



Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen

Bericht

Frank Kreienkamp, Arne Spekat, Wolfgang Enke

Aktualisierte Fassung des Berichts vom 22. Juni 2010

Auftraggeber:

Land Baden-Württemberg, vertreten durch die **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)** – Best.-Nr. 45000 69449/23

Freistaat Bayern, vertreten durch das **Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU-BY)**, Dienstort **Hof**

Land Berlin, vertreten durch die **Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt**

Land Brandenburg, vertreten durch das **Landesumweltamt Brandenburg** (in Bearbeitung)

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)** – Bestellnummer 4500413490

Land Mecklenburg-Vorpommern, vertreten durch das **Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus** – AZ V510-461-09-937

Land Nordrhein-Westfalen, vertreten durch das **Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV)** – Vergabe-Nr. 10020 53774 - 5005965

Land Rheinland-Pfalz, vertreten durch die **Landforsten Rheinland-Pfalz, Zentralstelle für Forstverwaltung, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft** – Aktenzeichen 62-215

Land Saarland, vertreten durch das **Ministerium für Umwelt, Abteilung D (Natur und Mensch)** – AZ: D/1 - 1.652/09 Bu

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 – Vertrag-Nr. 01/31/2009

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** – Werkvertrag 09/000107

Land Niedersachsen, vertreten durch den **Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)** (unterstützend)

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

Die vorliegende Studie ist im Kontext der Entwicklung der statistischen Regionalisierungsmethode WETTREG zu sehen: Im Jahr 2006 wurde eine Deutschlandweite Studie, basierend auf der damaligen Version von WETTREG vorgestellt. In WETTREG2006 stand die Anpassung an Beobachtungen im Vordergrund. Die Beziehungen zwischen großräumigen atmosphärischen Mustern und lokalen klimatischen Konsequenzen wurden aus Reanalysen (freie Atmosphäre) und Messdaten (Erdoberfläche) für die Periode 1971–2000 ermittelt. Bei der Synthese der lokalen Zeitreihen, wie sie in einem modellierten Klima auftreten können, erfolgte unter der Maßgabe, die sich wandelnde Häufigkeit der atmosphärischen Muster zu reproduzieren. Parallel dazu wurde in einer weiteren Studie untersucht, welchen Änderungen die Eigenschaften großräumiger atmosphärischer Muster in Folge der sich ändernden klimatischen Bedingungen, wie sie in den Szenarios der großräumigen Klimamodelle simuliert werden, unterliegen. Wichtigste Erkenntnis war, dass die aus dem Klima der Gegenwart ermittelte Vielfalt der Muster nicht hinreicht, das zukünftige Klima zu beschreiben; es treten zusätzliche, extreme Muster auf. In der vorliegenden Studie WETTREG2010 erfolgte die Implementierung dieser Erkenntnisse. Ein wesentlicher Unterschied zu WETTREG2006 ist somit, dass die Spezifika des antreibenden Klimamodells (hier: ECHAM 5-OM) in WETTREG2010 stärker berücksichtigt werden. Ein Aspekt ist die Erweiterung des Vorrats an atmosphärischen Mustern um solche, die in der Gegenwart praktisch nicht auftreten, aber in den Szenarios des antreibenden Modells an Häufigkeit zunehmen, die so genannten Transwetterlagen.

Im vorliegenden Bericht wird das Konzept der Transwetterlagen vorgestellt. Um diese zusätzlichen atmosphärischen Muster in WETTREG zu berücksichtigen sind Weiterentwicklungen und Modifikationen der Methodik notwendig, die im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitet wurden. Ihre Dokumentation erfolgt ebenfalls in diesem Bericht.

