



Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs
für Deutschland
mit dem statistischen Modell WETTREG2010

Bericht

Frank Kreienkamp, Arne Spekat, Wolfgang Enke

Fassung vom 24. August 2010

Auftraggeber:

Umweltbundesamt – Best.-Nr. Z4-BR - 50 201-2/4

Ausführende:

Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
David - Gilly - Strasse 1
14469 Potsdam

Verwendete WETTREG-Version: WETTREG_T_2010_V.3

Disclaimer

Die in diesem Bericht gezeigten Darstellungen beruhen auf Basisdaten, die von Dritten erzeugt wurden (Reanalysen, globale Klimamodell-Szenariorechnungen 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 Szenarios basieren ihrerseits auf Szenarios 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

Im Jahr 2006 wurde eine Deutschland-weite Studie, basierend auf der damaligen Version von WETTREG vorgestellt und 2007 als UBA-Bericht publiziert. Sie stellt eine statistisch-dynamische Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen dar. Im Zuge des WETTREG-Verfahrens wird dazu die Fähigkeit der großräumigen Klimamodelle genutzt, ein sich änderndes Klima in Form von Änderungen der Häufigkeit und Ausprägung großräumiger atmosphärischer Muster zu reflektieren. Die Häufigkeitsänderungen werden dabei eingesetzt, um Randbedingungen für einen stochastischen Wettergenerator zu schaffen. Mit diesem werden Segmente von Klimazeitreihen an Messstationen abhängig von den Randbedingungen neu geordnet. Resultat ist eine, entsprechend der Dichte der verfügbaren Station, hoch aufgelöste Auswertung des Globalmodells. Der dynamische Aspekt des WETTREG-Verfahrens wird durch einen weiteren Schritt eingebracht. Hierzu erfolgt die Analyse der Ausprägung der großräumig modellierten Klimaänderungen. Die so gefundenen physikalischen Änderungen im simulierten Klima werden anschließend auf die Zeitreihen des stochastischen Wettergenerators aufgeprägt. Resultat ist ein Satz von Zeitreihen, in denen die inneren Zusammenhänge des Klimas enthalten sind und die gleichzeitig die Signatur einer Klimaänderung wiedergeben.

Aufbauend auf das WETTREG2006-Verfahren, erfolgte in den Jahren 2009 und 2010 eine wesentliche Weiterentwicklung. Zum Einen gab es einen Übergang von der Reproduktion von Wetterelementen zur Reproduktion von deren Anomalien (Abweichungen vom Jahresgang). Zum Zweiten wurde ein Ansatz realisiert, demzufolge die großräumigen Muster selbst zukünftigen Änderungen unterliegen. Wie bereits aus Vorstudien bekannt, kann das WETTREG-Verfahren in zentralen Aspekten effizienter arbeiten, wenn so genannte Transwetterlagen eingeführt werden. Bei diesen Mustern handelt es sich nicht um neue Strömungskonfigurationen sondern um eigenständige, extreme Ausprägungen von bekannten Mustern. Ihre Häufigkeit nimmt zum Ende des 21. Jahrhunderts stark zu.

Die Nutzung des erweiterten Bestands an Mustern als Randbedingung für den Wettergenerator führt gegenüber WETTREG2006 insbesondere zu stärkeren Temperatursignalen. Damit wird eine Tendenz von WETTREG2006 ausgeglichen, derzufolge etwa ab der Mitte des 21. Jahrhunderts, insbesondere im Sommer, die regionalisierte Temperaturentwicklung hinter den Vorgaben des globalen Modells zurück bleibt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen	1
1.2	Modellierung des Klimawandels mit hoher Auflösung	2
1.3	Problemstellung	3
2	Datenmaterial	5
2.1	Reanalysen	5
2.2	Globales Klimamodell	6
2.3	Messdaten	6
3	Modell/Verfahrensbeschreibung	9
3.1	Grundlagen	9
3.2	Weiterentwicklung von WETTREG	10
4	Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit den Beobachtungen	11
5	Klimasignale	19
5.1	Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der nahen Zukunft (2021 bis 2050)	19
5.2	Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der fernen Zukunft (2071 bis 2100)	26
6	Diskussion	33
6.1	Statistische und dynamische Aspekte in WETTREG	33
6.2	Definition von Transwetterlagen	34
6.3	Verwendung von Anomalien	34
6.4	Ausdehnung des Zeitrahmens bei den Klimadaten	35
6.5	Übergang von Zeitscheiben zu transienter Herangehensweise	36
6.6	Resultierende Temperatur- und Niederschlagssignale	37
7	Zusammenfassung und Ausblick	41
	Literaturverzeichnis	43

Anhänge	I
I Anhänge	I
A Erläuterung der SRES-Szenarios	III

Abschnitt 1

Einleitung

1.1 Grundlagen

Der Klimawandel, Teil des Globalen Wandels, ist eine der großen Herausforderungen für die Menschheit mit weit reichenden Konsequenzen. Um ihn zu identifizieren werden auch weiterhin umfangreiche Forschungsaktivitäten benötigt. Dafür ist in erster Linie ein besseres Verständnis der Klimaprozesse notwendig. Des Weiteren werden umfangreiche Studien zu den Impakten des Wandels benötigt, auf deren Basis Adaptationsmaßnahmen umgesetzt werden können. Wichtige Meilensteine wurden seit 1990 im Rahmen des IPCC-Prozesses dokumentiert: [IPCC 1990], [IPCC 1996], [IPCC 1998], [IPCC 2001a] – eine Fortsetzung erfolgte 2007 mit dem vierten IPCC-Sachstandsbericht [IPCC 2007]. Parallel dazu erfolgte auch eine Weiterentwicklung der globalen Klimamodelle. Diese sind unverzichtbare Basis aller Regionalisierungsstudien, seien es dynamische oder statistische Ansätze. 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. 2007] publiziert. Dynamische Regionalisierungsmodelle wurden im EU-Projekt PRUDENCE einander gegenübergestellt [PRUDENCE 2005] und im EU-Projekt ENSEMBLES werden Multimodell-Ansätze erarbeitet. Es gibt einen zusammenfassenden ENSEMBLES-Bericht: [van der Linden und Mitchell 2009].

Der hier vorgelegte Bericht dokumentiert die Aktualisierung und Erweiterung einer seit 2006 verfügbaren [Kreienkamp u. a. 2006b] (im Text mit WETTREG2006 bezeichnet) und 2007 publizierten UBA-Deutschlandstudie mit der statistischen Regionalisierungsmethode WETTREG [Spekat u. a. 2007a]. Er basiert auf Weiterentwicklung dieser statistischen Regionalisierungsmethode, die von den Bundesländern in Auftrag gegeben wurden [Kreienkamp u. a. 2010] (im Bericht mit WETTREG2010 bezeichnet). Ziel jenes Vorhabens ist, unter Einsatz dieser Methode, ein hochauflösendes Bild des Klimawandels zu erhalten. Dazu wird das Konzept der so genannten Transwetterlagen (im Bericht mit TWL abgekürzt, s.a. [Kreienkamp u. a. 2006a]) weiter geführt – es folgt der Idee, dass in Zukunft neue atmosphärische Muster entstehen könnten, die sich in ihren physikalischen Eigenschaften von den derzeit auftretenden Mustern unterscheiden.

1.2 Modellierung des Klimawandels mit hoher Auflösung

Die Regionalisierung von Modellresultaten ist ein zentrales Aufgabenfeld der Klimamodellierung. Sie unterstützt den Erkenntnisprozess zum globalen Wandel, der Modellaussagen mit einer Auflösung benötigt, die auch von den am weitesten entwickelten globalen Klimamodellen nicht zur Verfügung gestellt werden können. Die globalen Modelle selbst wurden im Laufe der Zeit weiter verbessert, zum Beispiel bezüglich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie der physikalischen Parameterisierungen und der Anzahl der modellierten Prozesse. Auf der globalen und kontinentalen Skala liefern sie konsistente und robuste Ergebnisse, so dass sie den großskaligen Antrieb für die Regionalisierungsverfahren darstellen¹⁾. In Regionen von Interesse können somit die entsprechenden Studien vorgenommen werden. Es gibt bei der Regionalisierung zwei Grundansätze:

- 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. Eine verbreitete Herangehensweise identifiziert statistische Beziehungen zwischen den großräumigen Mustern/Wetterlagen und den lokalen Auswirkungen, wobei die aus der Vergangenheit oder der Jetztzeit gewonnenen Beziehungen auf die Vorausrechnungen der globalen Modelle (angetrieben von den globalen 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.

¹⁾Zitat Filippo Giorgi in [Christensen 2005]: *If you don't believe in the value of global climate models then there's no point in downscaling them. But if you do - and global models do provide a quite consistent pattern of climate change - then it makes sense to translate global patterns into local information.*

1.3 Problemstellung – Regionalisierung eines ECHAM 5-Szenarios mit der 2010 aktualisierten WETTREG-Methode

Es wurden in der Vergangenheit Klimastudien mit dem Verfahren WETTREG auf der Basis der Klimaszenarios **B2** und **A2** und Verwendung von ECHAM 4-OPYC3 und ab 2006 mit Szenariorechnungen **A1B**, **A2** und **B1** von ECHAM 5/MPI-OM T63L31 globalen Klimasimulationen erstellt [Kreienkamp u. a. 2006b], wie zum Beispiel in [Spekat u. a. 2007a] dokumentiert. Das WETTREG-Verfahren erhielt im Laufe der Zeit Verbesserungen und zudem wurden neue Läufe der globalen Klimamodelle zur Verfügung gestellt. Im Jahre 2009 wurde von einer umfangreichen Gruppe von Bundesländern und Freistaaten eine Studie aufgelegt, in der der TWL-Ansatz in das WETTREG-Verfahren implementiert wurde. Die Veränderungen der Methode sind im Bericht [Kreienkamp u. a. 2010] dokumentiert.

Ziel dieses, vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Vorhabens ist es, mit der in [Kreienkamp u. a. 2010] beschriebenen WETTREG2010-Methode für das Szenario A1B des ECHAM 5-Modells, Lauf 1, eine Regionalisierung für Deutschland durchzuführen und diese den Ergebnissen mit WETTREG2006 gegenüber zu stellen.

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

Grundgedanke des Reanalyse-Ansatzes ist es, eine Klimatologie der Atmosphäre in drei Dimensionen auf der Basis von Daten hoher Homogenität in Zeit und Raum zu erzeugen. 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 die Re-Analysen ist ein auf homogenen Daten beruhendes dreidimensionales Bild des Klimas der Jetztzeit möglich. Eine sehr gute und ausführliche Darstellung der Reanalyse-Philosophie sowie der Entwicklungs-Phasen insbesondere beim European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) findet sich in Kapitel 14 (S. 167–182) von [Woods 2006].

Es gibt zwei Reanalyse-Datensätze, die im Laufe der Zeit auch für WETTREG Verwendung fanden: Die NCEP/NCAR Reanalysen [Kalnay u. a. 1996] und die ERA40-Reanalysen [Uppala u. a. 2005]. Erstere werden stetig aktualisiert, während die Zweitgenannten nur bis 2002 reichen aber dafür eine höhere räumliche Auflösung bieten. Sowohl NCEP- als auch ERA40-Daten sind in Bereichen mit guter Datenbelegung (z.B. Europa) nur geringfügig unterschiedlich [Greatbatch und Rong 2006] und [Wang u. a. 2006]. Aus den Feldern werden Zirkulationsmuster bestimmt, deren Kopplung mit dem lokalen Klima ein zentraler Aspekt von WETTREG ist.

2.2 Globales Klimamodell

Nachdem rund 10 Jahre lang das ECHAM 4-OPYC3 [Cubasch u. a. 1995] des MPI-Hamburg mit globalen Klimasimulationen eine solide Grundlage für Klimastudien war, sind seit 2005 die Szenariorechnungen des Nachfolgermodells ECHAM 5/MPI-OM T63L31 (dokumentiert in [Roeckner u. a. 2003] und [Roeckner u. a. 2004]) verfügbar. Der Zeithorizont umfasst die Jahre 1861 bis 2100, bis 2000 als 20C-Lauf, danach als Rechnungen für die SRES-Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**. Aus den Feldern werden so genannte potenzielle Prediktoren bestimmt, die Analysen von physikalischen Eigenschaften einer Atmosphäre im Klimawandel ermöglichen. Bisherige WETTREG-Studien nutzten zur Regionalisierung auch ECHAM 4 bzw. ECHAM 5. Vergleiche mit regionalisierten Daten anderer Globalmodelle fanden im Rahmen des PaRK-Projekts [Spekat u. a. 2008] und [Kreienkamp u. a. 2009] statt. Inzwischen liegen weitere Läufe verschiedener Modelle vor, die im Rahmen des EU-Projekts ENSEMBLES erstellt und 2008 der Wissenschafts-Community zur Verfügung gestellt wurden – die Dokumentation von ENSEMBLES findet sich in [van der Linden und Mitchell 2009].

2.3 Messdaten

Für die Synthese der Beziehungen zwischen atmosphärischen Mustern und lokalen meteorologischen Größen sind Messdaten von Klimastationen und Niederschlagsstationen notwendig. Die an den 387 Klimastationen verfügbaren Wetterelemente sind in Tab. 2.1 aufgeführt. Ihre räumliche Verteilung zeigt Abb. 2.1(a) und die 2943 Niederschlagsstationen sind in Abb. 2.1(b) markiert. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Niederschlagsdaten um *unkorrigierte* Werte handelt.

