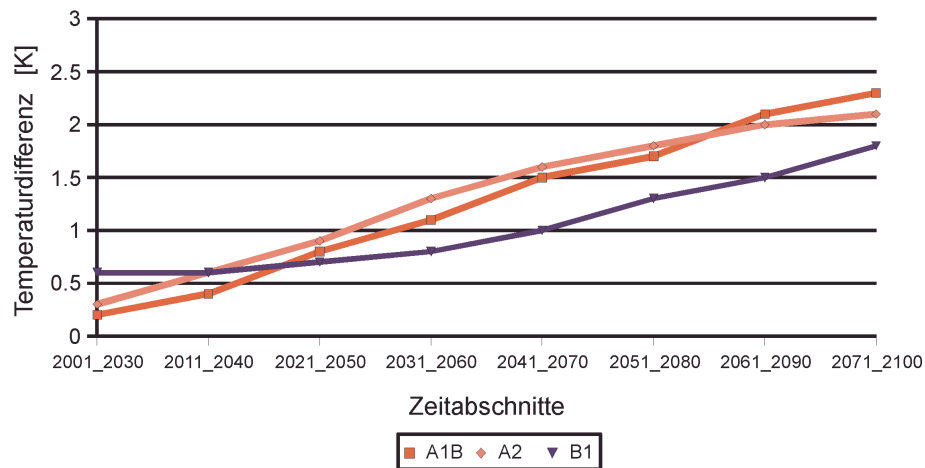


Abbildung 5.7: Zeitlicher Verlauf der Differenzen zwischen Szenario (30-jährige, gleitende Zeiträume) und Kontrolllauf (Zeitraum 1961–1990) für das Jahresmittel der Tagesmitteltemperatur im WETTREG-Modell. Dargestellt sind die Gebietsmittel für Deutschland im gesamten Jahr.

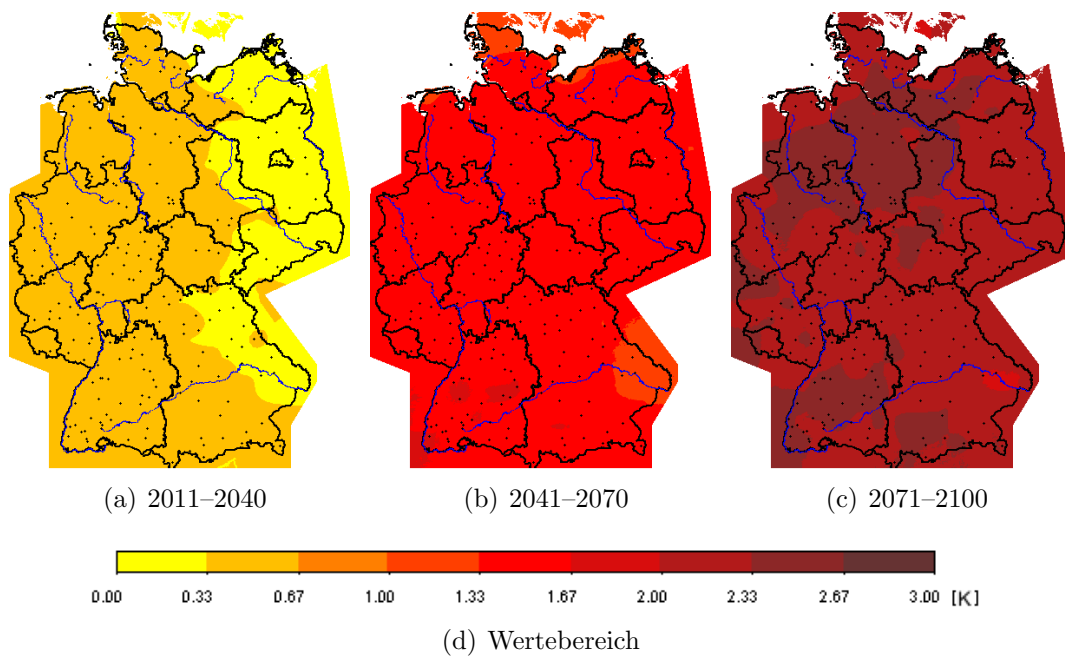


Abbildung 5.8: Kartendarstellung des zeitlichen Verlaufs der Differenzen zwischen dem Szenario **A1B** (drei fortschreitende 30-jährige Zeiträume) und dem Kontrolllauf (Zeitraum 1961–1990) für das Jahresmittel der Tagesmitteltemperatur. Die Flächenmittel sind in Abb. 5.7 dargestellt.

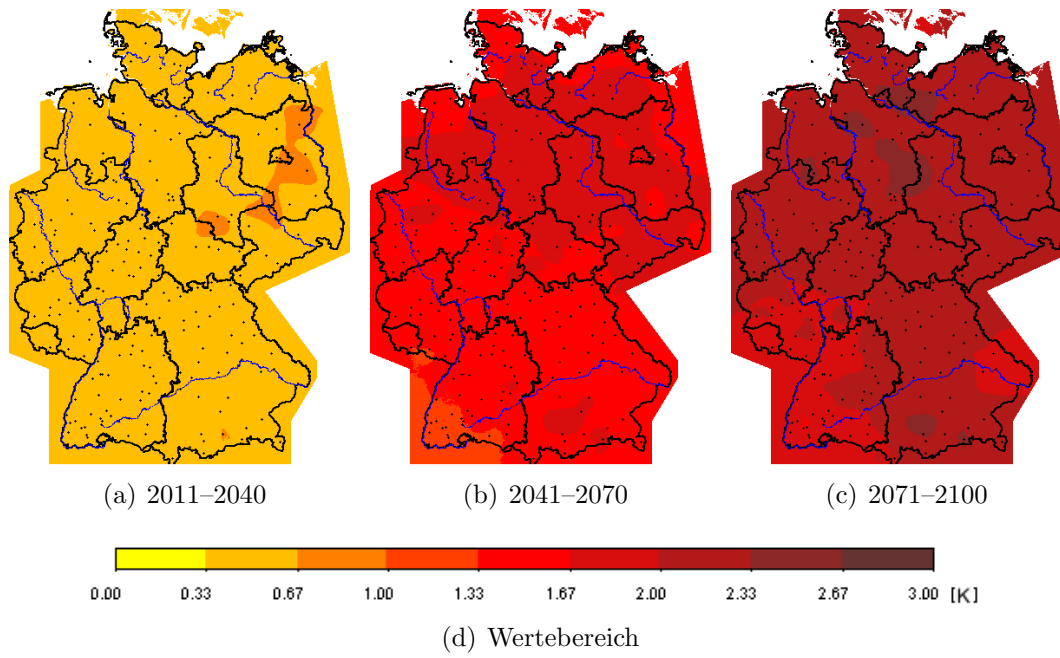


Abbildung 5.9: Wie in Abb. 5.8, jedoch für das Szenario **A2**.

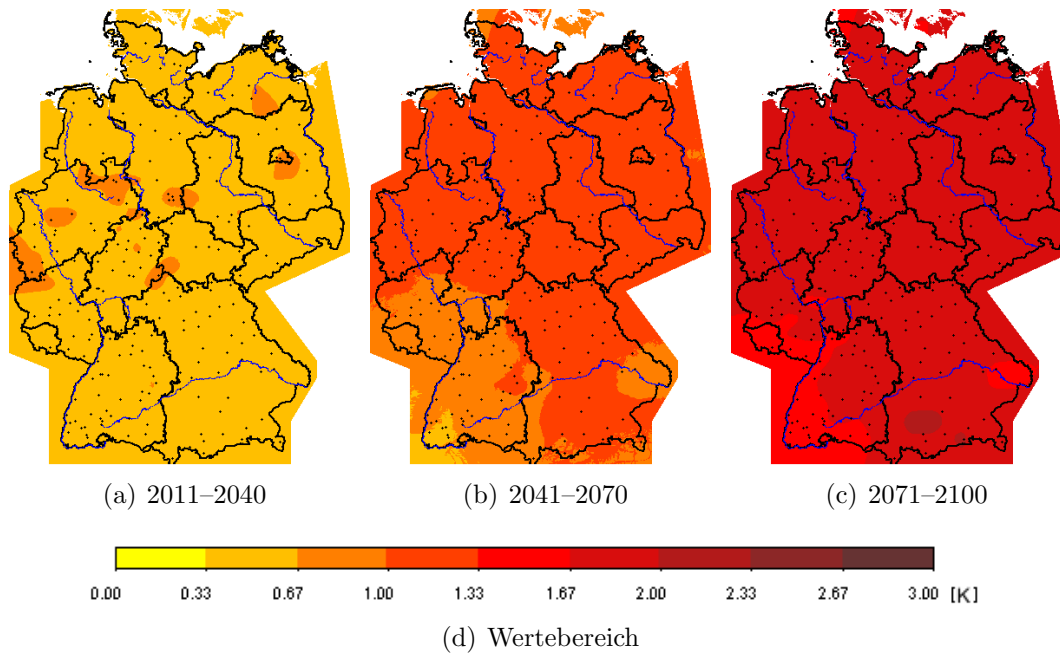


Abbildung 5.10: Wie in Abb. 5.8, jedoch für das Szenario **B1**.

Tabelle 5.4: Deutschlandmittel der Abweichungen der Tagesmitteltemperatur im Vergleich von Klima minus Kontrolllauf. Die Kartendarstellungen für die drei Szenarios finden sich in Abb. 5.8, 5.9 bzw. 5.10. Dargestellt sind die Werte für verschiedene 30-jährige Szenario-Perioden.

	2011–2040	2041–2070	2071–2100
ΔT_{mit} [K] A1B	+0,6	+1,5	+2,3
ΔT_{mit} [K] A2	+0,8	+1,6	+2,1
ΔT_{mit} [K] B1	+0,8	+1,0	+1,8

5.3.2 Niederschlag

Das Niederschlagssignal ist nicht nur in seiner Ausprägung, sondern auch in seiner Entwicklung komplexer als das Temperatursignal. In Abschnitt 5.1.2 wurde das Trendverhalten des monatlich und jahreszeitlich gemittelten Niederschlags analysiert. In Abschnitt 5.2.2 wurde beschrieben, wie sich das räumliche Signal des Sommer- bzw. Winterniederschlags in der Differenz zwischen der Periode 2071–2100 der drei Szenarios und dem Kontrolllauf 1961–1990 darstellt. In diesem Abschnitt geht es um den zeitlichen Verlauf. Wie in Abschnitt 5.3.1 bei der Temperatur, wird die prozentuale Änderung des Niederschlags für einen gleitenden 30-jährigen-Zeitraum in Relation zum Kontrolllauf untersucht. Bezüglich der Beträge der unten beschriebenen prozentualen Abweichungen sei einschränkend hinzugefügt, dass Aussagen über nur wenig unterschiedliche Werte (wie $\sim 5\%$ beim Sommerniederschlag) keine hohe Belastbarkeit besitzen.

Sommer

Das Niederschlagsabnahmesignal – gemittelt über die Fläche – in seiner zeitlichen Entwicklung für den Sommer ist in Abb. 5.11 dargestellt. Für die beiden Szenarios **A1B** und **A2** ist ein sowohl quantitativ als auch qualitativ ähnlicher Verlauf mit einer gleichförmigen, anfangs stärkeren und gegen Ende des Jahrhunderts weniger starken Abnahme erkennbar, die Werte von rund -15% zur Mitte und -20% zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht. Der Verlauf ist bei **B1** deutlich anders, denn in diesem Szenario ändert sich das Signal des Sommerniederschlags bis zur Periode 2031–2060 fast gar nicht und fällt dann ebenfalls in einen – wenn auch schwächer als bei **A1B** und **A2** ausgeprägten – Abwärtstrend, der zum Ende des Jahrhunderts einen Wert leicht unter -15% erreicht.

Tabelle 5.5 zeigt die Mittel der nicht-überlappenden 30-jährigen Perioden 2011–2040, 2041–2070 und 2071–2100, die gleichzeitig die Flächenmittel der in Abb. 5.12–5.14 dargestellten Entwicklung sind.

5.3 Zeitlicher Vergleich

Tabelle 5.5: Deutschlandmittel der prozentualen Änderung des Niederschlags im Sommer im Vergleich von Szenario minus Kontrolllauf (1961–1990). Die Kartendarstellungen für die drei Szenarios finden sich in Abb. 5.12, 5.13 bzw. 5.14. Dargestellt sind die Werte für verschiedene 30-jährige Perioden der Szenarios.

	2011–2040	2041–2070	2071–2100
ΔN_{ied} [%] A1B	–6,6	–17,3	–22,0
ΔN_{ied} [%] A2	–7,0	–16,6	–21,0
ΔN_{ied} [%] B1	–7,8	–12,5	–17,7

Beim Vergleich der zeitlichen Entwicklungen in den Szenarios (Abb. 5.12–5.14) fällt auf, dass sich beim Signal des Sommer-Niederschlags die erkennbaren regionalen Unterschiede erst in der letzten 30-jährigen Periode abzeichnen: Ein etwas stärkeres Rückgangssignal in Mecklenburg-Vorpommern, das aber in **B1** nicht deutlich in Erscheinung tritt.

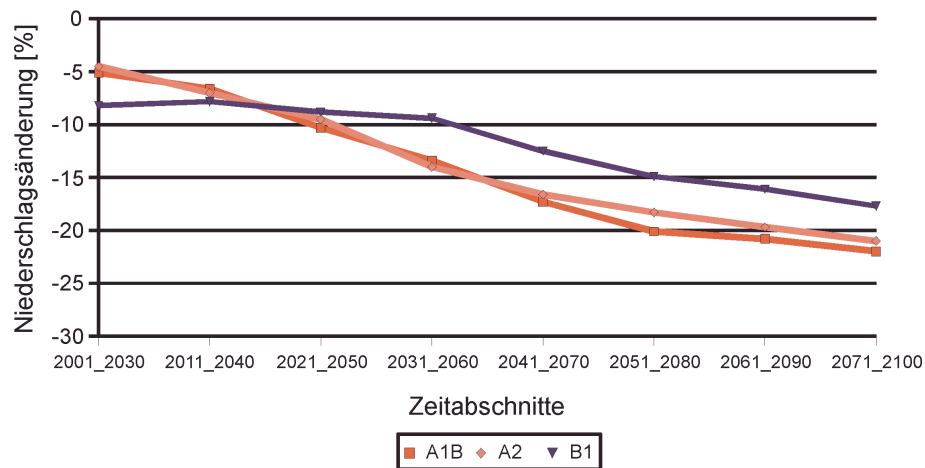


Abbildung 5.11: Zeitlicher Verlauf der prozentualen Änderung des Sommer-Niederschlags zwischen Szenario (30-jährige, gleitende Zeiträume) und Kontrolllauf (Zeitraum 1961–1990). Dargestellt sind die Gebietsmittel für Deutschland.

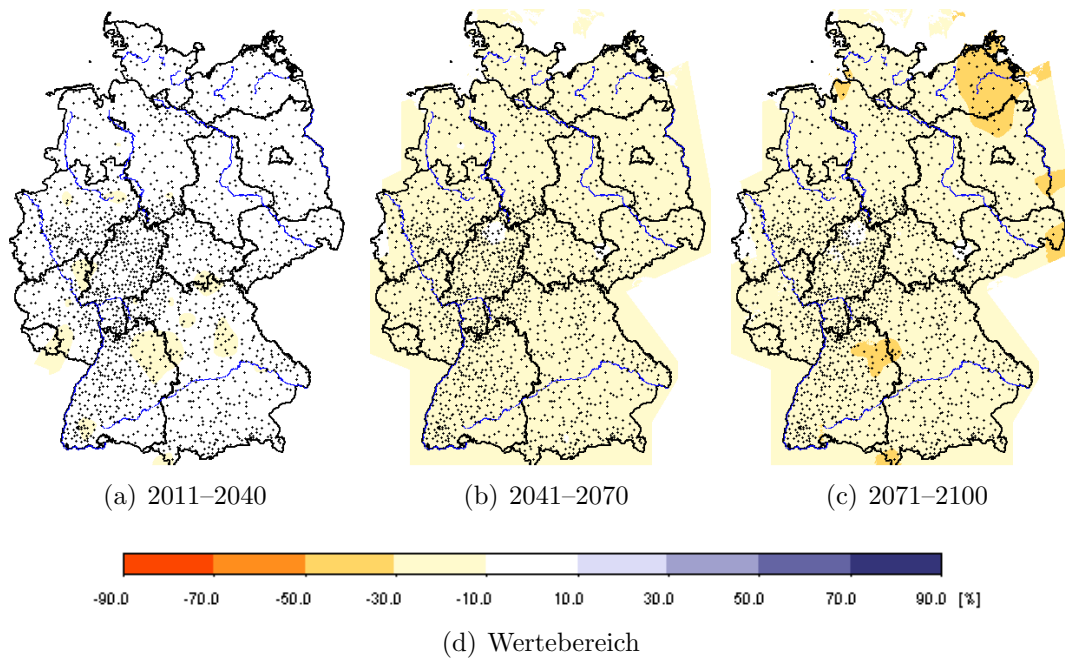


Abbildung 5.12: Kartendarstellung des zeitlichen Verlaufs der Differenzen zwischen dem Szenario **A1B** (drei fortschreitende 30-jährige Zeiträume) und dem Kontrolllauf (Zeitraum 1961–1990) für die prozentuale Änderung der Niederschlagsmenge im Sommer. Die Flächenmittel sind in Abb. 5.11 dargestellt.

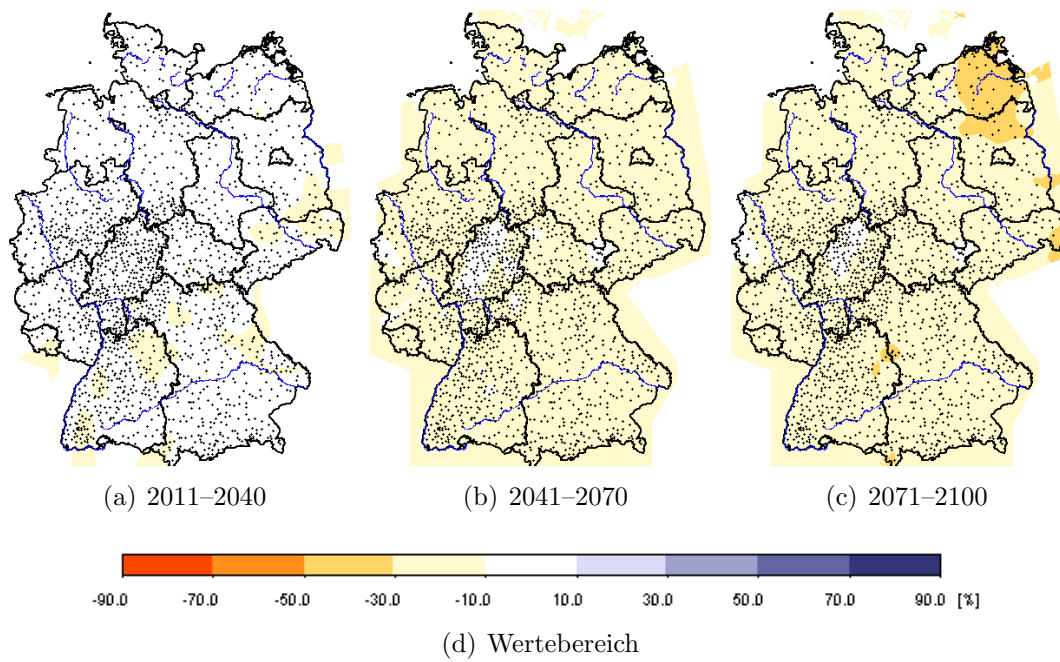


Abbildung 5.13: Wie in Abb. 5.12, jedoch für das Szenario **A2**.

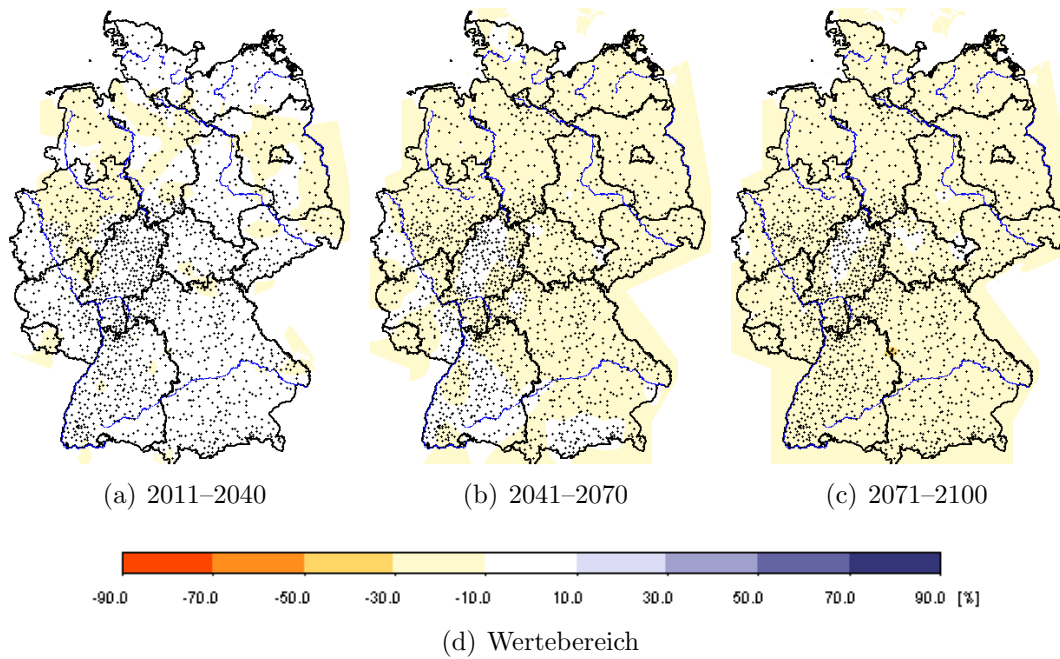


Abbildung 5.14: Wie in Abb. 5.12, jedoch für das Szenario **B1**.

Winter

Die Zunahme des Winter-Niederschlags ist als zeitlicher Verlauf des Flächenmittels in Abb. 5.15 dargestellt. Einige Charakteristika des Sommer-Verhaltens in den Szenarios finden sich auch hier – wenngleich mit umgekehrtem Vorzeichen: Die beiden Szenarios **A1B** und **A2** haben einen gleichsinnigen Verlauf, auch wenn sie sich zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter voneinander entfernen als im Sommer. In **B1** verlässt das Signal den Bereich zwischen -5 und -10% bis zum Abschnitt 2051–2080 nicht und liegt für den Rest des Jahrhunderts klar unter dem der Szenarios **A1B** und **A2**.

Die zeitliche Entwicklung zeigt den Aufbau des Zunahmesignals beim Winter-Niederschlag mit Schwerpunkt Hunsrück–Oberfranken. Dabei wird in **A1B** und **A2** in der Mitte des 21. Jahrhunderts eine geringere Signalstärke in Brandenburg und Sachsen verzeichnet, während in **B1** die gesamte Nordhälfte Deutschlands dieses Verhalten zeigt.

Tabelle 5.6: Deutschlandmittel der prozentualen Änderung des Niederschlags im Winter im Vergleich von Szenario minus Kontrolllauf (1961–1990). Die Kartendarstellungen für die drei Szenarios finden sich in Abb. 5.16, 5.17 bzw. 5.18. Dargestellt sind die Werte für verschiedene 30-jährige Perioden der Szenarios.

	2011–2040	2041–2070	2071–2100
ΔNied [%] A1B	+5,9	+14,1	+30,3
ΔNied [%] A2	+7,0	+15,3	+22,3
ΔNied [%] B1	+11,1	+7,4	+19,0

Fazit

In der Zusammenschau ist festzustellen, dass sich in den WETTREG-Szenarios **A1B** und **A2** eine größere Polarisierung – Abnahmeneigung im Sommer und Zunahmeneigung im Winter – des Niederschlagsklimas abzeichnet, wogegen sich das **B1**-Szenario in diesen Jahreszeiten weniger stark von den jetzigen Klimaverhältnissen entfernt.

5.3 Zeitlicher Vergleich

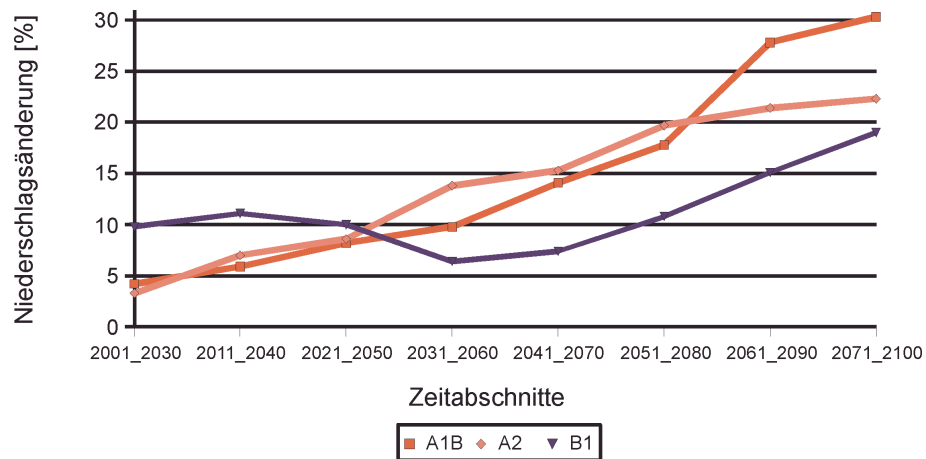


Abbildung 5.15: Wie in Abb. 5.7, jedoch für die prozentuale Änderung des Niederschlags im Winter.

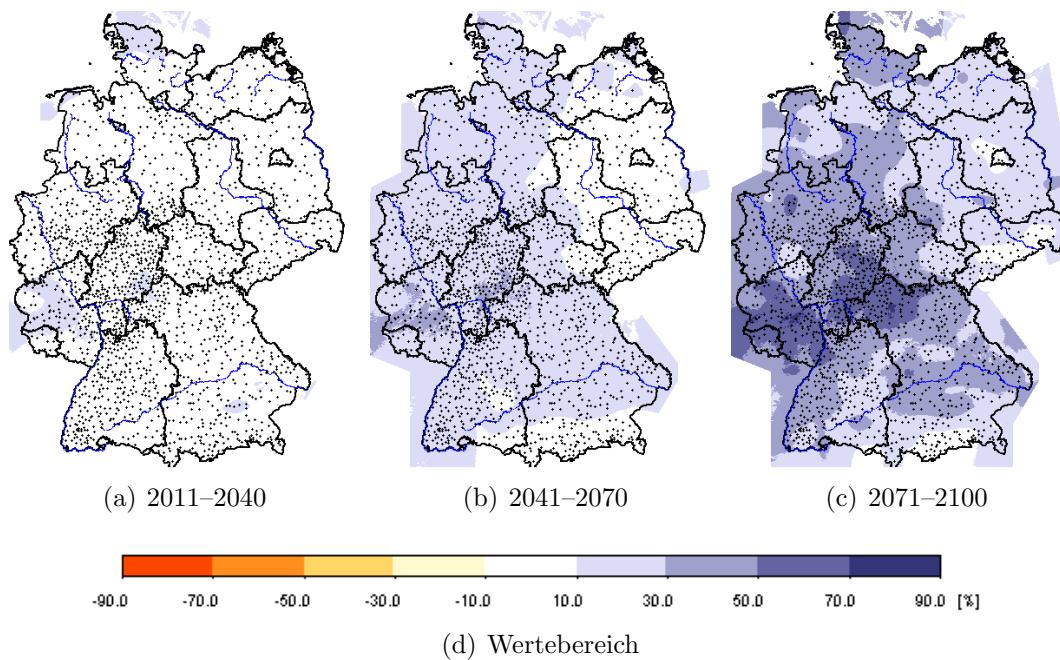


Abbildung 5.16: Wie in Abb. 5.12, jedoch für Szenario **A1B** im Winter. Die Flächenmittel sind in Abb. 5.15 dargestellt.

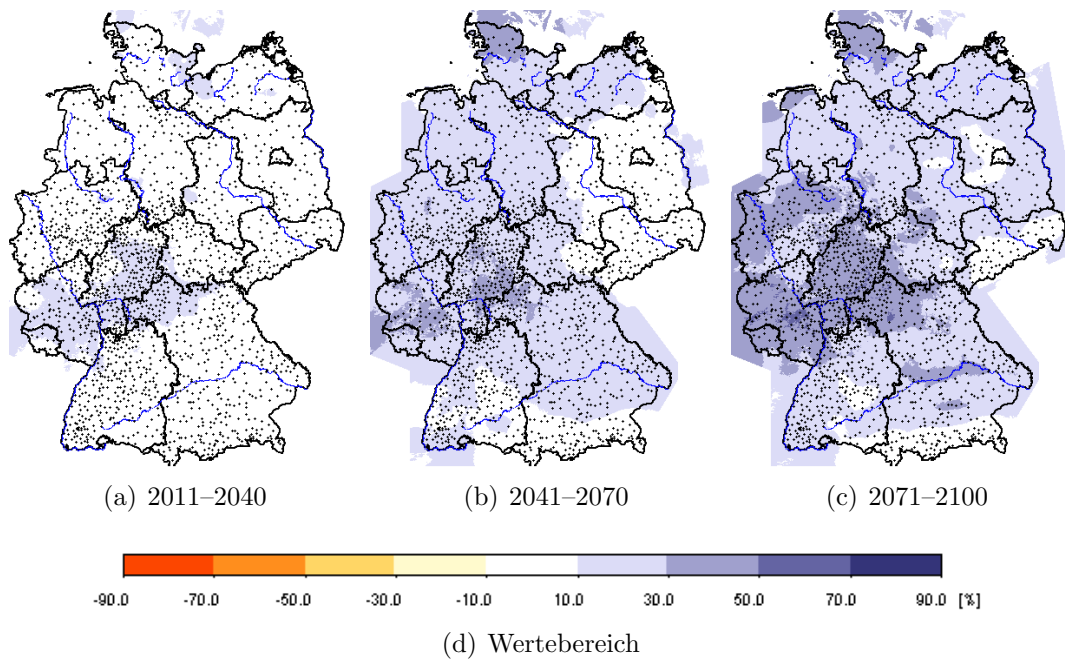


Abbildung 5.17: Wie in Abb. 5.16, jedoch für das Szenario **A2**.

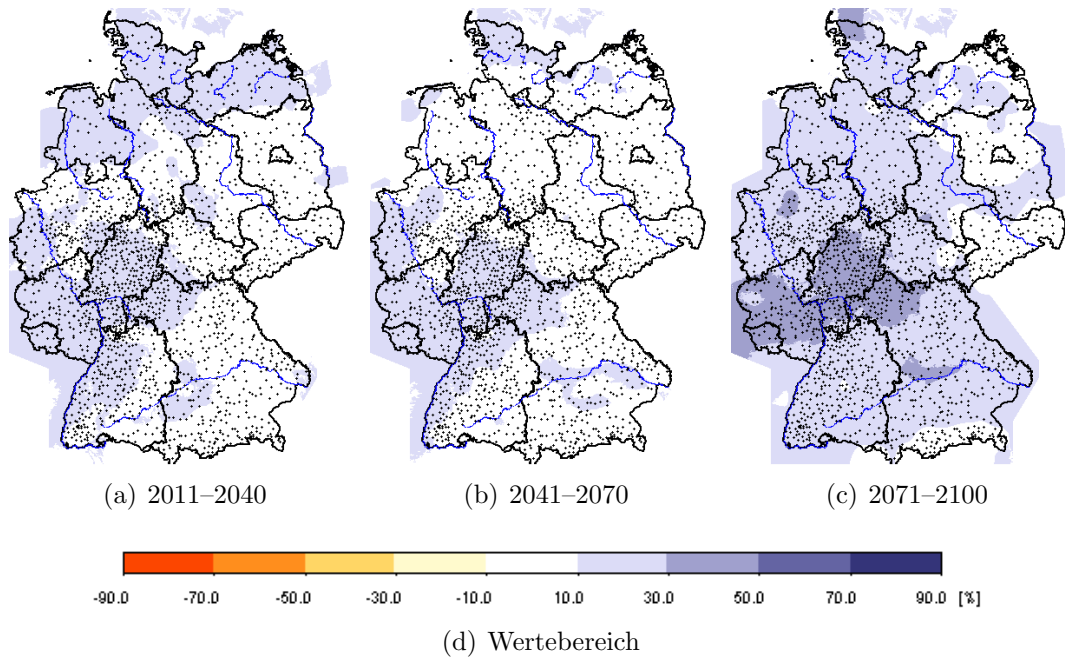


Abbildung 5.18: Wie in Abb. 5.16, jedoch für das Szenario **B1**.

5.4 Zeitliche Entwicklung abgeleiteter Größen

In diesem Abschnitt werden exemplarisch fünf abgeleitete Variablen sowohl in ihrem Verhalten in den Szenarios dargestellt als auch ihre Veränderung von der Jetztzeit zum Ende des 21. Jahrhunderts beschrieben. Zur Beschreibung wurden in der Regel zwei Stationen ausgewählt: Berlin-Dahlem und München. Sie sollen in Grundzügen die Entwicklung in den Regionen verdeutlichen. Eine ausführlichere Bewertung der Klimaänderung aufgrund der Temperatur- und Niederschlags-ergebnisse der WETTREG-Szenarios findet sich in Abschnitt 6.7.

5.4.1 Tageshöchsttemperatur

Untersuchung von Häufigkeitsverteilungen

Die Entwicklung der Tageshöchsttemperatur wird zunächst mit Hilfe des Verhaltens ihrer Häufigkeitsverteilungen dokumentiert. Es handelt sich dabei um den mit „nor“ bezeichneten Ausschnitt der 10 Simulationen (s. Abschnitt 3.5). Die Subfiguren von Abb. 5.19 sind so aufgebaut, dass die blauen Balken immer den Kontrolllauf 1981–1990 und die roten Balken die Häufigkeiten im jeweiligen Szenario für 2091–2100 zeigen⁵.

Die Erwärmung wird durch die Verschiebung der gesamten Häufigkeitsverteilungen in Richtung höherer Werte erkennbar. Sie ist jedoch nicht formtreu, denn die Verteilungen verlieren an ihrer linken Flanke (niedrige Tagesmaximumtemperatur) stark und der Zugewinn erfolgt hauptsächlich im Bereich der mittleren Werte und der „mittleren Extreme“, und nicht so sehr bei den höchsten Werten im rechten Fünftel der Verteilung. Mit anderen Worten werden sehr heiße Tage nicht in dem selben Maße häufiger, wie die Tage mit besonders niedrigem Tagesmaximum seltener werden. Es treten auch nicht gehäuft neue Extremwerte auf, wiewohl das WETTREG-Verfahren diese zu erzeugen in der Lage ist⁶. Mehr dazu findet sich im nächsten Unterabschnitt.