Als Folge der deutlich stärkeren Anlehnung von WETTREG2010 an die Vorgaben des antreibenden Modells kann nicht ausgeschlossen werden, dass einige problematische Aspekte des antreibenden Modells übernommen werden. Führt zum Beispiel, wie in ECHAM 5-OM, eine unzureichend erfasste Boden-Pflanzen-Atmosphären-Kopplung zu überhöhten Sommertemperaturen und damit verbundenen anderen Wetterlageneigenschaften, so werden diese stärkeren Einfluss auf die Ergebnisse von WETTREG2010 haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen	1
1.2	Modellierung des Klimawandels mit hoher Auflösung	2
1.3	Problemstellung – Aktualisierungen der WETTREG-Methode	3
2	Datenmaterial	7
2.1	Reanalysen	7
2.2	Globales Klimamodell	8
2.3	Messdaten	8
3	Modell/Verfahrensbeschreibung	11
3.1	Grundlagen	11
3.2	Weiterentwicklung von WETTREG	11
3.2.1	Verwendung von Jahresgang-bereinigten Daten	12
3.2.2	Glättung an den Jahreszeitenübergängen	16
3.2.3	Modifikation der stochastischen Reihenkonstruktion	16
3.2.4	Einführung zusätzlicher Zirkulationsmuster	17
3.2.5	„Transwetter“: Transwetterlagen-Witterungsabschnitte	23
3.3	Spezifika der Reihenkonstruktion	23
4	Ergebnisse und Diskussion	33
4.1	Transwetter in der Gegenwart?	33
4.1.1	Beispiel 1: Sommer 1952	34
4.1.2	Beispiel 2: Juni 2002	37
4.1.3	Beispiel 3: August 2003	41
4.1.4	TWL im Winter	44
4.2	Temperatursignale bei der Verwendung von Transwetterlagen	46
4.3	Vergleiche mit bestehenden Datensätzen	50
5	Zusammenfassung und Ausblick	53
	Literaturverzeichnis	55

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 Forschungsaktivität 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 2001] – 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 erarbeitet¹⁾. Ein zusammenfassender ENSEMBLES-Bericht existiert seit 2009 [van der Linden und Mitchell 2009].

Der hier vorgelegte Bericht beschreibt die Weiterentwicklung der statistischen Regionalisierungsmethode WETTREG. Ziel des von den Bundesländern und Freistaaten Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Brandenburg, Hamburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen (unterstützend), Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen in Auftrag gegebenen 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) weiter geführt – es folgt der Idee, dass in Zukunft neue atmosphärische Muster entstehen könn-

¹⁾www.ensembles-eu.org

ten, 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 auf den Feldern Auflösung, physikalische Parameterisierungen und 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 darstellen²⁾. 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. Sta-

²⁾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.*

tistische Verfahren benötigen deutlich weniger Rechnerkapazität. Im vorliegenden Bericht wird zur Beschreibung des regionalen Klimawandels ebenfalls eine statistische Methode (WETTREG) eingesetzt.

1.3 Problemstellung – Aktualisierungen der 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 und ist bei der CERA-Datenbank verfügbar [Kreienkamp u. a. 2006b] – als UBA-Bericht erfolgte die Vorstellung der Methode und von Ergebnissen in [Spekat u. a. 2007a]. 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 werden soll.

Neu auftretende Muster, so genannte emergente Strukturen, sind beispielsweise ein Forschungsgegenstand der nichtlinearen Physik. Ein Beispiel zum Studium von Gesetzmäßigkeiten solcher Strukturen sind zelluläre Automaten [Wolfram 2002]. In der Klimafolgenforschung sind Ansätze wie das Syndromkonzept [WBGU 1994] (S. 154ff), [Lüdeke und Petschel-Held 1997] oder [Cassel-Gintz 2000] verbreitet, die das Erdsystem darauf hin untersuchen, welche Muster aus einem Beziehungsgeflecht gebildet werden. Der Spezialfall dabei ist, dass das System seine bisher bekannten Bereiche verlässt und neue Zustände annimmt. Studien zur Biodiversität, wie [Williams u. a. 2007] identifizieren emergente und „aussterbende“ Klimata. Auch im Zusammenhang mit den Folgen erhöhter Treibhausgaskonzentrationen [Hansen u. a. 2008] werden irreversible Klimaänderungen und Moden der Stabilisierung eines neuen Klimas diskutiert [Solomon u. a. 2009].