Anmerkung 1: *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).*

Anmerkung 2: *Im Rahmen der UBA-Studie [Spekat u. a. 2007a] erfolgte die Simulation für 273 Klimastationen und 1690 Niederschlagsstationen. Die Daten wurden vor der Nutzung auf Homogenität geprüft und gegebenenfalls homogenisiert.*

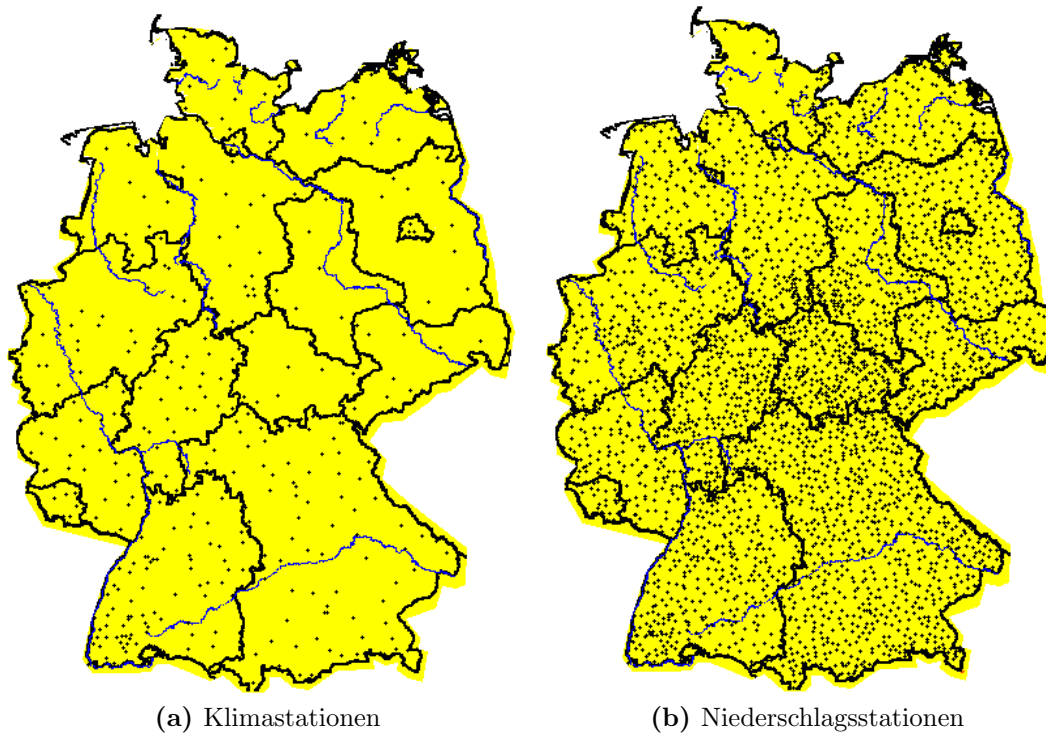


Abbildung 2.1: In dieser Studie verwendete Klima- (links) und Niederschlagsstationen (rechts).

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	[m/s]

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.), 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.

Die Bildung von Klassen folgt dem *Environment-to-Circulation* Ansatz [Yarnal 1993]. Dabei werden lokale Klimagrößen – zum Beispiel Temperaturmessungen – in Größenklassen eingeteilt und anschließend die an den so ermittelten Tagen herrschenden Zirkulationsmuster gefunden. Dieser Ansatz verfolgt also

die Strategie, im Falle der Temperatur-Klassenbildung, zu ermitteln, wie die atmosphärischen Muster beschaffen sind, wenn lokal hohe/niedrige Temperaturwerte registriert werden. Die umgekehrte Herangehensweise ist der *Circulation-to-Environment* Ansatz, bei dem zuerst Strukturen in der Atmosphäre gesucht und danach deren lokale Konsequenzen bestimmt werden. Ein klassisches Beispiel sind die Großwetterlagen [Hess und Brezowsky 1952]. Die COST-Aktion 733 vergleicht zahlreiche objektive und subjektive Klassifikationsmethoden [Huth u. a. 2008] und [Philipp u. a. 2010]. Wie in [Spekat u. a. 2010] gezeigt, ist ein *Environment-to-Circulation* Ansatz, wie er auch in WETTREG verfolgt wird, sehr gut geeignet, Zirkulationsmuster zu identifizieren, die bezüglich der lokalen Klimagrößen eine hohe Trennschärfe besitzen. Dies wiederum ist vorteilhaft für Studien des Klimaimpakts.

3.2 Weiterentwicklung von WETTREG

Die Details der Methode, inklusive der Zusammenschau und räumliche Homogenisierung der einzelnen Teilregionen, sind ausführlich in [Enke 2005], [Enke u. a. 2005b], [Enke u. a. 2005a], [Spekat u. a. 2007a] und in [Kreienkamp u. a. 2010] beschrieben. Im Laufe der Jahre wurde WETTREG in Teilaspekten verbessert. So ist in der für [Spekat u. a. 2007a] verwendete Fassung der Antrieb durch das globale Modell noch in Zeitscheiben erfolgt, d.h. die Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationsmuster wurden dekadenweise bestimmt und diese Diskretisierung führte zu Sprüngen an den Dekadenübergängen. In mehreren Studien, wie etwa [Spekat u. a. 2006] oder [Spekat u. a. 2007b] wurde eine transiente Strategie erarbeitet und umgesetzt, in der die Häufigkeitsverteilungen sich gleitend ändern. Ein solches Vorgehen wurde auch im Rahmen der TWL-Studie [Kreienkamp u. a. 2010] angewandt – dort werden in den Abschnitten 3.2.1ff die Weiterentwicklungen vorgestellt.

Abschnitt 4

Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit den Beobachtungen

In diesem Abschnitt wird beschrieben und verglichen, wie die Bodenbeobachtungen durch die Modellsimulation von WETTREG für die Jetztzeit wiedergegeben werden. Die dabei benutzten WETTREG-Simulationen hatten den 20C-Lauf 1 von ECHAM 5 (1971–2000) als Antrieb.

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. Zusätzlich ist es dabei möglich, Betrachtungen zur modellinternen Variabilität anzustellen. WETTREG liefert für jede Dekade an jeder Station 10 synthetisierte Datenreihen von 3650 Tagen Länge¹⁾, die dem statistischen Verhalten des Klimas in der Dekade entsprechen.

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].

Temperatur

Als erstes Klimaelement wird die Temperatur validiert. Abb. 4.1 zeigt dazu die Abweichungen der mit WETTREG simulierten Tagesmitteltemperatur von den im Zeitraum 1971–2000 registrierten Werten an den Klimastationen. Die Untersuchung wurde Jahreszeiten-spezifisch und für das gesamte Jahr durchgeführt.

¹⁾In den Simulationen sind keine Jahre mit Schalttagen vorhanden.

Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit den Beobachtungen

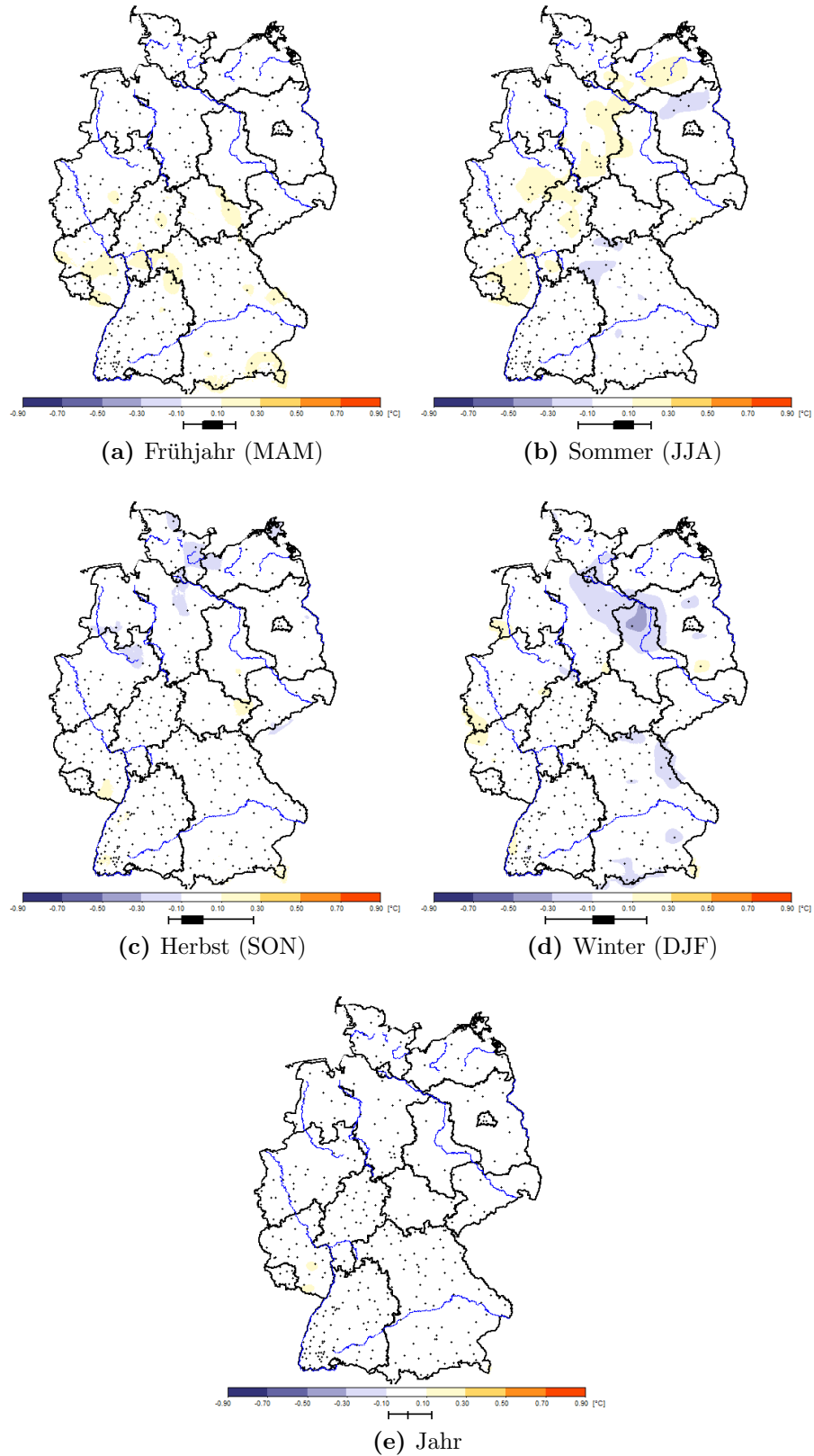


Abbildung 4.1: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM 5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Element: Tagesmitteltemperatur. Periode: 1971–2000. Blautöne: Modell zu kalt, Rottöne: Modell zu warm.

Unter jeder Teilfigur findet sich eine zweiteilige Legende, die erstens die verwendete Farbskala und zweitens in Form eines Box-Whisker-Diagramms den auftretenden Wertebereich zeigt. Letzteres markiert mit Strichen an seiner linken und rechten Begrenzung den niedrigsten bzw. höchsten in der Karte auftretenden Wert. Für den dazwischen befindlichen schwarzen Kasten wurden die an allen Bildpunkte ermittelten Werte der Größe nach sortiert. In dieser Rangfolge erfolgte die Identifikation derjenigen Werte, die 25 bzw. 75% entsprechen, also bei 1000 verwendeten Daten der 250. und der 750. Dazwischen liegt der so genannte Interquartilbereich, also die “mittleren 50%” der Daten.

Welche Abweichungen sind als signifikant zu bezeichnen? Die Basis hierfür ist die Berechnung des Mittelwertes \bar{x} der gewählten Zeiteinheit (Jahre, Halbjahre, Jahreszeiten, Vegetationsperioden oder Monate) einer simulierten Größe für den Zeitraum 1971–2000. Aus den 30 dazu verwendeten Einzelwerten wird die Standardabweichung s errechnet. Als nächstes erfolgt, in Anlehnung an [Taubenheim 1969], Kapitel 3.1.2 (Vertrauensgrenzen des Durchschnitts), die Berechnung des Erwartungswertes μ nach

$$\bar{x} - t_{\beta}(n) \frac{s}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\beta}(n) \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

oder

$$\mu = \bar{x} \pm t_{\beta}(n) \frac{s}{\sqrt{N}}, \quad (4.2)$$

mit N : Anzahl der Werte; n : Freiheitsgrad, d.i. $N - 1$; β : Irrtumswahrscheinlichkeit; $t_{\beta}(n)$ Signifikanzschwellen der t -Verteilung (Students Test) in Abhängigkeit von Freiheitsgrad und Irrtumswahrscheinlichkeit. Für $n = 30$ und $\beta = 0,01$ (1% Irrtumswahrscheinlichkeit) ist t 2,750 (s.a. Tabelle C in [Taubenheim 1969]).

Mit dieser Betrachtung kann für die Mitteltemperatur ein Bereich von rund $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ bestimmt werden, innerhalb dessen die Abweichungen nicht signifikant sind. Wie in Abb. 4.1 erkennbar, sind die auftretenden Abweichungen in fast allen Jahreszeiten und dem Jahr gering. Lediglich im Winter sind sie etwas stärker; ein ähnliches saisonales Verhalten konnte auch in den WETTREG-Simulationen der Gegenwart bei der UBA-Studie [Spekat u. a. 2007a] (dort Kapitel 4.1) gezeigt werden, wiewohl die Stärke der Abweichungen in der vorliegenden Studie geringer ist.

Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit den Beobachtungen

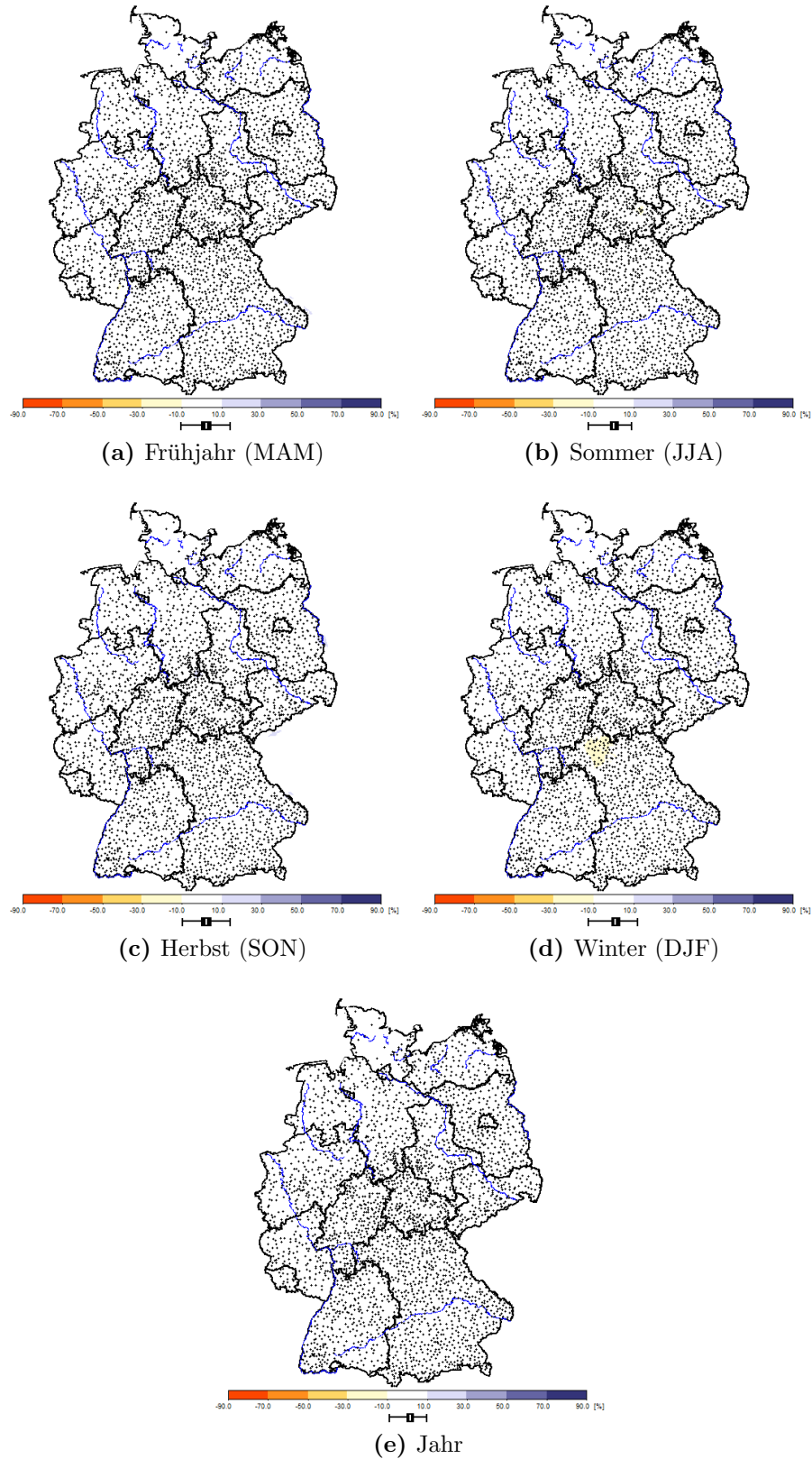


Abbildung 4.2: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM 5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Element: Niederschlagssumme. Periode: 1971–2000. Blautöne: Modell zu feucht, Rottöne: Modell zu trocken.

Niederschlag

In Abb. 4.2 ist die Validierung für den Niederschlag dargestellt. Der Signifikanzbereich (vgl. S. 13) liegt beim Niederschlag bei rund $\pm 10\%$, d.h. die auftretenden Abweichungen sind als gering zu bezeichnen. In der UBA-Studie [Spekat u. a. 2007a] (dort Kapitel 4.2.1) wurden ebenfalls geringe Unterschiede zwischen WETTREG-Simulationen, angetrieben mit ECHAM 5-20C Daten und Klimamessungen gefunden. Die dortige Abbildung 4.4 besitzt eine für die Problemstellung deutlich zu feine Auflösung, da dort ein Wertebereich von $\pm 9\%$ dargestellt wurde, was zur Gefahr der Überinterpretation von im Grunde sehr schwachen Signalen Anlass gibt.

Luftdruck und andere Klimaelemente

Die Abb. 4.3–4.8 zeigen die Validierung für die Klimaelemente Luftdruck, relative Feuchte, Dampfdruck, Sonnenscheindauer, Bedeckungsgrad und Windgeschwindigkeit. Die Grundmuster sind aus den Jahresdarstellungen ersichtlich. Gemeinsamer Eindruck ist, dass die Abweichungen beim Vergleich der WETTREG-Simulationen mit den Klimamessungen mit Ausnahme der Windgeschwindigkeit gering sind. Beim Bedeckungsgrad – Abb. 4.6 – treten in der Mitte und im Süden Deutschlands leichte Verschiebung (Modell simuliert etwas zu viel Sonnenscheindauer) auf. Beim Wind wird das mittlere Tagesmittel im Mittel um etwa 0,7 m/s überschätzt. Ausreißer stellen die Station Arkona und Fichtelberg dar.

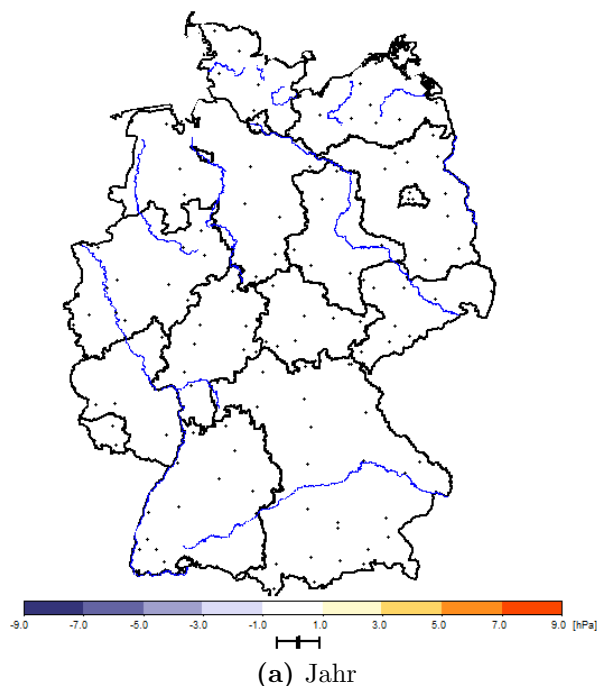


Abbildung 4.3: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM 5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Element: Luftdruck. Periode: 1971–2000.

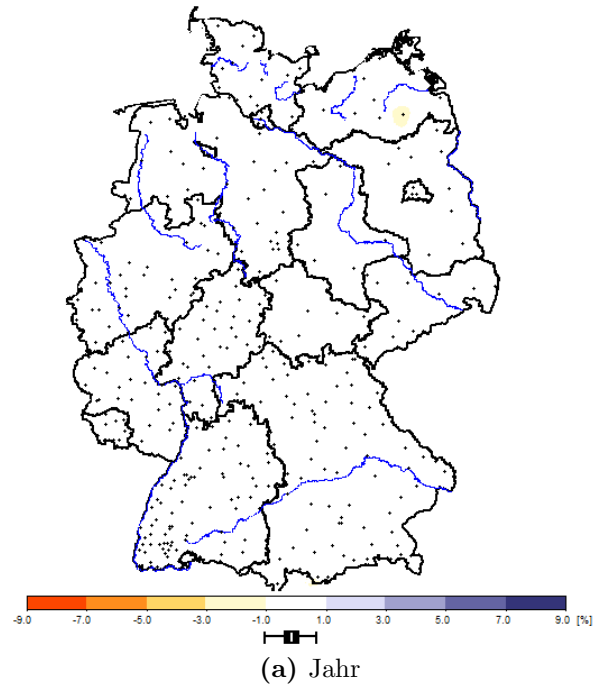


Abbildung 4.4: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM 5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Element: relative Feuchte. Periode: 1971–2000.

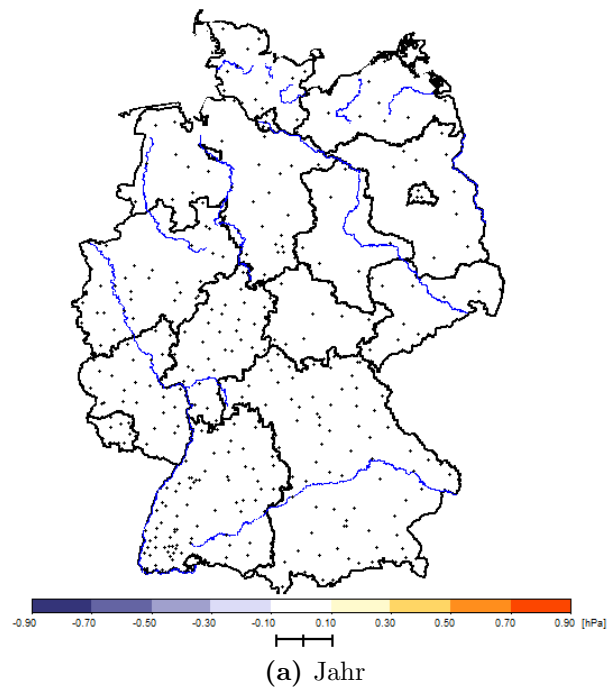


Abbildung 4.5: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM 5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Element: Dampfdruck. Periode: 1971–2000.

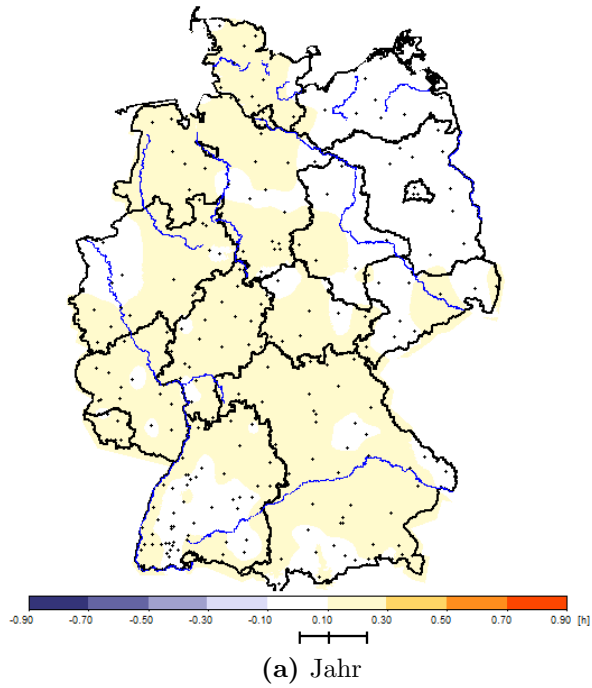


Abbildung 4.6: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM 5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Element: Sonnenscheindauer. Periode: 1971–2000.

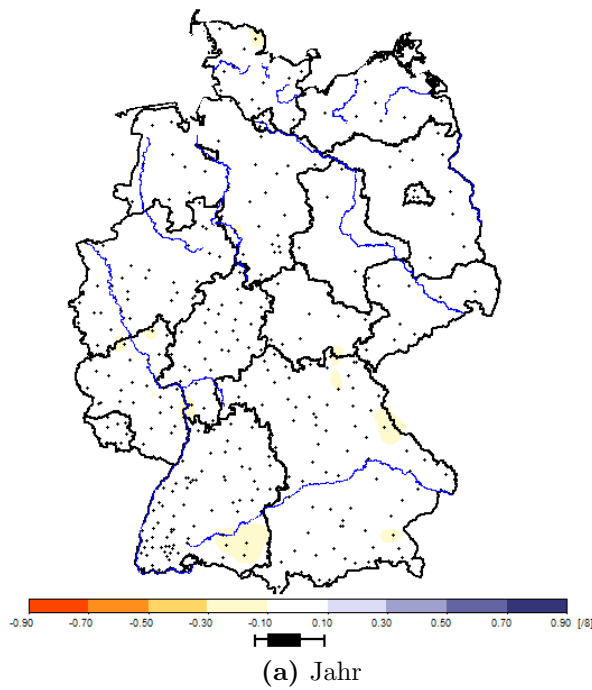


Abbildung 4.7: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM 5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Element: Bedeckungsgrad. Periode: 1971–2000.

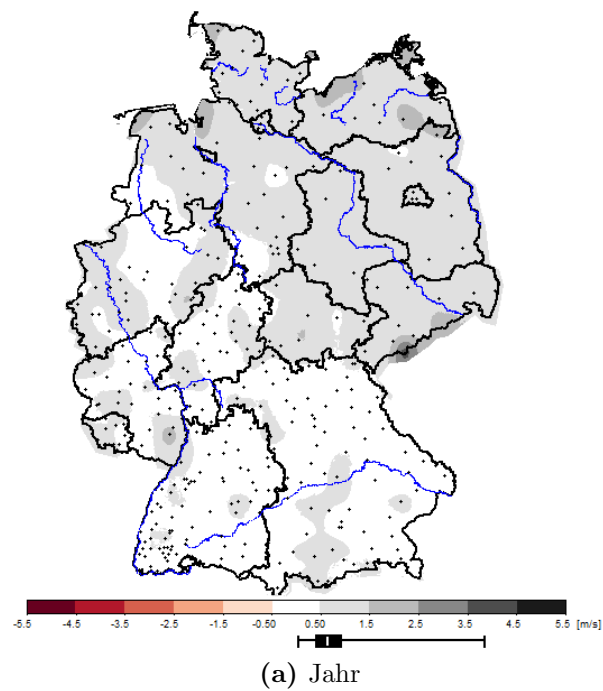


Abbildung 4.8: Vergleich der Simulation (WETTREG, angetrieben mit dem Kontrolllauf von ECHAM 5, über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Beobachtungsdaten der Jetztzeit. Element: Windgeschwindigkeit. Periode: 1971–2000.

Abschnitt 5

Klimasignale

Wie die Validierung im vorigen Abschnitt zeigt, sind WETTREG-Simulationen in der Lage, die Klimamessungen des Zeitraums 1971–2000 gut zu reproduzieren. Das bedeutet, dass ein Datenvergleich zwischen den Simulationen der Gegenwart und jenen der Zukunft erfolgen kann. Für Letztere wird WETTREG mit Daten des ECHAM 5-Szenario **A1B** Lauf 1 angetrieben¹⁾. Die untersuchte Größe ist dabei das Element-spezifische Klimasignal, d.h. die Differenz zwischen den Zeitbereichen 2021 bis 2050 (Abschnitt 5.1) bzw. 2071 bis 2100 (Abschnitt 5.2) des Szenarios und dem Zeitbereich 1971 bis 2000 des 20C-Laufs.

Die Strukturierung erfolgt in Anlehnung an das Validierungskapitel 4. Die Auswertungen für Tagesmitteltemperatur und Niederschlag erfolgen in jahrezeitlicher Differenzierung während für Luftdruck, relative Feuchte, Dampfdruck, Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad jeweils die Vergleiche für das gesamte Jahr dargestellt sind.