An vielen anderen Stellen wurde die Entwicklung von Klimaparametern unter den Bedingungen der Szenarios beschrieben. In den flächengemittelten Werten oder den zeitlichen Verläufen von Temperatur und Niederschlag waren die Unterschiede oftmals deutlich erkennbar. Mit Bezug auf die Häufigkeitsverteilungen der Tageshöchsttemperatur treten die Unterschiede zwischen den Szenarios jedoch nicht so klar in Erscheinung. Der im vorigen Absatz beschriebene Verschiebungseffekt, insbesondere der Rückgang der Häufigkeit in den Klassen im Bereich der an der linken Verteilungsflanke tritt aber in den Szenarios **A1B** und

⁵Die zur Auswertung eingesetzte Software ist zwar im Falle von Kartendarstellungen in der Lage, Daten, die über mehr als eine Dekade gemittelt sind, darzustellen. Für Analysen abgeleiteter Größen oder spezielle Grafiken, wie in diesem Abschnitt, beträgt der Mittelungszeitraum jedoch 10 Jahre.

⁶Bei WETTREG geschieht das durch das Auswerten von Veränderungen in dynamischen, thermodynamischen und hydrologischen Feldern der Atmosphäre in Form von Regressionsbeziehungen und Verteilungsanpassungen (vgl. Abschnitt 3.4).

A2 etwas klarer zutage als in **B1**. Diese Beobachtung ist konsistent mit den Untersuchungen anderer thermischer Größen z.B. Minimum und Mitteltemperatur in [Enke u. a. 2006] und der Untersuchung von Häufigkeitsverteilungen der Maximumtemperatur für andere Stationen in [Spekat u. a. 2006b] oder in [Spekat u. a. 2006a].

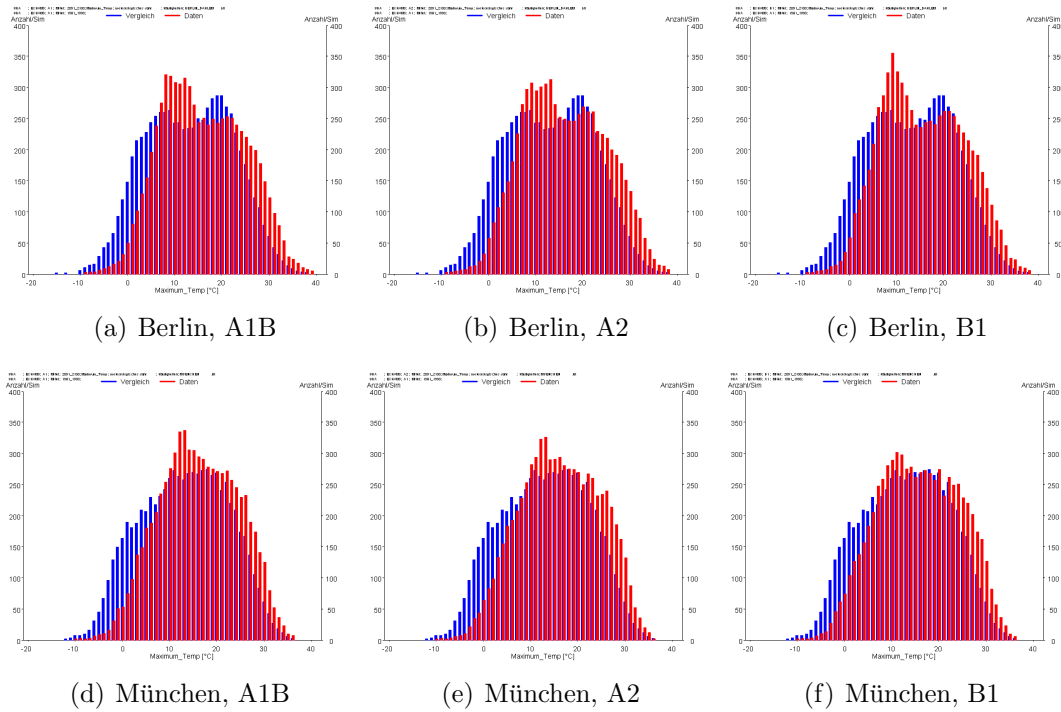


Abbildung 5.19: Häufigkeitsverteilungen der Tageshöchsttemperatur aus den Zeitbereichen 1981–1990 (blaue Balken) und 2091–2100 (rote Balken) für die Stationen Berlin-Dahlem (obere Reihe) und München (untere Reihe) sowie die drei Szenarios. Die dargestellten Werte sind das Mittel aus den 10 WETTREG-Simulationen der entsprechenden Dekaden.

Absolute Temperaturmaxima

In den Häufigkeitsverteilungen der Maximumtemperatur (Abb. 5.19) deutete sich bereits an, dass am Ende des 21. Jahrhunderts zwar im Bereich der höchsten Temperaturmaxima ein leichter Zuwachs zu verzeichnen ist. Auch wurden etwas höhere neue Temperaturextreme verzeichnet, aber diese nicht in drastisch höheren Wertebereichen.

Zur Illustration der neu auftretenden Extreme wurde an zwei Stationen eine eingehende Betrachtung der in der Dekade 2091–2100 durch WETTREG simulierten Reihen der Tageshöchstwerte durchgeführt. Es ergab sich:

- *Station Berlin-Dahlem:* Der höchste Tageswert in den zur Verfügung stehenden Beobachtungen war 37,7 °C. Es wird abgeschätzt, dass dieser in der

5.4 Zeitliche Entwicklung abgeleiteter Größen

Dekade 2091–2100 rund alle 2 bis 4 Jahre überschritten wird – das absolute von WETTREG simulierte Tagesmaximum liegt bei 39,5 °C.

- *Station München:* An dieser Station wurde ein absolutes Maximum von 35,7 °C in den zur Verfügung stehenden Beobachtungen verzeichnet. In der letzten Dekade des 21. Jahrhunderts wird dieser laut WETTREG-Simulationen alle 3 bis 8 Jahre überschritten. Das simulierte absolute Maximum liegt bei 37,1 °C.

Außerdem ist anzumerken, dass die höchsten Temperaturextreme nicht im Szenario mit dem stärksten Temperaturanstieg (**A1B**) auftreten: In Berlin-Dahlem bei **A2** und in München bei **B1**. Sie liegen jedoch zwischen den Szenarios nur wenige Zehntelgrade auseinander.

5.4.2 Kenntage

Deutlicher als bei den Häufigkeitsverteilungen der Maximumtemperatur ist das Klimasignal in den so genannten Kenntagen sichtbar, deren Definition in Tab. 5.7 gegeben ist.

Tabelle 5.7: Definitionen der Kenntage.

<i>Name</i>	<i>Definition</i>
Eistag	Maximumtemperatur ≤ 0 °C
Frosttag	Minimumtemperatur ≤ 0 °C
Sommertag	Maximumtemperatur ≥ 25 °C
Heißer Tag	Maximumtemperatur ≥ 30 °C
Tropennacht	Minimumtemperatur ≥ 20 °C

Schwellwertüberschreitungen wurden bereits bei der Validierung der Temperatur-Simulation als Indikatoren verwendet (z.B. die Zahl der Sommertage in Abschnitt 4.1) und sind in Abb. 5.20 für die Stationen Berlin-Dahlem und München dargestellt.

Tabelle 5.8: Kenntage an 12 Klimastationen im Vergleich von Kontrolllauf und den Szenarios.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Arkona					
1981–1990 Kon.	14,6	68,5	2,1	0,0	0,3
2091–2100 A1B	3,8	26,9	8,9	0,5	3,2
2091–2100 A2	3,6	23,2	10,6	0,6	2,7
2091–2100 B1	2,0	30,8	8,5	0,1	2,7
Hannover					
1981–1990 Kon.	15,9	78,3	26,1	4,0	0,1
2091–2100 A1B	4,3	30,8	52,0	10,6	0,7
2091–2100 A2	4,6	29,8	52,7	12,8	0,9
2091–2100 B1	3,7	40,1	51,5	8,6	0,9
Berlin-Dahlem					
1981–1990 Kon.	18,0	81,5	33,8	5,6	0,2
2091–2100 A1B	5,8	35,7	58,7	14,3	1,8
2091–2100 A2	5,5	36,4	61,8	20,6	2,5
2091–2100 B1	5,0	43,2	59,0	15,0	2,5
Köln-Wahn					
1981–1990 Kon.	8,3	66,1	35,2	5,5	0,1
2091–2100 A1B	2,5	29,1	62,4	16,9	2,0
2091–2100 A2	2,2	28,8	63,6	21,4	2,4
2091–2100 B1	1,3	34,1	62,4	14,5	2,4
Leipzig					
1981–1990 Kon.	17,3	70,4	39,5	7,3	0,8
2091–2100 A1B	6,2	28,6	65,5	17,4	4,8
2091–2100 A2	5,3	29,8	68,3	21,4	4,9
2091–2100 B1	4,5	35,3	65,8	16,4	4,9
Kassel					
1981–1990 Kon.	20,6	76,3	23,7	3,4	0,3
2091–2100 A1B	6,9	32,8	48,0	8,6	2,1
2091–2100 A2	6,1	33,7	51,7	12,8	1,5
2091–2100 B1	5,8	41,2	49,3	6,8	1,5
Dresden					
1981–1990 Kon.	24,4	81,2	29,7	5,3	1,1
2091–2100 A1B	8,3	38,0	56,3	13,0	4,4
2091–2100 A2	7,9	39,7	58,8	16,2	3,8
2091–2100 B1	8,3	42,7	56,1	13,7	3,8
Koblenz					
1981–1990 Kon.	6,9	49,7	44,4	8,7	1,4
2091–2100 A1B	1,9	20,1	74,4	23,4	5,0
2091–2100 A2	2,6	20,1	78,7	27,6	5,0
2091–2100 B1	1,1	22,3	75,3	22,6	5,0

...weiter auf der nächsten Seite

5.4 Zeitliche Entwicklung abgeleiteter Größen

<i>Fortsetzung</i>					
<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Karlsruhe					
1981–1990 Kon.	12,0	61,6	53,4	11,8	1,4
2091–2100 A1B	4,1	30,5	84,5	30,3	6,7
2091–2100 A2	3,8	29,7	87,1	34,6	7,0
2091–2100 B1	2,7	34,3	83,3	28,6	7,0
Ulm					
1981–1990 Kon.	33,3	100,0	23,1	2,8	0,0
2091–2100 A1B	13,0	53,4	45,4	7,3	0,4
2091–2100 A2	9,6	54,0	56,5	9,8	0,0
2091–2100 B1	14,9	60,6	48,0	6,0	0,0
München					
1981–1990 Kon.	25,3	106,9	28,9	4,8	0,1
2091–2100 A1B	8,0	60,4	51,2	10,5	0,9
2091–2100 A2	6,4	55,9	63,9	14,4	0,0
2091–2100 B1	9,2	61,1	57,3	12,9	0,0
Garmisch-Partenk.					
1981–1990 Kon.	27,9	142,0	25,8	2,7	0,0
2091–2100 A1B	11,3	101,8	49,7	7,6	0,0
2091–2100 A2	6,6	101,0	60,0	8,2	0,0
2091–2100 B1	9,8	103,7	52,6	6,2	0,0

Wie in Abb. 5.20 und Tab. 5.8 erkennbar wird, zeigen die Kenntage die Eckwerte des sich ändernden Klimas. In diesem geht laut WETTREG-Szenarios zum Ende des 21. Jahrhunderts die Zahl der Eis- und Frosttage sehr deutlich zurück – was sich auch in den Häufigkeitsverteilungen der Temperatur (vgl. Abb. 5.19) abzeichnet, wiewohl im vorigen Abschnitt die für die Eis- und Frosttage weniger aussagestarke Maximumtemperatur analysiert wurde. Als Kompensation steigt besonders deutlich die Zahl der Sommertage und auch der heißen Tage an. Tropennächte gewinnen an vielen Orten an Bedeutung – hier ist eine Besonderheit an der Küste zu finden, wo die Zahl der heißen Tage vernachlässigbar klein bleibt, aber die der Tropennächte sehr deutlich zunimmt. Im Binnenland (mit Ausnahme der höher gelegenen Regionen in Süddeutschland) herrscht diesbezüglich ein umgekehrter Trend vor: Tropennächte nehmen zwar zu, aber die Zahl der heißen Tage steigt noch deutlicher. Es gibt ein weiteres konsistentes Muster in den Daten von Tab. 5.8: Das Szenario **A2** – und nicht das etwas höhere flächengemittelte Temperaturwerte hervorrufende Szenario **A1B** – bringt sowohl die höchste Zahl der Sommertage als auch der heißen Tage mit sich. Das Szenario **B1** zeigt sein Profil am deutlichsten beim konsistent geringeren Rückgang der Frosttage.

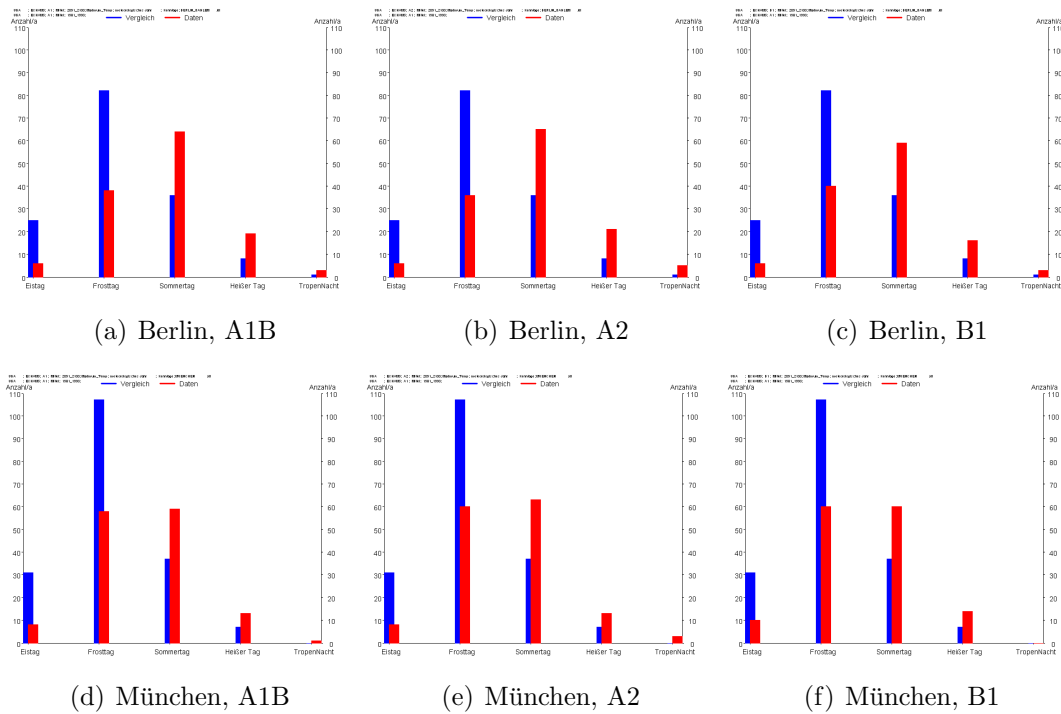


Abbildung 5.20: Kenntage aus den Zeitbereichen 1981–1990 (blaue Balken) und 2091–2100 (rote Balken) für die Stationen Berlin-Dahlem (obere Reihe) und München (untere Reihe) sowie die drei Szenarios. Die dargestellten Werten sind das Mittel aus den 10 WETTREG-Simulationen der entsprechenden Dekaden.

5.4.3 Hitzewellen

In welcher Art ändert sich das Andauerverhalten von Schwellwertüberschreitungen? Zu diesem Zweck wurde in der Region Oberrheingraben für die Stationen Karlsruhe, Heidelberg und Freiburg ein 30-jähriges Mittel der Häufigkeitsverteilungen der Andauer von Perioden mit Tageshöchsttemperaturwerten über 30°C und über 35°C untersucht. Dies ist in Abb. 5.21 dargestellt. Es zeigt sich, dass das bereits bei der Untersuchung der Kenntage häufigere Auftreten von heißen Tage nicht der einzige Stressfaktor ist – diese Tage treten auch in Form von häufiger werdenden längeren Serien auf. Insbesondere Hitzeperioden, die 2 bis 5 Tage andauern werden 2–3 mal so häufig im Vergleich zu den Beobachtungen, während die Zahl der in Eintagesperioden auftretenden Schwellwertüberschreitungen zwar auch zunimmt aber sich „nur“ um ein Drittel erhöht. Das heißt, wenn es Tage mit einer Höchsttemperatur über 30°C gibt, dann steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sie in einer längeren Serie auftreten werden. Bei den Überschreitungen der 35°C -Schwelle ist dies nicht so ausgeprägt sichtbar, aber mehrtägige Perioden werden auch in diesem Fall häufiger.

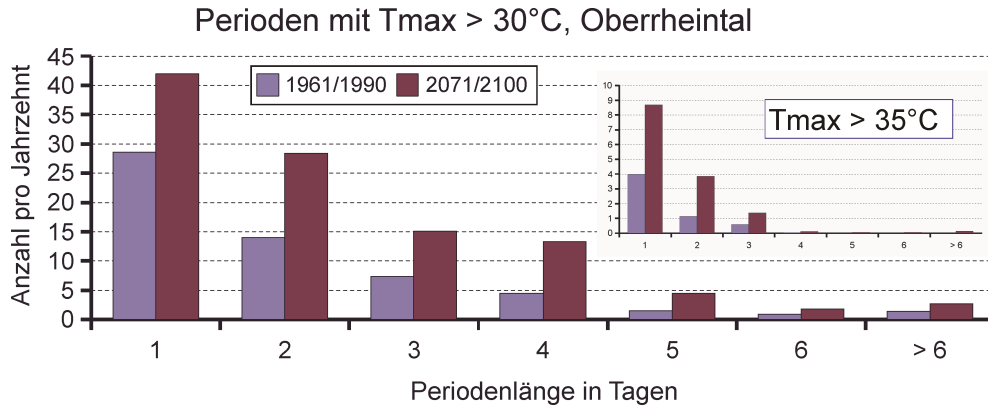


Abbildung 5.21: Häufigkeitsverteilung der Länge von Perioden, in denen der Schwellwert der Tageshöchsttemperatur von 30°C (in der kleinen Abbildung von 35°C) überschritten wird. Zählseinheit ist die Anzahl pro Dekade. Die Datenbasis für die Balken ist das Mittel der Oberrheinstationen Karlsruhe, Heidelberg und Freiburg für die Kontrolllauf-Periode 1961–1990 und das Szenario **A1B** 2071–2100, jeweils über die 3 mal 10 darin enthaltenen Dekadensimulationen gemittelt.

5.4.4 Jahresgang des Niederschlags

Wie schon in den Abschnitten 5.1.2, 5.2.2 und 5.3.2 beschrieben ist der Jahresgang des Niederschlags eine Größe, anhand der Änderungen, die im zukünftigen Klima wahrscheinlich werden, verdeutlicht werden können. Für die Stationen Berlin-Dahlem und München ist in Abb. 5.22 gegenübergestellt, wie ein Jahresgang der Jetztzeit in der Zukunft unter den Bedingungen der Szenarios aussehen könnte. Dies ergänzt die Darstellung in Abschnitt 5.1.2 (Abb. 5.2); während dort die prozentualen Änderungen zwischen Szenario und Kontrolllauf analysiert wurden ist der Untersuchungsgegenstand hier die Niederschlagsmenge.

Die beiden Beispielstationen zeigen – auf unterschiedlichem Niederschlagsniveau – den Rückgang im Sommer und die Zunahme im Winter. Unterschiede zwischen den Szenarios sind in dieser Darstellung weniger deutlich, was damit zusammenhängt, dass die Flächenrepräsentativität einer Station für den Niederschlag begrenzt ist, zumal die in Abb. 5.22 verwendeten Daten nur jeweils *eine* Dekade aus Szenario und Kontrolllauf miteinander in Beziehung setzen.

5.4.5 Extremniederschlag

Niederschlagsmengen über 25 mm/Tag

In diesem Abschnitt soll der Frage nachgegangen werden, ob sich eine Zukunftsentwicklung bei den Starkniederschlagsereignissen abzeichnet. Die betrachtete Größe ist die Anzahl pro Dekade von Tagen mit mehr als 25 mm Niederschlag. Zusätzlich erfolgt eine Mittelung dieser Größe über einen 30-jährigen Zeitraum, sowohl im Kontrolllauf als auch in **A1B**, **A2** und **B1**.

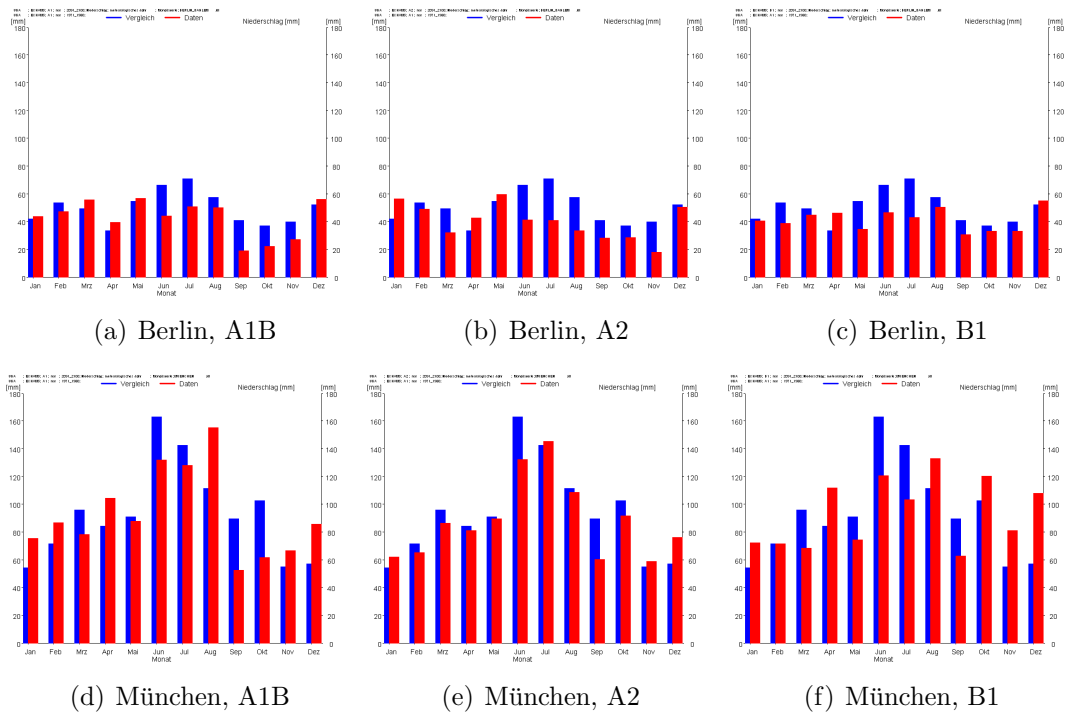


Abbildung 5.22: Jahresgang des Niederschlags aus den Zeitbereichen 1981–1990 (blaue Balken) und 2091–2100 (rote Balken) für die Stationen Berlin-Dahlem (obere Reihe) und München (untere Reihe) sowie die drei Szenarios. Es wurden die Szenario-Ausschnitte des Typs „nor“ (Beschreibung in Abschnitt 3.5) ausgewählt.

Für die beiden Stationen Berlin-Dahlem und München wurde eine entsprechende Untersuchung sowohl für den Sommer als auch den Winter und das gesamte Jahr durchgeführt und ist in Abb. 5.23 dargestellt.

An der Station Berlin-Dahlem sind diese Ereignisse selten; sie kommen im Winter weder im Kontrolllauf noch in den Szenarios vor. Ein Niederschlagsereignis von 24,7 mm ist für Berlin-Dahlem das absolute Maximum aller Winter-Niederschlagsmengen in allen „nor“-Szenario-Ausschnitten von **A1B**, **A2** und **B1**. In vielen Simulationen werden höchstens Werte von ~ 20 mm erreicht. Auch in München sind starke *Winterniederschlagsereignisse* sowohl im Kontrolllauf als auch in den Szenarios relativ selten. Im Sommer werden dort 60 bis 80 Tage pro Dekade (also zwischen 6 und 8 Tagen pro Jahr) mit mehr als 25 mm Niederschlag simuliert; im gesamten Jahr sind dies zwischen 12 und 14 Tage – klare Unterschiede zwischen den Szenarios und dem Kontrolllauf sind nicht erkennbar. Die Schlussfolgerungen aus der Untersuchung der beiden Stationen sind:

5.4 Zeitliche Entwicklung abgeleiteter Größen

- Bei der Zahl der Tage mit Starkniederschlag (Mengenstufe 25 mm) ist keine wesentliche Veränderung zwischen der Jetztzeit (Kontrolllauf) und dem Ende des 21. Jahrhunderts (Szenario) ersichtlich.
- Die Unterschiede zwischen den drei Szenarios sind größer als der Unterschied zwischen Kontrolllauf und demjenigen Szenario mit der größten Starkniederschlagshäufigkeit.
- Es gibt keine eindeutige Reihung der Szenarios, die Starkniederschlagshäufigkeit zu dieser Mengenstufe betreffend.

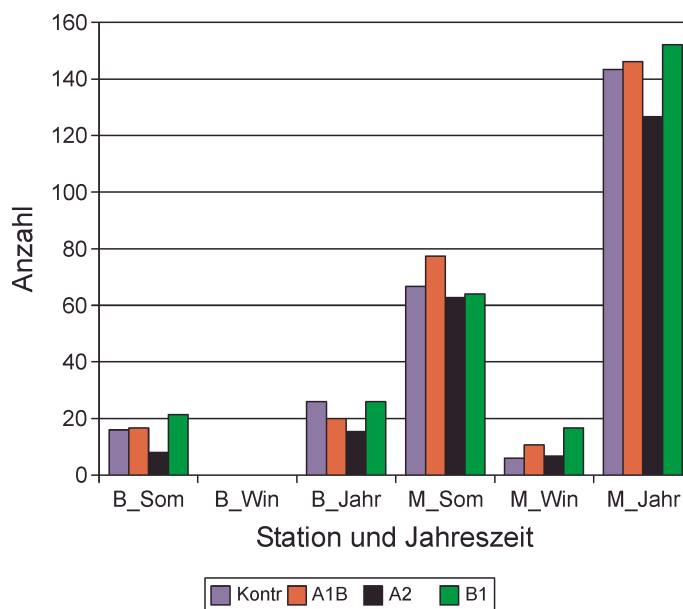


Abbildung 5.23: Anzahl der Tage pro Dekade, an denen Niederschlagsmengen über 25mm auftreten. Ausgewählte Stationen: Berlin-Dahlem („B_...“) und München („M_...“). Ausgewählte Realisierung: „nor“. Vergleich von Kontrolllauf 1961–1990 und den Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** 2071–2100 im Sommer, Winter und für das gesamte Jahr.

Absolute Tagesniederschlagsmaxima

Nach dem gegenwärtigen und zukünftigen Verhalten bei der Überschreitung von Tagesniederschlagsmengen über 25 mm wurde untersucht, welche absoluten Maxima des Tagesniederschlags in der Gegenwart auftreten und welche Maxima in der Dekade 2091–2100 mit WETTREG simuliert werden. Als Beispiele dienen die Stationen Berlin-Dahlem und München. Auch wenn das WETTREG-Verfahren bei der Simulation der Niederschlagszeitreihen neue Rekordwerte produzieren kann treten diese insgesamt sehr selten auf. Die Schlussfolgerungen:

- *Station Berlin-Dahlem:* Die in den für das Vorhaben verfügbaren Beobachtungen verzeichnete Tageshöchstmenge des Niederschlags ist 106 mm (der zweithöchste Wert liegt bei 50 mm). In den auf dem ECHAM5-Kontrolllauf – also für den selben Zeitraum wie die Beobachtungen – basierenden WETTREG-Simulationen finden sich mehrmals höhere Tagesmaxima bis 118 mm. In den insgesamt 30 WETTREG-Simulationen⁷ für die Dekade 2091–2100 wurde dieser Wert nur ein einziges Mal übertroffen: 120 mm an einem Tag im Szenario **A2**. Die höchsten Tagesmengen bewegen sich bei vielen der Simulationen zwischen 50 und 60 mm; in Einzelfällen werden um 100 mm simuliert.
- *Station München:* In den verfügbaren Beobachtungen gibt es eine maximale Tagesniederschlagsmenge von 131 mm; Werte zwischen 100 und 130 mm treten in den Beobachtungen mehrmals auf. Das Extremverhalten des Niederschlags ist in München anders als in Berlin-Dahlem. In so gut wie allen drei mal zehn Simulationen für die Dekade 2091–2100 werden Tagesmengen über 100 mm gefunden; in jedem der drei Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** wird die Schwelle von 130 mm überschritten und mit 166 mm Tagesmenge gibt es in einer Simulation des Szenarios **A1B** einen deutlich höheren Wert als als den bisher als höchsten bekannten.

Eine klar sichtbare Zu- oder Abnahmetendenz des Extremniederschlags im Verlauf des 21. Jahrhunderts kann aus diesen Ergebnissen nicht geschlossen werden. Die statistische Niederschlagssimulation hängt, insbesondere bei den Extremen, von einer Vielzahl physikalischer Parameter ab, die dem Regionalisierungsverfahren nicht komplett zur Verfügung stehen. Möglicherweise ist auch ein Ensemble von 200 Simulationsjahren, die das Klima einer Dekade beschreiben, für die Erfassung des Niederschlag-Extremverhaltens nicht umfangreich genug.

Höchste 5-Tage-Niederschlagssumme

Ein weiteres Maß für Extremniederschlag ist die Menge, die in fünf Tagen fallen kann. Auch hier wird ein Blick auf die Entwicklung dieser Größe anhand von zwei Beispielstationen (Berlin-Dahlem und München) geworfen. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- *Station Berlin-Dahlem:* Im Beobachtungszeitraum wurde eine maximale 5-Tagesmenge von 119 mm gemessen, also nicht deutlich über dem Tagesmaximum von 106 mm. Dies, und die Tatsache, dass der nächstniedrigere Tagesniederschlag bei 50 mm liegt (s.o.) zeigt, dass es sich im Grunde um konvektive Einzelereignisse und nicht um besonders niederschlagsreiche mehrtägige Witterungsabschnitte, die die hohen Niederschlagsmengen erzeugen. In nur drei der zehn WETTREG-Simulationen des **A1B**-Szenarios für die Dekade 2091–2100 wurde eine 5-Tagesmenge von 100 mm oder mehr simuliert, wobei mit einer maximalen Menge von 120 mm das Niveau der

⁷Je 10 für die Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**.

Klimabeobachtungen erreicht wurde. Bei den anderen Szenarios zeigt sich ein ähnliches Häufigkeitsverhalten – in den **A2**-Simulationen wird einmal 130 mm erreicht und der höchste 5-Tageswert in **B1** liegt bei 118 mm.

- *Station München*: Hier liegt die maximale 5-Tagesmenge im Beobachtungszeitraum bei 219 mm, also rund 90 mm höher als das Maximum eines einzelnen Tages. An dieser Station kann also eine Serie von Tagen mit relativ hohen Niederschlagssummen in der Umgebung besonders hoher Maxima auftreten. Allerdings wird in den WETTREG-Simulationen für die Dekade 2091–2100 dieser Wert nicht erreicht⁸; lediglich 200 bzw. 210 mm finden sich in **A1B** während in **A2** 194 und in **B1** 188 mm als maximale 5-Tagesmenge simuliert werden.

Es wäre eine Überinterpretation, im Lichte dieser Ergebnisse auf eine zukünftige Zunahme oder Abnahme von Starkniederschlagsereignissen schließen zu wollen.

⁸Aber im Kontrolllauf, der ja das Verhalten im Beobachtungszeitraum simuliert wird dieser Wert mehrmals überschritten (!)

Abschnitt 6

Zusammenfassung und Bewertung

6.1 Übersicht

Mit Hilfe der WETTREG-Regionalisierung ist es möglich, räumliche Muster sowie zeitliche Entwicklungen des Klimasignals zu analysieren, die sich in Folge der steigenden Treibhausgasemissionen im Verlauf des 21. Jahrhunderts abzeichnen. Aus der Fülle der Daten und Auswertemöglichkeiten wurde auf folgende fokussiert:

- Validierung des Kontrolllaufs mit Klimadaten.
- Bestimmung der Klimasignal-Stärke durch Vergleich des Kontrolllaufs mit den Simulationen für das Ende des 21. Jahrhunderts.
- Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Änderung.
- Aussagen zur unterschiedlichen Klimasignalstärke infolge der unterschiedlichen Antriebe durch die Emissionsszenarios.
- Aussagen zu Extremgrößen.

6.2 Validierung

Wenn das WETTREG-Modell mit Daten des ECHAM5-Kontrolllaufs angetrieben wird, soll im Idealfall eine 100%-ige Repräsentierung des beobachteten Klimas für den entsprechenden Zeitabschnitt erfolgen. Die Validierung des WETTREG-Kontrolllaufs ergibt:

- Die WETTREG-Simulationen der mittleren **Temperatur**verhältnisse geben für den 30-jährigen Zeitraum 1971–2000 sowohl bezüglich ihres Betrags als auch bezüglich möglicher regionaler Muster mit sehr guter Qualität wieder.

- Nach Jahreszeiten differenziert gibt es für die 30-jährigen Mittel im Sommer eine mit +0,1 K sehr schwache Neigung des Modells, zu hohe Werte zu simulieren und im Winter eine mit −0,4 K etwas deutlicher ausgeprägte Neigung des Modells, zu niedrige Werte zu simulieren – aber selbst die stärksten Abweichungen im Osten Deutschlands übersteigen −0,6 K nicht; in der Jahresbilanz liegt dieser Wert bei −0,1 K. Die Muster besitzen keine ausgeprägte räumliche Struktur.
- Werden die 10-jährigen Teilperioden des Zeitraums 1971–2000 separat betrachtet, so wird eine Temperaturwelle sichtbar. Diese zeigt für die Dekade 1971–1980, dass die Simulation mit dem Modell zu war sind (bis +0,7 K im Südwesten Deutschlands); die Dekade 1981–1990 ist ausgeglichen und in der Dekade 1991–2000 liegen die vom Modell simulierten Werte teilweise mehr als 0,7 K *unter* den Beobachtungen. Der Nettoeffekt ist bei einer 30-jährigen Mittelung jedoch fast nicht mehr nachweisbar (s.o.). Die Temperaturwelle ist ein Artefakt der Realisierung des antreibenden ECHAM5-Modells und findet sich auch in der dynamischen Regionalisierung REMO, die ebenfalls mit ECHAM-Daten angetrieben wird.
- Bezüglich der Zahl der Sommertage ($T_{max} \geq 25\text{ °C}$) zeigen sich für die 30-jährige Validierungsperiode 1971–2000 so gut wie keine Unterschiede zwischen Kontrolllauf und Beobachtungen. An zwölf Stationen aus allen Naturräumen finden sich Diskrepanzen von höchstens 2 Tagen. Wenn 10-jährige Teilperioden des Validierungszeitraums betrachtet werden erscheinen allerdings deutlichere Unterschiede, die mit der Temperaturwelle dieses Zeitraums im ECHAM5-Modells korrespondieren.
- Die WETTREG-Simulationen der mittleren **Niederschlags**verhältnisse zeigen räumliche Muster, die sich im Flächenmittel der Validierungsperiode 1971–2000 jedoch weitgehend kompensieren.
- Nach Jahreszeiten differenziert finden sich im *Sommer*, dass die Simulationen trockener sind als die Beobachtungen (bis zu −9%), insbesondere im Nordwesten Deutschlands, während im Südwesten das Modell bis etwa +7% höheren Niederschlag simuliert; als Nettoeffekt für den Sommer kompensieren sich diese Areale allerdings nahezu. Im *Winter* besteht ebenfalls die Neigung des Modells, eine leicht zu niedrige Niederschlagsmenge zu simulieren. Es treten Abweichungen bis −9% im Westen Deutschlands und an der Nordseeküste auf, während erhöhte Werte bis +7% des Modells im Nordosten anzutreffen sind¹. Per Jahresbilanz bleibt ein schwaches Muster mit leicht zu trockenen Niederschlagsimulationen im Nordwesten übrig, das jedoch im Flächenmittel vollständig von ebenso leicht erhöhtem simulierten Niederschlag im übrigen Deutschland kompensiert wird.