In diesem Bericht wird dokumentiert, welches Potenzial neu auftretende atmosphärische Muster besitzen. Es werden TWL postuliert, dem Argument folgend, dass das Klimasystem zukünftig Zustände annehmen kann, die im bisherigen noch selten oder gar nicht auftreten. Dieser Ansatz ist motiviert durch einige Beobachtungen:

- Obwohl die Häufigkeit der Zirkulationsmuster und die modellierten physikalischen Verhältnisse eines zukünftigen Klimas aus ECHAM 5 als Antriebsgröße von WETTREG ausgewertet werden, ist die Amplitude des von WETTREG simulierten Temperatursignals ab der Mitte des 21. Jahrhunderts niedriger als beim antreibenden ECHAM-Modell; auch die von ECHAM angetriebenen dynamischen Regionalisierungen mit REMO oder CLM weisen höhere Signalamplituden auf.

- Die Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationsmuster, die in ECHAM 5-Szenarios wiedererkannt werden haben eine Tendenz zur „Degenerierung“, d.h. zum Ende des 21. Jahrhunderts nehmen die mit niedriger lokaler Temperatur assoziierten Muster bis zu deren Verschwinden ab und ein wachsender Anteil der Zirkulationsmuster akkumuliert in den Mustern, die mit besonders hoher lokaler Temperatur assoziiert sind.
- Das Gütemaß der Wiedererkennung lässt mit der Zeit nach; es gibt also Muster, die nicht gut mit den Vorgaben in Einklang zu bringen sind.

Erläuternd sei angefügt, dass der Begriff „Muster“ in einem weit gefassten Kontext verstanden werden sollte. Die naheliegende Wortbedeutung bezieht sich auf *morphologische* Eigenschaften, wie etwa bei den durch die Position von Steuerungszentren definierten Großwetterlagen. Diese sind aus synoptischen Karten, beispielsweise denen des Luftdrucks oder des Geopotentials evident. Der erweiterte Musterbegriff umfasst Strukturen in anderen Feldern, wie etwa der Temperatur, der relativen Topographie, des Windes, der Advektion, der Vorticity, der Feuchte oder abgeleiteter Größen (Q-Vektor, Frontneigungswinkel, vertikale Stabilität, etc.). Ein „neues Muster“ ist daher nicht notwendigerweise eine neue Strömungskonfiguration, sondern kann auch eine zuvor nicht aufgetretene Ausprägung in einem der anderen Felder oder die Amplituden-Variation eines bekannten Musters, also eine extreme Ausprägung eines bekannten Musters sein.

Der TWL-Ansatz wurde erstmals 2006 im Rahmen einer Studie [Kreienkamp u. a. 2006a], die von sechs Bundesländern und Freistaaten in Auftrag gegeben wurde, verfolgt. Dort wurden aus den Szenariorechnungen von ECHAM 5 zukünftige Tage identifiziert, an denen das Gütemaß der Wiedererkennung der WETTREG-Zirkulationsmuster besonders niedrig war. Ein wichtiges Resultat war, dass diese suboptimale Wiedererkennung überwiegend im Sommer auftritt. In der Menge der so bestimmten „außergewöhnlichen Tage“ erfolgte mit Hilfe eines Clusterverfahrens eine erneute Mustersuche. Dabei wurde klar, dass rund 90% der identifizierten Tage, ihrer Auffälligkeit zum Trotz, bezüglich der mit ihnen im Zusammenhang stehenden lokalen Klimagrößen den Werterahmen der in WETTREG definierten Muster nicht verlassen. Es fielen jedoch Muster auf, die sich insofern abhoben, als es sich bei ihnen um extreme Ausprägungen bekannter Strukturen handelte. Dem Charakter nach sind diese Tage von großer Trockenheit, sehr hoher Temperatur und südwestlicher Anströmung geprägt. Eine erste Abschätzung ergab, dass eine effektivere Auswertung dieser, in WETTREG offenkundig unzureichend berücksichtigter, Tage einen Zuschlag von rund $+0,3^{\circ}\text{C}$ beim Temperatursignal am Ende des 21. Jahrhunderts bewirken würde.