5.1 Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der nahen Zukunft (2021 bis 2050)

Temperatur

Im ersten Drittel des 21. Jahrhunderts werden von den WETTREG-Simulationen Temperaturanstiegssignale in einer Größenordnung um $+1,5^{\circ}\text{C}$ errechnet, wie in Abb. 5.1 erkennbar ist. Sie sind im Frühjahr geringer und Winter etwas stärker als dieses mittlere Niveau ausgeprägt. Die Box-Whisker-Diagramme der Werteverteilung in jeder Karte weisen beim Frühjahr darauf hin, dass dort in Teilbereichen sehr geringe Anstiegsraten unterhalb der dargestellten Werte-Untergrenze von $0,5^{\circ}\text{C}$ auftreten. Zudem zeigen diese Diagramme durch die geringe Breite des Kastens (der Interquartilbereich) an, dass die Wertebereiche im überwiegenden Teil der Karte nahe beieinander liegen und dass die Extreme einzelner Bildpunkte diese Werte durchaus deutlich übersteigen.

¹⁾WETTREG erzeugt 10 Simulationen pro Dekade, über die für die Analysen jeweils gemittelt wurde.

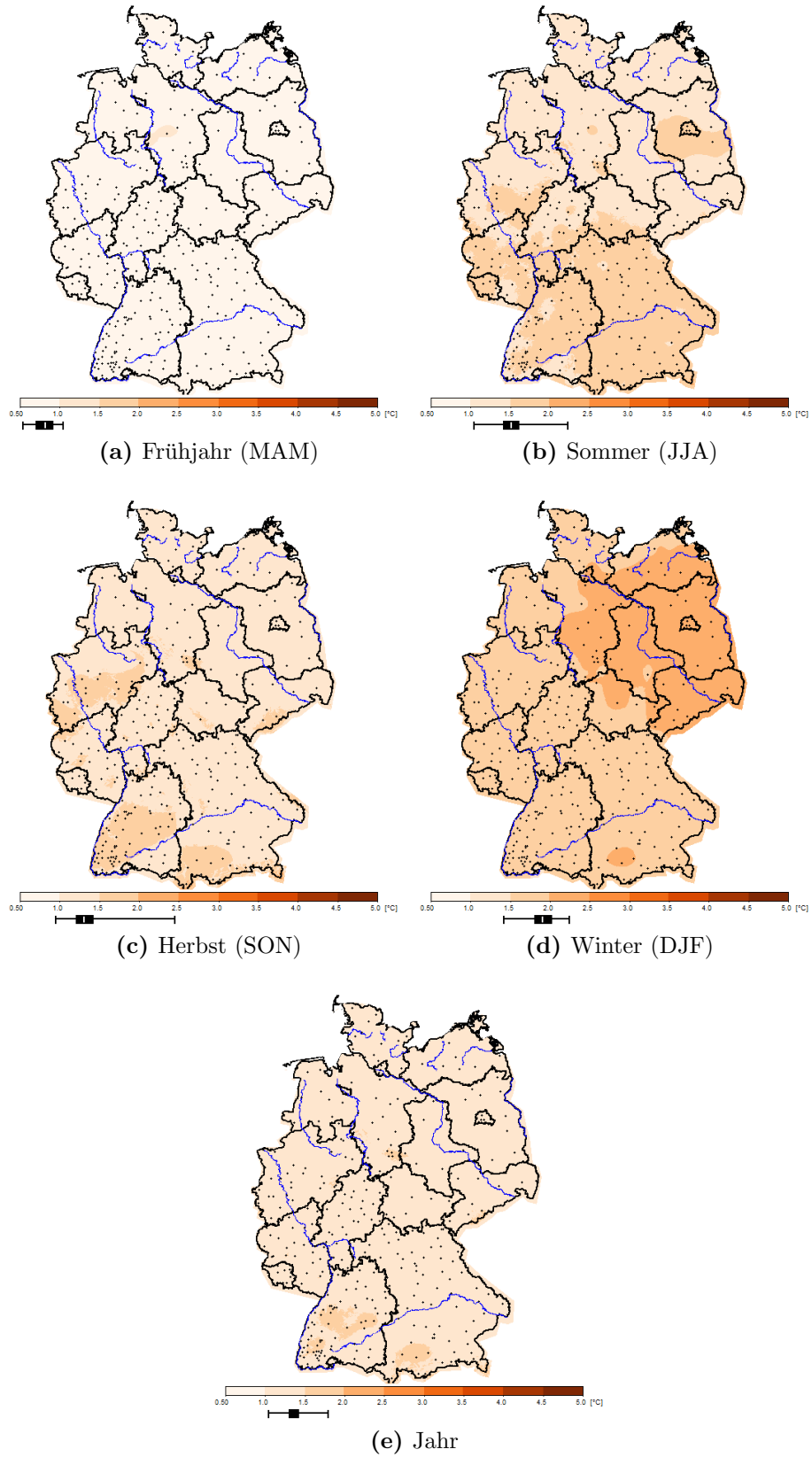


Abbildung 5.1: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Tagesmitteltemperatur. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000.

5.1 Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der nahen Zukunft (2021 bis 2050)

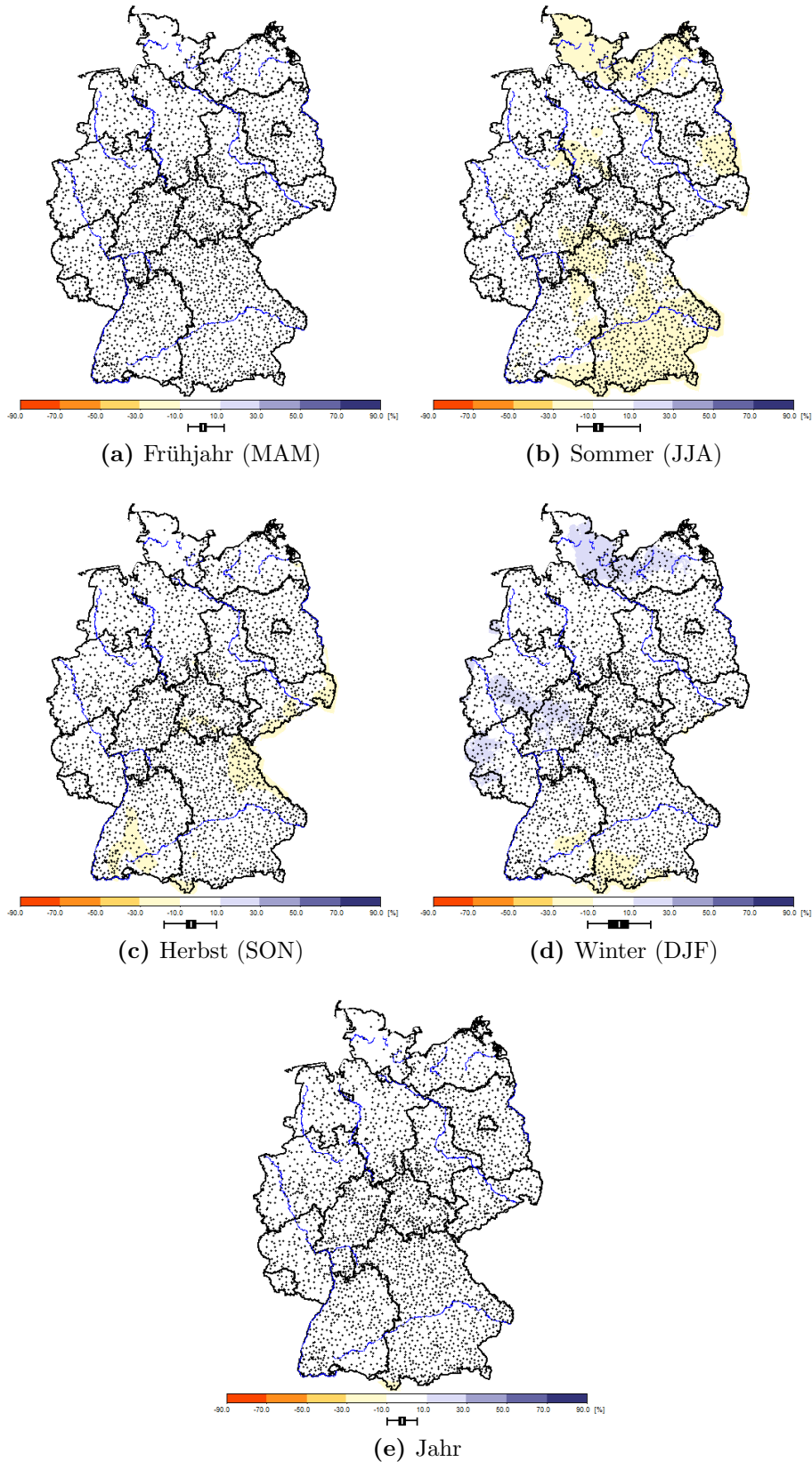


Abbildung 5.2: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Niederschlagssumme. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000.

Niederschlag

Wie Abb. 5.2 zeigt, liegen die Niederschlagssignale für den Zeithorizont der nahen Zukunft in einer Größenordnung von $\pm 10\%$, d.h. sie sind nur schwach signifikant, vgl. S. 13. In den Karten auftretende lokale Maxima und Minima sollten daher nicht überinterpretiert werden.

Luftdruck und andere Klimaelemente

Wie in Abb. 5.3–5.8 zeigen, sind die Klimasignale der einzelnen Größen zum Zeithorizont nicht stark. Weder treten große regionale Unterschiede auf noch ändert sich bis 2021–2050 das Niveau stark. Lediglich bei Dampfdruck (Abb. 5.5) und Sonnenscheindauer (Abb. 5.6) sind leichte systematische Änderungen zu höheren Werten erkennbar.

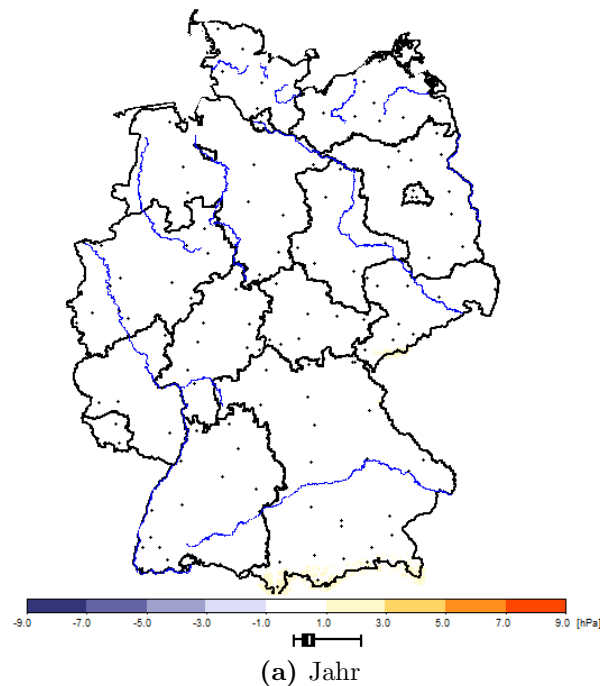


Abbildung 5.3: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Luftdruck. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000.

5.1 Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der nahen Zukunft (2021 bis 2050)

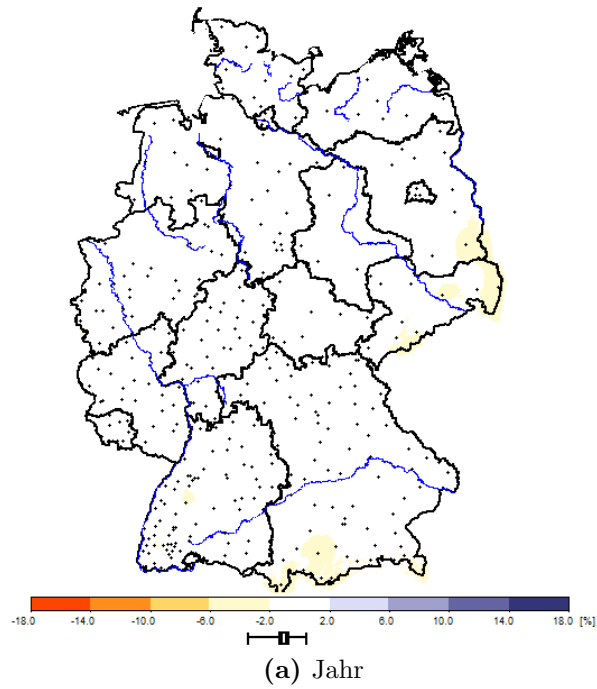


Abbildung 5.4: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: relative Feuchte. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000.

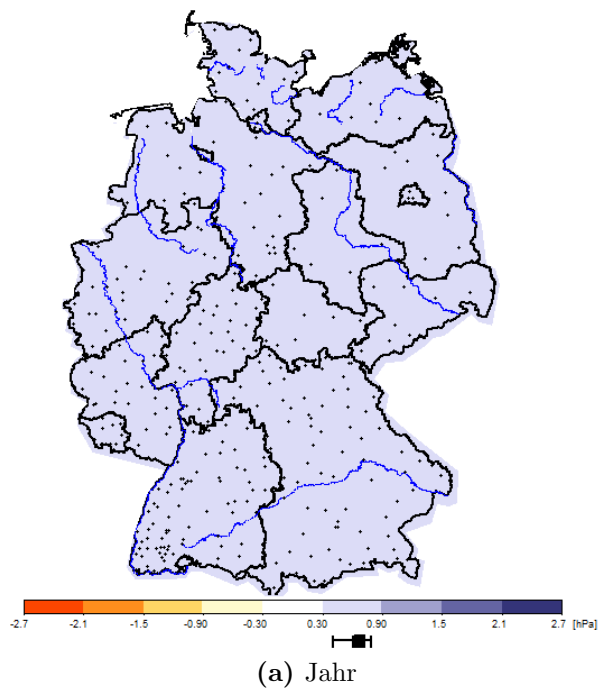


Abbildung 5.5: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Dampfdruck. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000.

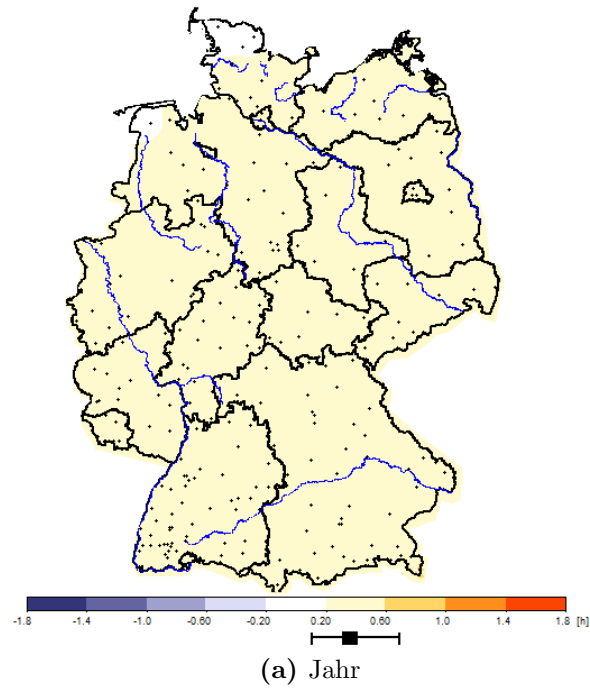


Abbildung 5.6: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Sonnenscheindauer. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000.