¹In dieser Region ist das Niederschlagssignal im Validierungszeitraum besonders komplex, denn dort geht die Entwicklung im *Sommer* konform mit der Abweichung, wie sie im Nordwesten angetroffen wird, also den niedrigeren Werten in den Modellsimulationen.

- Für die Validierung der Niederschlags**mengen** wurde die Ereignishäufigkeit für das Überschreiten von Schwellwerten (Tagesmengen von mindestens 5, 10, 15 bzw. 20 mm) betrachtet. Abgesehen von Fällen, die wegen zu geringer Häufigkeit im Grunde keine Aussagen zulassen, ist bei den betrachteten Stationen die Anpassungsgüte bei den meisten Mengenstufen überraschend hoch. Es ist eine leichte Neigung des WETTREG-Modells zum Unterschätzen der Beobachtungen zu verzeichnen.

6.3 Stärke des Klimasignals

Die Elemente Tagesmitteltemperatur und Niederschlag wurden bezüglich der räumlichen Muster des Klimasignals untersucht. Dabei erfolgte ein Vergleich der Kontrolllauf-Periode 1961–1990 mit der Szenario-Periode 2071–2100. Verglichen wurden die mit ECHAM5-Daten angetriebenen WETTREG-Simulationen der SRES-Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**.

- Jahresmittel der Temperatur, qualitativ: Die Erwärmung ist im Norden Deutschlands – jedoch nicht in unmittelbarer Küstennähe – und im Vor-alpenraum am größten. Die geringste Erwärmung findet sich an der Küste und im Osten Bayerns sowie (nicht für **A1B**!) im äußersten Südwesten.
- Jahresmittel der Temperatur, quantitativ: In Abhängigkeit von den Szenarios liegt das Temperatursignal für die Gesamtfläche Deutschlands zwischen +2,3 K (für Szenario **A1B**) und +1,8 K (für Szenario **B1**). In den Maximagebieten im Norden und Südwesten Deutschlands wird dabei höchstens +2,5 K erreicht. Die geringste Erwärmung zeigt sich bei **B1** im Südwesten mit Werten um +1,5 K. Eine Besonderheit stellt der Südwesten zusätzlich dadurch dar, dass dort unter den Bedingungen von **A1B** eine relativ starke und unter den Bedingungen der anderen Szenarios eine nicht so starke Erwärmung – im Verhältnis zum Flächenmittel – in den WETTREG-Simulationen sichtbar ist.
- Niederschlag, qualitativ: Das Niederschlagssignal besitzt für das gesamte Jahr betrachtet, keine deutliche Ausprägung, ist aber saisonal differenziert mit einer Abnahme im Sommer und einer Zunahme im Winter. Das Sommer(-Abnahme)-Signal besitzt dabei eine nur sehr gering ausgeprägte räumliche Struktur mit einer etwas stärkeren Abnahme im äußersten Nordosten Deutschlands. Das Winter(-Zunahme)-Signal hingegen besitzt eine ausgeprägte Verstärkung in den Mittelgebirgen und an der Küste sowie eine Abschwächung in Brandenburg, Sachsen und im Alpenraum.
- Niederschlag, quantitativ: Auch beim Niederschlag ist **A1B** das Szenario, bei dem das stärkste Signal auftritt. Gegenüber dem Kontrolllauf ist für die Gesamtfläche Deutschlands im Sommer eine Veränderung von –22% und im Winter von +30% zu erwarten mit dem stärksten lokalen Sommer-Rückgang in Vorpommern bis unter –40% und Winter-Anstieg im Hunsrück bis +80%

und in Unterfranken bis +70%. Das Szenario **A2** weist im Sommer ähnliche Rückgangswerte und im Winter deutlich geringere Anstiegswerte wie **A1B** auf. Das Szenario **B1** ist den Niederschlag betreffend moderat und entfernt sich sowohl im Winter wie im Sommer weniger als 20% von den Werten des Kontrolllaufs.

6.4 Zeitlicher Verlauf des Klimasignals

In Form von gleitenden 30-jährigen Mitteln 2001–2030...2071–2100, deren Differenz zum Kontrolllauf 1961–1990 gebildet wird erfolgt die Analyse des Signalverlaufs über das 21. Jahrhundert. Dabei ist bei den untersuchten Größen mit einer Ausnahme (Niederschlag, Winter, Szenario **B1**) ein monoton wachsender Verlauf zu verzeichnen, was sowohl bei den Flächenmitteln als auch in den sich aufbauenden Mustern sichtbar ist.

- Das Temperatursignal verläuft für die beiden Szenarios **A1B** und **A2** in geringem Abstand, d.h. die Veränderung des jeweiligen 30-jährigen Zeitraums zum Kontrolllauf unterscheidet sich in diesen beiden Szenarios durchweg um nicht mehr als 0,2 K. Das **B1**-Signal beginnt am Anfang des 21. Jahrhunderts mit leicht höheren Werten als die **A**-Szenarios und verläuft ab dem Zeitraum 2021–2050 klar unterhalb von jenen.
- Die räumlichen Muster des Temperatursignals entstehen im Grunde durch gleichmäßige Verstärkung in den Regionen mit stärkerer bzw. geringerer Entwicklung. Es sind zur Mitte des 21. Jahrhunderts keine Zwischenphasen zu erkennen, in denen sich z.B. anders aussehende Muster bilden, die dann zum Ende des 21. Jahrhunderts wieder verschwinden.
- Beim Sommerniederschlag ist das zeitliche Verhalten des Gebietsmittels so, dass die Verlaufskurven für **A1B** und **A2** sich fast nicht voneinander unterscheiden. Das **B1**-Signal verharrt im Sommer bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts auf einem Plateau von rund 10% Abnahme und nimmt danach monoton, wie die **A**-Szenarios, ab, wobei aber ein nicht so großer Endwert für den Zeitraum 2071–2100 erreicht wird.
- Der Winterniederschlag zeigt bei **A1B** und **A2** einen parallelen Zunahmetrend, demzufolge bis 2051–2080 keine Unterschiede von mehr als 5% zwischen den beiden Szenarios auftreten². Zum Ende des 21. Jahrhunderts driften die Werte auseinander, wobei **A1B** eine Zunahme des Winterniederschlags von rund 30% und **A2** eine Zunahme von rund 20% erreicht. Szenario **B1** verläuft bis 2021–2050 auf einem Werteplateau von etwa +10%, was für diesen Zeitbereich zudem ein stärkeres Signal als das der **A**-Szenarios

²Es fällt auf, dass **A2** für viele der 30-jährigen Perioden ein stärkeres Signal besitzt als **A1B** und dass erst am Ende des 21. Jahrhunderts die Änderung von **A1B** größer als diejenige von **A2** ist.

ist. In den beiden Folgezeiträumen erreicht das Signal bei **B1** sogar – entgegen der Entwicklung bei den **A**-Szenarios ein noch niedrigeres Werteplateau von rund 5% und erst ab 2051–2080 erfolgt ein monotones Wachstum des Signals.

- Die räumlichen Muster des Niederschlagssignals entstehen im Laufe des 21. Jahrhunderts, wie oben für das Temperatursignal beschrieben, durch kontinuierliche Zunahme/Abnahme ohne die Ausbildung von anders aussehenden Zwischenphasen.

6.5 Unterschiede zwischen den Szenarios

In den untersuchten Aspekten erscheint es fraglich, ob bei einer nach Szenarios differenzierten Betrachtungsweise **A1B** und **A2** zukünftig separat untersucht werden sollten. Das Verhalten des Klimas, angetrieben von diesen beiden Szenarios, grenzt sich aber vielfach deutlich vom Verhalten mit dem Antrieb **B1** ab. Die Szenarios spannen einen Ereignisraum auf, bei dem **A1B** für die extremen und **B1** für die moderaten Antworten des Klimasystem steht.

6.6 Extremgrößen

Auf Extremgrößen wird in diesem Bericht mehrfach Bezug genommen. So folgt aus den WETTREG-Szenarios, dass sich bei der Tageshöchsttemperatur die größten Veränderungen in der Zukunft im Bereich der „mittleren Extreme“, also von der Mitte der Häufigkeitsverteilung bis etwa zu deren 80-Perzentil ereignen. Auch wenn sich die Zahl der heißen Tage ($T_{max} \geq 30\text{ °C}$) verbreitet verdoppelt, treten zwar neue absolute Temperaturrekorde auf, dennoch sind nicht auffällig häufig. Von Bedeutung ist außerdem neben dem sehr klaren Rückgang der Eis- und Frosttage auch die verbreitete Zunahme der Tropennächte, in denen die Temperatur nicht unter 20 °C sinkt. Dies hat z.B. medizinische Implikationen.

Beim Niederschlag wurden die Simulation der Häufigkeit des Auftretens von Tagesmengen über 25 mm sowie möglicher zukünftiger Veränderungen bei den höchsten Tages- und 5-Tagesmengen untersucht. Hier zeigt sich kein klar nachweisbares Änderungsverhalten und auch keine Differenzierung des Klimasignals in Abhängigkeit vom Szenario. Die Frage, ob das verwendeten Analyseverfahren den Extrembereich hinreichend genau abbildet kann nicht abschließend beantwortet werden.

6.7 Bewertung der Resultate in Naturräumen

Naturräume

Diesem Abschnitt liegt eine Einteilung Deutschlands in Naturräume zu Grunde, wie sie in [Meynen u. a. 1962] publiziert und auch in der UBA-Vulnerabilitätsstu-



Abbildung 6.1: Naturräume in Deutschland nach [Meynen u. a. 1962] und [Zebisch u. a. 2005].

die [Zebisch u. a. 2005] verwendet wurde; damit sind deren Resultate mit jenen der WETTREG-Regionalisierung noch besser kombinierbar. Die von Meynen und Schmithüsen angewandte Methode fasst rund 600 kleinräumige, landschaftsökologisch homogene Naturräume in mehreren Schritten zu den hier verwendeten Gebieten zusammen (s. Abb. 6.1), die weitgehend den Klimaregionen entsprechen. Es gibt Ansätze zur objektiven Bestimmung der Klimaregionen ([Blümel u. a. 1986], [Christoffer u. a. 2004]), die im Kern eine Kombination von Höhenlage und Entfernung zum Meer auswerten und insgesamt 15 Regionen identifizieren; diese sind im Bereich der Mittelgebirge etwas anders zusammengesetzt als die Naturräume, jedoch überwiegen bei Weitem die Ähnlichkeiten zwischen objektiv identifizierten Klimaregionen und Naturräumen. Ein Indikator für das zukünftige Klima ist das Verhalten der Kenntage, die in der Folge häufig zur Regionenspezifischen Beschreibung der Klimaänderung hinzugezogen werden. Sofern sich in den Regionen durch die unterschiedlichen Szenarios eine Bandbreite des Klimasignals abzeichnet wird diese in den folgenden Abschnitten ebenfalls beschrieben. Wo nicht anders erwähnt, werden bei der Klimaentwicklung die Werte von 30-jährigen Zeitabschnitten zu Grunde gelegt.

Anmerkungen zu den semi-quantitativen Übersichtsdiagrammen

Es wurden Diagramme entwickelt, die für jeden der zwölf Naturräume die wesentlichen Fakten auf einen Blick präsentieren. In ihnen sind verschiedene Maße

des Klimastatus' und der Klimaänderung zusammengefasst. In semi-quantitativer Form wird dargestellt, welche Größenordnung und Betrag Temperatur bzw. Niederschlag in der Gegenwart besitzen und wie das Klimasignal aussieht. Für die Aussagen zum Klima der Jetztzeit entstammen die Daten dem Kontrolllauf (nicht aus den Beobachtungen!). Die zugehörigen Bereiche des Diagramms sind hellgrau hinterlegt. Hier stehen unterschiedlich große $\oplus$ bzw. $\ominus$ -Symbole für unterschiedlich hohe *Beträge* der Temperatur bzw. des Niederschlags. Die Symbole sind beim Kontrolllauf zudem anders eingefärbt als diejenigen der Szenarios. Die waagerechten Balken trennen bei den Aussagen zum Kontrolllauf den unter- vom überdurchschnittlichen Wertebereich – im Verhältnis zum *Gesamtittel* über alle in der Studie benutzten deutschen Stationen – zeigen also z.B. an, ob die *derzeitigen* klimatischen Verhältnisse in der betreffenden Region kühler/wärmer/trockener/niederschlagsreicher als das Deutschlandmittel sind³.

Bei den übrigen Diagrammteilen ist die Aussage von einer anderen Idee getragen: Hier wird die Stärke des Klimasignals dargestellt. Das heißt, die Angaben beziehen sich auf das Verhältnis des Klimaparameters zum Durchschnitt der in Deutschland auftretenden *Veränderungen* der Zukunftsszenarios gegenüber dem Kontrolllauf. Kleine Symbole stehen dabei für unterdurchschnittliche, mittelgroße für durchschnittliche und große für überdurchschnittliche *Änderungen* im Vergleich zum Gebietsmittel der betrachteten Größe. Die waagerechten Balken stehen für ein Gleichbleiben; wenn ein $\oplus$ -Symbol oberhalb dieser Mitte steht, dann erfolgt ein Ansteigen (die Bewertung erfolgt durch die Symbolgröße, s.o.) und wenn ein $\ominus$ -Symbol unterhalb der Mitte steht, dann erfolgt ein Rückgang im Vergleich zum Gebietsmittel der betrachteten Größe.

Die Diagramme sind zweigeteilt. Die obere Hälfte zeigt temperaturbezogene Indikatoren wie die Entwicklung des Mittels und der Kenntage unter Szenariobedingungen an; in der unteren Hälfte befinden sich niederschlagsbezogenen Indikatoren, links für den Sommer und rechts für den Winter. Eine Legende im ersten der zwölf Diagramme (auf Seite 70) erläutert die Symbole.

In Anhang H werden Karten vorgestellt, auf denen die Signalstärke für die Tagesmitteltemperatur, den Sommerniederschlag und den Winterniederschlag in vereinfachter Form zusammengefasst sind.

6.7.1 Küste

Die Küstenregion ist durch einen moderaten Temperaturanstieg charakterisiert, der je nach Szenario für die letzten 30 Jahre des 21. Jahrhunderts zwischen 1.5 und 2.1 K beträgt. Hauptgrund ist der Klimasignal-abschwächende Einfluss von Nord- und Ostsee. Schon bei etwas größerem Abstand zur Küste ist der Temperaturanstieg deutlich größer. Das relativ ausgeglichene und gemäßigte Küstenklima besitzt keine ausgeprägte Neigung zu Temperaturextremen. Das drückt sich auch in den Kenntagen aus, die vergleichsweise geringe absolute Häufigkeiten (jeweils in der ersten Zeile eines Stationsblocks in Tab. 6.1 aufgelistet) aufweisen. Die

³In den Übersichtsdiagrammen sind keine Vergleiche zwischen Kontrolllauf und Beobachtungen dargestellt – dies wurde im Rahmen der Validierung in Abschnitt 4 erörtert.

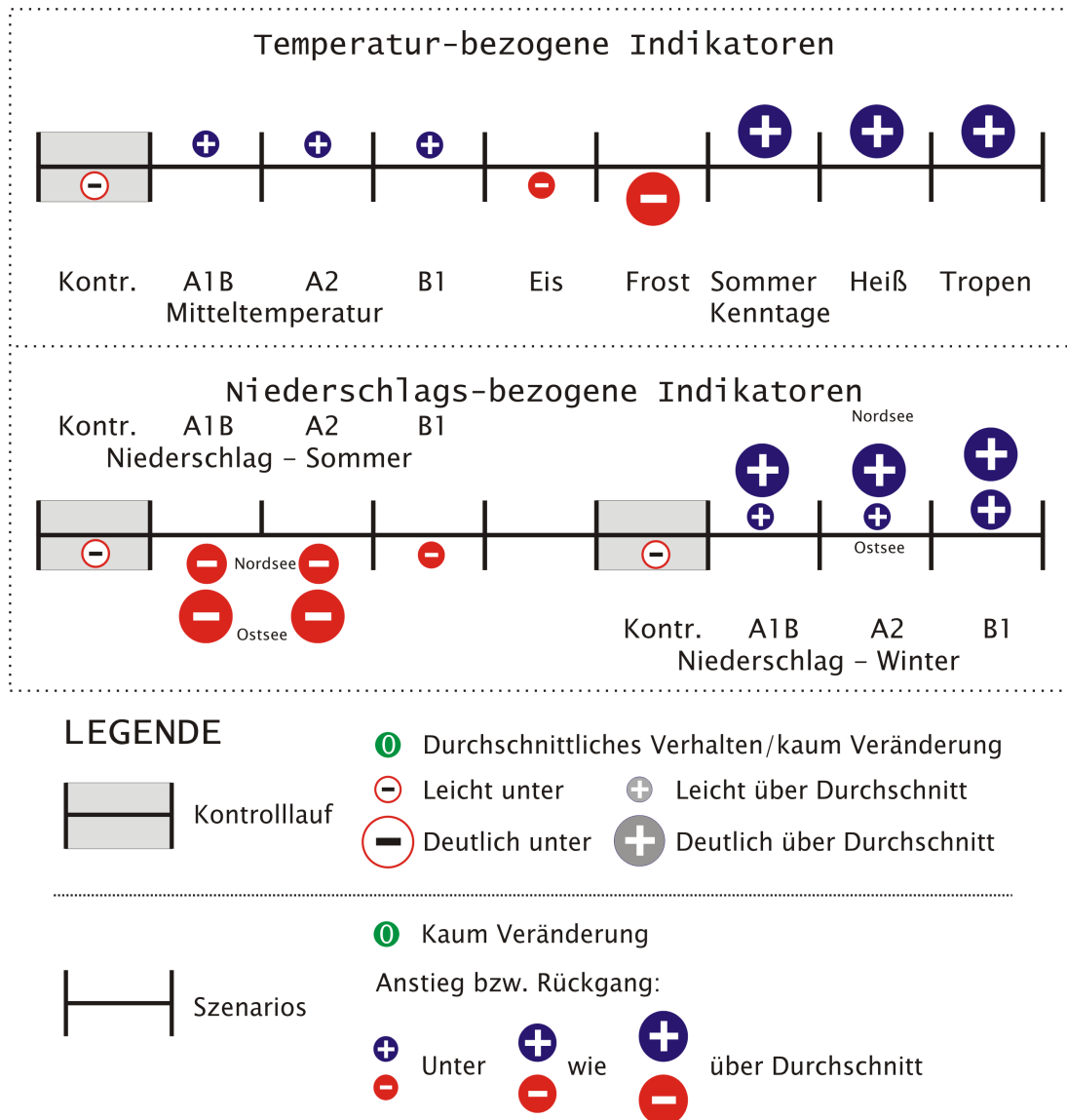


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für die Küstenregion. Unterschiede in Teilregionen, wie hier bei Nord- und Ostsee, sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt.

Änderung des Auftretens von Kenntagen ist allerdings deutlicher als in anderen Regionen. So lässt sich aus den Werten in Tab. 6.1 schließen, dass an den drei Beispielsstationen die Zahl der Frosttage auf rund ein Drittel ihrer Werte im Kontrolllauf zurückgeht – stärker als in anderen Regionen, wo ein Rückgang auf lediglich die Hälfte der Kontrolllauf-Werte die Regel ist. Auch die Zahl der Sommertage verändert sich deutlicher als an vielen anderen Orten in anderen Regionen: Sie erreicht zum Ende des 21. Jahrhunderts das mehr als Zweifache ihrer Kontrolllauf-Werte.

6.7 Bewertung der Resultate in Naturräumen

Tabelle 6.1: Anzahl der Kenntage an drei Küstenstationen für den Kontrolllauf (1981–1990) und ihre Veränderung bis zur Periode 2091–2100 für die Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**. Erste Zeile einer Gruppe: Mittlere Anzahl der Tage pro Jahr. Zweite bis vierte Zeile: Differenz der Zahl der Tage (Kontrolllauf minus Szenario). Beispiel für Jever: Von den mittleren 66,1 Frosttagen pro Jahr im Kontrolllauf erfolgt zur Periode 2091–2100 ein *Rückgang* zwischen 43,7 und 34,0 Tagen, je nach Szenario und die Zahl der Tropennächte *übersteigt* am Ende des 21. Jahrhunderts um 2,6 bis 1,3 Tage die Anfangsmarke des Kontrolllaufs von 0,2 Tagen.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Jever					
1981–1990 Kon.	10,9	66,1	14,9	2,1	0,2
2091–2100 A1B	–7,6	–43,7	15,6	2,6	2,6
2091–2100 A2	–6,5	–42,2	19,1	2,5	2,7
2091–2100 B1	–7,0	–34,0	13,3	0,0	1,3
Travemünde					
1981–1990 Kon.	15,6	62,9	9,6	1,1	0,4
2091–2100 A1B	–12,1	–39,5	15,2	3,0	2,3
2091–2100 A2	–11,5	–40,8	16,0	3,4	4,3
2091–2100 B1	–11,1	–31,5	14,0	1,7	1,9
Arkona					
1981–1990 Kon.	14,6	68,5	2,1	0,0	0,3
2091–2100 A1B	–10,8	–41,6	6,8	0,5	2,9
2091–2100 A2	–11,0	–45,3	8,5	0,6	3,9
2091–2100 B1	–12,6	–37,7	6,4	0,1	2,4

Den Niederschlag betreffend tritt zumindest an der Nordseeküste eine überdurchschnittliche Verstärkung im Winter auf, die größer im direkten Küstenhinterland und von vergleichbarer Größenordnung wie die Niederschlagszunahme in den Mittelgebirgen ist: Je nach Szenario wird in diesem Küstenbereich ein bis zu 50-(**A1B**) resp. 30(**B1**)-prozentiger Anstieg zum Ende des 21. Jahrhunderts erwartet. Die Ostseeküste, insbesondere in Mecklenburg-Vorpommern zeigt beim Niederschlag kein spezifisches Signal; hier findet sich, wie verbreitet im Osten Deutschlands, ein unterdurchschnittlicher Anstieg des Winterniederschlags.

Der Sommerniederschlag besitzt an der Küste kein einheitliches Signal. Zwar folgt auch diese Region dem generellen Abnahmetrend. Dieser Trend ist an der Vorpommerschen Ostseeküste sogar besonders stark (mit einem Szenario-bedingten Ereignisraum zwischen –40% bei **A1B** und –25% bei **B1**)⁴, aber es gibt auch Bereiche, in denen die Abnahme stärker (Schleswig-Holsteins Ost- und Nordseeküste) bzw. geringer (Ostfriesische Küste) als im Hinterland ist, wobei im Szenario **A1B** Abnahmewerte um –30% und in **B1** um –15% die Regel sind.

⁴Die Region Vorpommern ist, wie auch an Anfang von Abschnitt 5.2.2 erwähnt, durch eine etwas stärkere Abnahme des *Jahresniederschlags* gekennzeichnet, was sich aus der Kombination des relativ geringen Anstieg des Winterniederschlags und des dort besonders starken Rückgangs des Sommerniederschlags erklären lässt.

6.7.2 Nordwestdeutsches Tiefland

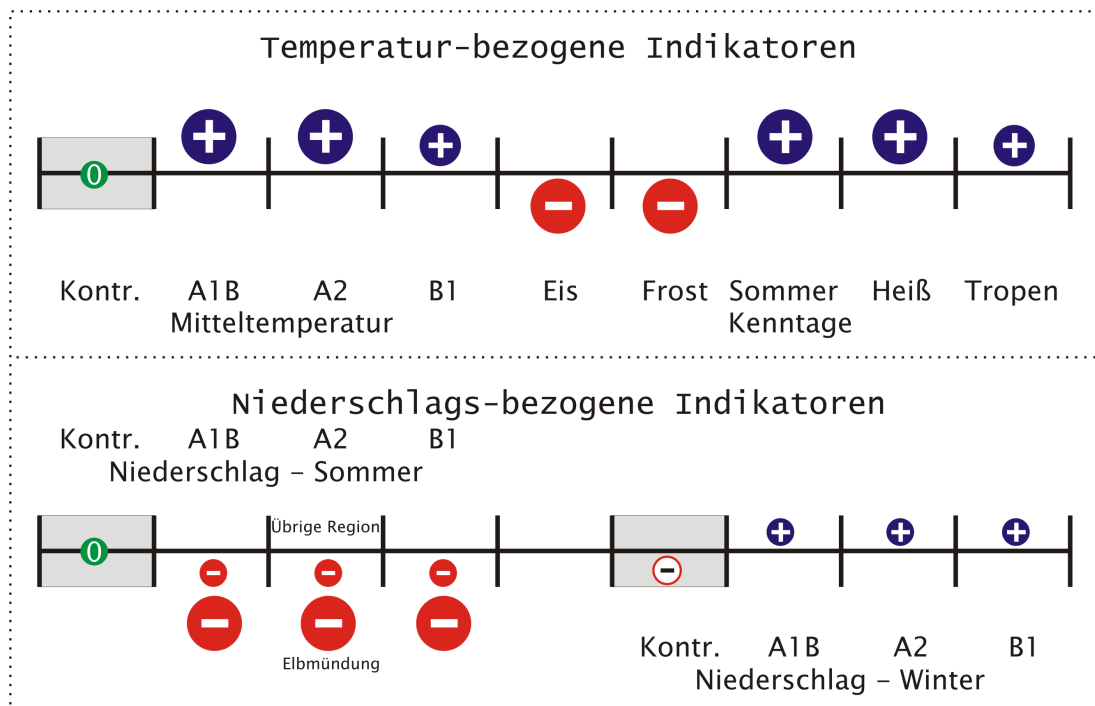


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für das Nordwestdeutsche Tiefland. Unterschiede in Teilregionen, wie hier bei der Elbmündung, sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

Aus dem Temperatursignal wird ersichtlich, dass sich der Meereseeinfluss auf relativ kurzer Strecke verliert (s. Abb. 6.4). Für das Nordwestdeutsche Tiefland bedeutet dies nicht nur, dass dort das Erwärmungssignal höher als direkt an der Küste ist und für die letzten 30 Jahre des 21. Jahrhunderts laut Szenario **A1B** eine Erhöhung der Tagesmitteltemperatur bis zu 2,5 K gegenüber dem Kontrolllauf zu erwarten ist. Im Szenario **B1** liegt diese Erhöhung bei 2,0 K und mithin ein halbes Grad über den küstennahen Werten. Ein weiterer Indikator für den im Hinterland nicht so stark maritim geprägten Charakter des Klimas ist, dass die Zahl der heißen Tage mit einer Höchsttemperatur über 30 °C sich deutlich stärker erhöht als die Zahl der Tropennächte. Direkt an der Küste nehmen heiße Tage hingegen in der selben Größenordnung wie die Tropennächte zu.

Für den Sommerniederschlag, der ja in der Gesamtfläche Deutschlands abnimmt, ist im Nordwestdeutschen Tiefland entlang der Elbmündung ein *über*durchschnittlich starker Rückgang bis zu 20–25% zu verzeichnen. Außerhalb dieser Teilregion nimmt der Niederschlag im Sommer *unter*durchschnittlich mit Beträgen von 10 bis 20% ab.

Der Winterniederschlag verzeichnet zwar, wie im übrigen Deutschland, einen Zuwachs zum Ende des 21. Jahrhunderts; dieser ist jedoch weder so stark wie

6.7 Bewertung der Resultate in Naturräumen

direkt an den Küsten Schleswig-Holsteins und Niedersachsens noch erreicht er die hohen Zunahmewerte der Mittelgebirge. In der Fläche des Nordwestdeutschen Tieflands liegt die winterliche Niederschlagszunahme bei etwa 15 bis 25%. In allen Szenarios liegt die Zunahme im Raum Hamburg bei lediglich 5 bis 15%. Es sei daran erinnert, dass Aussagen über geringe Niederschlagsveränderungen (weniger als 10–15%) eine reduzierte Belastbarkeit besitzen.

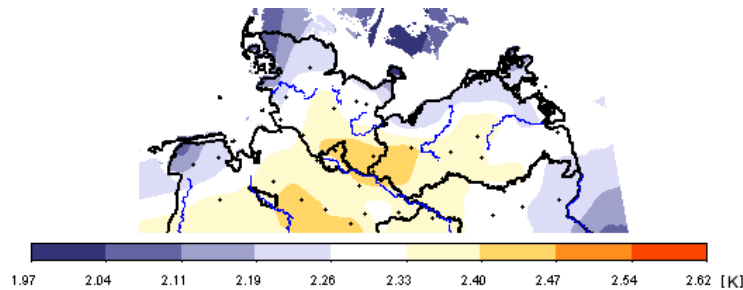


Abbildung 6.4: Tagesmitteltemperatur im Vergleich der Periode 2071–2100 (Szenario A1B) mit dem Kontrolllauf für die küstennahen Gebiete. Die Farbskala wurde, im Gegensatz zu Abb. 5.3 auf den Wertebereich angepasst, um den Signalverlauf von der Küste ins Tiefland herauszuarbeiten.

Tabelle 6.2: Wie Tab. 6.1, jedoch für fünf Stationen des Nordwestdeutschen Tieflands.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Eutin					
1981–1990 Kon.	17,4	74,4	16,4	2,1	0,1
2091–2100 A1B	–14,1	–43,8	20,8	4,4	2,0
2091–2100 A2	–13,0	–45,3	19,6	6,1	2,1
2091–2100 B1	–12,2	–37,0	16,6	2,3	0,7
Neumünster					
1981–1990 Kon.	16,5	70,8	20,1	2,7	0,1
2091–2100 A1B	–12,8	–43,1	23,1	5,9	1,7
2091–2100 A2	–12,3	–43,6	22,5	7,7	3,1
2091–2100 B1	–12,4	–36,7	18,8	3,1	1,5
Hamburg					
1981–1990 Kon.	15,0	75,4	22,2	3,6	0,4
2091–2100 A1B	–10,8	–47,4	24,2	5,0	1,4
2091–2100 A2	–10,8	–46,2	21,9	6,8	2,1
2091–2100 B1	–11,1	–38,4	19,9	2,6	0,4
Hannover					
1981–1990 Kon.	15,9	78,3	26,1	4,0	0,1
2091–2100 A1B	–11,6	–47,5	25,9	6,6	0,6
2091–2100 A2	–11,3	–48,5	26,6	8,8	1,6
2091–2100 B1	–12,2	–38,2	25,4	4,6	0,8

...weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

Station	Eistage	Frosttage	Sommertage	Heiße Tage	Tropennächte
Helmstedt					
1981–1990 Kon.	19,7	76,7	28,9	4,7	0,2
2091–2100 A1B	–13,5	–47,2	27,6	9,4	2,0
2091–2100 A2	–13,2	–45,0	29,0	11,8	3,4
2091–2100 B1	–14,3	–38,3	26,9	7,9	1,5

6.7.3 Nordostdeutsches Tiefland

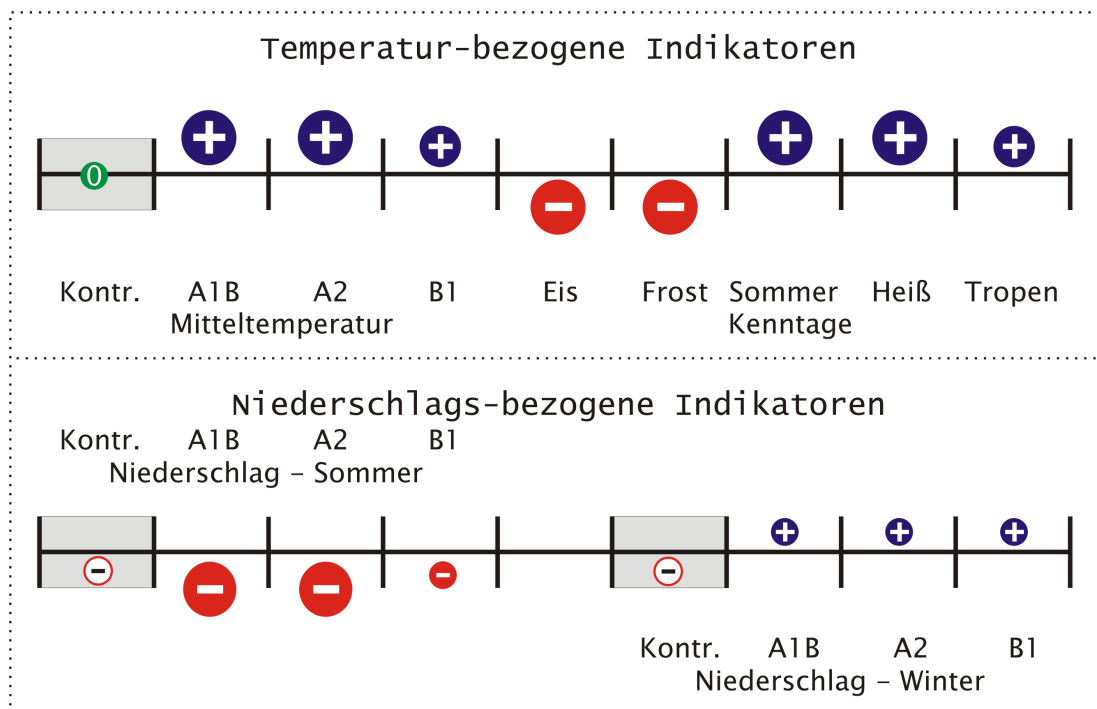


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für das Nordostdeutsche Tiefland. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

Das Nordostdeutsche und Nordwestdeutsche Tiefland sind einander vom Temperatursignal her relativ ähnlich. Auch im Nordosten ist laut regionalisierten Szenariorechnungen ein Erwärmungsniveau von etwas unter 2,5 K (**A1B**) bis rund 2 K (**B1**) zu erwarten. In einigen Aspekten wird dort der abnehmende maritime Charakter des Klimas dennoch deutlich. So ist z.B. auch im Nordosten die Zunahme der heißen Tage (zum Teil um 15 Tage pro Jahr) deutlich stärker als die Zunahme der Tropennächte (s. Tab. 6.3); dies tritt mit zunehmender Entfernung von der Küste klarer in Erscheinung. So ist z.B. für Arkona (s. Tab. 6.1) zu verzeichnen, dass heiße Tage dort auch in der Zukunft praktisch nicht vorkommen, Tropennächte jedoch schon.