Die Transwetterlagenstudie von 2006 [Kreienkamp u. a. 2006a] legte ein wichtiges Fundament zu diesem Vorhaben, verdeutlichte sie doch, dass neue Strukturen in einem zukünftigen Klima identifizierbar sind und dass diese Strukturen auch eine Modifikation des Temperatursignals zu höheren Werten hin bewirken. Um dies systematisch in die WETTREG-Methode einfließen lassen zu können, muss ein Weg gefunden werden, Zeitreihen zu synthetisieren, in denen sich eine Häufigkeitsverteilung von „regulären“ und von TWL abbildet. Die Strategie der Wahl

1.3 Problemstellung – Aktualisierungen der WETTREG-Methode

ist es, zu den zehn Mustern zusätzliche, neue, zu definieren, die extremen Ausprägungen der wärmsten Klassen entsprechen. In diesem Zusammenhang und zum Teil als Folge der Anwendung dieser Strategie waren weitere Veränderungen von WETTREG notwendig, die in Abschnitt 3 dargestellt sind.

Ein Diskussion der Ergebnisse folgt in Abschnitt 4. Dort wird vorgestellt, dass TWL durch Mustersuche zwar sehr selten, aber durchaus auch in den Klimawerten der Gegenwart gefunden werden können. Zudem wird in diesem Abschnitt diskutiert, welche Implikationen die TWL für den Wettergenerator besitzen. Das ist der Teil von WETTREG, der die Synthese der Simulationszeitreihen vornimmt und dabei aus Episoden gemessenen Klimas Zeitreihen eines zukünftigen Klimas zusammensetzt.

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 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 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 mit ECHAM 5 simulierte Zeithorizont umfasst die Jahre 1861 bis 2100¹⁾, bis 2000 als 20C-Lauf, danach als Rechnungen für die SRES-Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**²⁾. 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] 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 Klimastationen verfügbaren Wetterelemente sind in Tab. 2.1 aufgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Niederschlagsdaten um *unkorrigierte* Werte handelt. Nicht alle Daten sind für die endgültige Simulation genutzt worden.

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).

Gegenüber der WETTREG-Version von 2006 [Spekat u. a. 2007a] ist in dieser Studie eine Erweiterung vorgenommen worden: Die Zeitreihen der Klimastationen entstammen nicht mehr dem Zeitraum bis 1971–2000, sondern umfassen die Jahre bis 2007. Diese Aktualisierung hat den Vorteil, dass für die Synthetisierung der Zeitreihen des zukünftigen Klimas zum Beispiel mehr Episoden mit Extremen zur Verfügung stehen.

¹⁾Für die vorliegende Studie werden Daten ab 1961 verwendet.

²⁾Für die vorliegende Studie wird einzig das Szenario **A1B** verwendet.

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:

1. Globale Klimamodelle sind in der Lage, das Klima großräumig in hinreichender Qualität zu beschreiben;
2. 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;
3. unter dem Antrieb von Emissions-Szenarios verändert sich die Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Muster, wie sie von einem globalen Klimamodell errechnet wird;
4. die Beziehungen der Klassen lokaler Konsequenzen zu den atmosphärischen Mustern ist auch in der Zukunft der derzeit bestehenden Beziehung sehr ähnlich,
5. 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.

3.2 Weiterentwicklung von WETTREG

Die Details der Methode, inclusive der Zusammenschau und räumliche Homogenisierung der einzelnen Teilregionen, sind ausführlich in [Enke 2005], [Enke u. a.

2005b], [Enke u. a. 2005a] und in [Spekat u. a. 2007a] 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 dekadewise 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 wird auch für diese TWL-Studie angewandt.

In den nächsten Abschnitten werden mehrere durch den Einsatz der TWL-Strategie motivierte Änderungen gegenüber dem bisherigen Stand der WETTREG-Methode beschrieben.