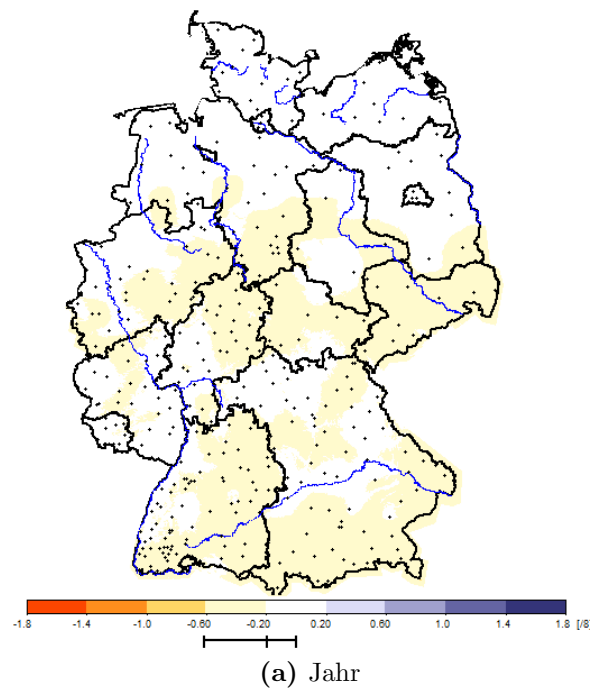


Abbildung 5.7: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Bedeckungsgrad. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000.

5.1 Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der nahen Zukunft (2021 bis 2050)

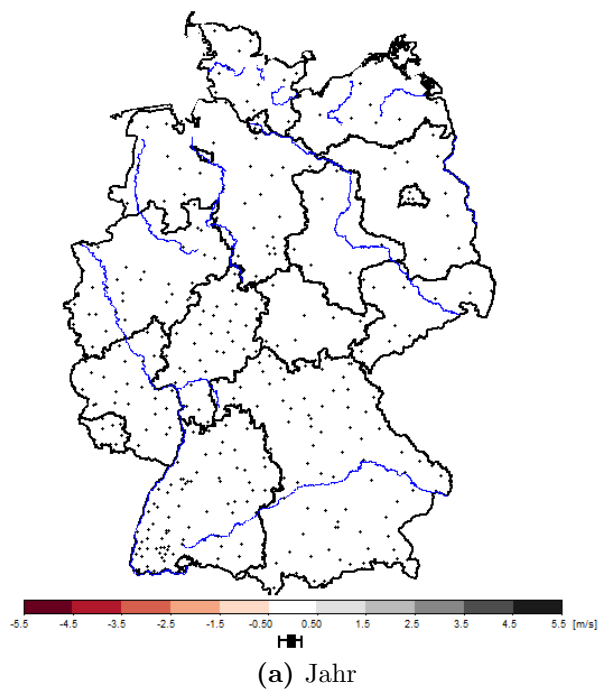


Abbildung 5.8: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Windgeschwindigkeit. Periode: 2021 bis 2050 minus 1971 bis 2000.

5.2 Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der fernen Zukunft (2071 bis 2100)

Temperatur

Die Temperatursignale zum Zeithorizont 2071 bis 2100 sind, wie Abb. 5.9 darstellt, bei einem mittleren Anstiegsniveau von rund $+3,5^{\circ}\text{C}$. Die jahreszeitliche Differenzierung ist stark, denn im Frühjahr und Herbst wird ein Temperaturanstieg zwischen $2,5$ und $3,0^{\circ}\text{C}$ simuliert, während es im Sommer und Winter rund $4,0$ bis $4,5^{\circ}\text{C}$ sind. Dabei besteht im Jahressignal [Abb. 5.9 (e)] die auffällige Neigung zu relativ geringen Anstiegsraten an der Küste und einer stärkeren Temperaturzunahme im Westen und Süden Deutschlands.

In der Zusammenschau sind die räumlichen Muster bezüglich des geringer ausgeprägten Signals im Küstenbereich jahreszeitlich konsistent. Frühjahr und insbesondere Herbst sind durch relativ hohe Signalniveaus im Westen und Süden Deutschlands charakterisiert, während im Winter das deutlichste Temperaturanstiegssignal im Osten zu verzeichnen ist.

Im Vergleich zum Zeithorizont 2021 bis 2050 fällt zudem auf, dass die räumliche Differenzierung der Temperatursignalstärke größer wird, was sich in der Breite der Box-Whisker-Diagramme widerspiegelt.

Niederschlag

Insgesamt sind die Niederschlagssignale auch für den langen Zeithorizont als schwach zu bezeichnen. Für den Jahresniederschlag ist das Änderungsniveau ganz überwiegend im Bereich von $\pm 10\%$. Die Jahreszeiten weisen einige, wenn auch schwach ausgeprägte Besonderheiten auf:

- Das Bild ist in jeder Jahreszeit uneinheitlich, d.h. es treten regional sowohl Zunahmen als auch Abnahmen auf.
- Im Sommer herrscht eine Neigung zu Niederschlagsrückgang vor, insbesondere in den Küstenbereichen, wiewohl auch in dieser Jahreszeit in einigen Regionen eine schwache Zunahme simuliert wird.
- Im Winter treten die Mittelgebirgsregionen von Rheinland-Pfalz, Hessen, Thüringen und Nordbayern sowie der Norden mit Niederschlagszunahmen bis 40% hervor, während es im Voralpenland und der Erzgebirgsregion in den Simulationen einen leichten Rückgang gibt.
- Die Übergangsjahreszeiten besitzen nur geringe Niederschlagssignale – konsistente Zu- oder Abnahmen sind nur in wenigen Regionen erkennbar.

5.2 Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der fernen Zukunft (2071 bis 2100)

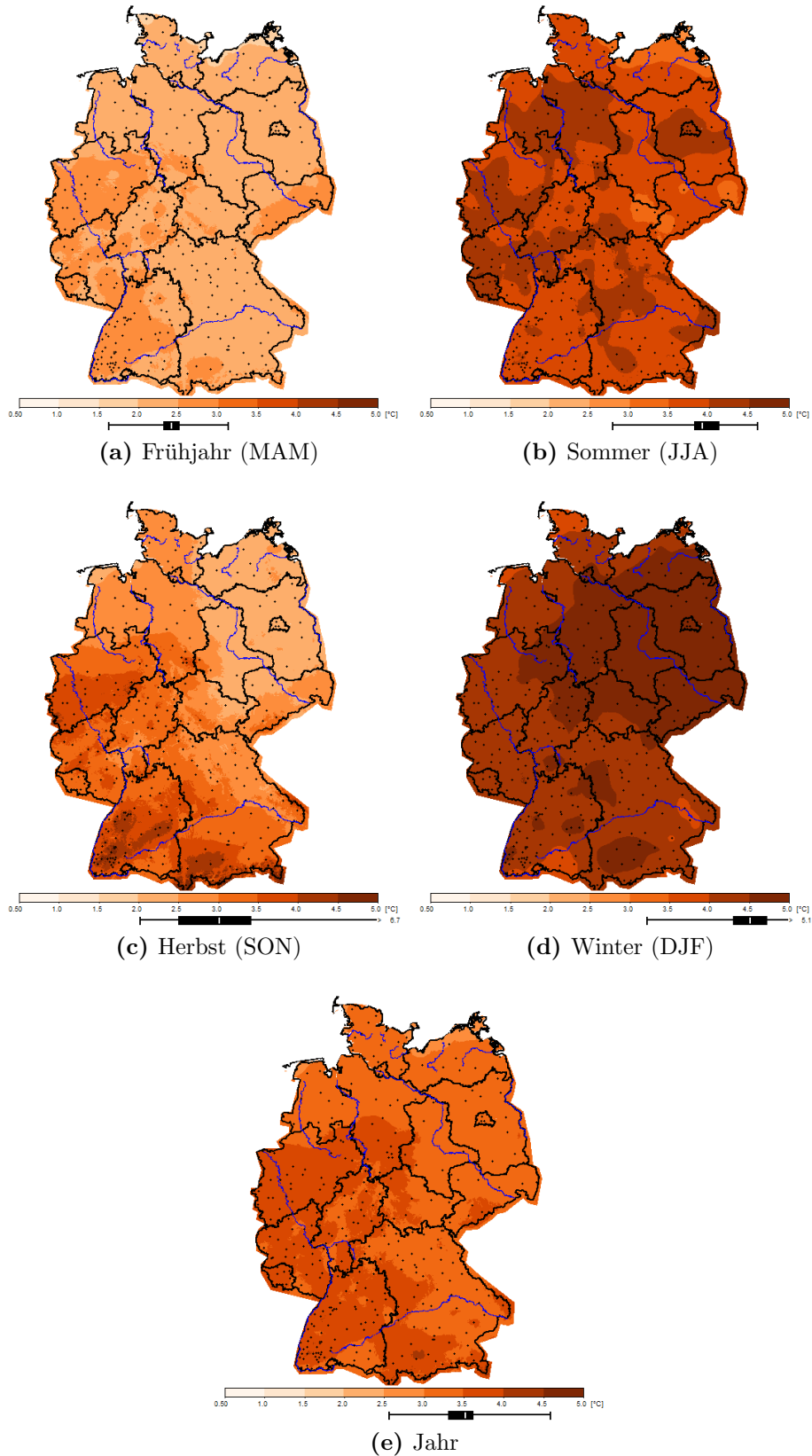


Abbildung 5.9: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Tagesmitteltemperatur. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000.

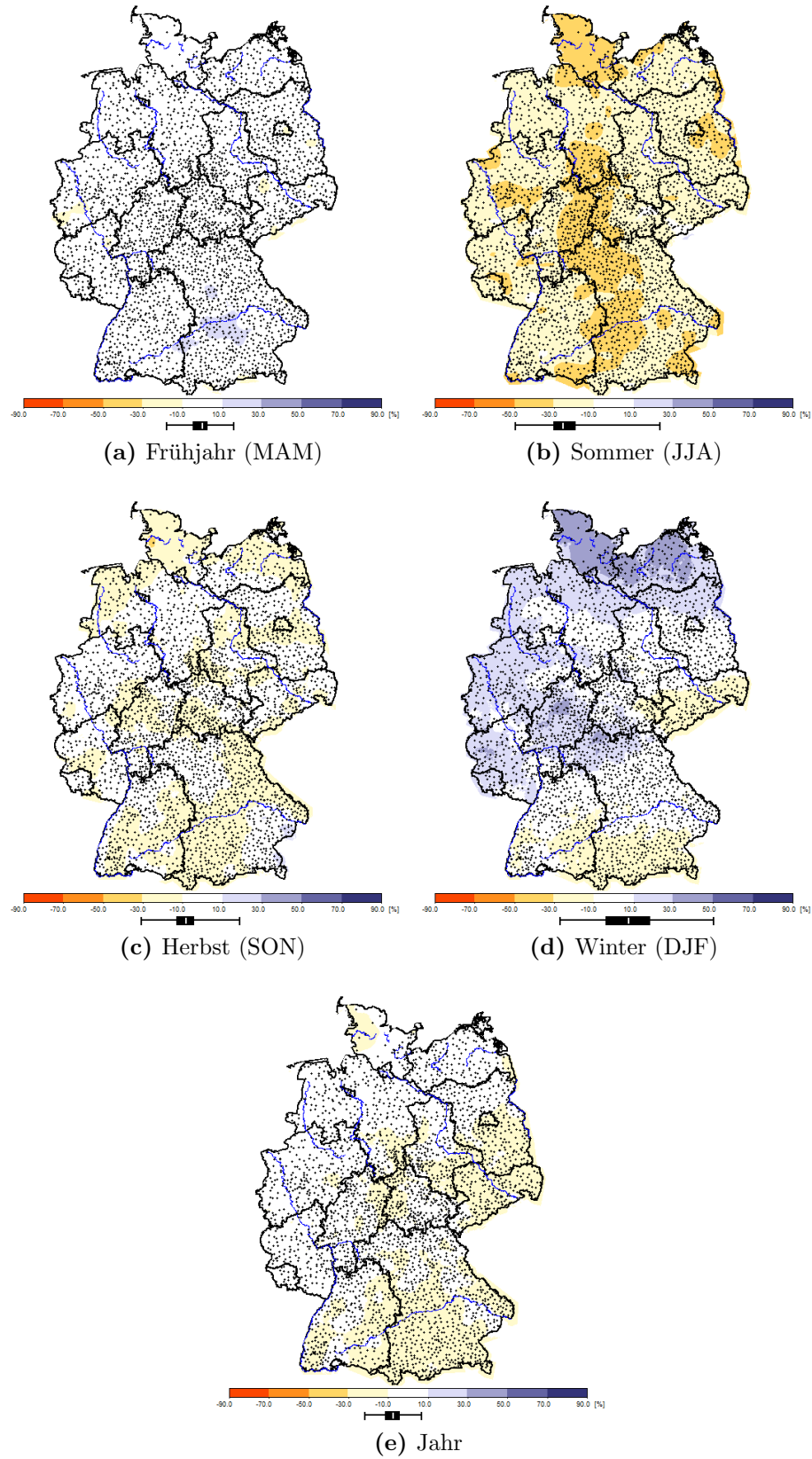


Abbildung 5.10: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Niederschlagssumme. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000.

5.2 Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der fernen Zukunft (2071 bis 2100)

Luftdruck und andere Klimaelemente

Den Änderungssignale der Klimaelemente Luftdruck, relative Feuchte, Dampfdruck, Sonnenscheindauer und Bewölkung (Abb. 5.11–5.16) ist gemeinsam, dass Tendenzen, die zum Zeithorizont 2021 bis 2050 erkennbar wurden, sich zum Zeithorizont 2071 bis 2100 fortsetzen und verstärken. Bei Luftdruck, relativer Feuchte und Bewölkung bleiben die Entwicklungen jedoch schwach – systematische erkennbare Zunahmen erfolgen bei Dampfdruck und Sonnenscheindauer. Bei der Windgeschwindigkeit sind keine Tendenzen erkennbar.