6.7 Bewertung der Resultate in Naturräumen

Auch wenn sich bezüglich der Temperatur kaum Unterschiede zwischen dem Tiefland in Nordwesten und Nordosten zeigen, hat der Nordosten eine ausgeprägte Eigenständigkeit beim Niederschlagsverhalten. Die Besonderheit im *Jahresniederschlag* wurde bereits zu Beginn des Abschnitts 5.2.2 sowie in Fußnote 4 auf Seite 71 angesprochen. Der *Sommerniederschlag* geht im Nordosten verbreitet am stärksten in ganz Deutschland zurück (bis nahe –50% laut Szenario **A1B** und –30% laut Szenario **B1**). Dies geschieht in einem Gebiet, das bereits keine hohe Niederschlagsmenge erhält, so dass sich z.B. die Wassergüteproblematik dort verschärfen dürfte.

Während im Winter der Niederschlag in den Mittelgebirgen und an der Küste verbreitet um 50% und mehr zunimmt ist im Nordosten auch in dieser Jahreszeit mit einem nur geringen Anstieg zu rechnen, der kaum +20% (**A1B**) bzw. +10% (**B1**) erreicht.

Tabelle 6.3: Wie Tab. 6.1, jedoch für fünf Stationen des Nordostdeutschen Tieflands.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Schwerin					
1981–1990 Kon.	19,8	77,8	22,3	3,7	0,3
2091–2100 A1B	–14,8	–47,2	24,5	4,5	2,3
2091–2100 A2	–14,9	–47,1	22,6	5,5	3,5
2091–2100 B1	–14,2	–37,9	19,3	2,4	1,8
Waren					
1981–1990 Kon.	23,9	84,1	24,7	3,5	0,1
2091–2100 A1B	–18,0	–48,8	24,4	7,6	1,4
2091–2100 A2	–18,0	–48,9	24,0	10,4	2,8
2091–2100 B1	–15,6	–40,0	20,4	7,0	1,8
Greifswald					
1981–1990 Kon.	21,1	81,0	15,0	1,9	0,2
2091–2100 A1B	–15,5	–44,6	15,6	4,8	0,7
2091–2100 A2	–15,7	–47,6	21,1	4,5	1,3
2091–2100 B1	–14,9	–35,8	16,0	3,9	0,8
Potsdam					
1981–1990 Kon.	19,3	89,7	39,0	7,9	0,5
2091–2100 A1B	–12,2	–48,8	29,3	11,3	2,1
2091–2100 A2	–13,0	–48,8	26,9	15,7	5,7
2091–2100 B1	–13,9	–40,6	25,8	10,3	2,0
Berlin-Dahlem					
1981–1990 Kon.	18,0	81,5	33,8	5,6	0,2
2091–2100 A1B	–12,2	–45,8	24,9	8,7	1,6
2091–2100 A2	–12,5	–45,1	28,0	15,0	4,8
2091–2100 B1	–13,0	–38,3	25,2	9,4	2,3

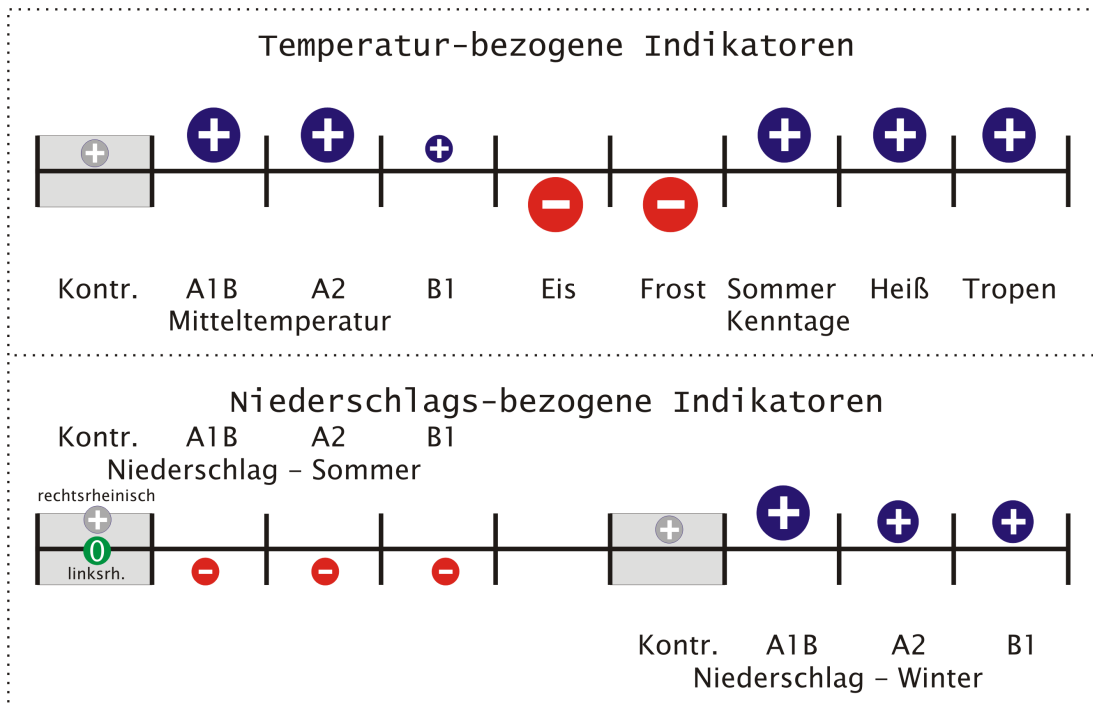


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für die Westdeutsche Tieflandsbucht. Unterschiede in Teilregionen, wie hier in den Gebieten links und rechts des Rheins, sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

6.7.4 Westdeutsche Tieflandsbucht

Im Grunde ist das Temperatur-Änderungssignal für die Westdeutsche Tieflandsbucht nicht sehr unterschiedlich zu dem des Nordwestdeutschen Tieflands (rund 2,3 K Temperaturzunahme bei **A1B** und unter 2 K bei **B1**), aber die Temperaturänderungen treffen dort auf ein bereits vorhandenes höheres thermisches Niveau, was sich bei allen Kenntagen zeigt: Die Zahl der Eis- und Frosttage ist im Kontrolllauf gering und nimmt in Zukunft auf 25 bis 45% ihres jetzigen Wertes ab, was im Deutschlandvergleich relativ viel ist; gleichzeitig erhöhen sich, bei bereits relativ hohem Anfangsniveau die Kennzahlen im oberen Temperaturbereich deutlich, was auf klar zunehmenden Hitzestress hinweist.

Den Sommerniederschlag betreffend dominiert in der Westdeutschen Tieflandsbucht eine eher unterdurchschnittliche Abnahme; insbesondere am westlichen Niederrhein bleibt der Sommerniederschlag nahezu gleich; es gibt Abnahmen von lediglich 5 bis 10%, die nicht überinterpretiert werden sollten. Allerdings ist im Lee der Ardennen dort der mittlere Niederschlag sowieso geringer als östlich des Rheins.

Ganz anders sieht es beim Winterniederschlag im Münsterland, also im Luv der Rechtsrheinischen Schiefergebirge aus. Hier wird eine überdurchschnittliche Zunahme von bis zu +50% (Szenario **A1B** – für **B1** liegen die Werte immer noch

6.7 Bewertung der Resultate in Naturräumen

bei überdurchschnittlichen +30%) zum Ende des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich. Das winterliche Niederschlags-Zunahmesignal ist im Rheintal südlich von Köln/Bonn dagegen eher durchschnittlich.

Tabelle 6.4: Wie Tab. 6.1, jedoch für fünf Stationen des Westdeutschen Tieflandsbucht.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Dortmund					
1981–1990 Kon.	10,0	56,3	28,5	3,6	0,7
2091–2100 A1B	–7,6	–36,5	25,6	8,5	2,8
2091–2100 A2	–5,9	–37,9	28,7	10,9	5,2
2091–2100 B1	–7,5	–29,9	27,2	6,3	2,3
Gütersloh					
1981–1990 Kon.	11,4	63,8	29,8	6,0	0,1
2091–2100 A1B	–8,1	–39,2	25,9	9,3	2,1
2091–2100 A2	–7,7	–39,8	27,9	10,4	3,8
2091–2100 B1	–8,6	–32,5	25,5	6,6	2,1
Leverkusen					
1981–1990 Kon.	5,6	32,3	31,5	4,8	2,9
2091–2100 A1B	–3,8	–20,9	26,9	10,7	7,3
2091–2100 A2	–3,9	–21,3	31,7	14,6	11,3
2091–2100 B1	–5,0	–19,5	29,0	9,4	4,5
Aachen					
1981–1990 Kon.	10,4	48,7	25,4	4,1	1,1
2091–2100 A1B	–8,2	–33,2	24,5	7,6	3,0
2091–2100 A2	–6,9	–33,2	26,9	9,2	6,4
2091–2100 B1	–8,2	–28,1	25,0	4,5	2,2
Köln-Wahn					
1981–1990 Kon.	8,3	66,1	35,2	5,5	0,1
2091–2100 A1B	–5,8	–37,0	27,2	11,4	1,9
2091–2100 A2	–6,1	–37,3	28,4	15,9	3,9
2091–2100 B1	–7,0	–32,0	27,2	9,0	2,3

6.7.5 Zentrale Mittelgebirge und Harz

Überraschenderweise ist diese Region trotz der vielfach gegliederten Orografie vom Temperaturänderungsverhalten her ganz ähnlich den tiefer gelegenen Regionen West-, Nord- und Ostdeutschlands. Aber auch in den Zentralen Mittelgebirgen und im Harz trifft das Temperatursignal auf ein spezifisches thermisches Niveau, so dass dort das Klima zwar „im Gleichschritt“ eine Erwärmung von rund 2 bis 2,3 K erfährt, aber im Vergleich zu den weiter westlich gelegenen Regionen seinen relativ kühlen Charakter behält. Ein weiteres Charakteristikum dieser Region ist, dass sich die Zahl der Frosttage auf 40 bis 55% ihres derzeitigen Wertes, also weniger stark als in tiefer gelegenen Klimaregionen ändert. Dafür wird die

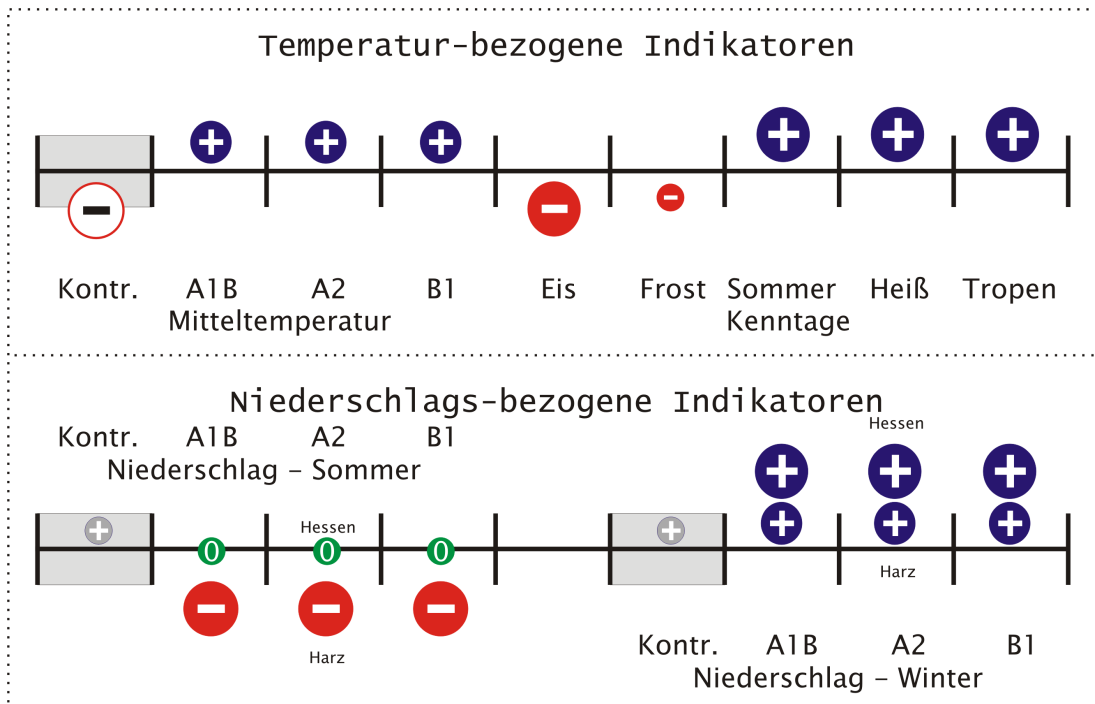


Abbildung 6.7: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für die Zentralen Mittelgebirge und den Harz. Unterschiede in Teilregionen, wie hier in Hessen und dem Harz, sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

Zahl der Sommertage verbreitet mehr als verdoppelt, was über dem Niveau der weiter südlich gelegenen Regionen liegt. Im Harz treten – im Gegensatz zum derzeitigen Klima, in dem dies so gut wie gar nicht vorkommt – auch bei etwas höher gelegenen Stationen heiße Tage und Tropennächte auf.

Diese Region weist bereits im gegenwärtigen Klima ein höheres Niederschlagsniveau als die tiefer gelegenen Gebiete auf. Beim Niederschlag zeigt sich auch die Auswirkung der Orografie klarer als bei der Temperatur: Im Sommer ist der Harz und das Harzvorland durch überdurchschnittliche Abnahme charakterisiert (–20 bis –30%) während in Nordhessen auch in Zukunft verbreitet ein nahezu unverändertes Niederschlagsverhalten. Auf eine Besonderheit des Sommerniederschlags sei in diesem Zusammenhang hingewiesen: Während der Gesamttrend in Deutschland eine sommerliche Abnahme zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigt, erreicht im Szenario **B1** in der Umgebung von Kassel Wertebereiche um bis leicht über (!) 0%. Dies ist in Abb. 6.8 dargestellt.

Der Winterniederschlag zeigt die Region mit überdurchschnittlicher Zunahme, aber in der Ausprägung zweigeteilt: Während laut WETTREG-Szenarios im nördlichen Teil nur eine Zunahme von 20 bis 45% auftreten wird, erreicht die winterliche Niederschlagszunahme in den Gebieten zwischen Rothaargebirge und Vogelsberg verbreitet deutlich höhere Werte mit 40% (Szenario **B1**) bis 60% (Szenario **A1B**).

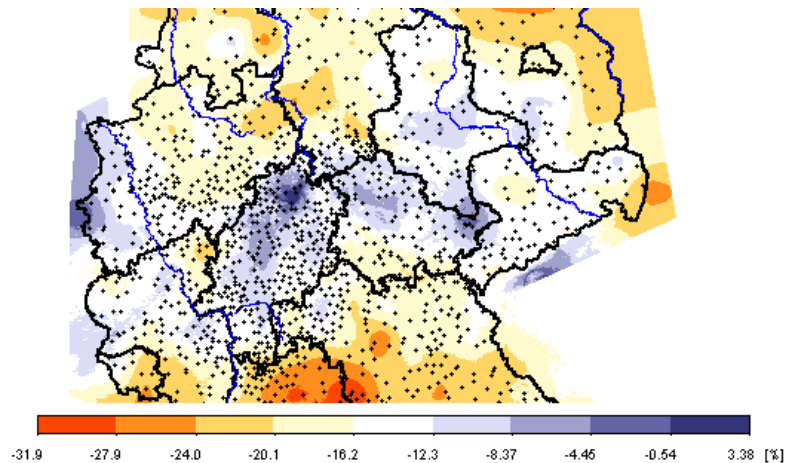


Abbildung 6.8: Lokale Besonderheit beim *Sommerniederschlag* des Szenarios **B1** in den Zentralen Mittelgebirgen: Die prozentuale Niederschlagsänderung im Vergleich der **B1**-Szenarioperiode 2071–2100 mit dem Kontrolllauf liegt verbreitet bei Werten um oder über 0%. Die Farbskala wurde auf den Wertebereich angepasst, um dies herauszuarbeiten.

Tabelle 6.5: Wie Tab. 6.1, jedoch für fünf Stationen der Zentralen Mittelgebirge und des Harzes.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Osnabrück					
1981–1990 Kon.	14,7	62,7	22,2	3,7	0,1
2091–2100 A1B	–11,4	–42,0	27,5	5,9	2,1
2091–2100 A2	–9,9	–41,0	27,8	8,7	4,3
2091–2100 B1	–11,5	–32,0	21,9	3,4	2,3
Hildesheim					
1981–1990 Kon.	16,1	68,2	25,7	4,3	0,2
2091–2100 A1B	–11,5	–40,6	27,4	7,1	0,4
2091–2100 A2	–11,1	–40,4	29,3	9,4	1,2
2091–2100 B1	–11,6	–35,6	27,9	4,5	0,6
Braunlage					
1981–1990 Kon.	44,2	125,7	7,4	0,2	0,0
2091–2100 A1B	–28,2	–55,3	13,2	2,0	0,3
2091–2100 A2	–27,8	–59,0	15,2	1,8	1,1
2091–2100 B1	–25,9	–43,6	11,6	1,7	0,2
Gießen					
1981–1990 Kon.	16,6	72,8	33,7	5,2	0,4
2091–2100 A1B	–11,5	–38,7	28,4	9,7	1,5
2091–2100 A2	–11,6	–36,9	29,8	12,8	3,2
2091–2100 B1	–12,3	–30,0	28,1	7,9	1,0

...weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

Station	Eistage	Frosttage	Sommertage	Heiße Tage	Tropennächte
Kassel					
1981–1990 Kon.	20,6	76,3	23,7	3,4	0,3
2091–2100 A1B	–13,7	–43,5	24,3	5,2	1,8
2091–2100 A2	–14,5	–42,6	28,0	9,4	3,3
2091–2100 B1	–14,8	–35,1	25,6	3,4	1,2

6.7.6 Südostdeutsche Becken und Hügel

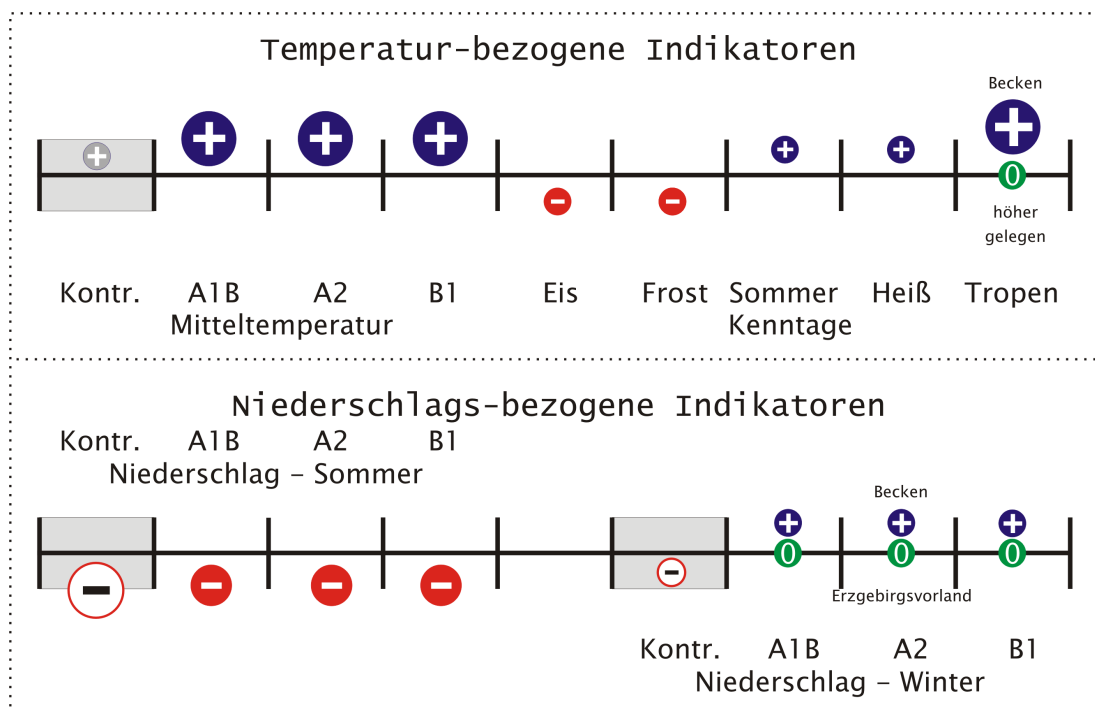


Abbildung 6.9: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für die Südostdeutschen Becken und Hügel. Unterschiede in Teilregionen, wie hier in tiefer bzw. höher gelegenen Gebieten, sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

Diese Region ist im gegenwärtigen Klima durch relativ hohe Temperaturwerte und relativ geringen Niederschlag (weitgehend aufgrund von Lee-Effekten) charakterisiert. Ein zukünftiges Klima wird, die Temperatur betreffend, dort ein ähnlich starkes Signal aufmodulieren, wie in den Tieflandsregionen von West-, Nord und Nordostdeutschland, so dass mit einer Erwärmung zum Ende des 21. Jahrhunderts von knapp 2 K (B1) bis 2,3 K (A-Szenarios) zu rechnen ist. Die Erwärmungssignale der drei Szenarios liegen in dieser Region dichter beieinander als in anderen Regionen. Bei den Kenntagen zeigt sich große lokale Unterschiede,

6.7 Bewertung der Resultate in Naturräumen

die nicht allein mit der Zugehörigkeit zu Becken bzw. Hügelland erklärt werden können (daher auch eine umfangreichere Stationsliste für diese Region). Das Klima ist durch hohe Kontinentalität geprägt, was sich in der gleichzeitig großen Zahl von Niedrigtemperatur- wie von Hochtemperaturindikatoren zeigt. Dieser Charakter bleibt auch erhalten, da sich die Anzahl der Eis- bzw. Frosttage auf rund 40 bis 50% ihres gegenwärtigen Wertes verringern, was eine relativ schwache Änderung ist. Gleichzeitig nehmen die Sommertage und die heißen Tage zwar zu, aber ihre Wachstumsraten bleiben im unteren Bereich (Sommertage: weniger als eine Verdoppelung; heiße Tage: geringfügig über einer Verdoppelung, bei den tiefer gelegenen Stationen auch noch stärkere Zunahmen). Interessant ist auch das Zunahmeverhalten der heißen Tage und der Tropennächte. Insbesondere die Letztgenannten bleiben bei den höher gelegenen Stationen selten, während die Tage mit Temperaturmaxima über 30 °C überall stärker zunehmen.

Tabelle 6.6: Wie Tab. 6.1, jedoch für 12 Stationen der Südostdeutschen Becken und Hügel.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Lindenberg					
1981–1990 Kon.	22,0	86,9	35,8	6,5	1,1
2091–2100 A1B	–13,6	–43,8	24,0	8,2	2,7
2091–2100 A2	–15,1	–45,3	25,7	12,8	8,3
2091–2100 B1	–15,7	–39,7	25,3	9,4	3,3
Cottbus					
1981–1990 Kon.	18,4	84,2	42,6	8,6	0,6
2091–2100 A1B	–11,9	–41,6	26,8	10,1	2,3
2091–2100 A2	–12,5	–40,2	27,3	16,1	5,2
2091–2100 B1	–12,7	–35,7	28,9	12,8	2,9
Magdeburg					
1981–1990 Kon.	16,6	85,7	37,2	6,9	0,0
2091–2100 A1B	–11,4	–50,0	27,5	12,8	1,6
2091–2100 A2	–10,9	–48,5	30,1	15,4	1,8
2091–2100 B1	–12,0	–39,1	27,3	10,3	1,4
Artern					
1981–1990 Kon.	22,7	86,7	33,1	6,1	0,1
2091–2100 A1B	–14,3	–43,8	26,9	8,2	0,3
2091–2100 A2	–15,9	–44,2	30,9	10,0	1,6
2091–2100 B1	–15,7	–38,1	28,7	7,1	0,0
Halle					
1981–1990 Kon.	18,7	76,6	29,9	6,1	0,4
2091–2100 A1B	–12,5	–43,1	28,4	7,2	1,7
2091–2100 A2	–12,0	–44,5	29,0	10,6	3,1
2091–2100 B1	–13,4	–35,2	27,8	5,9	1,2

...weiter auf der nächsten Seite

<i>Fortsetzung</i>					
<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Leipzig					
1981–1990 Kon.	17,3	70,4	39,5	7,3	0,8
2091–2100 A1B	–11,1	–41,8	26,0	10,1	4,0
2091–2100 A2	–12,0	–40,6	28,8	14,1	7,5
2091–2100 B1	–12,8	–35,1	26,3	9,1	4,1
Dresden					
1981–1990 Kon.	24,4	81,2	29,7	5,3	1,1
2091–2100 A1B	–16,1	–43,2	26,6	7,7	3,3
2091–2100 A2	–16,5	–41,5	29,1	10,9	7,1
2091–2100 B1	–16,1	–38,5	26,4	8,4	2,7
Görlitz					
1981–1990 Kon.	26,5	92,2	28,2	4,1	0,5
2091–2100 A1B	–16,8	–45,1	30,6	8,0	1,6
2091–2100 A2	–16,5	–45,7	29,4	13,0	3,7
2091–2100 B1	–16,5	–41,1	27,5	10,2	2,8
Gera					
1981–1990 Kon.	24,1	96,9	26,3	4,7	0,1
2091–2100 A1B	–14,9	–47,8	25,7	5,9	0,5
2091–2100 A2	–16,5	–50,6	29,0	7,3	1,3
2091–2100 B1	–15,2	–42,8	26,8	4,7	0,2
Jena					
1981–1990 Kon.	14,4	79,5	43,8	9,4	0,2
2091–2100 A1B	–9,6	–40,1	27,7	11,5	0,6
2091–2100 A2	–9,9	–40,9	30,0	15,3	1,8
2091–2100 B1	–10,6	–38,7	29,3	10,4	0,4
Weimar					
1981–1990 Kon.	20,3	89,8	29,2	5,1	0,1
2091–2100 A1B	–12,7	–42,4	27,2	7,2	0,5
2091–2100 A2	–14,1	–43,7	29,8	8,6	0,4
2091–2100 B1	–13,5	–37,0	27,5	4,9	0,1
Erfurt					
1981–1990 Kon.	26,9	108,3	23,3	3,6	0,0
2091–2100 A1B	–18,4	–51,5	23,2	3,9	0,6
2091–2100 A2	–18,9	–52,7	29,0	6,5	0,5
2091–2100 B1	–17,0	–43,9	24,6	3,2	0,2

In weiten Teilen der Südostdeutschen Becken und Hügel ist das gegenwärtige Klima niederschlagsarm. Das von den Szenarios errechnete Zukunftsverhalten bringt dort im Sommer eine weitere Abnahme, die aber mit durchschnittlich –15% im Westen der Region und –25% in der Lausitz nicht deutlich anders als in den meisten Naturräumen ist. Ausnahme: Im Nordosten Mecklenburg-Vorpommerns werden zum Ende des 21. Jahrhunderts Abnahmen von –30 bis –50% (je nach Sze-

nario) erwartet. Der Winterniederschlag nimmt zwar auch zu, erreicht aber verbreitet lediglich Werte um +20%. Im Erzgebirgsvorland und im Lee des Thüringer Waldes werden noch geringere Anstiegswerte erwartet.

6.7.7 Links- und Rechtsrheinische Mittelgebirge

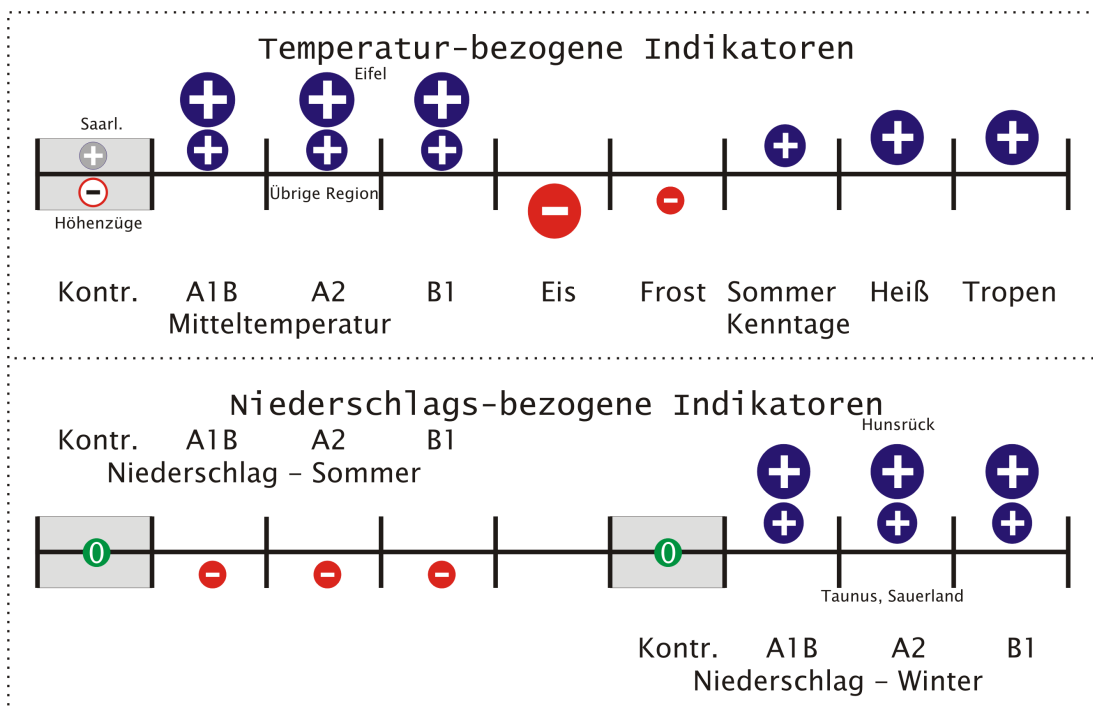


Abbildung 6.10: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für die Links- und Rechtsrheinischen Mittelgebirge. Unterschiede in Teilregionen sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

In der Rheinischen Mittelgebirgsregion liegt das mittlere Temperaturniveau der Jetztzeit in etwa so niedrig wie in den angrenzenden Zentralen Mittelgebirgen (vgl. Abschnitt 6.7.5). Entlang der Täler von Mosel und Nahe, sowie zum Saarland hin werden allerdings höhere Temperaturmittelwerte, die denen des Niederrheins vergleichbar sind, angetroffen (vgl. Abschnitt 6.7.4). Das zukünftige Klimasignal ist im Südwesten und im Rechtsrheinischen Schiefergebirge mit einer Erwärmung von 2,2 (A1B) bis 1,5 K (B1) etwas geringer als das Deutschlandmittel, während es zur Eifel hin um rund 0,3 K höher liegt. Die Auswirkung des Klimasignals auf die Kenntage ist in Tab. 6.7 anhand einiger Stationen dokumentiert. Am deutlichsten zeigen sich die Auswirkungen im starken Rückgang der Zahl der Eistage, die in den Szenarios nur noch 15 bis 30% des Niveaus des Kontrolllaufs erreicht. Das ist der stärkste Rückgang der Zahl der Eistage im Vergleich aller Regionen. Dieser Effekt ist längst nicht mehr so stark beim Rückgang der Frosttage ausgeprägt. Dort herrscht eine für das Gros der Regionen typische Halbierung

der Gegenwartswerte vor. Interessanterweise ist auch die Zunahme der Anzahl der Sommertage eher mäßig (deutlich weniger als eine Verdoppelung, was im Bundesdurchschnitt im niedrigsten Bereich rangiert), jedoch nimmt die Zahl der heißen Tage stark zu.

Die im vorigen Absatz beschriebene Feinstruktur des Klimasignals wird auch erkennbar, wenn die Häufigkeitsverteilungen der Mitteltemperatur betrachtet werden. In Abb. 6.11 finden sich diese für zwei Stationen im Rheinischen Mittelgebirge (Trier und Euskirchen) und eine Vergleichsstation aus Schleswig-Holstein (Eutin). In den Häufigkeitsverteilung von Trier und Euskirchen treten nur relativ geringe Veränderungen in der Mitte der Verteilung, d.h. bei 5–15 °C, auf. Deutlich ist jedoch der Abbau an der linken Flanke (niedrige Werte) als auch der Zuwachs an der rechten Flanke (hohe Werte) in Form der Lage der roten Balken erkennbar. Eine Vergleichsstation aus dem Nordwestdeutschen Tiefland (Eutin) zeigt dies nicht so ausgeprägt – dort ist gerade in der Verteilungsmitte die Veränderung relativ groß und insbesondere an der rechten Verteilungsflanke relativ gering.

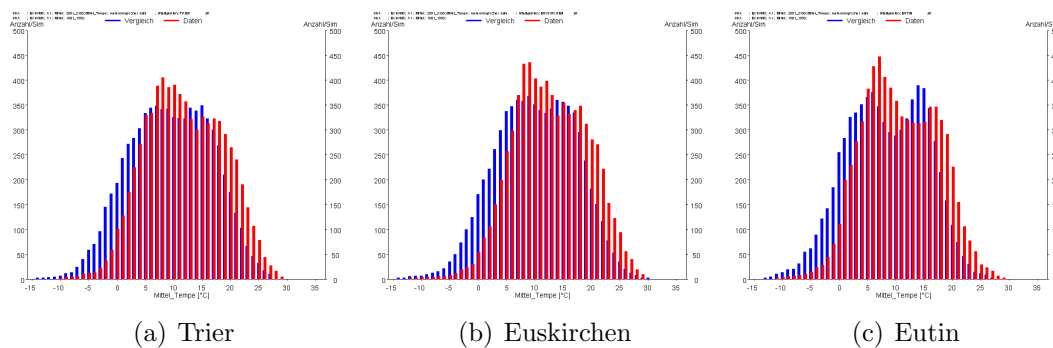


Abbildung 6.11: Veränderungen in der Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur zwischen dem Kontrolllauf 1981–1990 (blaue Balken) und dem Szenario **A1B** 2091–2100 (rote Balken). Dargestellt sind zwei Stationen aus dem Rheinischen Mittelgebirge (Trier und Euskirchen) und eine Station aus dem Nordwestdeutschen Tiefland (Eutin).