3.2.1 Verwendung von Jahresgang-bereinigten Daten

Entgegen der weit verbreiteten Herangehensweise, die atmosphärische Situation an sich zu gruppieren und dann die Eigenschaften der meteorologischen Elemente der gefundenen Klassen zu analysieren und zu nutzen¹⁾ baut WETTREG seine Zirkulationsmuster anders auf. Am Beispiel der Temperatur sei dies illustriert: Es werden Klassen geformt, in denen sich bestimmte Temperaturintervalle wiederfinden, also z.B. alle Tage, bei denen das Gebietsmittel im Sommer zwischen 9 und 11°C liegt, vgl. Tab 3.1. Dies wird auch als *Environment-to-Circulation-Ansatz* [Yarnal 1993] bezeichnet. Die eigentlichen Muster entstehen dann als Komposita der atmosphärischen Felder dieser Tage²⁾ „Muster“ wird dabei in einem umfangreicheren Sinn als bei vielen gängigen Zirkulationsmuster-Definitionen verwendet, denn es handelt sich dabei nicht nur um Konfigurationen in der Strömung, sondern auch um andere Größen, wie relative Topografie, Advektion, Vorticity, Temperatur, Feuchte u.a.m. in verschiedenen Höhengniveaus. Die Muster werden in den Resultaten der dynamischen Klimamodelle objektiv wiedererkannt und damit ihre sich mit der Zeit ändernde Häufigkeit bestimmt.

Nun ist es prinzipiell möglich, die Zirkulationsmuster von WETTREG, nicht nur, wie im obigen Beispiel, so zu bilden, dass sie direkt das Regime der Temperatur wiedergeben. Es lohnt sich vielmehr wegen der statistisch stabilisierenden Wirkung Anomalien der Temperatur zum Jahresgang zu verwenden. Die einzelnen Muster werden dann nicht mehr durch Temperaturintervalle definiert; statt dessen fasst jedes von ihnen Tage zusammen, die auf ähnliche Weise vom Jahresgang abweichen; die Intervalle dieser Abweichung vom Jahresgang sind dabei in allen Jahreszeiten gleich, wie Tab. 3.2 zeigt.

¹⁾ *Circulation-to-Environment-Methode*. [Yarnal 1993]

²⁾ Da die atmosphärischen Muster so definiert sind, dass sie eine Verbindung zwischen am Boden gemessenen Größen, z.B. Temperatur und damit verbundenen Zuständen in der Atmosphäre darstellen, werden im Laufe des Berichts häufig die Begriffe *Zirkulationsmuster* und *Temperaturklassen* äquivalent verwendet.

3.2 Weiterentwicklung von WETTREG

Tabelle 3.1: Zur Wetterlagen-Definition vor der Durchführung der TWL-Studie. Intervalle der Temperatur [°C] für die Temperaturklassen.

<i>Klasse</i>	<i>Frühjahr</i>	<i>Sommer</i>	<i>Herbst</i>	<i>Winter</i>
1	< -6,0	< 9,0	< -5,0	< -14,0
2	-6,0 ... -2,8	9,0 ... 11,0	-5,0 ... -1,9	-14,0 ... -11,1
3	-2,7 ... 0,5	11,1 ... 13,0	-1,8 ... 1,2	-11,0 ... -8,1
4	0,6 ... 3,8	13,1 ... 15,0	1,3 ... 4,2	-8,0 ... -5,2
5	3,9 ... 7,0	15,1 ... 17,0	4,3 ... 7,3	-5,3 ... -2,2
6	7,1 ... 10,2	17,1 ... 19,0	7,4 ... 10,4	-2,1 ... 0,7
7	10,3 ... 13,5	19,1 ... 21,0	10,5 ... 13,5	0,8 ... 3,6
8	13,6 ... 16,8	21,1 ... 23,0	13,6 ... 16,5	3,7 ... 6,6
9	16,9 ... 20,0	23,1 ... 25,0	16,6 ... 19,6	6,7 ... 9,5
10	> 20,0	> 25,0	> 19,6	> 9,5

Tabelle 3.2: Zur Wetterlagen-Definition bei der Transwetterlagen-Studie. Intervalle der Temperaturabweichung vom Jahresgang [°C] für die Temperaturklassen.