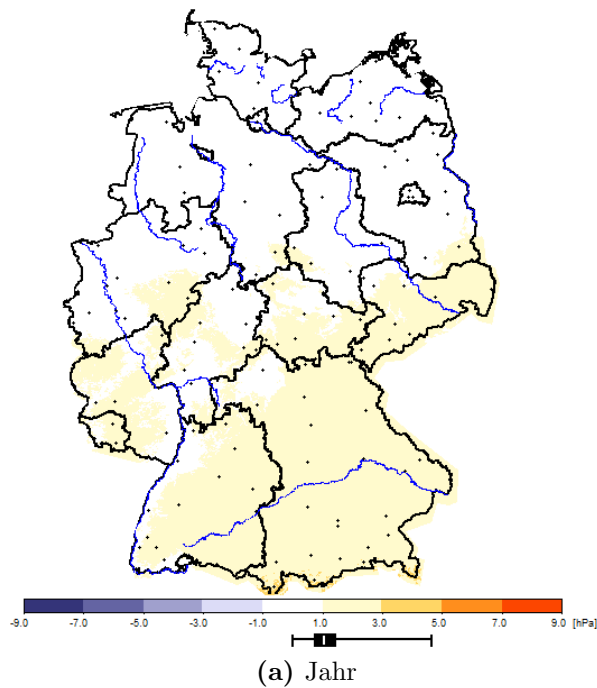


Abbildung 5.11: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Luftdruck. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000.

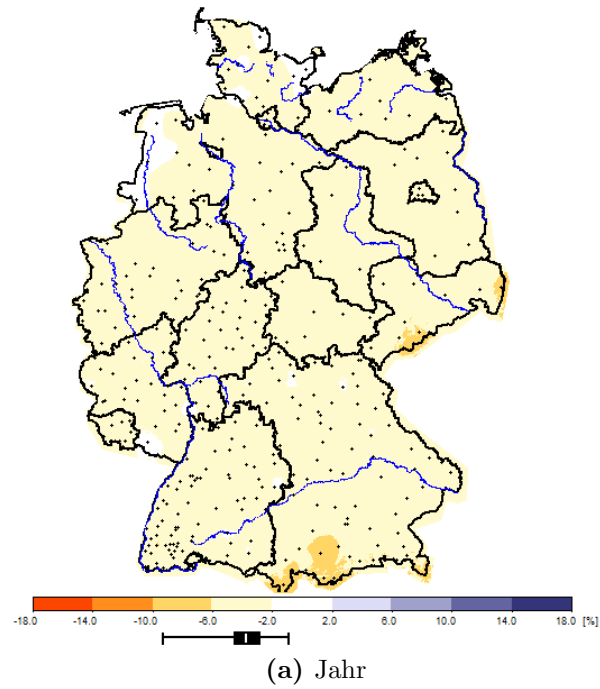


Abbildung 5.12: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: relative Feuchte. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000.

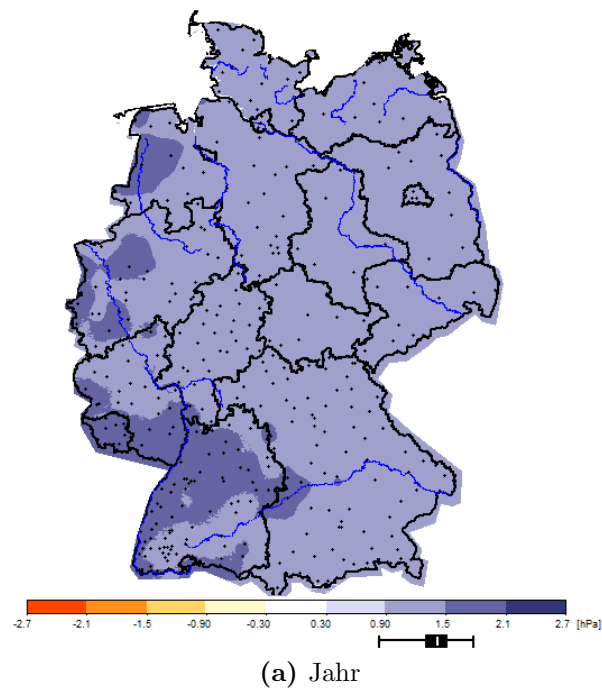


Abbildung 5.13: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Dampfdruck. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000.

5.2 Vergleich der Ist-Zeitraum Simulationen mit der fernen Zukunft (2071 bis 2100)

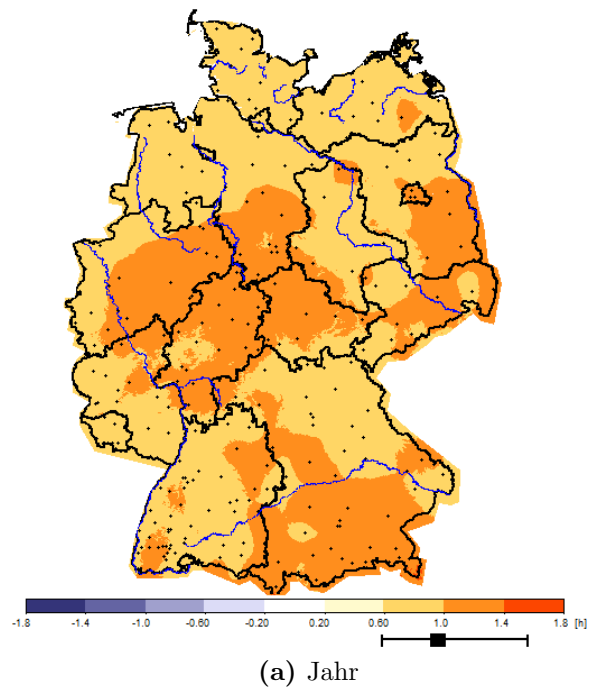


Abbildung 5.14: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Sonnenscheindauer. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000.

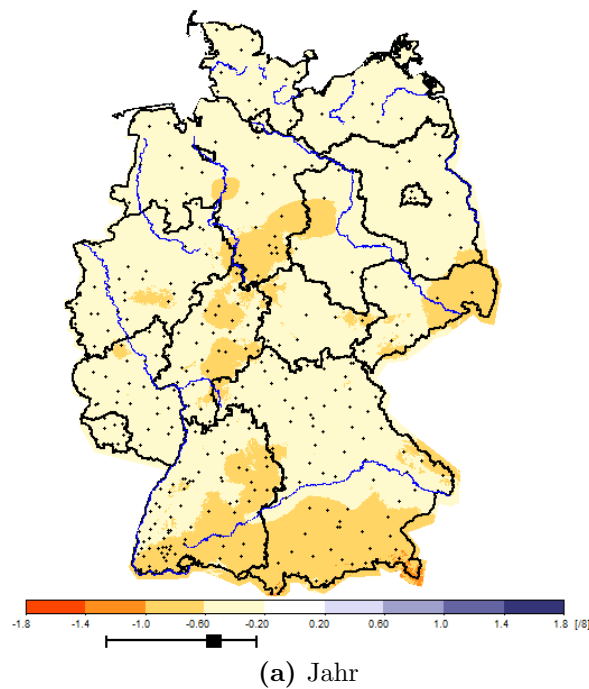


Abbildung 5.15: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Bedeckungsgrad. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000.

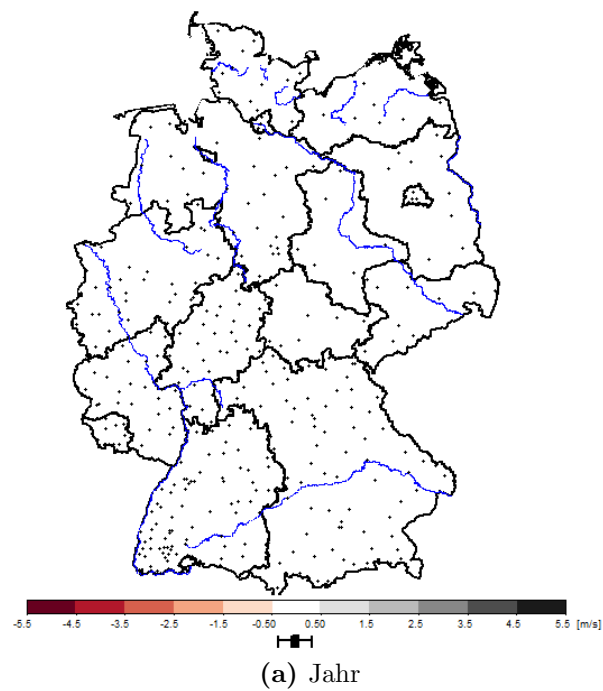


Abbildung 5.16: Vergleich der Simulation (über die zehn Simulationen gemittelt) mit den Kontrolllaufdaten. Element: Windgeschwindigkeit. Periode: 2071 bis 2100 minus 1971 bis 2000.

Abschnitt 6

Diskussion

6.1 Statistische und dynamische Aspekte in WETTREG

Statistische Regionalisierungen stellen einen alternativen Entwurf zur dynamischen Betrachtung dar. Die WETTREG-Methodik nutzt Aspekte aus beiden Herangehensweisen, denn sie verfügt über statistische und dynamische Komponenten.

- Statistisch
 1. Verwendung eines Algorithmus zur Klassifikation von ähnlichen Tagen.
 2. Nutzung eines stochastischen Wettergenerators zur Konstruktion synthetischer Zeitreihen.
 3. Ableitung von Maßen wie z.B. Dekadenmitteln, Häufigkeitsverteilungen oder Periodenlängen zu Analyse und Vergleich von Resultaten.

- Dynamisch
 1. Verwendung von Simulationen großräumiger Zirkulationsmodelle und deren Fähigkeit, konsistent atmosphärische Muster zu reproduzieren.
 2. Antrieb des Wettergenerator mit synoptisch-physikalisch relevanten Randbedingungen.
 3. Aufprägen einer zusätzlichen physikalischen Signatur, die vom großräumigen Zirkulationsmodell in den Szenariorechnungen simuliert wurde.

Die mit der WETTREG2006 erfolgte Regionalisierung für ganz Deutschland ([Kreienkamp u. a. 2006b], s.a. [Spekat u. a. 2007a]) verfügte bereits über die oben genannten Aspekte. Jedoch bestand bei den Resultaten die Auffälligkeit, dass ab der Mitte des 21. Jahrhunderts das großräumige Temperatursignal des antreibenden Modells ECHAM 5 insbesondere im Sommer deutlich stärker war,

als das mit WETTREG regionalisierte – wenn es eine stringente Kopplung zwischen großräumigem Signal und aufgesetzter statistischer Methodik geben sollte, so müsste zumindest eine Approximation erreicht werden.

6.2 Definition von Transwetterlagen

Die Einführung von Transwetterlagen stellt einen wesentlichen Fortschritt und einen Paradigmen-Wandel dar. Bisher wurde die Identifikation von atmosphärischen Mustern an den *gegenwärtigen* physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre vollzogen. Der Erkenntnis folgend, dass es emergente Strukturen gibt, die in Zukunft an Bedeutung gewinnen, verfügt die statistische Regionalisierung WETTREG nunmehr über einen weiteren dynamisch-physikalischen Aspekt. Wie in [Kreienkamp u. a. 2010] dokumentiert, sind diese Transwetterlagen in der Gegenwart zu selten, als dass sie bei einem Strukturbildungsalgorithmus als eigenständig identifiziert werden können. Jedoch gewinnen sie ab etwa der Hälfte des 21. Jahrhunderts an Bedeutung und leisten einen wichtigen Beitrag zu den Klimasignalen.

Ein weiterer Grund für die Einführung von Transwetterlagen ist die von den atmosphärischen Strukturklassen gebildete angestrebte *optimale Komplexität* der Beschreibung durch das statistische Modell. Es gilt, eine Balance zwischen einer zu groben und einer unnötig nuancierten Differenzierung zu finden. Aus Vorstudien [Enke und Spekat 1997] wurde eine Größenordnung von ≈ 10 ermittelt. Da die globalen Klimamodelle in der Lage sind, physikalische Änderungen eines zukünftigen Klimas in Änderungen der Häufigkeit von atmosphärischen Mustern zu übersetzen, tritt in der Zukunft folgender Effekt auf: Es gibt einen „Schwund“ bei den mit niedriger Temperatur assoziierten Mustern und eine Zunahme bei den Mustern, die mit hoher Temperatur assoziiert sind. Dies führt dazu, dass etliche der „kalten“ Muster in der Zukunft völlig verschwinden. Somit ist die Einführung zusätzlicher Muster allein schon um die optimale Komplexität weiter wahren zu können, notwendig.

Anmerkung: *Die Einführung der Transwetterlagen wirkt sich insbesondere in der Jahreszeit Sommer aus. Hier ist eine wesentliche Grundlage für die geänderten Signale gegenüber der UBA-Studie [Spekat u. a. 2007a] zu finden.*

6.3 Verwendung von Anomalien

Gegenüber WETTREG2006 erfolgte in dieser Studie eine weitere wesentliche Veränderung: Der Übergang zur Verwendung von Anomalien für die Definition der Muster sowie den stochastischen Wettergenerator. Wie in [Kreienkamp u. a. 2010] beschrieben, waren atmosphärische Muster bisher so definiert, dass sie, jahreszeitenspezifisch, bestimmte Intervalle der Temperatur oder des Niederschlags wiedergaben. Beispiel: Muster #3 fasst Atmosphärenzustände zusammen, die im Sommer mit einem Regionaltemperaturmittel zwischen 11,1 und 13,0°C und im

6.4 Ausdehnung des Zeitrahmens bei den Klimadaten

Winter mit einem Regionaltemperaturmittel zwischen $-11,0$ und $-8,1^{\circ}\text{C}$ assoziiert sind. Mit dem Übergang zu Anomalien fasst Muster #3 in der WETTREG-Version von 2010 Atmosphärenzustände zusammen, die mit einer Abweichung vom mittleren regionalen Jahresgang zwischen $-4,4$ und $-3,0^{\circ}\text{C}$ assoziiert sind, *und zwar für jede Jahreszeit einheitlich (!)*.