In den meisten Teilen dieses Berichts wurde die Zweiteilung des Niederschlags-signals mit Abnahme im Sommer und Zunahme im Winter betont. In Gebiet der Links- und Rechtsrheinischen Mittelgebirge sollte ausnahmsweise auch auf das bemerkenswerte Verhalten des *Jahresniederschlags* hingewiesen werden. Abb. 6.12 illustriert diese Besonderheit: Im Bereich vom Taunus bis zum Sauerland ist gibt es so gut wie keine Änderung (dunkelrote Farbtöne), während in den Linksrheinischen Mittelgebirgen mit 10 bis 15% Jahresniederschlagsänderung eine Verschiebung zu einem insgesamt feuchteren Klima angezeigt wird. Dies ist der Nettoeffekt eines besonders starken Anstiegs des Winterniederschlags und eines nicht sehr ausgeprägten Rückgang des Sommerniederschlags, wie er in den nächsten beiden Absätzen beschrieben ist.

Bezüglich des Sommerniederschlags zeigt die gesamte Region ein einheitliches Verhalten: Der sommerliche Rückgang liegt in einer Größenordnung von –15%.

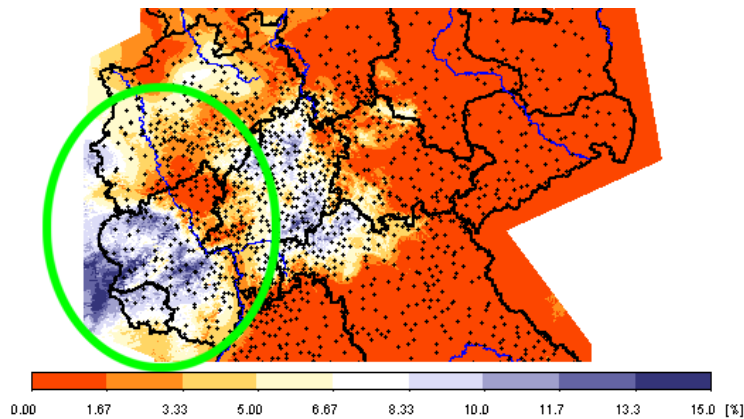


Abbildung 6.12: Kartendarstellung des Klimasignals beim *Jahresniederschlag*. Dargestellt sind die prozentualen Änderungen zwischen dem Szenario **A1B** 2071–2100 und dem Kontrolllauf 1961–1990. Die Farbskala wurde modifiziert, damit sowohl Abnahme als auch Gleichbleiben des Jahresniederschlags zum Ende des 21. Jahrhunderts durch die gleiche dunkelrote Farbe gekennzeichnet sind. Hellrote, weiße und blaue Farbgebung zeigt Niederschlagszunahme an. Die Linksrheinischen Mittelgebirge sind durch den grünen Ring hervorgehoben.

Dies ist geringer als der im Mittel in Deutschland um -20% zurückgehende Sommerniederschlag. Dieses Muster findet sich sowohl links als auch rechts des Rheins.

Wie oben beschrieben zeigt der *Jahresniederschlag* in weiten Teilen dieses Naturraums ein auffälliges, anderenorts nicht sichtbares Zunahmeverhalten. Ursache dafür ist die sehr starke Zunahme des *Winterniederschlags* in den Links- und Rechtsrheinischen Mittelgebirgen. Im Szenario **A1B** (vgl. a. Abb. 5.5) finden sich die höchsten Zunahmewerte für den Winterniederschlag mit nahe $+80\%$ im Hunsrück, und auch in anderen Teilen der Linksrheinischen Gebirge werden Werte von $+50\%$ verbreitet übertroffen. Im Bereich vom Taunus bis zum Sauerland gilt: Die winterliche Niederschlagszunahme bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist mit lediglich $+20$ bis $+30\%$ geringer als in anderen Teilen der Rheinischen Mittelgebirge; der sommerliche Niederschlagsrückgang wird dadurch nahezu kompensiert und beim Jahresniederschlag sind folglich keine auffälligen Veränderungen erkennbar.

Tabelle 6.7: Wie Tab. 6.1, jedoch für fünf Stationen der Links- und Rechtsrheinischen Mittelgebirge.

Station	Eistage	Frosttage	Sommertage	Heiße Tage	Tropennächte
Euskirchen					
1981–1990 Kon.	9,6	53,5	31,5	5,6	0,3
2091–2100 A1B	–7,2	–32,3	28,1	10,7	3,0
2091–2100 A2	–6,6	–32,2	30,9	14,2	5,7
2091–2100 B1	–8,5	–29,1	32,2	9,0	2,8

...weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Koblenz					
1981–1990 Kon.	6,9	49,7	44,4	8,7	1,4
2091–2100 A1B	–5,0	–29,6	30,0	14,7	3,6
2091–2100 A2	–4,3	–29,6	34,3	18,9	5,6
2091–2100 B1	–5,8	–27,4	30,9	13,9	3,6
Kaiserslautern					
1981–1990 Kon.	14,6	74,5	37,7	6,2	0,3
2091–2100 A1B	–11,0	–34,7	28,6	14,7	1,1
2091–2100 A2	–10,3	–39,3	35,8	17,0	1,9
2091–2100 B1	–11,5	–29,3	30,7	11,3	1,1
Trier					
1981–1990 Kon.	15,1	63,8	34,6	5,8	0,6
2091–2100 A1B	–11,4	–31,8	27,4	11,5	1,4
2091–2100 A2	–10,1	–32,2	30,0	14,4	1,9
2091–2100 B1	–10,6	–24,8	25,6	9,3	0,3
Saarbrücken					
1981–1990 Kon.	10,4	56,6	38,2	5,6	0,4
2091–2100 A1B	–7,4	–28,1	29,1	12,9	3,4
2091–2100 A2	–6,4	–26,5	33,0	14,9	4,3
2091–2100 B1	–8,5	–23,1	29,0	9,3	1,5

6.7.8 Oberrheingraben

In dieser Region werden die höchsten Temperaturwerte beobachtet. Insbesondere im südlichen Oberrheingraben führt dies zu besonders häufigen und lang anhaltenden Hitzewellen. Die Temperaturänderung zum Ende des 21. Jahrhunderts ist im Bereich des Oberrheingraben bei **A1B** von der gleichen Größenordnung wie im weit überwiegenden Teil Deutschlands und liegt bei +2,3 K, im äußersten Südwesten bei +2,5 K. In dieser Teilregion sind die Unterschiede zwischen den Szenarios Deutschland-weit am deutlichsten ausgeprägt, denn sowohl **A2** als auch **B1** verzeichnen im Oberrheingraben zwar auch eine Erwärmung, aber diese bleibt mit +1,8 resp. +1,5 K deutlich hinter dem für Deutschland gemittelten Anstieg der beiden Szenarios zurück. Die besonderen Klimaverhältnisse des Oberrheingrabens zeigen sich zudem deutlich bei der Zahl der Tropennächte, die an einigen Stationen schon im Kontrolllauf häufig auftreten. In den Szenarios werden am Ende des 21. Jahrhunderts zum Teil mehr als 10 Tropennächten pro Jahr simuliert. Man sollte annehmen, dass dieser Zunahme ein besonders starker Rückgang der „kalten Kenntage“ gegenübersteht. Es zeigt sich jedoch, dass sowohl die Zahl der Eistage im Oberrheingraben im gegenwärtigen Klima als auch ihr Rückgang in den Projektionen der Szenarios zumeist nicht am niedrigsten in ganz Deutschlands ist; dies ist an den Stationen des Linksrheinischen Mittelgebirges der Fall.

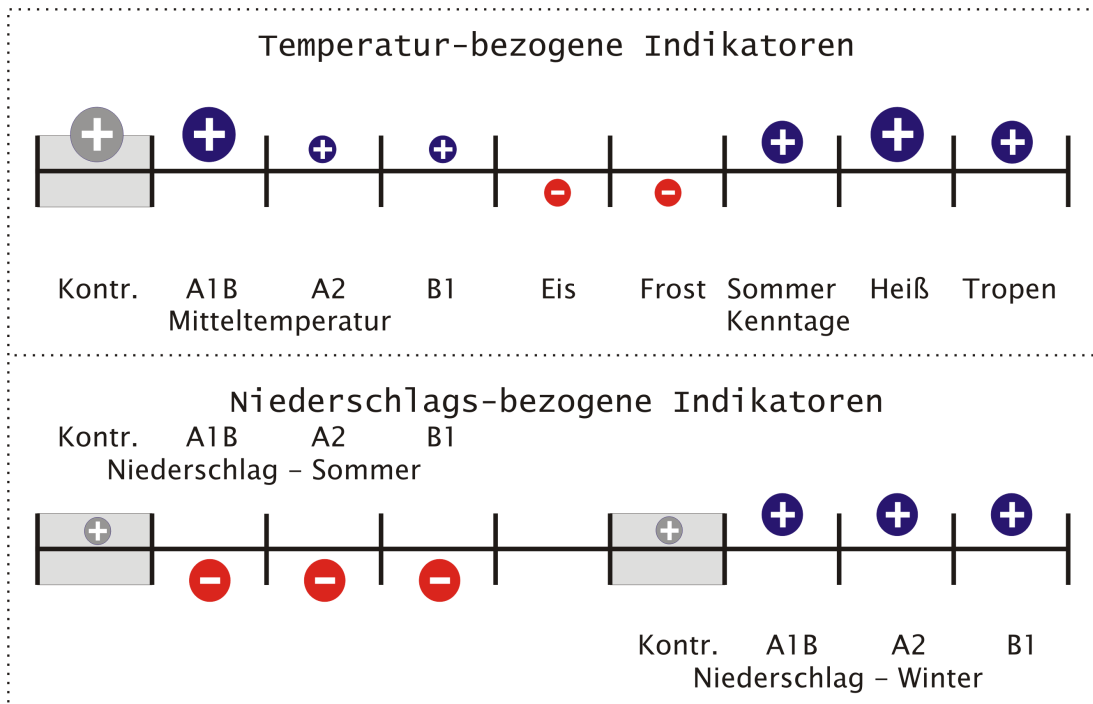


Abbildung 6.13: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für den Oberrheingraben. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

Sowohl für den Niederschlagsrückgang im Sommer als auch die Niederschlagszunahme im Winter ist in der Oberrhein-Region keine besonders auffällige Struktur erkennbar. Die Niederschlagsänderungen liegen, im Vergleich zum Deutschlandmittel, bei durchschnittlichen -20% im Sommer und leicht überdurchschnittlichen $+40\%$ (A1B) bis durchschnittlichen $+20\%$ (B1) im Winter.

Tabelle 6.8: Wie Tab. 6.1, jedoch für sieben Stationen des Oberrheingrabens.

Station	Eistage	Frosttage	Sommertage	Heiße Tage	Tropennächte
Mainz					
1981–1990 Kon.	12,5	55,9	42,0	7,9	1,2
2091–2100 A1B	-8,9	-28,9	32,7	15,7	3,4
2091–2100 A2	-8,8	-28,0	33,9	17,4	4,5
2091–2100 B1	-9,5	-25,5	31,9	11,8	1,6
Wiesbaden					
1981–1990 Kon.	12,4	58,2	39,6	7,9	1,2
2091–2100 A1B	-8,7	-31,3	29,5	11,3	2,7
2091–2100 A2	-8,5	-30,5	35,4	14,9	5,2
2091–2100 B1	-9,7	-26,1	34,4	10,4	1,6

...weiter auf der nächsten Seite

<i>Fortsetzung</i>					
<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Mannheim					
1981–1990 Kon.	11,2	66,8	46,6	9,0	0,9
2091–2100 A1B	–7,7	–33,4	32,2	16,5	3,6
2091–2100 A2	–7,4	–33,6	34,5	20,1	4,7
2091–2100 B1	–8,8	–29,0	32,3	14,7	1,7
Heidelberg					
1981–1990 Kon.	11,2	51,4	42,5	7,2	1,8
2091–2100 A1B	–7,7	–28,3	30,0	15,4	9,4
2091–2100 A2	–7,3	–30,5	33,3	18,9	13,0
2091–2100 B1	–9,1	–27,9	33,6	14,6	9,3
Karlsruhe					
1981–1990 Kon.	12,0	61,6	53,4	11,8	1,4
2091–2100 A1B	–7,9	–31,1	31,1	18,5	5,3
2091–2100 A2	–8,2	–31,9	33,7	22,8	6,1
2091–2100 B1	–9,3	–27,3	29,9	16,8	5,6
Baden Baden					
1981–1990 Kon.	12,9	86,6	35,4	4,9	0,3
2091–2100 A1B	–9,0	–43,3	25,7	10,4	0,2
2091–2100 A2	–8,4	–40,3	30,0	11,7	1,0
2091–2100 B1	–10,0	–32,0	29,0	7,5	–0,3
Freiburg i.Br.					
1981–1990 Kon.	9,6	46,1	48,0	8,3	4,7
2091–2100 A1B	–6,1	–23,0	31,8	17,9	8,5
2091–2100 A2	–4,1	–22,1	34,0	18,8	12,1
2091–2100 B1	–4,7	–15,7	29,7	14,3	8,4

6.7.9 Alp und Nordbayerisches Hügelland

Dies ist der größte Naturraum. In ihm ist gegenwärtig ein relativ kühles Klima anzutreffen, was sich beispielsweise in der hohen Zahl der Eis- und Frosttage (s. Tab. 6.9) zeigt. Deutlicher als in anderen Naturräumen ist auch erkennbar, wie in dieser Region die Kontinentalität von West nach Ost zunimmt. In Abb. 6.15 ist eine Größe dargestellt, mit der sich Kontinentalität charakterisieren lässt: Die mittlere Tagestemperaturspanne. Sie ist von höherer Komplexität, als es auf den ersten Blick erscheint, denn in ihr finden sich auch Wirkungen der Strahlung und der atmosphärischen Trübung wieder: Klare Winternächte können Grund für eine hohe Tagestemperaturspanne sein, ebenso wie Tage mit hoher Einstrahlung und hinreichend klarer Luft, damit nach dem hohen Tagesmaximum eine entsprechende Abkühlung in der Nacht auftreten kann. In Meeresnähe ist die mittlere Tagestemperaturspanne geringer, wegen der häufig eintretenden Pufferwirkung durch den atmosphärischen Wasserdampf. Die Häufigkeitsverteilung der Tagestemperaturspanne ist für kontinentale Stationen folglich besonders breit, d.h. es treten Tagestemperaturspannen mit großer Vielfalt auf da dort Werte im hohen

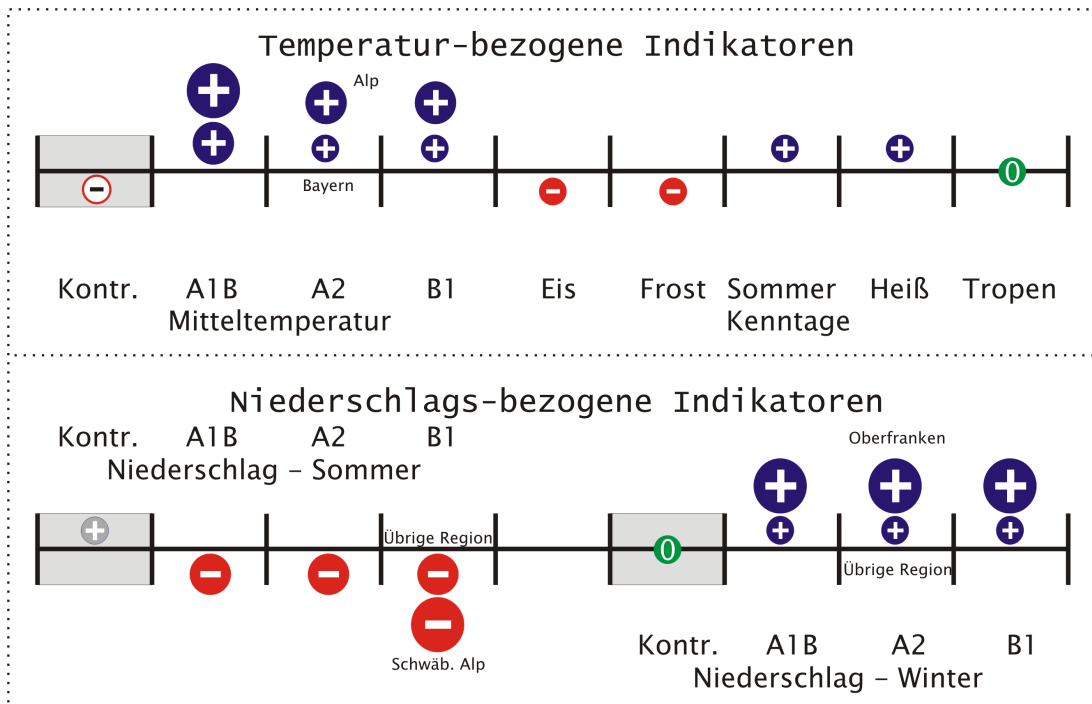


Abbildung 6.14: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für die Alp und das Nordbayerische Hügelland. Unterschiede in Teilregionen, wie hier bei Schwäbischer Alp und Oberfranken, sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

Bereich häufiger sind. Dieser Verteilungscharakter ist in Abb. 6.15 (b) an der Station Bamberg deutlich ausgeprägt, während die Verteilung in Abb. 6.15 (a) an der Station Ulm einen geringeren Kontinentaleinfluss widerspiegelt. Zum Vergleich ist in Abb. 6.15 (c) der Verteilungsverlauf für eine klar maritim geprägte Station gezeigt. Aus dem Breiterwerden aller Verteilungen im Vergleich der gegenwärtigen und der zukünftigen Dekaden (blaue bzw. rote Balken in Abb. 6.15) ist außerdem eine zunehmende „Kontinentalisierung“ erkennbar.

In der Region Alp und Nordbayerisches Hügelland treten die Unterschiede zwischen den Szenarios so deutlich hervor wie in kaum einer anderen Region. Dabei ist das Temperatursignal der Klimaänderung je nach Szenario sowohl quantitativ als auch *qualitativ* unterschiedlich ausgeprägt. Während im **A1B**-Abschnitt 2071–2100 im Vergleich zur Periode 1961–1990 des Kontrolllaufs rund 2,4 K Temperaturerhöhung im gesamten Bereich vorherrscht (vgl. Abb. 5.3), ist in den anderen beiden Szenarios zusätzlich zum niedrigeren Gesamtniveau der Erwärmung auch ein stärkerer räumlicher Unterschied erkennbar. Bei **A2** liegt die Temperaturzunahme zwischen +1,7 K im Südschwarzwald und etwas über 2 K auf der Schwäbischen Alb und im Fränkischen Stufenland; bei **B1** liegt der Wertebereich, bei ähnlichen räumlichen Mustern, zwischen +1,4 K im Südschwarzwald und knapp +2 K im Fränkischen Stufenland. Die Kenntage ändern sich dabei in diesem Naturraum weniger als in tiefer gelegenen Regionen. So wird die Zahl

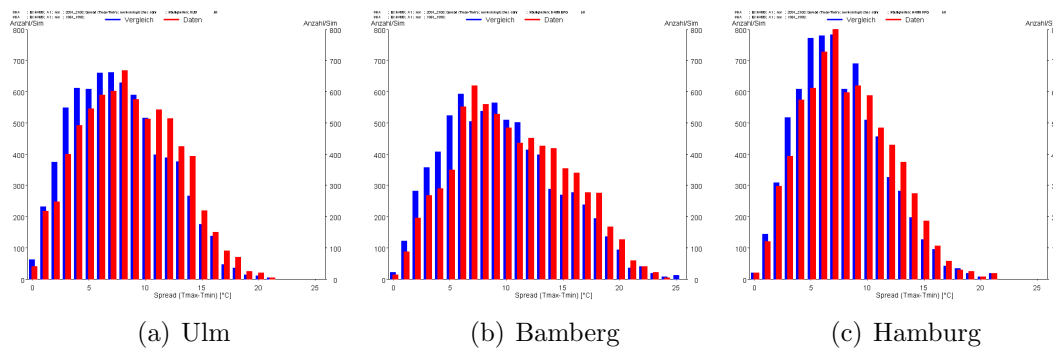


Abbildung 6.15: Veränderungen in der Häufigkeitsverteilung der Tagestemperaturspanne zwischen dem Kontrolllauf 1981–1990 (blaue Balken) und dem Szenario **A1B** 2091–2100 (rote Balken). Dargestellt sind zwei Stationen aus der Region Alp/Nordbayerisches Hügelland (Ulm und Bamberg) und eine Station aus dem Nordwestdeutschen Tiefland (Hamburg).

der Frosttage in Zukunft relativ wenig zurückgehen und auch die Zahl der Sommertage und heißen Tage unterdurchschnittlich zunehmen. Tropennächte bleiben selten.

Beim Sommerniederschlag findet sich ebenfalls ein nach Szenarios differenziertes Verhalten (vgl. Abb. 5.4). Während bei **A1B** und **A2** der sommerliche Rückgang von vergleichbarer Größenordnung wie der Durchschnitt aller Stationen ist (–20 bis –30%) zeigt sich bei **B1** ein sehr viel deutlicherer Rückgang, der im Bereich der Schwäbischen Alb mit –30% Werte erreicht, die denen im Gebiet des stärksten Rückgangs im Nordosten Deutschlands vergleichbar sind.

Das Signal des Winterniederschlags besitzt erneut eine andere Charakteristik: Qualitativ, also bei Betrachtung der Lage der Gebiete mit stärkerer und mit geringerer Zunahme, gibt es kaum Unterschiede zwischen den Szenarios. Andererseits existieren aber Teilregionen, in denen die Zunahme des Winterniederschlags zu den stärksten ganz Deutschlands zählt (Unterfranken, Szenario **A1B**: über +70% Zunahme). In der Schwäbischen Alb treten Zunahmewerte von lediglich +10 bis +20% auf.

Tabelle 6.9: Wie Tab. 6.1, jedoch für sechs Stationen der Alp und des Nordbayerischen Hügellands.

Station	Eistage	Frosttage	Sommertage	Heiße Tage	Tropennächte
Bamberg					
1981–1990 Kon.	19,7	98,8	38,1	7,1	0,3
2091–2100 A1B	–11,9	–44,5	23,4	7,3	–0,2
2091–2100 A2	–14,6	–42,2	32,0	14,0	0,2
2091–2100 B1	–13,9	–38,7	28,7	8,7	–0,2

...weiter auf der nächsten Seite

6.7 Bewertung der Resultate in Naturräumen

<i>Fortsetzung</i>					
<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Regensburg					
1981–1990 Kon.	25,0	103,4	42,6	7,6	0,3
2091–2100 A1B	–13,5	–48,3	21,3	9,8	0,3
2091–2100 A2	–16,1	–48,8	34,5	17,6	0,0
2091–2100 B1	–15,1	–40,9	30,2	13,7	0,3
Donaueschingen					
1981–1990 Kon.	25,8	127,6	21,1	1,6	0,0
2091–2100 A1B	–17,2	–46,7	24,2	6,2	0,0
2091–2100 A2	–17,8	–38,0	29,1	6,2	0,0
2091–2100 B1	–15,2	–35,8	23,2	4,4	0,0
Schweinfurt					
1981–1990 Kon.	18,2	87,5	38,3	7,3	0,5
2091–2100 A1B	–11,3	–42,5	29,1	12,1	0,8
2091–2100 A2	–13,4	–41,9	34,4	16,6	1,6
2091–2100 B1	–13,6	–36,1	33,1	11,0	0,8
Würzburg					
1981–1990 Kon.	21,3	83,7	37,2	7,0	0,4
2091–2100 A1B	–13,9	–43,2	25,0	8,7	1,1
2091–2100 A2	–15,8	–43,8	32,3	13,7	1,5
2091–2100 B1	–15,1	–36,0	30,6	6,8	1,1
Ulm					
1981–1990 Kon.	33,3	100,0	23,1	2,8	0,0
2091–2100 A1B	–20,3	–46,6	22,3	4,5	0,4
2091–2100 A2	–23,7	–46,0	33,4	7,0	1,3
2091–2100 B1	–18,4	–39,4	24,9	3,2	0,0

6.7.10 Erzgebirge, Thüringer und Bayerischer Wald

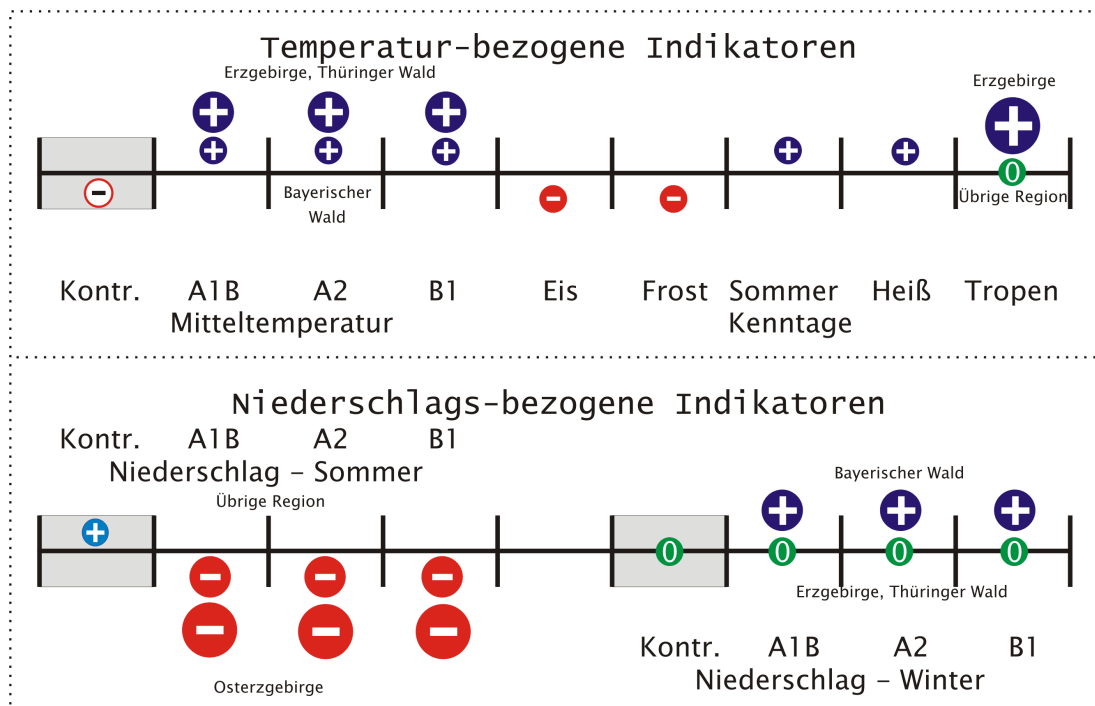


Abbildung 6.16: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für das Erzgebirge sowie den Thüringer und den Bayerischen Wald. Unterschiede in Teilregionen sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

In dieser Region setzt das Klimasignal auf ein kühles und feuchtes gegenwärtiges Klima auf. Vom Temperaturanstiegsverhalten ist das Erzgebirge und der Thüringer Wald den vorgelagerten Hügelländern recht ähnlich; es werden dort Anstiegswerte um 2,3 K (**A1B**) bis 2,0 K (**B1**) erreicht. Ein differenzierteres Bild zeigt sich im Bayerischen Wald, wo das Signal im nördlichen Teil jenem des Thüringer Waldes gleicht, jedoch nach Süden zur Donau hin ein geringeres Anstiegssignal erwartet werden kann (+2 K in **A1B** bis +1,5 K in **B1**). Der Einfluss dieses Anstiegs auf die Kenntage ist in dieser Region geringer als in anderen; bemerkenswert ist die deutliche Zunahme der Tropennächte im Erzgebirgsvorland.

Der sommerliche Niederschlagsrückgang entspricht in diesem Gebiet etwa dem Durchschnitt aller Stationen in Deutschland, ist allerdings im Osterzgebirge mit -35% (**A1B**) bis -25% (**B1**) ein wenig stärker ausgeprägt.

Das Verhalten des Winterniederschlags ist in der Region recht unterschiedlich. Ganz besonders auffällig ist dies im Erzgebirge und im Thüringer Wald, wo geringe Zunahmewerte von deutlich unter 15% auftreten; Auch wenn prozentuale Niederschlagsänderungen im Bereich zwischen +15% und -15% nur eingeschränkt interpretierbar sind sei hinzugefügt, dass die Niederschlagszunahme zum Erzgebirgskamm hin verbreitet unter 5% liegt und sich im Bereich des Elbtals in allen Szenarios eine schwache winterliche Niederschlagsabnahme (!) fin-

6.7 Bewertung der Resultate in Naturräumen

det. Im Bayerischen Wald hingegen nimmt die winterliche Niederschlagszunahme einen relativ einheitlichen und im Vergleich zum Deutschlandmittel „normalen“ Wertebereich von +20 bis +30% ein.

Tabelle 6.10: Wie Tab. 6.1, jedoch für vier Stationen des Erzgebirgsvorlands, des Erzgebirges sowie des Thüringer und Bayerischen Waldes.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Plauen					
1981–1990 Kon.	25,7	99,9	25,4	4,2	0,1
2091–2100 A1B	–16,5	–45,4	24,9	6,9	0,1
2091–2100 A2	–17,4	–46,2	29,9	8,0	1,0
2091–2100 B1	–16,7	–41,1	26,7	6,2	0,0
Chemnitz					
1981–1990 Kon.	31,7	94,1	19,1	2,9	0,4
2091–2100 A1B	–20,8	–47,0	22,0	2,8	2,7
2091–2100 A2	–22,3	–49,4	26,6	5,1	4,7
2091–2100 B1	–21,3	–44,4	22,6	3,8	2,8
Sonneberg					
1981–1990 Kon.	50,2	117,4	12,7	1,4	0,1
2091–2100 A1B	–28,9	–44,3	13,8	2,6	0,6
2091–2100 A2	–28,7	–45,2	21,0	2,7	3,6
2091–2100 B1	–23,1	–39,6	14,0	2,0	0,5
Hof					
1981–1990 Kon.	42,2	127,2	15,3	3,3	0,0
2091–2100 A1B	–25,7	–54,9	16,8	0,9	0,0
2091–2100 A2	–26,5	–55,0	25,3	2,3	0,4
2091–2100 B1	–24,5	–49,4	18,2	0,3	0,1

6.7.11 Alpenvorland

Zwischen Donau und Alpen wird das Klimasignal einem niederschlagsreichen und wegen der Höhenlage mäßig warmen Klima aufgeprägt. Die Aussagen zum Klimawandel müssen sich in dieser Region auf ein für die orografische Vielfalt verhältnismäßig dünnes Stationsnetz stützen. Es besteht folglich die Möglichkeit, dass nicht alle regionalen Strukturen des Klimasignals erkannt werden können.

Das Erwärmungssignal zeigt im Grunde eine Dreiteilung in West-Ost-Richtung: Moderater Temperaturanstieg zwischen 1,5 K (**B1**) und 2,2 K (**A1B**) am Bodensee, etwas größerer Anstieg zwischen 2 und 2,5 K in Oberbayern und erneut moderater Temperaturanstieg nach Niederbayern hin. Die Veränderungen bei den Kenntagen sind eher unterdurchschnittlich; zwar nimmt die Zahl der heißen Tage zum Teil deutlich zu aber Tropennächte bleiben eine Seltenheit.

Das Änderungssignal beim Niederschlag entspricht im Alpenvorland in etwa dem Durchschnitt Deutschlands mit einem sommerlichen Rückgang um –15% (**B1**) bis –25% (**A1B**) und einem winterlichen Anstieg um +20% (**B1**) bis +35% (**A1B**).

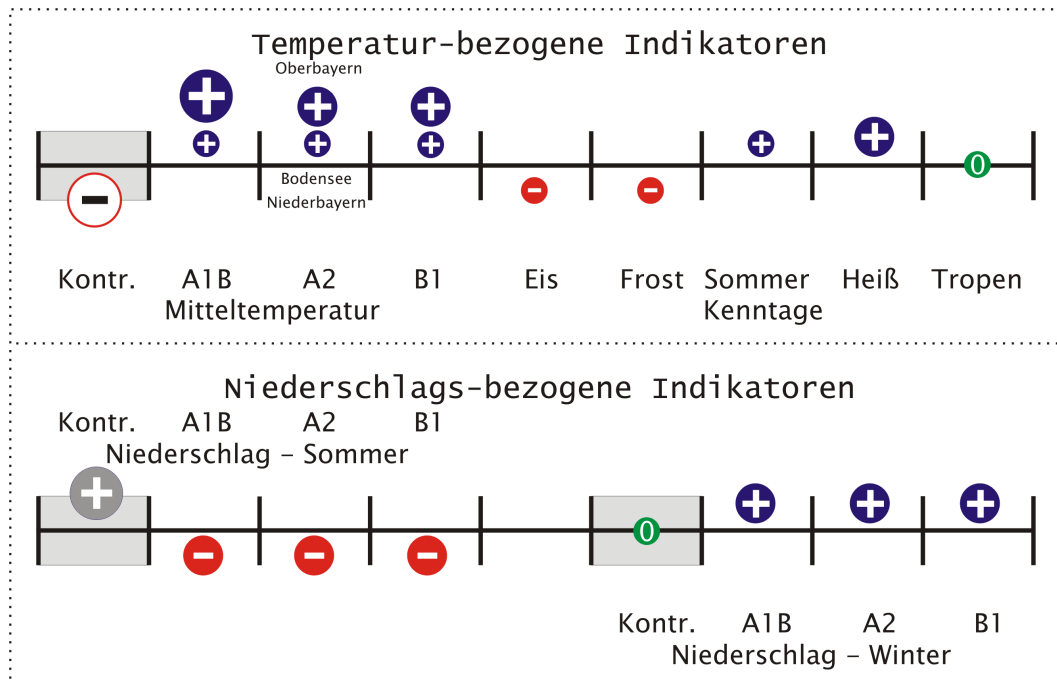


Abbildung 6.17: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für das Alpenvorland. Unterschiede in Teilregionen, wie hier am Bodensee und in Ober- und Niederbayern, sind, wo notwendig, mit zwei Symbolen dargestellt. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

Tabelle 6.11: Wie Tab. 6.1, jedoch für zwei Stationen des Alpenvorlands.