<i>Klasse</i>	<i>Frühjahr</i>	<i>Sommer</i>	<i>Herbst</i>	<i>Winter</i>
1	< -6,0	< -6,0	< -6,0	< -6,0
2	-6,0 ... -4,5	-6,0 ... -4,5	-6,0 ... -4,5	-6,0 ... -4,5
3	-4,4 ... -3,0	-4,4 ... -3,0	-4,4 ... -3,0	-4,4 ... -3,0
4	-2,9 ... -1,5	-2,9 ... -1,5	-2,9 ... -1,5	-2,9 ... -1,5
5	-1,4 ... 0,0	-1,4 ... 0,0	-1,4 ... 0,0	-1,4 ... 0,0
6	0,1 ... 1,5	0,1 ... 1,5	0,1 ... 1,5	0,1 ... 1,5
7	1,6 ... 3,0	1,6 ... 3,0	1,6 ... 3,0	1,6 ... 3,0
8	3,1 ... 4,5	3,1 ... 4,5	3,1 ... 4,5	3,1 ... 4,5
9	4,6 ... 6,0	4,6 ... 6,0	4,6 ... 6,0	4,6 ... 6,0
10	> 6,0	> 6,0	> 6,0	> 6,0

Was sind Jahresgang-bereinigte Daten?

Abb. 3.1 illustriert am Beispiel der Temperatur an der Station Freiburg i.Br. den Vorgang der Anomaliebildung.

Während bei der Temperatur als verwendete Größe der Verlauf der Referenzgröße sich über das Jahr von Tag zu Tag ändert [mittlerer Temperatur-Jahresgang, schwarze Linie in Abb. 3.1 (a)] ist die Referenzgröße bei der Anomalie das gesamte Jahr über unverändert [rote Linie in Abb. 3.1 (b)]. Für die Interpretation der Zirkulationsmuster ist ein Umdenken erforderlich: Waren es bisher Zeitbereiche, an denen – jahreszeitenspezifisch – niedrige/mittlere/hohe

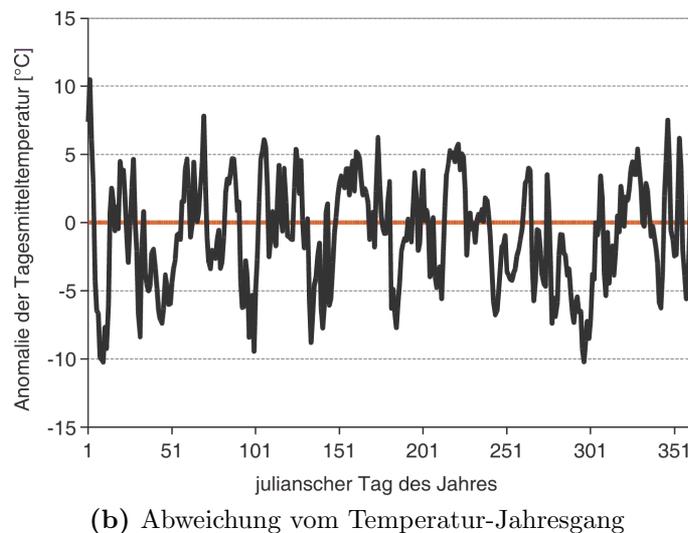
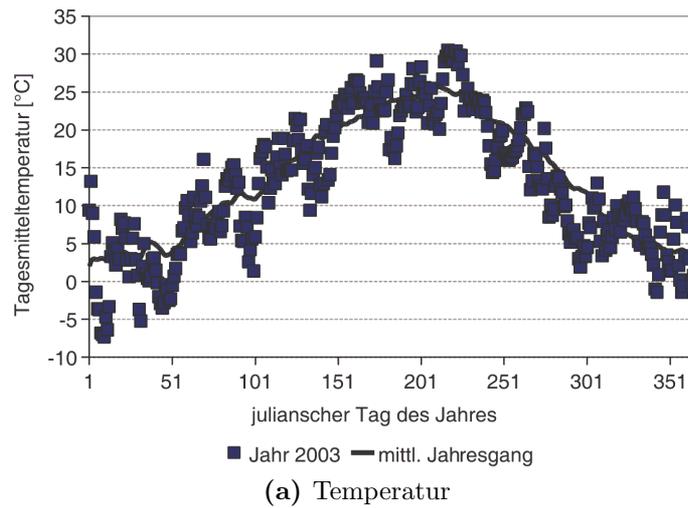


Abbildung 3.1: Oben: Temperaturverlauf über das Jahr an der Station Freiburg. Die Quadrate stellen die Einzelwerte für das Jahr 2003 dar. Die durchgezogene Kurve ist der mittlere Jahresgang aus dem Jahren 1971–2007. Unten: Für das Jahr 2003 ist die Anomalie (schwarze Kurve) zum mittleren Jahresgang (rote Linie) dargestellt.