Die Zahl der Klassen, die mit Hilfe des Anomalie-Ansatzes gebildet werden ist ebenfalls 10 – sowie die hinzugefügten zwei Anomalieklassen, die zur Bildung der Transwetterlagen benötigt werden. Ihre Häufigkeitsverteilung ist derjenigen in WETTREG2006 ähnlich. Beim Temperaturregime treten die Verschiebungen zu den „warmen“ Klassen (in WETTREG 2010 die Klassen mit besonders starker positiver Temperaturabweichung vom Jahresgang) mit zunehmender Zeit verstärkt auf, während die „kalten“ Klassen (in WETTREG 2010 die Klassen mit besonders starker negativer Abweichung vom Jahresgang) seltener werden.

Anmerkung: *Die Verwendung von Anomalien hat vielfältige Auswirkungen. Dazu zwei Beispiele.*

Beispiel 1: *In beiden Übergangsjahreszeiten erlaubt die Nutzung der Anomalie-bezogenen Witterungsabschnitte in stärkerem Maße, die Witterungsabschnitte innerhalb der Jahreszeit zu verschieben. Somit ist eine Erhöhung der Anpassungsgüte beim Wettergenerator möglich.*

Beispiel 2: *Der für UBA-Studie [Spekat u. a. 2007a] genutzte Ansatz unterteilte die Wetterlagenklassen nach dem mittleren Temperaturniveau. Zum Beispiel fielen dabei die Tage mit einem regionalen Temperaturmittel von 22 bis 24°C in eine Klasse. Für den reinen Temperaturbezug ist dieses ausreichend. Die Feuchteverhältnisse sind aber, je nach Position im Jahr, unterschiedlich. Im Frühsommer sind Temperaturmittelwerte von 23°C überdurchschnittlich hoch und wahrscheinlich mit einer trockenen Hochdruckwetterlage verbunden. Im Hochsommer hingegen ist ein Wert von 23°C eher unterdurchschnittlich und wahrscheinlich mit starker Bewölkung und möglicherweise auch dem Auftreten von Niederschlag assoziiert. Tage, die mit den Anomalie-Ansatz einer Klasse mit starker positiver (negativer) Anomalie zugeordnet wurden, sind daher sehr wahrscheinlich trockener (feuchter) als andere Tage. Dieser Effekt ist ein Grund für die erhöhte Sommertrockenheit im hier vorgestellten Datensatz.*

6.4 Ausdehnung des Zeitrahmens bei den Klimadaten

Eine weitere Veränderung gegenüber WETTREG2006 besitzt Relevanz für den stochastischen Wettergenerator: Der Zeitrahmen für die Klimareihen wurde erweitert. In der Studie von 2006 wurden dem Wettergenerator Episoden bis 2000 zur Verfügung gestellt. Für WETTREG2010 wurde der Zeitraum bis Ende 2007 ausgedehnt. Folge ist, dass die Segmente, aus denen der Wettergenerator die simulierten Zeitreihen synthetisiert, auch mehr extreme Ereignisse der jüngsten

Vergangenheit beinhalten. Das hat Auswirkungen auf die Zeitreihen, denn wenn durch die Randbedingungen, nach denen der Wettergenerator die Reihensynthese durchführt, bestimmte Extreme häufiger gefordert werden, so steht ihm eine größere Zahl und Diversität von „Kandidatensegmenten“ zur Verfügung.

Anmerkung: *Die Ausdehnung des Zeitrahmens bei den Klimadaten hat noch einen weiteren Einfluss. Im Zeitraum 1971–2007 hat sich die Relation zwischen der Zuordnung eines Tages zu einer Temperaturklasse und einer Feuchtekategorie geändert. Im späteren Zeitraum (nach 2000) sind für viele Temperaturklassen sinkende mittlere Niederschläge zu verzeichnen. Somit entfällt die in WETTREG2006 für die Gegenwart ermittelte starke Korrelation zwischen ansteigenden Temperaturwerten und steigenden Niederschlägen.*

6.5 Übergang von Zeitscheiben zu transienter Herangehensweise

Die Simulationen erfolgten bei WETTREG2006 in so genannten Zeitscheiben. Die steuernde Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Muster, die eine bedeutsame Größe für den Wettergenerator ist, wurde dazu für eine Dekade konstant gehalten und es entstand ein Sprung beim Übergang zur nächsten Dekade. WETTREG2010 verfügt über einen transienten Ansatz, bei dem sich die Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Muster mit der Zeit gleitend ändert. In [Spekat u. a. 2006] und [Spekat u. a. 2007b] ist die transiente Vorgehensweise beschrieben.

6.6 Resultierende Temperatur- und Niederschlagssignale

Als Folge der Veränderungen sind die Temperatursignale in WETTREG2010 stärker als in WETTREG2006. Abb. 6.1 gibt wieder, wie sich das Erwärmungssignal für Deutschland zum Ende des 21. Jahrhunderts für verschiedene Regionalisierungen darstellt. Dort kommt eine in Abschnitt 6.1 angesprochene Beobachtung zum Ausdruck: Zum Ende des 21. Jahrhunderts errechnete WETTREG2006 eine Temperaturentwicklung, die unter der des antreibenden globalen Modells ECHAM 5 lag. Wie in Abb. 6.1 zum Ausdruck kommt, liegen die dynamischen Regionalisierungen CLM und REMO für diesen Zeitraum in einem höheren Wertebereich, der der „Vorgabe“ von ECHAM 5 nahe kommt. Abb. 6.2 zeigt die von den verschiedenen Modellen simulierte Niederschlagsentwicklung zum Ende des 21. Jahrhunderts. Hier ist auffällig, dass die Simulationen in etwa über einen ähnlichen Wertebereich verfügen.

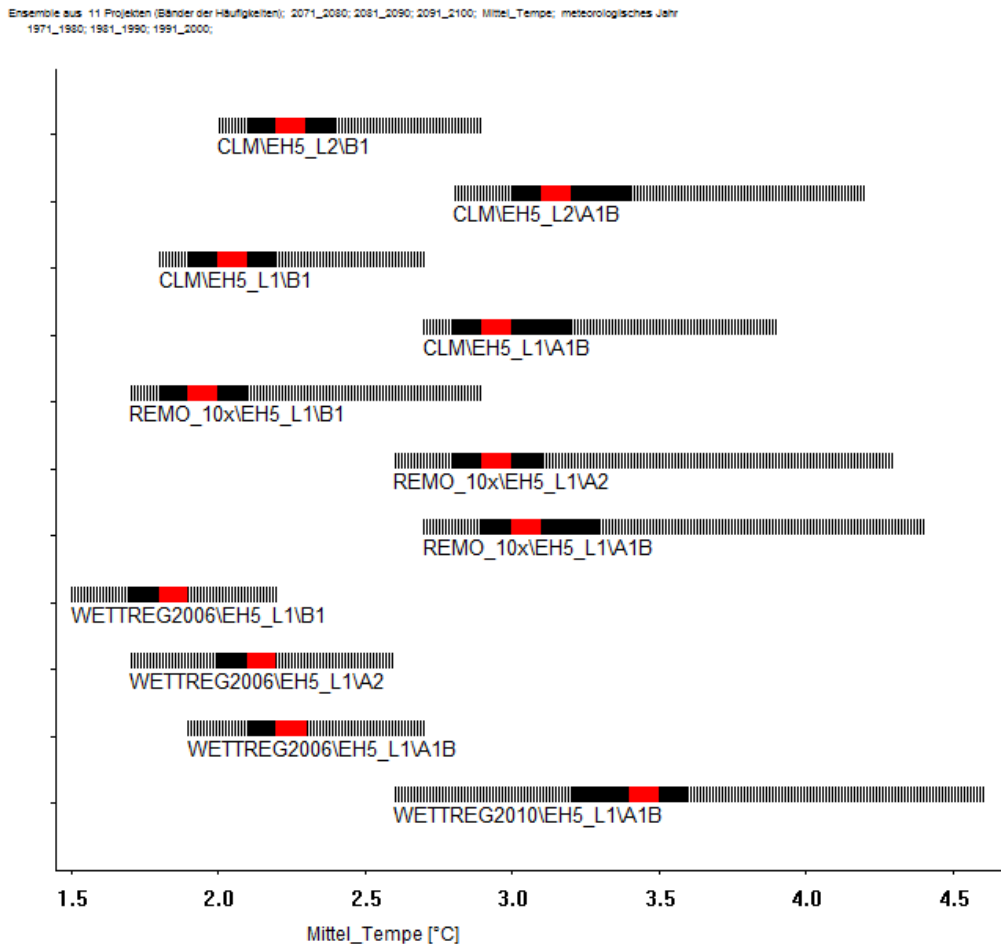


Abbildung 6.1: Gegenüberstellung der Jahres-Temperatursignale im Vergleich der Perioden 2071–2100 (Antrieb: ECHAM 5-Szenariorechnungen) und 1971–2000 (Antrieb: ECHAM 5-20C-Rechnungen) für 11 verschiedene Regionalisierungen. Die Breite jedes Bandes gibt die Werteverteilung innerhalb Deutschlands wieder. Die dargestellten Regionalisierungen sind: CLM/EH5_L2/B1 - CLM, angetrieben vom B1-Szenariolauf 2 des ECHAM 5-Modells; CLM/EH5_L2/A1B - CLM, angetrieben vom A1B-Szenariolauf 2 des ECHAM 5-Modells; CLM/EH5_L1/B1 - CLM, angetrieben vom B1-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells; CLM/EH5_L1/A1B - CLM, angetrieben vom A1B-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells; REMO10x/ECHAM5/B1 - REMO 10km Auflösung mit verdriftetem Niederschlag, angetrieben vom B1-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells; REMO10x/ECHAM5/A2 - REMO 10km Auflösung mit verdriftetem Niederschlag, angetrieben vom A2-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells; REMO10x/ECHAM5/A1B - REMO 10km Auflösung mit verdriftetem Niederschlag, angetrieben vom A1B-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells; WETTREG/ECHAM5/B1 - WETTREG2006, angetrieben vom B1-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells; WETTREG/ECHAM5/A2 - WETTREG2006, angetrieben vom A2-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells; WETTREG/ECHAM5/A1B - WETTREG2006, angetrieben vom A1B-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells; WETTREG2010/EH5_L1/A1B - WETTREG, Version 2010, angetrieben vom A1B-Szenariolauf 1 des ECHAM 5-Modells.

6.6 Resultierende Temperatur- und Niederschlagssignale

Ensemble aus 11 Projekten (Bänder der Häufigkeiten): 2071_2080; 2081_2090; 2091_2100; Niederschlag; meteorologisches Jahr
1971_1980; 1981_1990; 1991_2000;

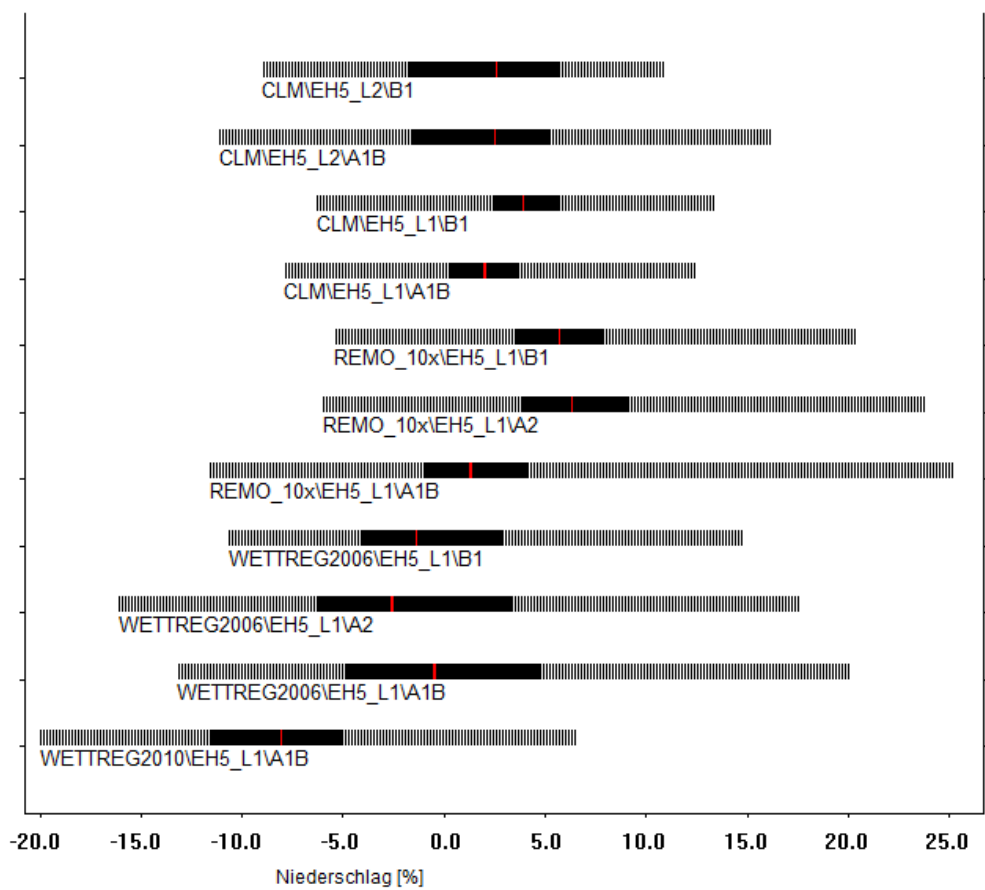


Abbildung 6.2: Wie Abb. 6.1, jedoch für die Niederschlagssignale.

Abschnitt 7

Zusammenfassung und Ausblick

Für Planungen, basierend auf regionalen/thematischen Untersuchungen der Folgen des Klimawandels sind hoch aufgelöste Basisdaten notwendig, die sowohl bezüglich der verwendeten Erkenntnisse aus den Globalmodellen als auch bezüglich der eingesetzten Regionalisierungsmethode *state-of-the-art* sind.

Im Zuge des IPCC-Prozesses werden die Klimamodelle stetig weiter verbessert und beinhalten ein zunehmendes Maß an Prozessen und Wechselwirkungen. Ein zusätzliches Verbesserungspotenzial für klimarelevante Planungen findet sich in einer Aktualisierung der verbreitet genutzten WETTREG-Methodik, die an die globalen Modelle gekoppelt ist – es wird die Fähigkeit der globalen Modelle, den Klimawandel in Form von Änderungen von atmosphärischen Mustern zu reproduzieren genutzt. Eine zielführende Aktualisierung von WETTREG war der Inhalt der von den Ländern getragenen vorbereitenden Studie [Kreienkamp u. a. 2010]. Ohne diese wäre die hiermit vorgelegte Aktualisierung der UBA-WETTREG-Studie [Spekat u. a. 2007a] für ganz Deutschland nicht möglich.