Station	Eistage	Frosttage	Sommertage	Heiße Tage	Tropennächte
Augsburg					
1981–1990 Kon.	27,7	106,5	29,4	4,1	0,1
2091–2100 A1B	–18,3	–46,5	22,5	7,2	0,0
2091–2100 A2	–19,5	–47,7	33,9	11,8	0,5
2091–2100 B1	–17,6	–42,5	29,2	8,1	–0,1
München					
1981–1990 Kon.	25,3	106,9	28,9	4,8	0,1
2091–2100 A1B	–17,3	–46,5	22,3	5,7	0,8
2091–2100 A2	–18,9	–51,0	35,0	9,6	2,0
2091–2100 B1	–16,1	–45,8	28,4	8,1	–0,1

6.7.12 Alpen

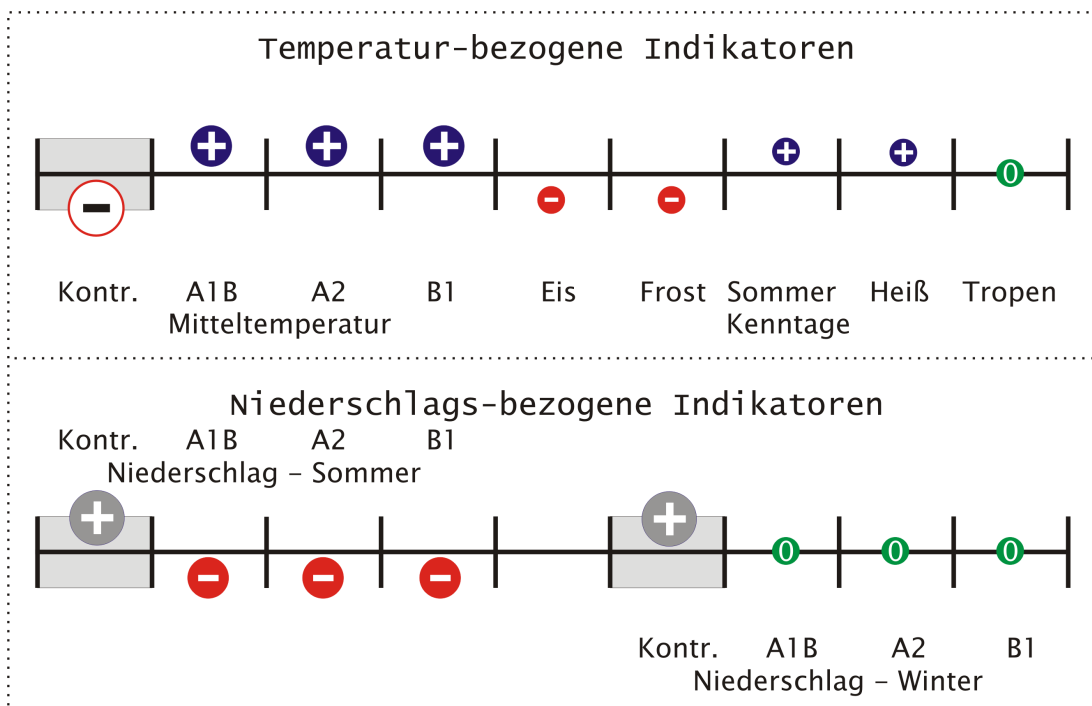


Abbildung 6.18: Schematische Darstellung des Klimazustands und der Klimaänderung für die Alpenregion. In Abb. 6.2 auf Seite 70 findet sich eine Erläuterung der Symbole.

Der Bereich der Alpen ist im gegenwärtigen Klima durch ein niederschlagsreiches, kühles Klima gekennzeichnet. Die Aussagen der Temperaturszenarios liegen hier besonders dicht beieinander, da bei **A1B** etwa +2,3 und bei **B1** etwa +2 K erreicht werden. Der Rückgang von Eis- und Frosttagen ist an den Beispielstationen im Verhältnis zu anderen Regionen besonders gering – bei den Frosttagen entspricht die zukünftige Zahl z.B. immer noch rund 75% des gegenwärtigen Stands (in anderen Regionen ist eine Halbierung oder ein noch stärkerer Rückgang häufig). Auch der Zuwachs an Sommertagen und an heißen Tagen liegt unter dem Durchschnitt des gesamten Untersuchungsgebiets.

Bei der Beurteilung der Niederschlagsmenge darf nicht übersehen werden, dass diese bereits im gegenwärtigen Klima in den Alpen besonders hoch ist. Die durch die Szenario errechnete sommerliche Abnahme befindet sich dabei im für Deutschland typischen Wertebereich von rund -20%. Im Winter hingegen zeichnet sich der Alpenraum dadurch aus, dass – ähnlich wie im Erzgebirge – der Niederschlag kaum zunimmt oder sogar verbreitet in eine winterliche Niederschlagsabnahme bis unter -5% verkehrt ist. Allerdings ist ein Wertebereich der prozentualen Niederschlagsänderung zwischen rund +15% und -15% nur eingeschränkt interpretierbar.

Tabelle 6.12: Wie Tab. 6.1, jedoch für zwei Stationen des Alpenraums.

<i>Station</i>	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
Garmisch-Part.					
1981–1990 Kon.	27,9	142,0	25,8	2,7	0,0
2091–2100 A1B	–16,6	–40,2	23,9	4,9	0,0
2091–2100 A2	–21,3	–41,0	34,2	5,5	0,0
2091–2100 B1	–18,1	–38,3	26,8	3,5	0,0
Mittenwald					
1981–1990 Kon.	25,5	129,1	20,5	2,0	0,0
2091–2100 A1B	–17,2	–46,3	21,5	3,6	0,0
2091–2100 A2	–18,8	–43,6	34,4	4,0	1,0
2091–2100 B1	–16,6	–42,7	24,6	2,4	0,1

6.8 Beurteilung weiterer Klimaparameter

Das Hauptaugenmerk wurde in dieser Studie auf die Analyse des Klimasignals von Temperatur und Niederschlag gelegt. Wie Tab 2.1 zeigt standen Daten weiterer Größen zur Verfügung. In den beiden folgenden Abschnitten wird das Klimasignal des Bedeckungsgrad und des Wind kurz vorgestellt.

6.8.1 Bedeckungsgrad

Der Bedeckungsgrad, sowohl für das Klima der Jetztzeit⁵ als auch das Klimasignal des Bedeckungsgrads in den Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** finden sich in Abb. 6.19. Dort ist erkennbar, dass im gegenwärtigen Klima in Deutschland ein Wertebereich zwischen rund 4,5 und 6 Achteln (Octas) erreicht wird. Das Deutschlandmittel beträgt 5,3 Octas. Das Klimasignal des Bedeckungsgrads, also die Änderung dieser Größe zum Ende des 21. Jahrhunderts ist hingegen schwach und liegt unter einem Zehntel des Wertes im Klima der Jetztzeit. Es fällt auf, dass so gut wie überall ein *Rückgang* des Bedeckungsgrads simuliert wird, bei **B1** im Flächenmittel etwas geringer (0,3 Octas) als bei **A1B** und **A2** (jeweils 0,4 Octas).

Ein zusätzlicher Vergleich von Kontrolllauf und Beobachtungen (hier nicht dargestellt) zeigt, dass die modellbedingten Abweichungen in einer Größenordnung von 0,1 bis 0,2 Octas liegen. Das bedeutet, die Identifikation des Klimasignals des Bedeckungsgrads ist schwierig, denn es ist relativ schwach im Verhältnis zum Betrag der betrachteten Größe und zudem nicht deutlich unterschiedlich von der systematischen Abweichung des Modells von den Beobachtungen. Daher ist anzunehmen, dass die in Abb. 6.19 gezeigten Differenzen zum Teil modellbedingt sind und nur zum Teil ein reales Klimasignal darstellen.

Auch wenn die Identifikation des Klimasignals des Bedeckungsgrads problematisch ist, sollte dennoch ein Blick auf den Jahresgang dieser Größe geworfen

⁵vom Kontrolllauf dargestellt

werden. Die Ringdiagramme (Abb. 6.20) zeigen, nach Monaten und Jahreszeiten differenziert, die Änderungen des Bedeckungsgrads für die Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**. Die Farbgestaltung erfolgte dabei wie in den Kartendarstellungen von Abb. 6.19. Es ist zudem zu beachten, dass, auf Grund der Analyse-methode, bei den Ringdiagrammen nur zehnjährige Zeitabschnitte miteinander verglichen werden können. Aus Abb. 6.20 ist ersichtlich, dass beim Bedeckungsgrad eine zeitliche Differenzierung des Klimasignals existiert. In Winter und Frühjahr besteht dabei die Tendenz, dass sich der Bedeckungsgrad kaum ändert, während im Herbst und insbesondere im Sommer zum Ende des 21. Jahrhunderts eine leichte Zunahme bis zu einer Größenordnung von $+0,8$ Octas (**A1B** und **A2**, Sommer) abzeichnet. Mit gebotener Vorsicht sei noch erwähnt, dass für das Szenario **B1** eine schwache Zunahme (unter $+0,7$ Octas) im 21. Jahrhundert lediglich im Sommer finden lässt, während in allen anderen Jahreszeiten ein deutlich geringerer Anstieg verzeichnet wird.

Eine abschließende quantitative Beschreibung des Klimasignals des Bedeckungsgrades auf Grund der WETTREG-Simulationen ist zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Es gibt jedoch einen schwachen Hinweis auf einen Bewölkungsrückgang zum Ende des 21. Jahrhunderts.

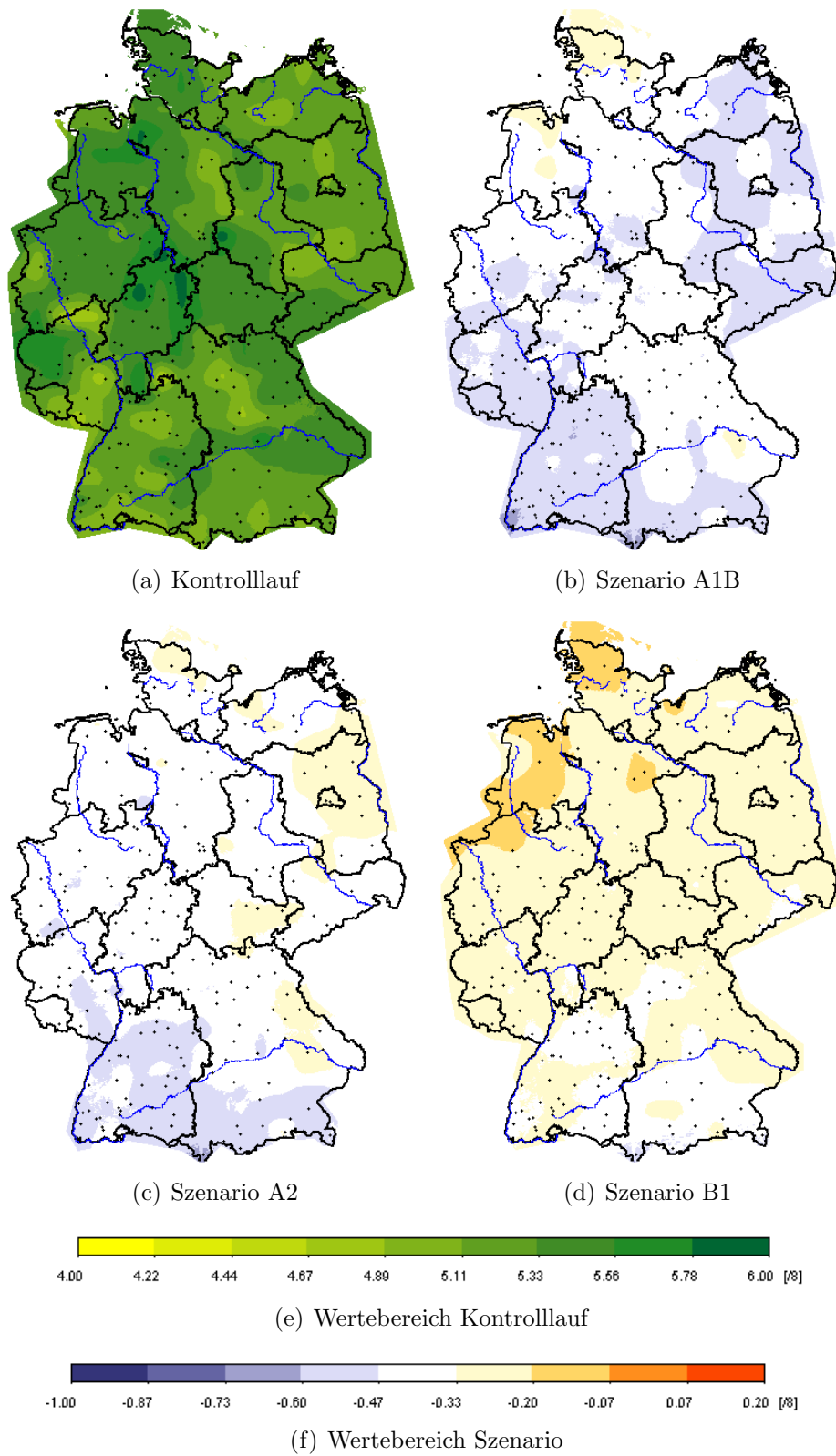


Abbildung 6.19: Kartendarstellung des Bedeckungsgrads für das Jahr. (a) ECHAM5-Kontrolllauf für den Zeitraum 1961–1990; (b)–(d) Differenz zwischen den Szenarios A1B, A2, bzw. B1, Zeitraum 2071–2100 und dem Kontrolllauf 1961–1990.

6.8 Beurteilung weiterer Klimaparameter

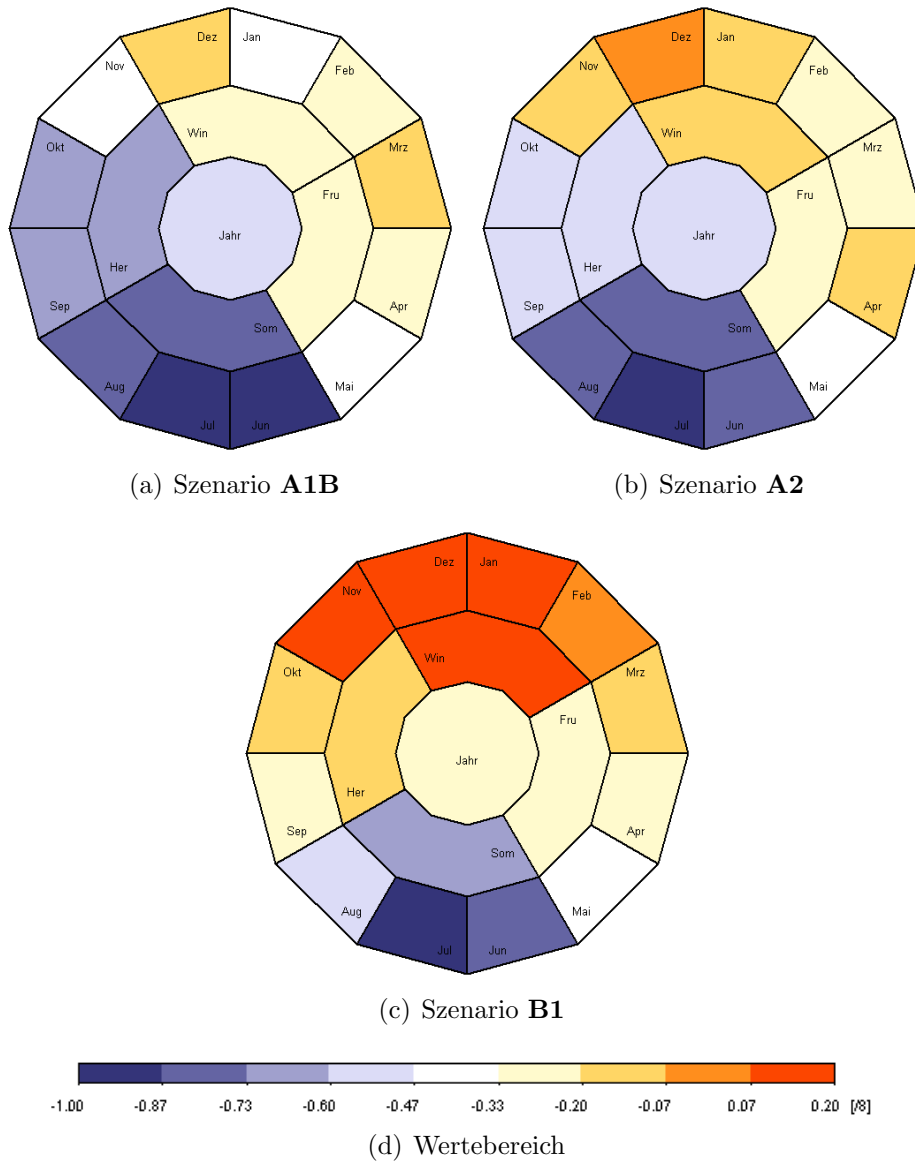


Abbildung 6.20: Ringdiagramme für die WETTREG-Simulationen (Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**) des Bedeckungsgrads als Differenz 2091–2100 minus 1981–1990. Der äußere Ring gibt die Monatswerte wieder; der mittlere Ring zeigt die Jahreszeitenwerte und im zentralen Zwölfeck findet sich der Jahreswert.

6.8.2 Tagesmittel der Windgeschwindigkeit

Das Tagesmittel der Windgeschwindigkeit ist eine Größe, die für energetische Betrachtungen besser tauglich ist als für Klimaimpakt-Analysen. Letzter erfordern im Grunde eine noch höhere zeitliche Auflösung, die allerdings mit der vorhandenen Datenbasis nicht erreicht werden kann.

Trotz der oben genannten Einschränkungen soll an dieser Stelle untersucht werden, ob es beim Tagesmittel der Windgeschwindigkeit ein klares Klimaänderungssignal gibt. Dazu wird in Abb. 6.21 (a) das Klima der Jetztzeit (in Form des Kontrolllaufs, gemittelt über den Zeitraum 1961–1990) sowie in Abb. 6.21 (b)–(d) die Änderung zum Ende des 21. Jahrhunderts (in Form der Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**, gemittelt über den Zeitraum 2071–2100) dargestellt. Ähnlich den Erkenntnissen bei der Untersuchung des Bedeckungsgrades muss beim Tagesmittel der Windgeschwindigkeit festgestellt werden, dass das Klimamittel der Jetztzeit in der Größenordnung von mehreren m/s liegt – das Deutschlandmittel beträgt rund 2,5 m/s. Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird überwiegend ein *Rückgang* des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit simuliert. Dieser beträgt bei den Szenarios **A2** und **B1** maximal $-0,2$ m/s; lediglich im Szenario **A1B** werden Änderungen bis $-0,4$ m/s simuliert. Ein Vergleich von Kontrolllauf und Beobachtungen (hier nicht dargestellt), dass die Windgeschwindigkeit vom Modell systematisch um rund $0,1$ m/s zu niedrig simuliert wird. Nur im Harz und den Alpen liegt die Differenz zwischen Modell und Beobachtungen bei $-0,2$ bis $-0,3$ m/s. Daraus folgt dass beim Wind Modellfehler und Klimasignal von vergleichbarer Größenordnung sind und die Änderung zum Ende des 21. Jahrhunderts zudem rund zehnmal geringer als der Betrag des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit ist. Neben der Aussagekraft des Tagesmittels für Impaktanalysen ist dieses Signal-Rauschen-Verhältnis eine weitere Einschränkung für weiter gehende Analysen.

Die zeitliche Struktur eines möglichen Klimasignals ist in den Ringdiagrammen (Abb. 6.22) wiedergegeben. Blautöne zeigen dabei einen Rückgang und Rottöne eine Zunahme des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit an; die Farbskala ist zudem die gleiche wie in Abb. 6.21 (b)–(d). Bei aller Unsicherheit bezüglich der wahren Stärke des Klimasignals kann aus den Ringdiagrammen abgelesen werden, dass unter den Bedingungen von Szenario **A1B** zum Ende des 21. Jahrhunderts fast im gesamten Jahr ein leichter Rückgang des Windmittels zu verzeichnen ist, der sich am deutlichsten im Herbst zeigt. In noch schwächerer Form zeigt sich dies auch bei **A2**, während sich bei **B1** eine ganz leichte winterliche Zunahme abzeichnet.

Da das Tagesmittel der Windgeschwindigkeit sowohl keine optimale Größe für Klimaimpakt-Studien ist als auch kein sich deutlich vom Modellfehler abhebendes Klimaänderungssignal zeigt ist eine abschließende Abschätzung dieses Signals auf der Basis der vorliegenden Daten und Erkenntnisse nicht möglich. Es gibt jedoch einen schwachen Hinweis auf eine Abnahme des Windmittels im Laufe des 21. Jahrhunderts.

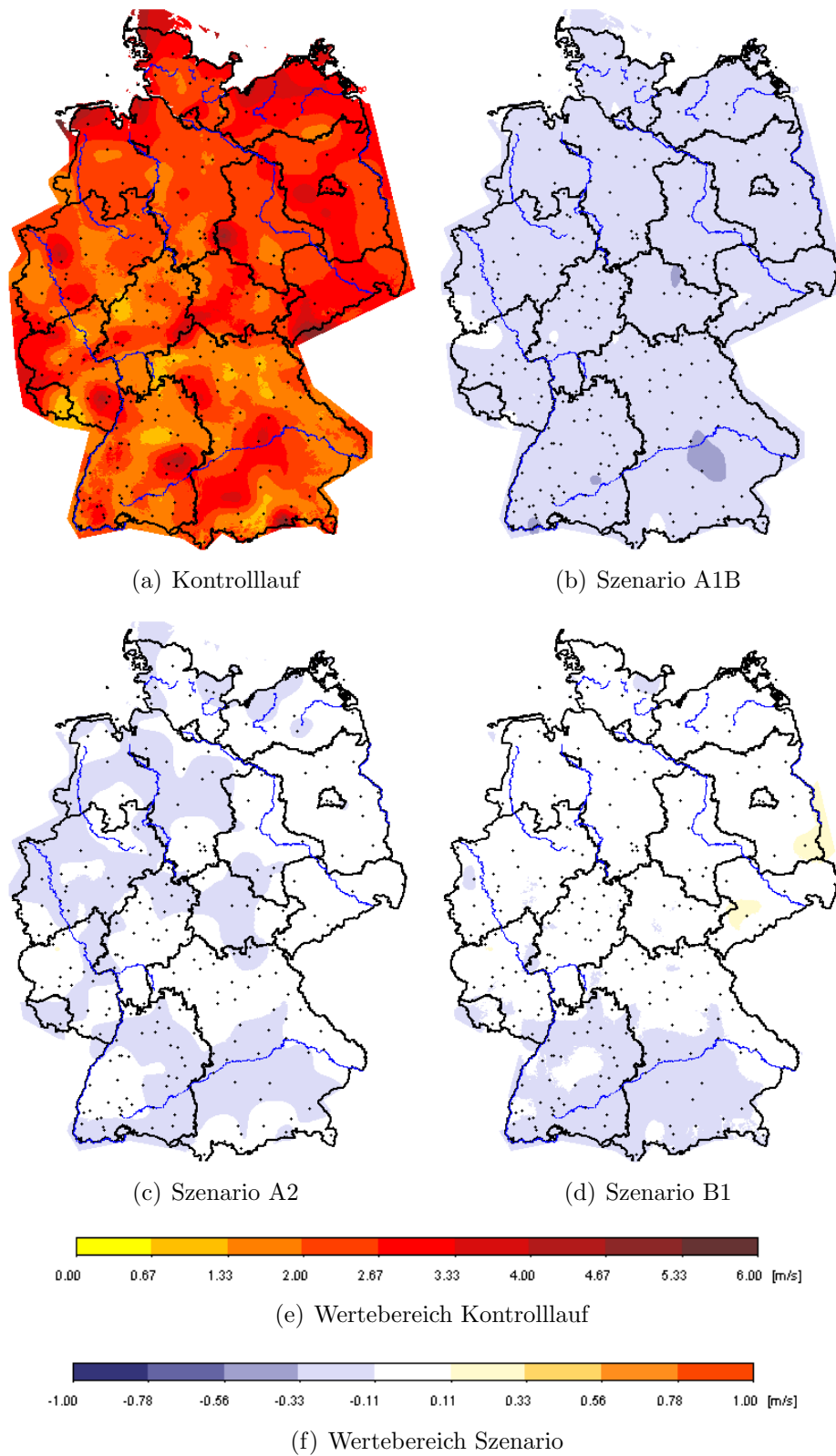


Abbildung 6.21: Kartendarstellung des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit für das Jahr. (a) ECHAM5-Kontrolllauf für den Zeitraum 1961–1990; (b)–(d) Differenz zwischen den Szenarios **A1B**, **A2**, bzw. **B1**, Zeitraum 2071–2100 und dem Kontrolllauf 1961–1990.

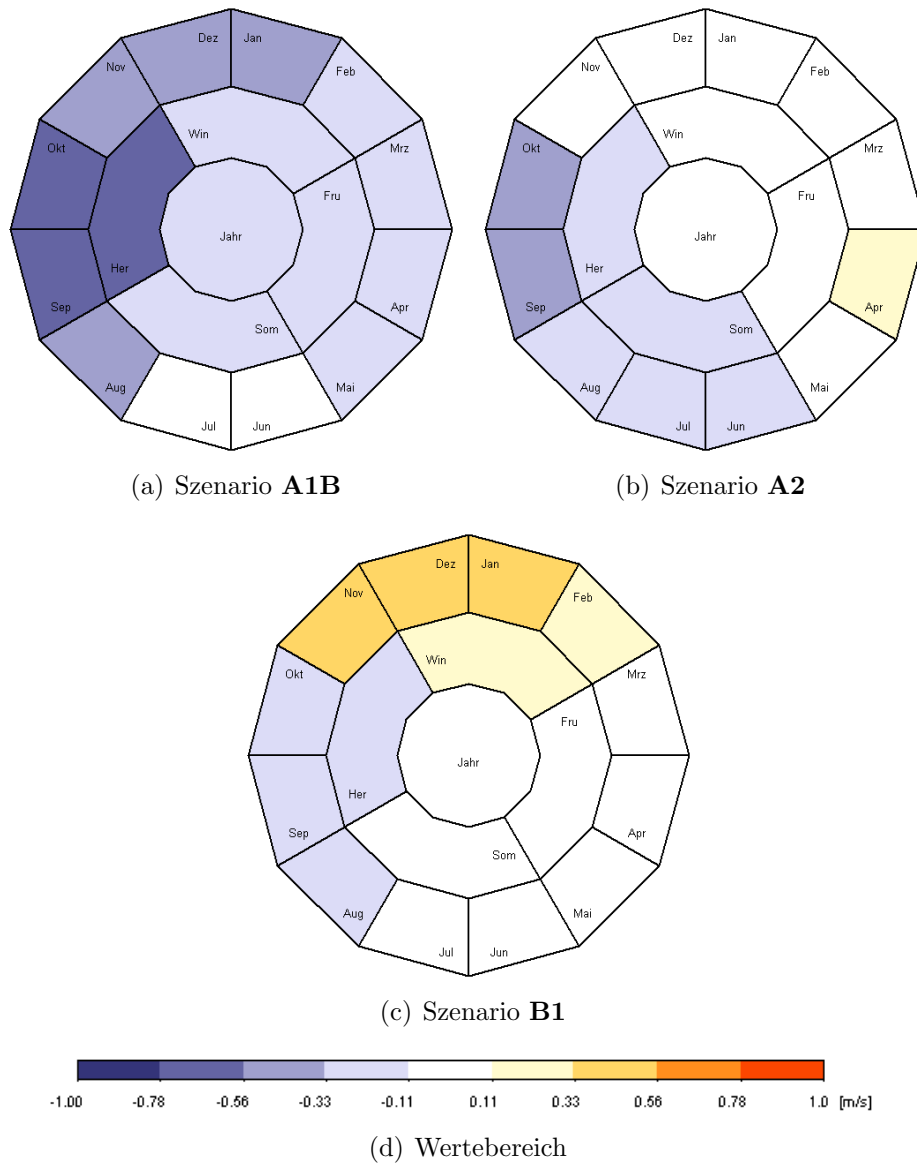


Abbildung 6.22: Ringdiagramme für die WETTREG-Simulationen (Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**) des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit als Differenz 2091–2100 minus 1981–1990. Der äußere Ring gibt die Monatswerte wieder; der mittlere Ring zeigt die Jahreszeitenwerte und im zentralen Zwölfeck findet sich der Jahreswert.

Abschnitt 7

Ausblick

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: „Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland - Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland“ des Umweltbundesamtes (Förderkennzeichen 204 41 138) wurden mit der Methode WETTREG und dem Modell REMO des MPI-Hamburg regionale Klimaszenarios bereitgestellt. Im Rahmen der Präsentation im Bundespresseamt in Berlin am 17. Oktober 2006¹ wurden erste Vergleiche beider Szenarios vorgestellt. Für beide Gruppen hat damit die Phase des detaillierten Vergleichs begonnen. So ein Vergleich ist üblich, damit die Entwickler der Modelle Ansatzpunkte für weitere Präzisierungen der Algorithmen finden können. Eine erste Untersuchung für das WETTREG-Modell wird im Bericht Transwetterlagen [Kreienkamp u. a. 2006]² vorgestellt. Im folgenden eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Für die Erstellung der WETTREG-Szenarios wird die Änderung der Häufigkeit der großräumigen Wettersituation, dargestellt durch die Ergebnisse globaler Klimaszenarios, als Haupteingangsgroße genutzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich im Wesentlichen nur die Häufigkeit der Wetterlagen ändert und weniger deren Eigenschaften.

Im Transwetterlagen-Bericht [Kreienkamp u. a. 2006] wird diese Annahme in Bezug auf die Szenarios von ECHAM5/OM geprüft. Trifft es zu, dass der Einfluss der Änderung der Eigenschaften der Wetterlagen nur geringe Auswirkungen auf die Szenarios hat? Oder ist die Änderung eine wesentliche Fehlerquelle?

Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

1. Die Änderung der Eigenschaften der Wetterlagen tritt nur in den Jahreszeiten Sommer und Herbst auf.
2. Der Einfluss dieser Änderungen bezieht sich im Wesentlichen nur auf einzelne Extremereignisse.

¹Vortrag ist im Internet verfügbar unter: http://osiris.uba.de/gisudienste/kompass/_pdf/2006-10/folien/01_Regionale_Klimaszenarien_fuer_Deutschland_Jacob_MPI.pdf .

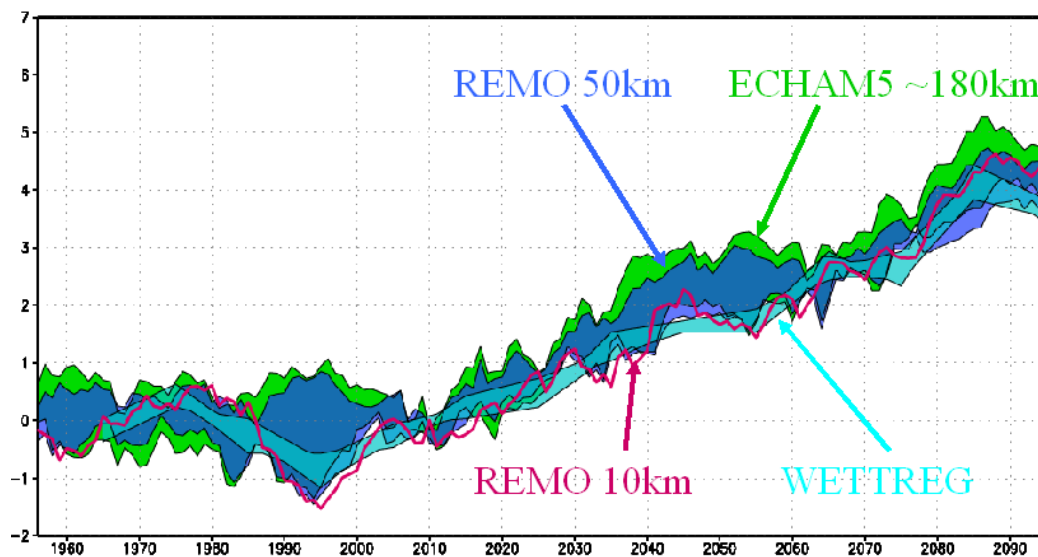
²Der Bericht ist im Internet verfügbar unter: http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/dokumente/endberichte/klimaprognose_transwl.pdf .

3. Auch wenn numerische und statistische Verfahren (Beispiel: REMO des MPI-Hamburg und WETTREG) die Klimaentwicklung in vielen Aspekten sehr ähnlich darstellen, gibt es, beispielsweise bei der Temperaturentwicklung im Sommer, Differenzen; diese können aber nur zu einem kleinen Teil erklärt werden.

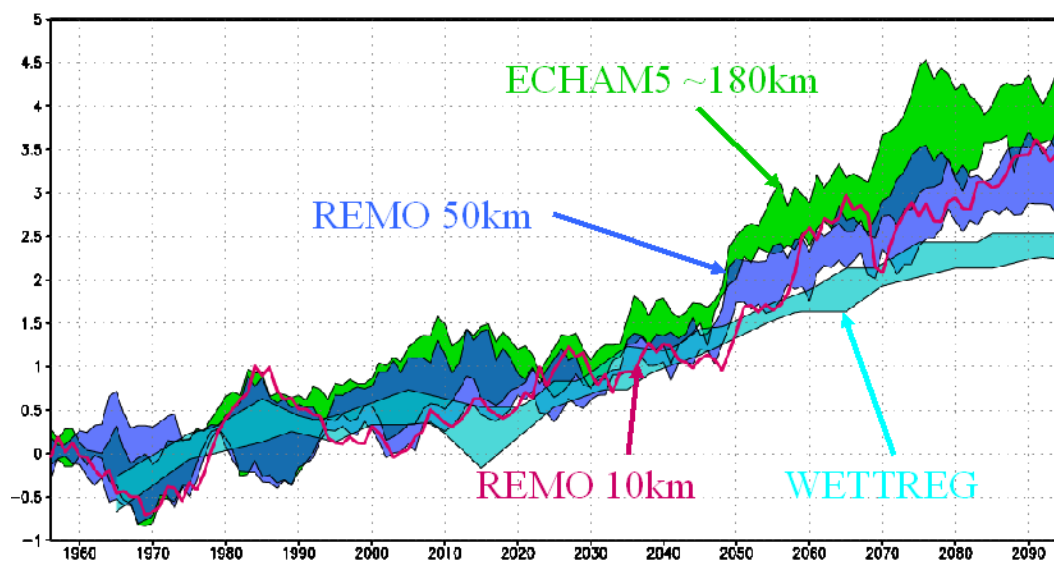
Die seit Oktober 2006 vorliegenden Ergebnisse sollten auch im Kontext des Vergleichs zwischen verschiedenen Modellierungsansätzen gesehen werden. Abbildung 7.1 (b) zeigt einen Unterschied am Ende des Szenariozeitraumes zwischen REMO und WETTREG (Sommer) von etwa 1 K bei der Jahreszeitenmitteltemperatur. Allein über die Ergebnisse dieser WETTREG-Studie kann das **NICHT** erklärt werden. Weitere Untersuchungen, bei denen beide Verfahren (REMO und WETTREG) im Detail verglichen werden, müssen folgen. Diese sind geplant.

Beim Winter [s. Abbildung 7.1 (a)] treten keine Unterschiede auf. Hier kann die Änderung der Mitteltemperatur allein über die Änderung der Anströmung (Wetterlage) erklärt werden.

Die Untersuchung der Transwetterlagen ist zudem ein wesentlicher Meilenstein bei der Suche nach den Ursachen der Unterschiede zwischen numerischen und statistischen Regionalisierungsmethoden. Sie zeigt, insbesondere für die Region Deutschland im Sommer auf, inwieweit sich das Klimasystem ändert und weist auf die Problematik der neuen klimatischen Verhältnisse hin. Wie werden beispielsweise Perioden in den beiden Regionalisierungsmethoden beschrieben, in denen neue Extremverhältnisse auftreten? Hier liegt ein wichtiger Forschungsschwerpunkt der nächsten Jahre.



(a) Winter



(b) Sommer

Abbildung 7.1: Verlauf der Entwicklung der Jahreszeitenmitteltemperatur im Szenario A1B für die Modelle ECHAM5 (Gitterpunkte in Deutschland, drei Läufe), REMO 50 km (Gitterpunkte in Deutschland, drei Läufe), REMO 10 km (Gitterpunkte in Deutschland, ein Lauf) und WETTREG (10 Realisierungen zu 20 Jahren) für Winter und Sommer. (Quelle: Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg)

Literaturverzeichnis

- [Blümel u. a. 1986] BLÜMEL, K. ; HOLLAN, E. ; KÄHLER, M. ; PETER, R. ; JAHN, A.: Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland / Bundesministerium für Forschung und Technologie. 1986 (BMFT-FB-T86-051). – Forschungsbericht
- [Christoffer u. a. 2004] CHRISTOFFER, J. ; DEUTSCHLÄNDER, Th. ; WEBS, M.: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse (TRY) / Deutscher Wetterdienst. 2004 (ISBN 3-88148-398-5). – Forschungsbericht
- [Cubasch u. a. 2001] Kap. 9 In: CUBASCH, U. ; MEEHL, G.A. ; BOER, G.J. ; STOUFFER, R.J. ; DIX, M. ; NODA, A. ; SENIOR, C.A. ; RAPER, S. ; YAP, K.S.: *Projections of Future Climate Change*. Cambridge, New York, Oakleigh, Madrid, Cape Town : Cambridge University Press, 2001, S. 526–582
- [Cubasch u. a. 1995] CUBASCH, U. ; WACZKEWITZ, J. ; HEGERL, G.C. ; PERLWITZ, J.: Regional climate changes as simulated in time-slice experiments / Max Planck Institute. Hamburg : Max-Planck-Institut für Meteorologie, 1995 (153). – Forschungsbericht
- [Davis und Kalkstein 1990] DAVIS, R.E. ; KALKSTEIN, L.S.: Development of an Automated Spatial Synoptic Climatological Classification. In: *Int. J. Climatol* 10 (1990), S. 769–794
- [DWD 1987] DWD: *Leitfaden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst. Nr. 1 Allgemeine Meteorologie*. Offenbach am Main : Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1987
- [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 2003a] ENKE, W.: Abschlussbericht: Anpassung der Sachsen-Wetterlagenklassifikation für Thüringen und Anwendung auf das Szenario ECHAM4 OPYC3 des Klimasimulationslaufes B2 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Thüringen - REWA Thüringen. 2003. – Forschungsbericht
- [Enke 2003b] ENKE, W.: Anwendung Einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM4 Klimasimulationslaufes (Szenario B2) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland. 2003 (Werkvertrag B. Nr. 50000099 KLIWA). – Forschungsbericht
- [Enke 2003c] 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 2003d] ENKE, W.: Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit Hilfe globaler Klimasimulationen / Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2003. – 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. ; DEUTSCHLÄNDER, 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 1994] ENKE, W. ; SPEKAT, A.: Verbundprojekt: Klimavariabilität und Signalanalyse. Teilthema: Signalanalyse zur Regionalisierung von

- Klimamodell-Outputs mit Hilfe der Erkennung synoptischer Muster und statistischer Analysemethoden. 1994 (07KV01/1 (161/30)). – Forschungsbericht
- [Enke und Spekat 1996] ENKE, W. ; SPEKAT, A.: A Two-Step Method to transform Climate Model Outputs into regional and local Weather Elements. In: *Preprints, 13th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, 21-23 February 1996, San Francisco*. Boston : American Meteorological Society, 1996, S. 370–373
- [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. 2006] ENKE, W. ; SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F.: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarien B1, A1B und A2. Zwischenbericht: Szenario A2 / Meteo-Research, Potsdam. 2006. – 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
- [Giorgi 2005] GIORGI, F.: Climate Change Prediction. In: *Clim. Change* 73 (2005), S. 239–265
- [Greatbatch und Rong 2006] GREATBATCH, R.J. ; RONG, P.-P.: Discrepancies Between Different Northern Hemisphere Summer Atmospheric Data Products. In: *J. Climate* 19 (2006), S. 1261–1273
- [IPCC 1996] IPCC ; HOUGHTON, J.T. (Hrsg.) ; FILHO, L.G. M. (Hrsg.) ; CALLANDAR, B.C. (Hrsg.) ; HARRIS, N. (Hrsg.) ; KATTENBERG, A. (Hrsg.) ; MASKELL, K. (Hrsg.): *Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Oakleigh : Cambridge University Press, 1996
- [IPCC 1998] IPCC ; WILSON, R.T. (Hrsg.) ; ZINYOWERA, M.C. (Hrsg.) ; MOSS, H. (Hrsg.): *The Regional Impacts of Climate Change - An Assessment of Vulnerability*. Cambridge, United Kingdom : Cambridge University Press, 1998 (A Special Report of the IPCC Working Group II). – 517 pp

- [IPCC 2001a] 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
- [IPCC 2001b] IPCC ; METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O. (Hrsg.) ; SWART, R. (Hrsg.) ; PAN, J. (Hrsg.): *Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York, Oakleigh, Madrid, Cape Town : Cambridge University Press, 2001b
- [Jonas u. a. 2005] JONAS, M. ; STAENGER, T. ; SCHÖNWIESE, C.-D.: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland / Umweltbundesamt. 2005 (Forschungsvorhaben 201 41 254). – Forschungsbericht
- [Kalnay u. a. 1996] KALNAY, E. ; KANAMITSU, M. ; KISTLER, R. ; COLLINS, W. ; DEAVEN, D. ; GANDIN, L. ; IREDELL, M. ; SAHA, S. ; WHITEA, G. ; WOOLEN, J. ; ZHU, Y. ; CHELLIAH, M. ; EBISUZAKI, W. ; HIGGINS, W. ; JANOWIAK, J. ; MO, K. ; ROPELEWSKI, C. ; WANG, J. ; LEETMAA, A. ; REYNOLDS, R. ; JENNE, R. ; JOSEPH, D.: The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. In: *Bull. Am. Met. Soc.* 77 (1996), S. 437–471
- [Kreienkamp und Spekat 2006] KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A.: IDP2006. Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse. Teilbericht zum Vorhaben: Ableitungen von Transwetterlagen und Entwicklung eines interaktiven Diagnose- und Präsentationstools / Land Baden-Württemberg vertreten durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU-BW), Freistaat Bayern vertreten durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU-BY) Dienstort München, Land Hessen vertreten durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Land Rheinland-Pfalz vertreten durch das Landesamt für Umweltschutz, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUGW), Freistaat Sachsen vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), Freistaat Thüringen vertreten durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG). 2006 (BW: 500 94836/43, HE: 4500169596, RP: 69-CK/Mo, TH: 05/000126). – Forschungsbericht
- [Kreienkamp u. a. 2006] KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A. ; ENKE, W.: Ableitung von Transwetterlagen. Teilbericht zum Vorhaben: Ableitungen von Transwetterlagen und Entwicklung eines interaktiven Diagnose- und Präsentationstools / Land Baden-Württemberg vertreten durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU-BW), Freistaat Bayern vertreten durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU-BY) Dienstort München, Land Hessen vertreten durch das Hessische Landesamt für Umwelt

- und Geologie (HLUG), Land Rheinland-Pfalz vertreten durch das Landesamt für Umweltschutz, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUGW), Freistaat Sachsen vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), Freistaat Thüringen vertreten durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG). 2006 (BW: 500 94836/43, HE: 4500169596, RP: 69-CK/Mo, TH: 05/000126). – Forschungsbericht
- [Linke und Baur 1970] LINKE, F. ; BAUR, F.: *Meteorologisches Taschenbuch. Neue Ausgabe, Band II. 2. Auflage.* Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, 1970
- [Lucarini u. a. 2006] LUCARINI, V. ; CALMANTI, S. ; DELL'AQUILA, A. ; RUTI, P.M. ; SPERANZA, A.: Intercomparison of the Northern Hemisphere Winter Mid-Latitude Atmospheric Variability of the IPCC Models. In: *Clim. Dyn.* 26 (2006), S. (in press)
- [Meynen u. a. 1962] MEYNEN, E. ; SCHMITHÜSEN, J. ; GELLERT, J. ; NEEF, E. ; MÜLLER-MINY, H. ; SCHULTZE, J.H.: *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands.* Selbstverlag. Bad Godesberg, 1962
- [Nakićenović u. a. 2000] NAKIĆENOVIĆ, N. ; ALCAMO, J. ; VRIES, B. de ; FENHANN, J. ; GAFFIN, S. ; GREGORY, K. ; GRÜBLER, A. ; JUNG, T.Y. ; KRAM, T. ; ROVERE, E.L. L. ; MICHAELIS, L. ; MORI, S. ; MORITA, T. ; PEPPER, W. ; PITCHER, H. ; PRICE, L. ; RAIHI, K. ; ROEHL, A. ; ROGNER, H.-H. ; SANDOVSKI, A. ; SCHLESINGER, M. ; SHUKLA, P. ; SMITH, S. ; SWART, R. ; ROOIJEN, S. van ; VICTOR, N. ; DADI, Z.: *IPCC Special Report on Emission Scenarios.* Cambridge, U.K. und New York, USA : Cambridge University Press, 2000
- [PRUDENCE 2005] PRUDENCE ; CHRISTENSEN, J. H. (Hrsg.): PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects): Final Report. 2005. – Forschungsbericht. EU Code EVK2-CT2001-00132
- [Roeckner u. a. 2003] ROECKNER, E. ; BAEUML, 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

- [Salinger 2005] SALINGER, M.J.: Climate Variability and Change: Past, Present and Future – an Overview. In: *Clim. Change* 70 (2005), S. 9–29
- [Schulla 1997] SCHULLA, J.: *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen*, ETH Zürich, Diss., 1997
- [Spekat u. a. 2006a] SPEKAT, A. ; ENKE, W. ; KREIENKAMP, F.: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für den Freistaat Sachsen und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die Szenarios B1, A1B und A2 (WEREX IV). Endbericht: Transiente Szenarios / Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden. 2006 (Werkvertrag 13-0345.42/237). – Forschungsbericht
- [Spekat u. a. 2006b] SPEKAT, A. ; ENKE, W. ; KREIENKAMP, F.: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für den Freistaat Sachsen und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die Szenarios B1, A1B und A2 (WEREX IV). Endbericht: Szenarios für das Einzugsgebiet der Parthe. / Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden. 2006 (Werkvertrag 13-0345.42/237). – Forschungsbericht
- [Uppala u. a. 2005] UPPALA, S.M. ; KÅLLBERG, 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. ; HÓLM, 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
- [Wang u. a. 2006] WANG, X.L. ; SWAIL, V.R. ; ZWIERS, F.W.: Climatology and Changes of Extra-Tropical Cyclone Activity: Comparison of ERA40 with NCEP/NCAR Reanalysis for 1958–2001. In: *J. Climate* 19 (2006), S. in press
- [Woods 2006] WOODS, A.: *Medium-Range Weather Prediction. The European Approach. The Story of The European Center for Medium-Range Weather Forecasts*. New York : Springer, 2006
- [Zebisch u. a. 2005] ZEBISCH, M. ; GRUNDMANN, T. ; SCHRÖTER, D. ; HASSE, C. ; FRISCH, U. ; CRAMER, W.: Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien Klimasensitiver Systeme / Umweltbundesamt. 2005. – Forschungsbericht

Teil II

Anhänge

Anhang A

Erläuterung der SRES-Szenarios

In seinem dritten Wissensstandsbericht [IPCC 2001a] hat das Intergovernmental Panel on Climate Change wahrscheinliche Szenarios der Entwicklung von Treibhausgas-Emissionen vorgestellt, die ausführlich im IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES, [Nakićenović u. a. 2000]) beschrieben werden. Es wird zwischen den SRES-Szenario-“Familien” **A1**, **A2**, **B1** und **B2** unterschieden, die unterschiedlichen globalen Strategien im Umgang mit den Ressourcen entsprechen: Im Grunde vier Kombinationen aus weniger oder mehr ausgeprägtem Umweltbewusstsein sowie aus weniger oder mehr ausgeprägtem Wissenstransfer (s. Abb. A.1). Das Szenario **A1** wird dabei in Gruppen differenziert, die bei einer sich globalisiert weiter entwickelnden Wirtschaft in unterschiedlichem Maße vom Einsatz fossiler Energieträger Gebrauch macht. Die Szenarios wurden qualitativ im *Mitigation*-Band des Wissensstandsberichts [IPCC 2001b] (s. Abb. A.2) vorgestellt.

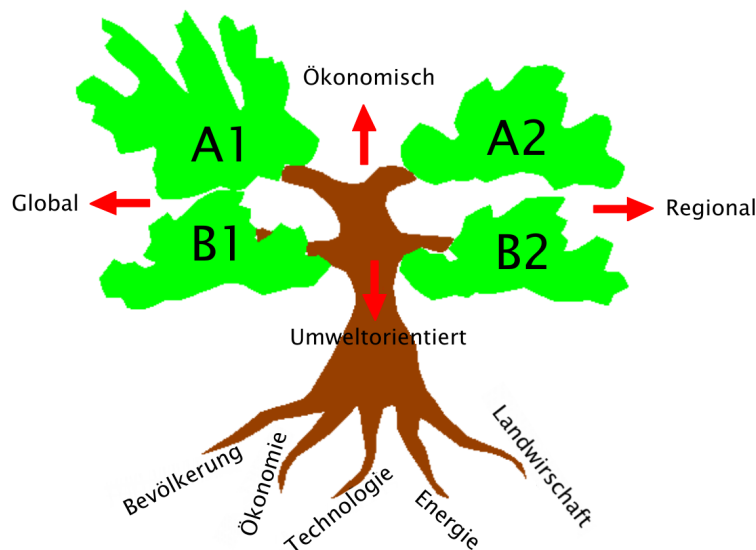


Abbildung A.1: Grundstruktur der IPCC-SRES Emissionsszenarios.

Noch genauer sind die Unterschiede zwischen den Szenarios aus den zeitlichen Verläufen der Emissionen ersichtlich, wie sie in Abb.A.3 gezeigt werden.

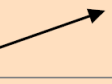
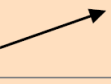
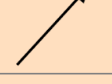
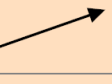
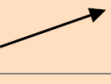
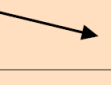
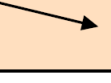
Szenario	Bevölkerung	Wirtschaft	Umwelt	Gerechtigkeit	Technologie	Globalisierung
A1FI						
A1B						
A1T						
B1						
A2						
B2						

Abbildung A.2: Qualitative Beschreibung der zeitlichen Verläufe unterschiedlicher natürlicher und sozialer Sachverhalte, die den IPCC-SRES Emissionsszenarios zugrunde liegen (nach Abb. TS.1 des Technical Summary im Berichts der Arbeitsgruppe III des dritten IPCC-Sachstandsberichts [IPCC 2001b]).

Die aus den einzelnen Szenarios resultierenden globalen Temperaturänderungen finden sich in Abb. A.4. Aus ihnen geht hervor, dass die stärkste Erwärmung unter den Bedingungen von **A1FI** und **A2** stattfinden, wobei bis zur Dekade 2040–2050 die Erwärmung hinter der von Szenario **A1T** zurückbleibt. Das in diesem Zwischenbericht vorgestellte regionalisierte **A2**-Szenario stellt also die angenommenen Auswirkungen einer, insbesondere bei einem längeren Zeithorizont, global besonders erwärmungsträchtigen Entwicklung dar.

Im hier vorgelegten Zwischenbericht erfolgte eine Beschreibung und zusammenschauende Analyse der Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**. Es sei hinzugefügt, dass Simulationen des Szenarios **B2** mit *State-of-the-Art* Klimamodellen sind leider nicht verfügbar sind.

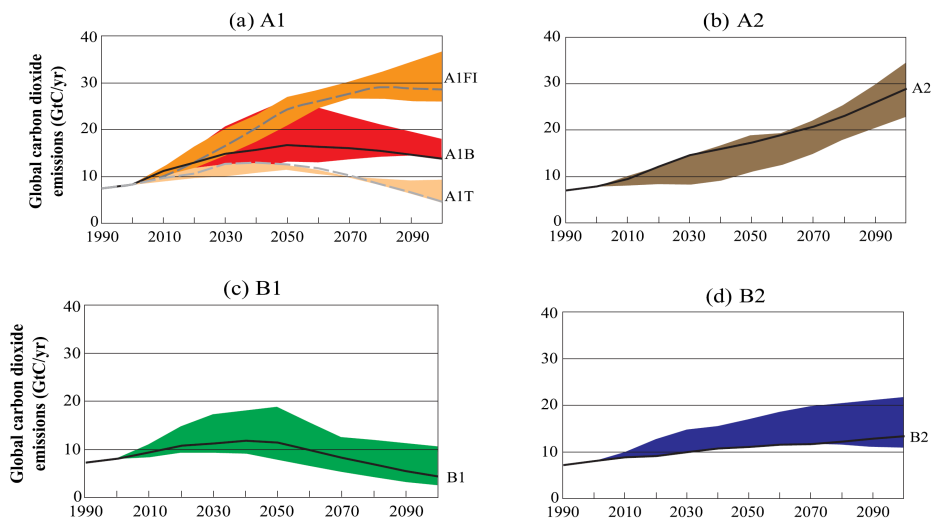


Abbildung A.3: Zeitlicher Verlauf der Emission von CO₂ in den IPCC-SRES-Emissionsszenarios.

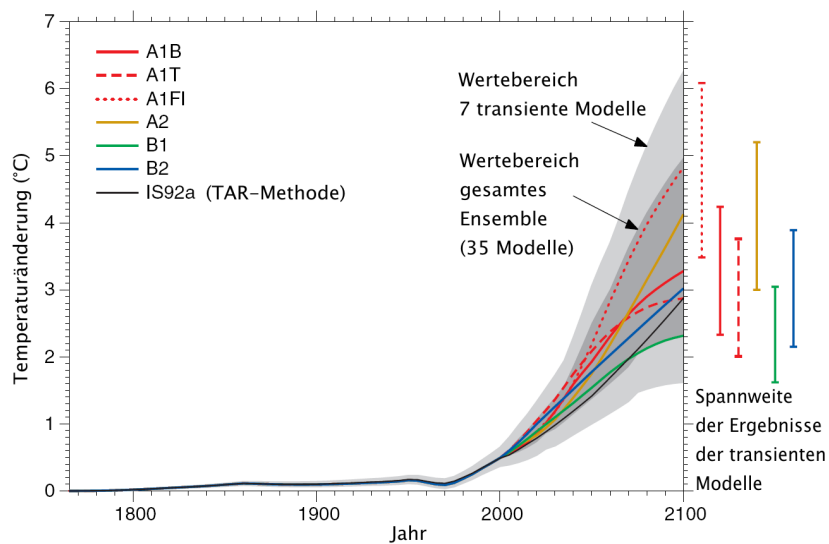


Abbildung A.4: Entwicklung der globalen Mitteltemperatur seit dem Ende des 20. Jahrhunderts und im 21. Jahrhundert in Abhängigkeit von den sechs SRES-Emissionsszenarios. Die Ergebnisse wurden sowohl mit dem vollen Ensemble von 35 globalen Modellen als auch einer Untermenge, die transiente Rechnungen vornahm, durchgeführt. Zudem ist das so genannte *business as usual*-Szenario IS92a dargestellt. Die Balken am rechten Rand zeigen die Ergebnisspanne für die SRES-Szenarios bei den transienten Modellen (nach Abb. 9.14 im Kapitel 9 des Berichts der Arbeitsgruppe I im dritten IPCC-Sachstandsberichts [Cubasch u. a. 2001]).

Anhang B

Äquidistante Gitterpunkte

Die in Anhang D vorgestellten Prediktoren müssen auf einem verzerrungsfreien horizontalen Gitter berechnet werden. Dieses Gitter wird so konstruiert, dass von einem Referenzpunkt, der bei 51°N und auf dem 10°O -Meridian liegt, in einem Abstand von 100 km in x- bzw. y-Richtung Gitterpunkte aufgetragen werden (Abb. B.1). Für diesen Meridian gilt, dass die Punkte in y-Richtung auf einer mit ihm zusammenfallenden Linie angeordnet sind.

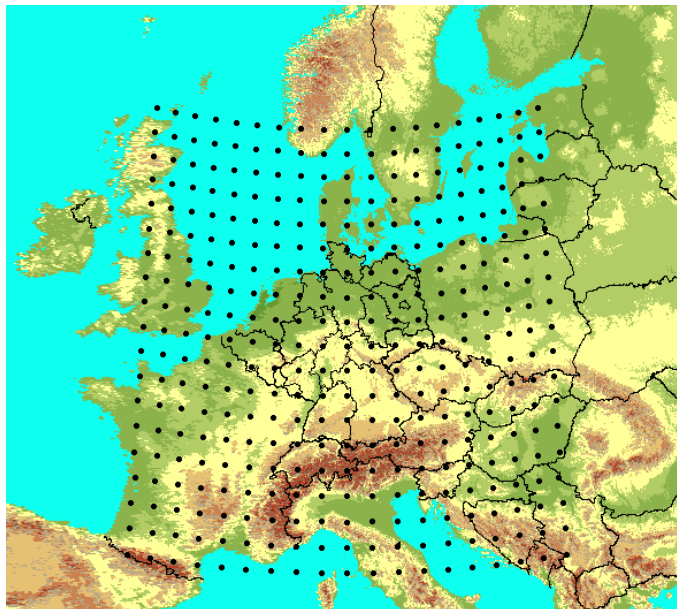


Abbildung B.1: Äquidistantes Gitter in stereographischer Projektion. Die 19×19 Gitterpunkte sind in einem Abstand von 100 km aufgetragen.

Für die Georeferenzierung werden die äquidistanten Gitterpunkte in geographische Koordinaten umgerechnet.

Anhang C

Interpolationsverfahren

Die Datengrundlage für das Darstellungssystem IDP2006 sind Stationswerte, die auf die einzelnen Zellen des Modellgitters interpoliert werden müssen. Dafür werden zwei Methoden in Kombination genutzt:

- die höhenabhängige Regression mit Ausgleich der Residuen durch eine Trendfläche als vertikale Interpolation;
- die abstandsgewichtende Interpolation (IDW – Inverse-Distance-Weighting Interpolation) als horizontale Interpolation. [Schulla 1997]

C.1 Höheninterpolation

Die höhenabhängige Regression bietet sich für alle jene Größen an, die eine ausgeprägte Höhenabhängigkeit aufweisen. Gerade in gebirgigen Einzugsgebieten sind die höhenbedingten Änderungen dieser Größen im allgemeinen weit wichtiger und deutlicher als die horizontalen Änderungen.

Abbildung C.1 zeigt ein Beispiel für die Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur. Die durchgezogene Profillinie stellt die Anpassung an die Daten der Stationen dar. Für jeden Stationswert wird dann die Differenz zwischen den Messwert und den sich aus der Regressionsbeziehung der kontinuierlich aufzeichnenden Stationen ergebenden Schätzwerten gebildet (Anomalien).

C.2 Horizontale Interpolation

Die abstandsgewichtende Interpolation geht davon aus, dass der Wert einer Messgröße an einer Interpolationsstelle durch die Entfernungen der Interpolationsstelle zu den verschiedenen Stützstellen – in der Praxis also zu den Stationsstandorten – und deren Messwerte beschrieben werden kann.

Die Abhängigkeit des Interpolationswertes von der Entfernung der Stützstellen ist umgekehrt proportional, d.h. mit größer werdender Entfernung der Stützstelle zur Interpolationstelle nimmt deren Einfluss auf den Interpolationswert ab.

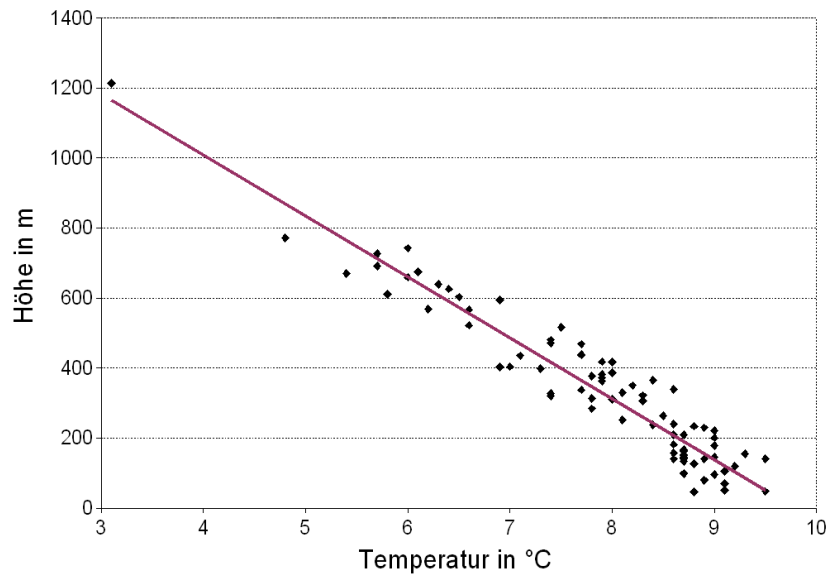


Abbildung C.1: Beispiel für die Abnahme der Temperatur mit der Höhe.

Durch die Potenzierung der inversen Entfernung mit einem festzulegenden Exponenten p (genutzt wird der Wert 3) kann die Abnahme des Gewichtes mit der Entfernung gesteuert werden. Der Interpolationswert ergibt sich aus der Summe aller beitragenden gewichteten Stützstellenwerte.

Auf diese Weise werden die Anomalien in die Fläche übertragen. Der abschließende Schritt prägt jedem Gitterpunktswert, entsprechend seiner Höhe, den Regressionswert wieder auf.

Anhang D

Erläuterung der potenziellen Prediktoren

Tabelle D.1: Liste der verwendeten Prediktoren.

<i>Nr.</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Fläche(n)</i>	<i>Kurzname</i>
1	geopotentielle Höhe	1000 hPa	GP 1000
2	geopotentielle Höhe	850 hPa	GP 850
3	geopotentielle Höhe	700 hPa	GP 700
4	geopotentielle Höhe	500 hPa	GP 500
5	Temperatur	850 hPa	TP 850
6	Temperatur	500 hPa	TP 500
7	relative Feuchte	850 hPa	RF 850
8	relative Feuchte	500 hPa	RF 500
9	horizontale Differenzen N–S	850 hPa	HD1 850
10	horizontale Differenzen O–W	850 hPa	HD2 850
11	horizontale Differenzen N–S	500 hPa	HD1 500
12	horizontale Differenzen O–W	500 hPa	HD2 500
13	Vorticity 1	1000 hPa	VOR 1000
14	Vorticity 1	850 hPa	VOR 850
15	Vorticity 1	700 hPa	VOR 700
16	Vorticity 1	500 hPa	VOR 500
17	Schichtdicke	850/1000 hPa	RT 850/1000
18	Schichtdicke	700/1000 hPa	RT 700/1000
19	Schichtdicke	500/1000 hPa	RT 500/1000
20	Temperaturdifferenz	850–500 hPa	TD 850-500
21	Stabilitätsindex (Enke)		SIE
22	Stabilitätsindex (Showalter)		SIS
23	thermischer Wind (U-Komponente)	850/1000 hPa	TW1 850/1000
24	thermischer Wind (V-Komponente)	850/1000 hPa	TW2 850/1000
25	Drehung des thermischen Windes	850/1000 hPa	TW3 850/1000
26	thermischer Wind (U-Komponente)	700/850 hPa	TW1 700/850

weiter auf der nächsten Seite

<i>Fortsetzung</i>			
<i>Nr.</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Fläche(n)</i>	<i>Kurzname</i>
27	thermischer Wind (V-Komponente)	700/850 hPa	TW2 700/850
28	Drehung des thermischen Windes	700/850 hPa	TW3 700/850
29	thermischer Wind (U-Komponente)	500/700 hPa	TW1 500/700
30	thermischer Wind (V-Komponente)	500/700 hPa	TW2 500/700
31	Drehung des thermischen Windes	500/700 hPa	TW3 500/700
32	Frontneigungswinkel (Margules u. Stueve)		FNW
33	Advektion der Temperatur	850 hPa	AT 850
34	Advektion der absoluten Feuchte	850 hPa	AF 850
35	Gradient des Geopotentials	1000 hPa	GRADGP 1000
36	Gradient des Geopotentials	850 hPa	GRADGP 850
37	Gradient des Geopotentials	700 hPa	GRADGP 700
38	Gradient des Geopotentials	500 hPa	GRADGP 500
39	Gradient der Temperatur	850 hPa	GRADT 850
40	Gradient der Temperatur	500 hPa	GRADT 500
41	Gradient der relativen Feuchte	850 hPa	GRADF 850
42	Gradient der relativen Feuchte	500 hPa	GRADF 500
43	Pseudopotentielle Temperatur	850 hPa	PT 850

In Tab. D.1 sind 43 Potenzielle Prediktoren aufgelistet, die bei der Untersuchung für Screening-Regressionsanalysen auf äquidistanten Gittern (s. Anhang B) zur Verfügung stehen und aus denen die zielführendsten Größen bestimmt werden. In den nächsten Abschnitten werden die einzelnen Prediktoren kurz beschrieben.

D.1 Aus einer Fläche extrahierte Größen: Geopotenzial und Temperatur – Nr. 1–8

Diese Größen werden direkt aus den Modell-Feldern extrahiert.

D.2 Horizontale Differenzen – Nr. 9–12

Bei diesen Größen wird die Umgebung des Bezugspunkts in zonaler bzw. meridionaler Richtung beschrieben. Sie werden ebenfalls aus jeweils einem Feld hergeleitet.

D.3 Vorticity – Nr. 13–16

Es handelt sich um die relative Vorticity ζ in geostrophischer Approximation, die mit $\nabla^2\Phi$ (∇ ist der Nablaoperator und Φ das Geopotential) berechnet wird. Am Gitterpunkt i, j (i in zonaler und j in meridionaler Richtung) ist die Vorticity

$$\zeta_{i,j} = -4 \cdot \Phi_{i,j} + \Phi_{i,j-1} + \Phi_{i,j+1} + \Phi_{i-1,j} + \Phi_{i+1,j} \quad (\text{D.1})$$

D.4 Aus zwei Flächen erzeugte Größen: Schichtdicken und vertikale Temperaturdifferenz – Nr. 17–20

Diese Größen werden am Ort aus zwei Flächen hergeleitet.

D.5 Stabilitätsindex nach Enke – Nr. 21

Dieses Maß für die Stabilität der Atmosphäre wird aus Geopotentialdaten der Flächen 1000, 700 und 500 hPa berechnet, d.h. es benötigt keinerlei Feuchtemaße. Es quantifiziert die Abweichung des vertikalen feuchtadiabatischen Temperaturgradienten ΔT_f vom vertikalen Gradienten der sensiblen Temperatur ΔT

$$SIE = \Delta T_f - \Delta T \quad (\text{D.2})$$

Die Stützstellen sind dabei die Daten in der 850 bzw. der 600 hPa-Fläche, deren Temperaturwerte approximativ für die Mitte der Schichten 700/1000 hPa bzw. 500/700 hPa sind. Es ist also

$$\Delta T_f = T_{f850} - T_{f600} \quad (\text{D.3})$$

oder

$$\Delta T_f = T_{f850} - (T_{850} - \gamma_f \cdot \Delta z) \quad (\text{D.4})$$

mit

$$\gamma_f = \left(\frac{dT}{dz} \right)_f = 0.973\beta \left[\frac{\text{K}}{100\text{m}} \right] \quad ; \quad \beta = \frac{p+a}{p+b}$$

(p: Luftdruck; a und b: empirische Konstanten nach [Linke und Baur 1970])

$$\Delta z = z_{600} - z_{850} = \bar{T}_v \cdot \frac{R}{g} \ln \left(\frac{850}{600} \right)$$

D.6 Stabilitätsindex nach Showalter – Nr. 22

Dieser Index verwendet die Temperatur- und Feuchteinformation aus den Flächen 850 und 500 hPa. Der Showalter-Index wird nach der Formel

$$SSI = T_{500} - T_{P_{500}} \quad (\text{D.5})$$

mit der Temperatur in 500 hPa T_{500} und der modifizierten Potentiellen Temperatur $T_{P_{500}}$, die unter der Annahme ermittelt wird, dass ein Luftpaket zunächst trockenadiabatisch von 850 hPa bis zum Kondensationsniveau gehoben wurde und von da an feuchtadiabatisch aufgestiegen ist.

D.7 Thermischer Wind – Nr. 23–31

Für die Beschreibung der Änderung des geostrophischen Windes $\vec{v}_g$ mit der Höhe werden die horizontalen Komponenten des Temperaturgradienten u_g und v_g verwendet – der Vertikalanteil des Temperaturgradienten wird nach einer Dimensionsabschätzung vernachlässigt. Es gilt

$$\vec{v}_g = \frac{1}{f} \vec{k} \times \vec{\nabla}_p \Phi \quad (\text{D.6})$$

mit dem Coriolisparameter f , dem vertikalen Einheitsvektor $\vec{k}$ und dem Geopotenzial Φ . Die x- und y-Komponenten berechnen sich im p-System nach

$$u_g = -\frac{1}{f} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_p \quad \text{und} \quad v_g = \frac{1}{f} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_p \quad (\text{D.7})$$

D.8 Frontenneigungswinkel nach Margules – Nr. 32

Eine weitere physikalische Größe, die quantitative Aussagen über die Intensität von Niederschlagsprozessen durch dynamische Hebung ermöglicht ist der Frontenneigungswinkel α nach Margules und Stüve.

$$\tan \alpha = \frac{f}{g} \cdot T \cdot \frac{\Delta v}{\Delta T} \quad (\text{D.8})$$

mit dem Coriolisparameter f , der Gravitationskonstanten g , der Temperatur T sowie der Differenz der Windgeschwindigkeiten Δv bzw. der Temperaturwerte ΔT in der warmen und der kalten Luftmasse.