Eine wichtige Erweiterung von WETTREG besteht in der Einführung eines Algorithmus' zur Identifikation von zukünftig auftretenden, neuen Atmosphärenmustern, so genannten Transwetterlagen. Damit wurde systematisch der Ansatz einer Mehrländerstudie [Kreienkamp u. a. 2006a] weiter geführt. Gegenüber der seit 2006 verfügbaren [Kreienkamp u. a. 2006b] und 2007 publizierten UBA-WETTREG-Studie [Spekat u. a. 2007a] werden unter Anderem Veränderungen in folgenden Bereichen sichtbar:

- Verstärkte Anknüpfung der WETTREG-Resultate an das antreibende Modell (ECHAM 5);
- stärkere Temperatursignale;
- stärkere Extreme, insbesondere bei der Temperatur¹⁾.

¹⁾Beispielsweise liegen die WETTREG2010-Simulationen der Maximumtemperatur im Zeitbereich 2071–2100 um rund 1,5–2°C über denen mit WETTREG2006. Außerdem treten für nahezu die gesamte Fläche Deutschlands in WETTREG2010 für diesen Zeithorizont gegenüber WETTREG2006 1–3 Tage mehr auf, an denen ein Tagesmaximum von 35°C übertroffen wird – im Rhein-Main-Gebiet sind es sogar 5–9 Tage mehr.

Es ist zu beachten, dass die verbesserte Anknüpfung an das antreibende Modell unter Umständen Eigenheiten dieses Modells aufnimmt. Auch ist die Fähigkeit von WETTREG, Zeitreihen eines geänderten Klimas zu simulieren, in denen sich die geänderten Häufigkeiten aller Wetterlagen wiederfinden, nicht in allen Jahreszeiten in vollem Umfang gegeben. Die WETTREG2010-Daten sind aber in jedem Fall für neue Impaktstudien und Vergleiche mit den Ergebnissen auf der Basis der Daten von 2006 geeignet.

Die vorgestellte Studie stellt eine erste Anwendung der erweiterten WETTREG2010-Methode dar. Sie wurde mit Daten des ECHAM 5 Szenarios A1B, Lauf 1 angetrieben. Um die Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen zu erhöhen, sollten auch andere Szenarios als Antrieb verwendet werden – nicht nur von ECHAM 5 sondern auch von anderen globalen und regionalen Klimamodellen.

Literaturverzeichnis

- [Christensen 2005] CHRISTENSEN, J. H.: Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects (PRUDENCE). Final Report / DMI. Kopenhagen. 2005 (EVK2-CT2001-00132). – 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
- [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 patten based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. In: *Meteorol. Z.* 14 (2005), S. 247–257. – available at <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0028>
- [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. – available at <http://www.springerlink.com/content/m737r30600222273/fulltext.pdf>
- [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

- [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
- [Hess und Brezowsky 1952] HESS, P. ; BREZOWSKY, H.: *Berichte Des Deutschen Wetterdienstes in der US Zone*. Bd. 33: *Katalog der Großwetterlagen Europas*. Deutscher Wetterdienst, 1952
- [Huth u. a. 2008] HUTH, R. ; BECK, C. ; PHILIPP, A. ; DEMUZERE, M. ; USTRNUL, Z. ; CAHYNOVÁ, M. ; KYSELÝ, J. ; TVEITO, O.E.: Classification of Atmospheric Circulation Patterns. Recent Advances and Applications. In: *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1146 (2008), S. 105–152
- [IPCC 1990] IPCC ; HOUGHTON, J.T. (Hrsg.) ; JENKINS, G.J. (Hrsg.) ; EPHRAUMS, J.J. (Hrsg.): *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Melbourne : Cambridge University Press, 1990
- [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.) ; VAN DER LINDEN, P.J. (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
- [IPCC 2007] IPCC ; SOLOMON, S. (Hrsg.) ; QIN, D. (Hrsg.) ; MANNING, M. (Hrsg.) ; CHEN, Z. (Hrsg.) ; MAQUIS, M. (Hrsg.) ; AVERYT, K.B. (Hrsg.)

LITERATURVERZEICHNIS

- ; TIGNOR, M. (Hrsg.) ; MILLER, H.L. (Hrsg.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA : Cambridge University Press, 2007 (ISBN: 978 0521 70596-7)
- [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 u. a. 2006a] 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
- [Kreienkamp u. a. 2006b] KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A. ; ENKE, W.: WETTREG-UBA, <http://cerawww.dkrz.de/WDCC/ui/BrowserExperiments.jsp?proj=WETTREG-UBA> / Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH. 2006. – Forschungsbericht
- [Kreienkamp u. a. 2009] KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A. ; ENKE, W.: Sensitivity studies with a statistical downscaling method – the role of the driving large scale model. In: *Meteorol. Z.* 18 (2009), S. 597–606. – available at <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2009/0410>
- [Kreienkamp u. a. 2010] KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A. ; ENKE, W.: Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. / Land

Baden-Württemberg, vertreten durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Freistaat Bayern, vertreten durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU-BY), Dienstort München, Freie und Hansestadt Hamburg, vertreten durch die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Amt für Natur- und Ressourcenschutz, Energieabteilung, Land Hessen, vertreten durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Land Mecklenburg-Vorpommern, vertreten durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus, Land Niedersachsen, vertreten durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Land Nordrhein-Westfalen, vertreten durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), Land Rheinland-Pfalz, vertreten durch die Landforsten Rheinland-Pfalz, Zentralstelle für Forstverwaltung, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Land Saarland, vertreten durch das Ministerium für Umwelt, Abteilung D (Natur und Mensch), Freistaat Sachsen, vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Land Sachsen-Anhalt, vertreten durch das Landesamt für Umweltschutz, Fachbereich 3: Immissionsschutz/Klimaschutz, Land Schleswig-Holstein, vertreten durch das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MLUR), Freistaat Thüringen, endvertreten durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. 2010. – Forschungsbericht

[Lucarini u. a. 2007] 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.* 28 (2007), S. 829–848

[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. ; ROEHRL, A. ; ROGNER, H.-H. ; SANDOVSKI, A. ; SCHLESINGER, M. ; SHUKLA, P. ; SMITH, S. ; SWART, R. ; VAN ROOIJEN, S. ; VICTOR, N. ; DADI, Z.: *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge, U.K. und New York, USA : Cambridge University Press, 2000

[Philipp u. a. 2010] PHILIPP, A. ; BARTHOLY, J. ; BECK, C. ; ERPICUM, M. ; ESTEBAN, P. ; FETTWEIS, X. ; HUTH, R. ; JAMES, P. ; JOURDAIN, S. ; KREIENKAMP, F. ; KRENNERT, Th. ; LYKOUDIS, S. ; MICHAELIDIS, S. ; PIANKO-KLUCZYNSKA, K. ; POST, P. ; ALVARAZ, D. R. ; SCHIEMANN, R. ; SPEKAT, A. ; TYMVIOS, F.: Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 35 (2010), S. 360–373. – DOI: 10.1016/j.pce.2009.12.010. Available at <http://dx.doi.com/10.1016/j.pce.2009.12.010>

LITERATURVERZEICHNIS

- [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
- [Spekat u. a. 2006] 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. 2007a] SPEKAT, A. ; ENKE, W. ; KREIENKAMP, F.: 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. / Umweltbundsamt. 2007 (Förderkennzeichen 204 41 138). – Forschungsbericht. Available at www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf
- [Spekat u. a. 2007b] SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F. ; ENKE, W.: Erstellung von transienten Szenarios für Hessen. Endbericht. / Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden. Werkvertrag 4500272588. 2007. – Forschungsbericht

- [Spekat u. a. 2008] SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F. ; ENKE, W.: Probabilistische Abschätzung regionaler Klimaänderungen der kommenden Dekaden und ihre Unsicherheiten (PARK): Anwendung von Methoden zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen der kommenden Dekaden, Szenarienrechnungen mit WETTREG. Dritter Zwischenbericht. / Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Umweltministerium (UM), dieses vertreten durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. 2008. – Forschungsbericht
- [Spekat u. a. 2010] SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F. ; ENKE, W.: An impact-oriented classification method for atmospheric patterns. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 35 (2010), S. 352–359. – DOI: 10.1016/j.pce.2010.03.042 available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.042>
- [Taubenheim 1969] TAUBENHEIM, J.: *Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten*. Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., 1969
- [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. ; VAN DE BERG, L. ; 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
- [van der Linden und Mitchell 2009] VAN DER LINDEN, P. (Hrsg.) ; MITCHELL, J.F.B. (Hrsg.): *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 2009
- [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. 3145–3166
- [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
- [Yarnal 1993] YARNAL, B.: *Synoptic Climatology in Environmental Analysis*. Belhaven Press, 1993

Teil I
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.

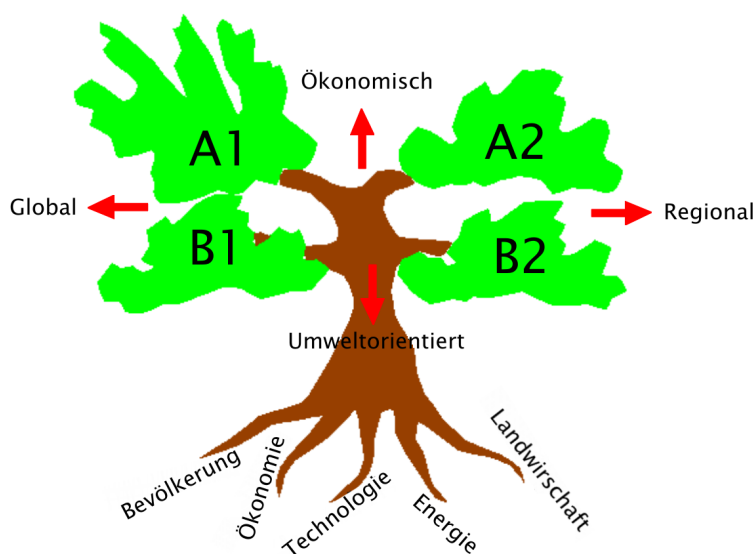


Abbildung A.1: Grundstruktur der IPCC-SRES Emissionsszenarios.

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	Globalsierung
A1F1						
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 **A1F1** und **A2** stattfinden, wobei bis zur Dekade 2040–2050 die Erwärmung hinter der von Szenario **A1T** zurückbleibt. Regionalisierte **A2**-Szenarios stellen also die angenommenen Auswirkungen einer, insbesondere bei einem längeren Zeithorizont, global besonders erwärmungsträchtigen Entwicklung dar.

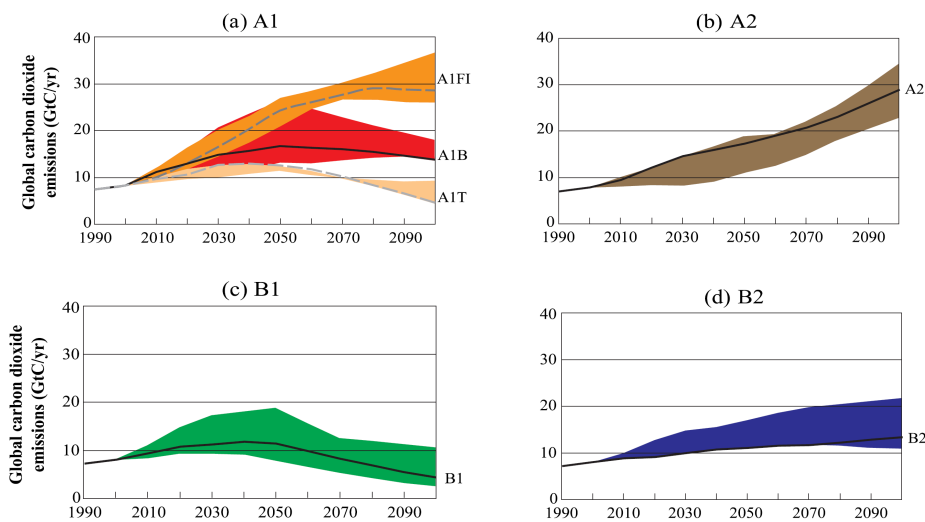


Abbildung A.3: Zeitlicher Verlauf der Emission von CO₂ in den IPCC-SRES-Emissionsszenarios.

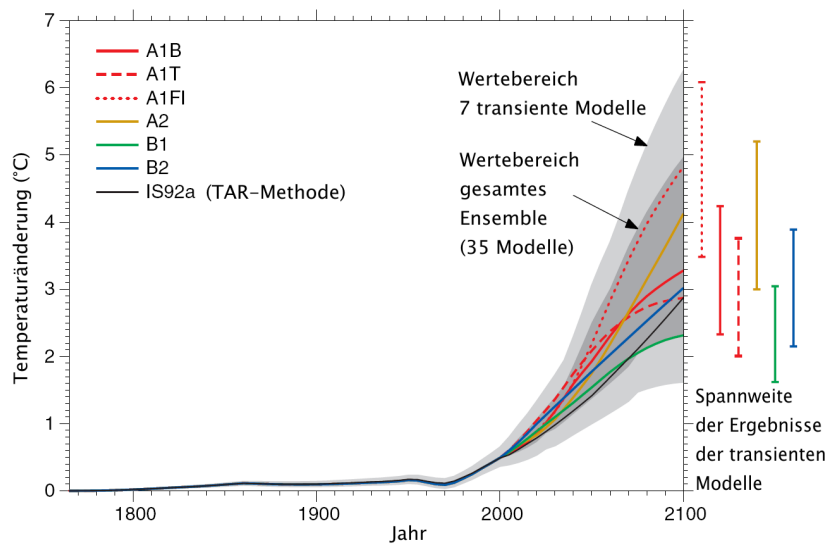


Abbildung A.4: Entwicklung der globalen Mitteltemperatur seit dem Ende des 20. Jahrhunderts und im 21. Jahrhundert in Abhängigkeit von den sechs SRES-Emissionsszenarios. Die Ergebnisse wurden sowohl mit dem vollen Ensemble von 35 globalen Modellen als auch einer Untermenge, die transiente Rechnungen 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]).