Zwar ist dieser Winkel im strengen Sinne aus Gitterpunktsdaten nur angenähert zu ermitteln und es ist zudem erforderlich, ihn in seiner Projektion auf das geographische Koordinatensystem zu berechnen; es lassen sich aber dennoch mit ihm Abschätzungen zur Wetterwirksamkeit von atmosphärischen Diskontinuitäten vornehmen. Der approximierte Winkel γ' wird mit Hilfe von

$$\gamma' = \frac{f}{g} T_v \frac{\Delta_z v_y}{\Delta_{x'} T_v} \quad (\text{D.9})$$

bestimmt. Dies erfolgt in der 850 hPa-Fläche, in der $\Delta_{x'} T_v$ den Sprung der virtuellen Temperatur bezeichnet.

D.9 Advektion von Temperatur und relativer Feuchte – Nr. 33 und 34

Weitere physikalisch für den Niederschlag relevante Charakteristika sind die horizontalen Transporte der Temperatur und der Feuchte. Die Temperaturadvektion ist dabei

$$A(T) = -\vec{v}_h \cdot \vec{\nabla}_h T \quad (\text{D.10})$$

wobei $\vec{v}_h$ in geostrophischer Approximation nach Gleichung D.6 benutzt wird. In Analogie dazu wird die Advektion für die absolute Feuchte berechnet. Dieses Feuchtemaß selbst wird aus psychrometrischen Standardbeziehungen bestimmt.

D.10 Gradienten – Nr. 35–42

Bei den Gradienten handelt es sich um die *Beträge der zonalen bzw. meridionalen Komponenten*; sie berücksichtigen also nicht die *Richtung* der stärksten Veränderungen in den Feldern.

D.11 Pseudopotentielle Temperatur – Nr. 43

Die pseudopotentielle Temperatur ist in ihrer räumlichen Verteilung eine wichtige Größe zur Identifikation von Fronten. Mit ihr wird der latente Wärmeinhalt eines Luftpakets und somit dessen Feuchteinhalt beschrieben. Dazu wird ein Vorgang vorausgesetzt, bei dem ein Luftpaket, in dem ein (noch nicht kondensierter) Wasseranteil enthalten ist gehoben wird, bis Kondensation einsetzt, also das Luftpaket feuchtegesättigt ist. Danach wird das Luftpaket feuchtadiabatisch gehoben, so dass die frei werdende Kondensationswärme der Temperatur des Luftpakets zugeschlagen wird. Danach wird das nunmehr von allem Wasserdampf befreite Paket – wie bei der Bestimmung der potentiellen Temperatur – trockenadiabatisch auf die Referenzfläche von 1000 hPa gebracht. Diese Größe wurde nach folgender Formel nach [DWD 1987] berechnet:

$$\theta_{ps} = T_0 \cdot \left(\frac{1000}{P_0} \right)^{\frac{\beta R_L}{c_p}} \quad (\text{D.11})$$

mit T_0 Ausgangstemperatur; p_0 Ausgangsdruck; R_L Gaskonstante für trockene Luft; c_p spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck. Der Faktor β , um den sich trocken- und feuchtadiabatische Temperaturgradienten voneinander unterscheiden, wird wie folgt bestimmt:

$$\beta = \frac{p + 0,623^{LE/R_L T}}{p + 0,623 \frac{dE}{dT}} \quad (\text{D.12})$$

mit p Druck; L spezifische Verdampfungswärme; E Sättigungsdampfdruck; T Temperatur.

Anhang E

Darstellung der Wetterlagen

Die Identifikation der Zirkulationsmuster erfolgt mit Hilfe eines konvergenten K-Means-Clusterverfahren [Davis und Kalkstein 1990]. Von zentraler Bedeutung ist das Distanzmaß, welches aus der quadratischen Euklidischen Distanz unter Verwendung von bestmöglich zielführenden Prediktoren hergeleitet wird.

$$D_{j,k,l} = MSD_{j,k,l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [o_{i,j,k} - \hat{o}_{i,k,l}]^2 \quad (\text{E.1})$$

mit $D_{j,k,l}$: Abstand des j -ten Tages zur l -ten Klasse (Cluster) bei Verwendung des k -ten potentiellen Prediktorenfeldes; $o_{i,j,k}$: Feldwert am Gitterpunkt i ; $\hat{o}_{i,k,l}$: Feldwert des k -ten Feldes in der “Mittelkarte” des l -ten Clusters am Gitterpunkt i . Aus Vorstudien wurde eine optimale Beschreibung der System-Komplexität von ~ 10 Clustern ermittelt. Zudem ist eine Überbestimmung des Systems und numerische Instabilität weitestgehend ausgeschlossen, wenn ~ 4 Prediktoren aus den potenziellen Prediktoren ausgewählt werden.

Die zur Mustererkennung benutzten Daten stammen aus den ERA40-Reanalysen [Uppala u. a. 2005]. Die Composita (“Mittelkarten”) der 10 identifizierten Zirkulationsmuster für das Temperatureregime ($D_{j,k,l}$) werden so optimiert, dass *Temperaturgrößen* bestmöglich beschrieben werden; diejenigen der 8 identifizierten Zirkulationsmuster für das Feuchteregime werden so optimiert, dass der *Niederschlag* bestmöglich beschrieben wird. Im Anhang von [Enke u. a. 2006] finden sich Abbildungen der Composita für das Temperatur und das Feuchteregime.

Anhang F

Beispiele für die Bandbreite der WETTREG-Simulationen

Mit WETTREG werden an jeder Station pro Dekade 10 Zeitreihen zu 7300 Tagen Länge erzeugt. In der Folge sind Deutschlandkarten für die Tagesmitteltemperatur im Sommer sowie den Jahresniederschlag wiedergegeben, die zeigen, wie die einzelnen Realisierungen voneinander abweichen.

Die Unterschiede zwischen den Einzelrealisierungen ist - wenn Dekaden in Karten dargestellt werden - nur sehr gering, was die Stabilität der WETTREG-Resultate untermauert. Das bedeutet jedoch keineswegs, dass die Zeitreihen der Wetterelemente am Ort eine geringe Variabilität besitzen. Wie in Abschnitt 3.3 geschildert, werden diese aus Episoden des Klimas der Jetztzeit synthetisiert, besitzen also deren Grundvariabilität. Dieser wird das sich langsam verändernde Klima im Laufe des 21. Jahrhunderts¹ aufgeprägt. In Abb. F.3 ist die lokale Variabilität exemplarisch für die Sommer-Tagesmitteltemperatur an einer Station gezeigt.

¹In Form der Änderungen in den Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationsmuster

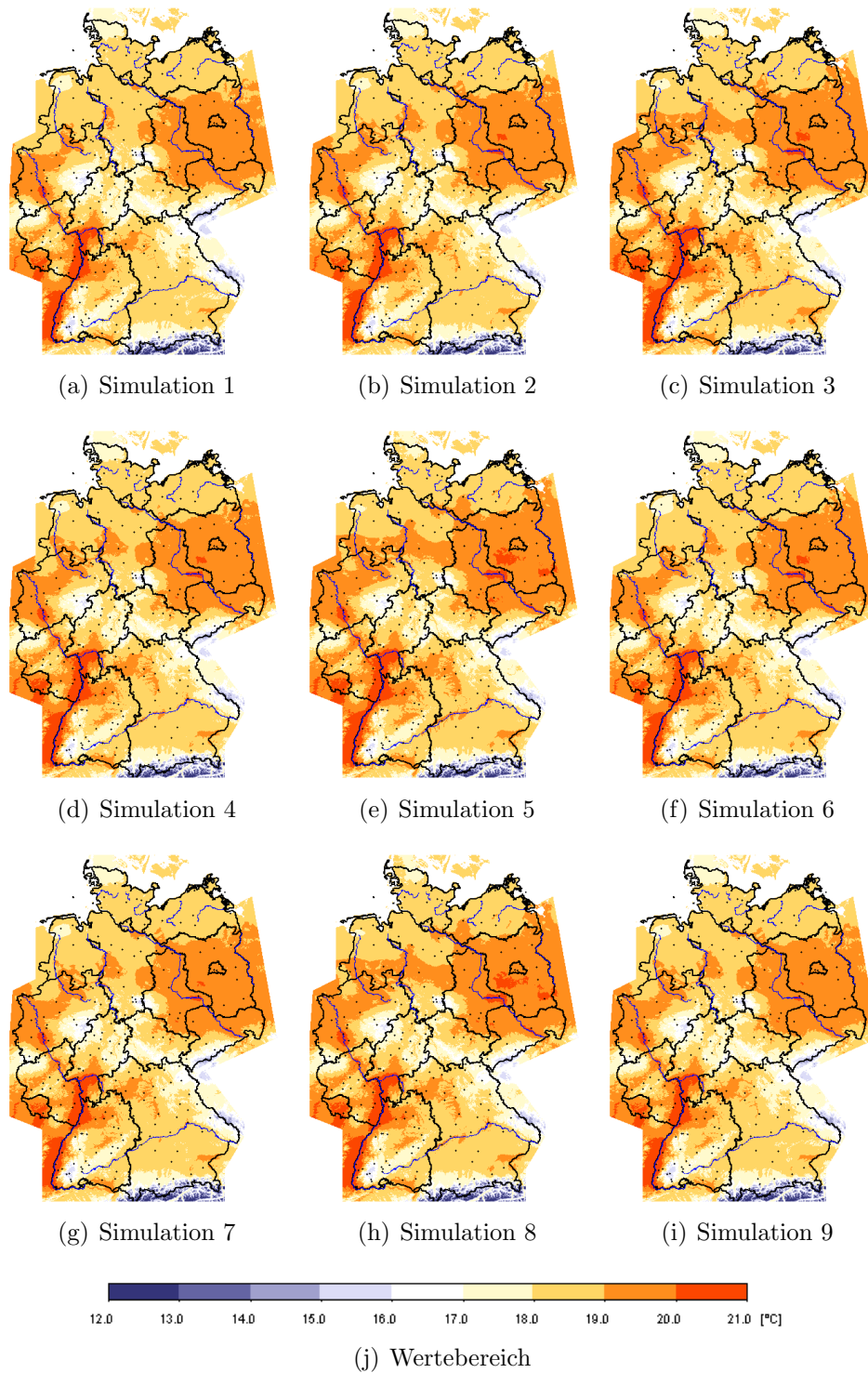


Abbildung F.1: Vergleich der WETTREG-Realisierungen. Element: Mitteltemperatur. Jahreszeit: Sommer. Zeitraum: 2071–2100. Szenario: A1B. Die Beschriftungen unter den Teilfiguren geben an, welche Realisierung dargestellt ist.

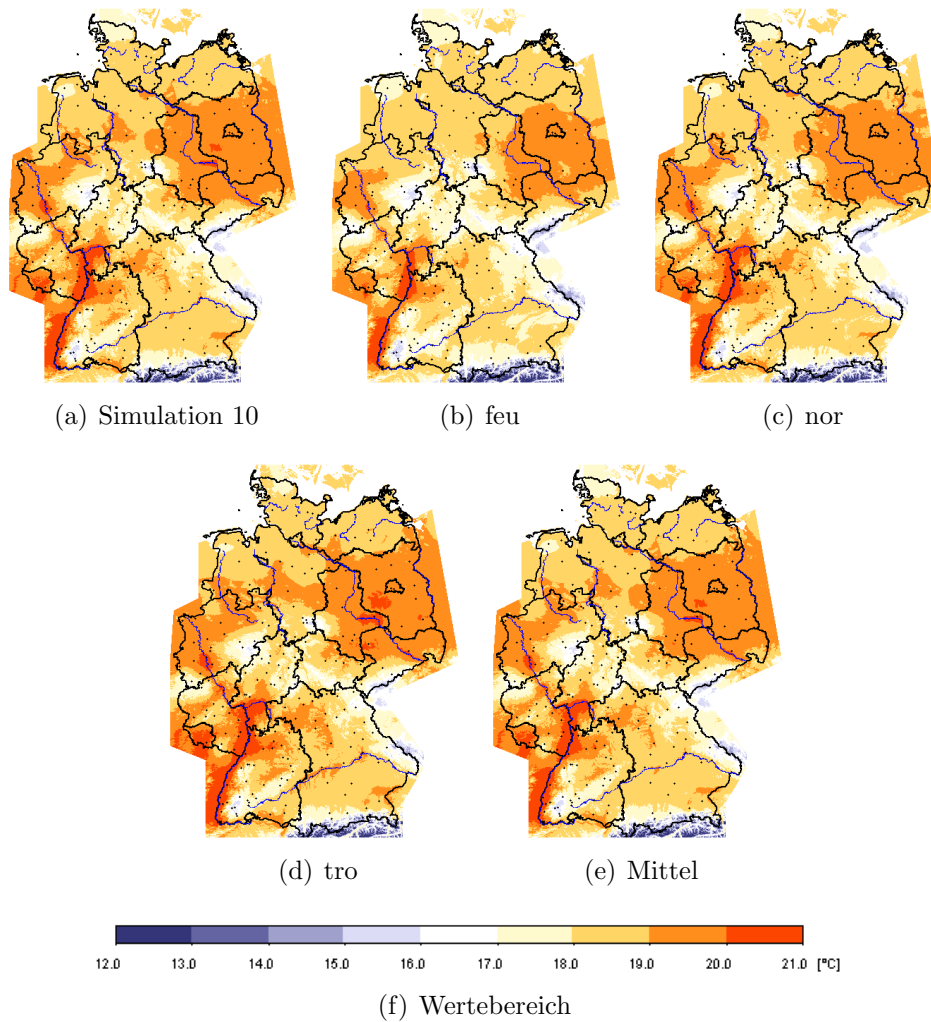


Abbildung F.2: Wie in Abb. F.1, jedoch für die WETTREG-Realisierung 10, die Auswahlbereiche „feucht“, „normal“ oder „trocken“ und das Mittel über alle zehn Realisierungen handelt.

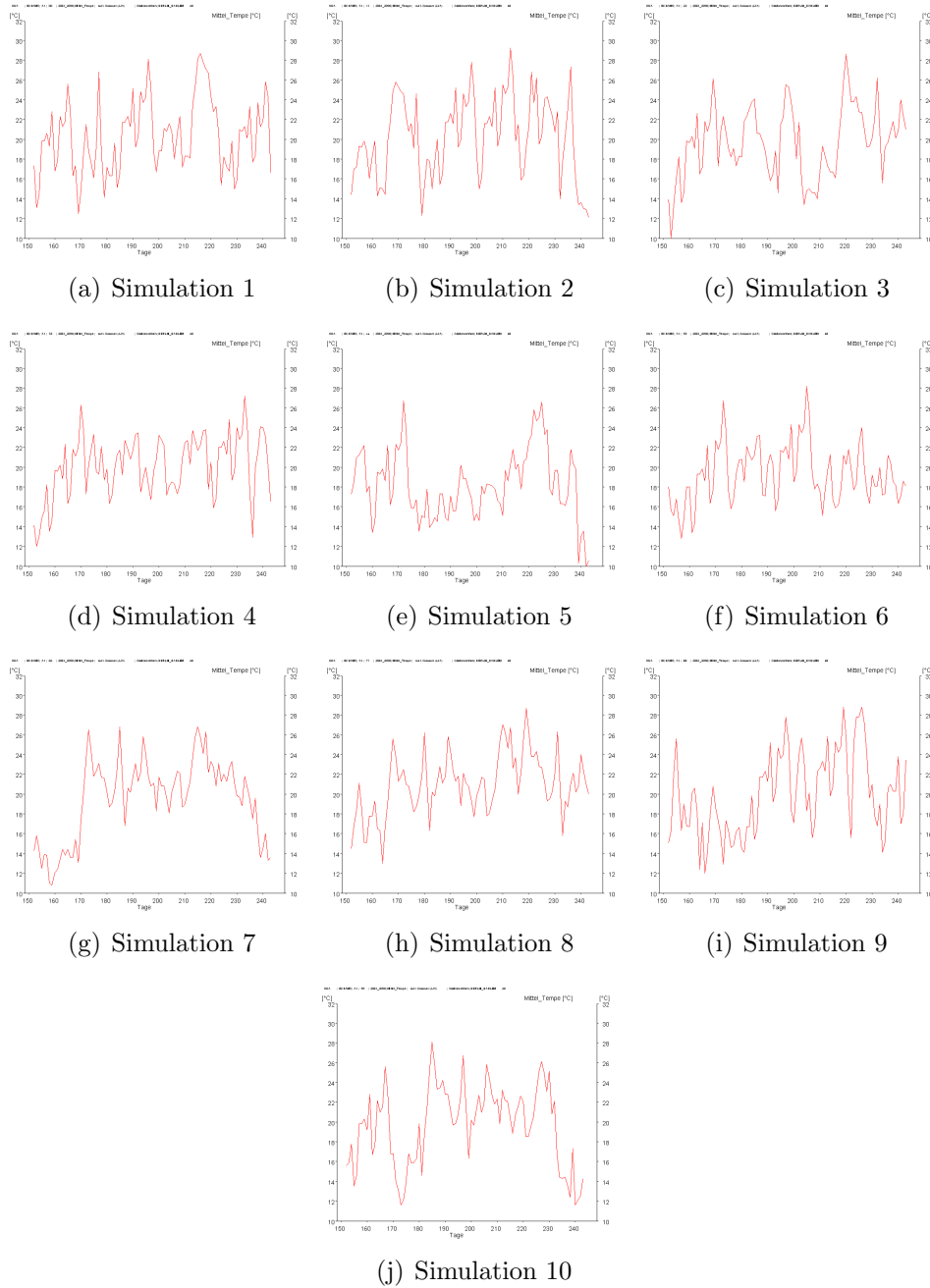


Abbildung F.3: Gegenüberstellung der Verlaufskurven für die Tagesmitteltemperatur im ersten Sommer der Simulationen 1 bis 10 für die Dekade 2081–2090 und das Szenario **A1** an der Station Berlin-Dahlem.

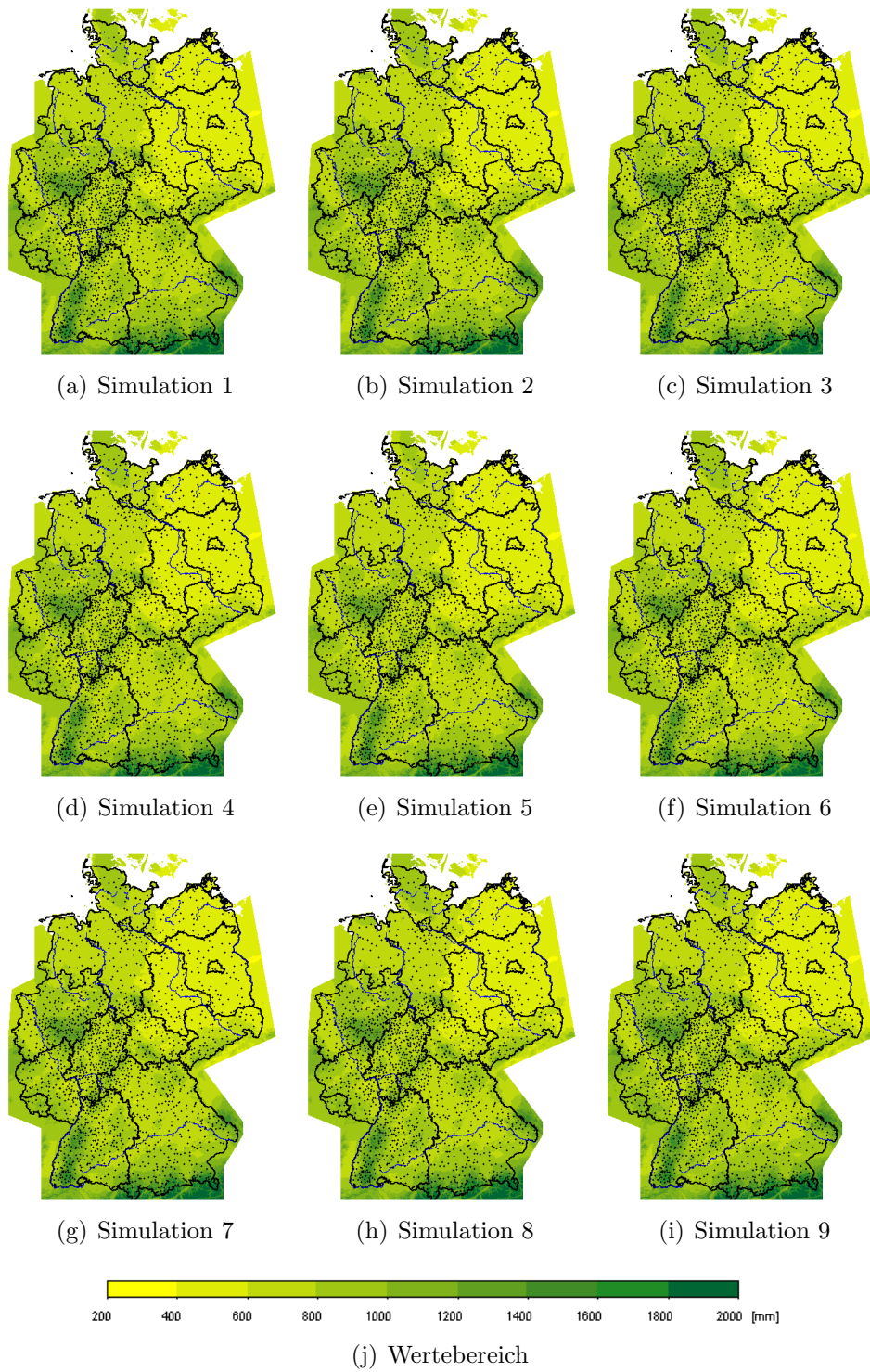


Abbildung F.4: Wie in Abb. F.1, jedoch für den Jahresniederschlag.

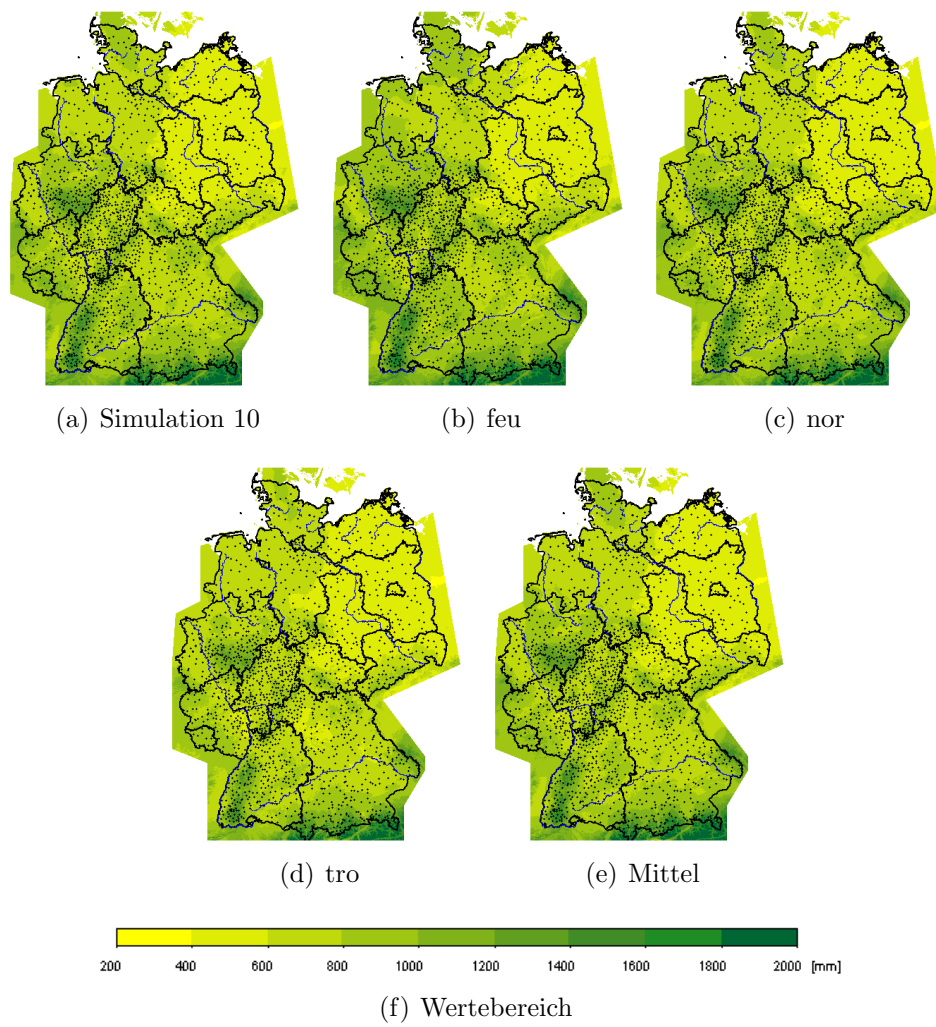


Abbildung F.5: Wie in Abb. F.2, jedoch für den Jahresniederschlag.

Anhang G

Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten

Am Beispiel einer Häufigkeitsverteilung von Tagen mit N mm Niederschlag an der Station Berlin-Dahlem (Tab. G.1) wird gezeigt, wie die Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten bestimmt werden. Die Daten stammen aus der Dekade 1981–1990. Zu jeder Mengenstufe ist in der Tabelle aufgeführt, an wie vielen Tagen dieser Dekade ein Niederschlagsereignis dieser Menge auftrat; von den insgesamt 3650 Tagen gab es also 2277 Tage ohne Niederschlag, 427 Tage mit 1 mm Niederschlag etc. Die *Überschreitungswahrscheinlichkeit* berechnet sich damit zu

$$W_{\geq N} = \frac{(3650 - n_{kum}) \cdot 100}{3650} \quad (\text{G.1})$$

und die *Unterschreitungswahrscheinlichkeit* $W_{<N}$ ist $100 - W_{\geq N}$.

Tabelle G.1: Beispiel für die Berechnung der Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten anhand der Häufigkeitsverteilung der Tage mit N mm Niederschlag. Station: Berlin-Dahlem. Zeitraum: 1981–1990.

N Mengenstufe [mm]	n Anzahl der Tage	n_{kum} Kumulierte Anzahl	$n_{\geq N}$ Tage mit mehr als N mm	$W_{\geq N}$ Überschr.- Wahrsch.	$W_{<N}$ Unterschr.- Wahrsch.
0	2277	2277	3650	37.62	62.38
1	427	2704	1373	25.92	74.08
2	236	2940	946	19.45	80.55
3	165	3105	710	14.93	85.07
4	124	3229	545	11.53	88.47
5	87	3316	421	9.15	90.85
6	67	3383	334	7.32	92.68
7	55	3438	267	5.81	94.19
8	43	3481	212	4.63	95.37
9	35	3516	169	3.67	96.33
10	30	3546	134	2.85	97.15

...weiter auf der nächsten Seite

Anhang G Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten

<i>Fortsetzung</i>					
<i>Mengenstufe / Schwelle</i>	<i>Anzahl der Tage</i>	<i>Kumulierte Anzahl</i>	<i>Tage mit mehr als N mm</i>	<i>Überschr.- Wahrsch.</i>	<i>Unterschr.- Wahrsch.</i>
11	13	3559	104	2.49	97.51
12	14	3573	91	2.11	97.89
13	16	3589	77	1.67	98.33
14	4	3593	61	1.56	98.44
15	10	3603	57	1.29	98.71
16	9	3612	47	1.04	98.96
17	1	3613	38	1.01	98.99
18	7	3620	37	0.82	99.18
19	8	3628	30	0.60	99.40
20	2	3630	22	0.55	99.45
21	1	3631	20	0.52	99.48
22	2	3633	19	0.47	99.53
23	1	3634	17	0.44	99.56
24	3	3637	16	0.36	99.64
25	3	3640	13	0.27	99.73
26	0	3640	10	0.27	99.73
27	1	3641	10	0.25	99.75
28	2	3643	9	0.19	99.81
29	1	3644	7	0.16	99.84
30	2	3646	6	0.11	99.89
31	0	3646	4	0.11	99.89
32	2	3648	4	0.05	99.95
33	0	3648	2	0.05	99.95
34	1	3649	2	0.03	99.97
35	0	3649	1	0.03	99.97
36	0	3649	1	0.03	99.97
37	0	3649	1	0.03	99.97
38	0	3649	1	0.03	99.97
39	0	3649	1	0.03	99.97
40	0	3649	1	0.03	99.97
41	0	3649	1	0.03	99.97
42	0	3649	1	0.03	99.97
43	0	3649	1	0.03	99.97
44	0	3649	1	0.03	99.97
45	0	3649	1	0.03	99.97
46	0	3649	1	0.03	99.97
47	0	3649	1	0.03	99.97
48	0	3649	1	0.03	99.97
49	1	3650	1	0.00	100.00

Anhang H

Kartendarstellung der Klimasignalstärke

In diesem Abschnitt finden sich Kartendarstellungen, die einen Überblick zur Stärke des Klimasignals geben. Sie fassen zusammen und vereinfachen die für die zwölf Naturräume in Abschnitt 6.7 getroffenen Aussagen.

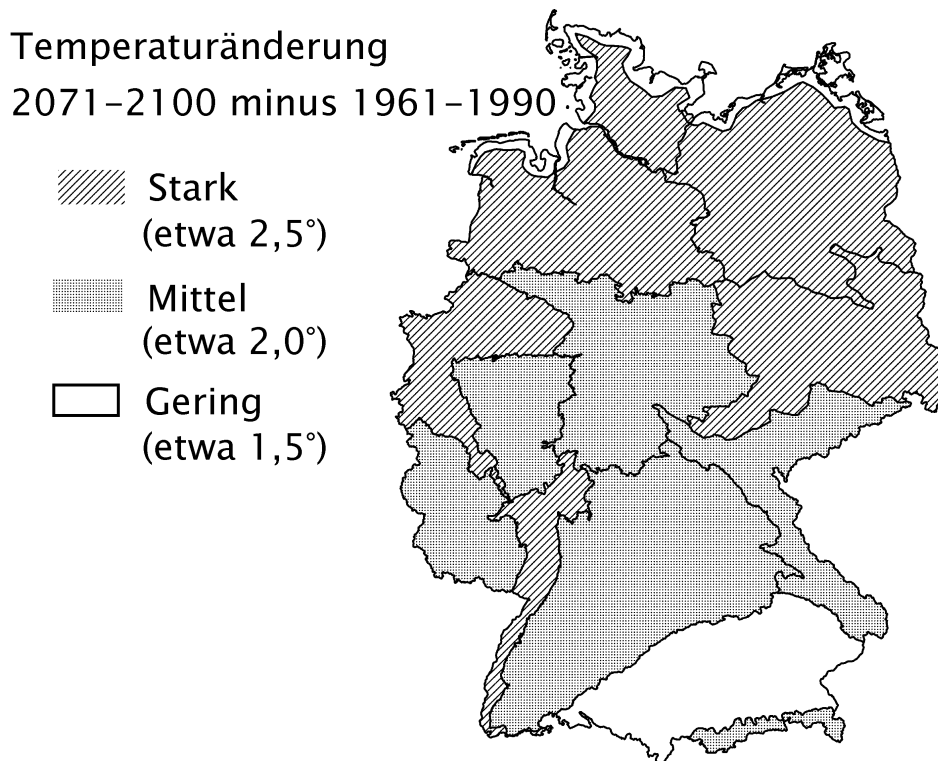


Abbildung H.1: Vereinfachte Kartendarstellung der Signalstärke des Temperaturtrends in den Naturräumen Deutschlands als Differenz zwischen den Perioden 2071–2100 (Szenario **A1B**) und 1961–1990 (Kontrolllauf).

Niederschlagsänderung
2071–2100 minus 1961–1990
Sommer

-  Starker Rückgang
(bis –30%)
-  Mittlerer Rückgang
(etwa –20%)
-  Geringer Rückgang
(0% bis –10%)

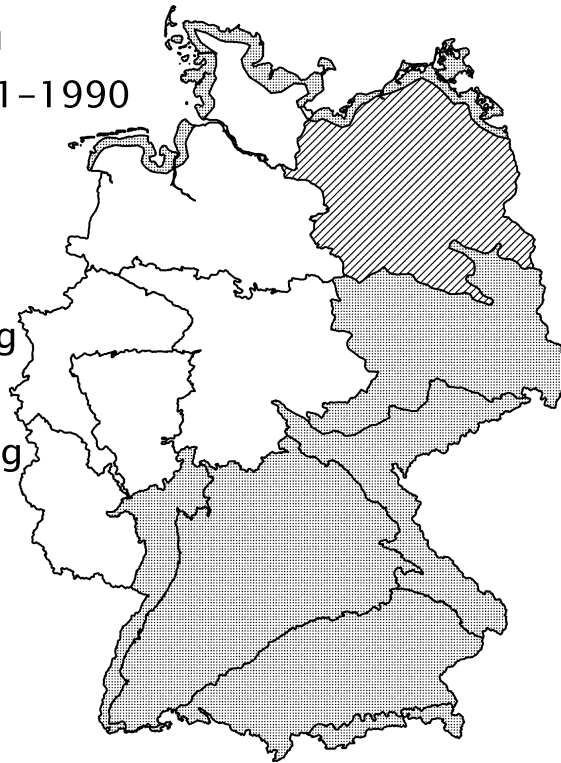


Abbildung H.2: Wie in Abb. H.1 jedoch für den Sommerniederschlag.

Niederschlagsänderung
2071–2100 minus 1961–1990
Winter

-  Starker Anstieg
(+30% bis +80%)
-  Mittlerer Anstieg
(etwa +20%)
-  Geringer Anstieg
(unter +20%)

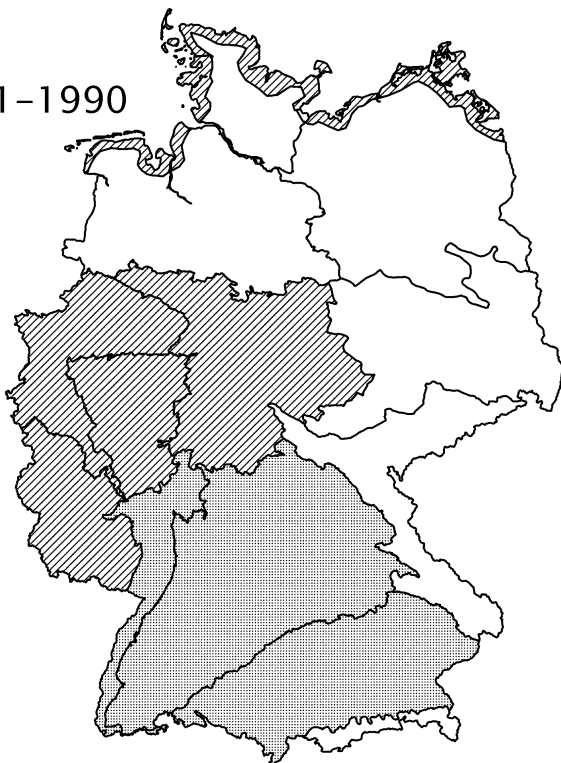


Abbildung H.3: Wie in Abb. H.2 jedoch für den Winterniederschlag.