Werte auftraten, die die 10 Zirkulationsmuster für die Temperatur definierten, so beschreiben bei der TWL-Studie die Zirkulationsmuster Situationen, in denen es wärmer/kälter als der mittlere Temperaturverlauf ist. Tab. 3.2 gibt die den Mustern zugeordneten Wertebereiche dieser Abweichung an.

Warum wurde auf Jahresgang-bereinigte Daten für die Stationsdaten umgestellt?

Werden Temperaturabsolutwerte (nicht Abweichungen vom Jahresgang!) in den Übergangsjahreszeiten betrachtet, so ist für diese typisch, dass die Verteilung von warmen und kalten Tagen im zeitlichen Verlauf nicht gleichmäßig ist. Im Frühjahr treten kalte Tage gehäuft am Anfang auf, währenddessen warme Tage verstärkt

am Ende auftreten. Für den Herbst gilt dieses auf umgekehrte Weise.

Der Wettergenerator reiht nun bei der Synthese von Frühjahrsdaten zufällig Episoden (Witterungsabschnitte) aus allen Teilen des Frühjahrs aneinander. Eine Konsequenz der Klimaerwärmung ist, dass bereits am Anfang der Jahreszeit der Einbau von wärmeren Tagen erforderlich ist und folglich warme Tage von Ende des Frühjahrs in Richtung des Anfangs ‚wandern‘. Somit muss ein Wettergenerator unter Umständen stärkere Verschiebungen der Witterungsabschnitte vom Ende zum Anfang des Frühjahrs durchführen. Um beim Beispiel des Frühjahrs zu bleiben: Die wärmeren Tage aus dem Mai werden zum Zusammenbau von Zeitreihen eines zukünftigen (wärmeren) Klimas häufiger bereits im April oder März benötigt. Es entstehen dabei Inkonsistenzen, denn an den Mai-Tagen, die früher im Jahr eingesetzt werden, herrschen beispielsweise andere Bedingungen bezüglich des Sonnenstands und somit der Einstrahlung. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Inkonsistenzen steigt in Folge dessen mit längerem Zeithorizont an. Mit dem Einsatz von Anomalie-bezogenen Wetterlagen reduziert sich diese Problematik deutlich.

Wie werden die atmosphärischen Felder einbezogen?

Wie in den voranstehenden Unterabschnitten erwähnt, erfolgt die Klasseneinteilung der Tage nicht mehr auf Grund der absoluten Atmosphärengrößen, wie Temperatur oder Niederschlag sondern auf Grund ihrer Abweichung vom Jahresgang. Zu allen Tagen, an denen eine Temperaturabweichungsklasse N (z.B. bei $N=8$: $3,1-4,5^\circ\text{C}$ Abweichung vom Jahresgang, s. Tab. 3.2) auftritt, werden Komposita von Feldern der freien Atmosphäre (Geopotenzial, Schichtdicke, Feuchte, Temperatur, Vorticity etc.) gebildet, die den Atmosphärenzustand für diese Abweichungsklasse repräsentieren. Der WETTREG-Version der Deutschland-Studie [Spekat u. a. 2007a] verwendete dabei die *Werte*-Felder der eben genannten Größen (z.B. Geopotenzial in 850 hPa in einer Größenordnung um 1500 gpm). In die vorliegende WETTREG-TWL-Studie flossen neue Erfahrungen und Erkenntnisse ein, die seit der Deutschland-Studie von 2007 gewonnen wurden. Ein wichtiger Schritt war dabei, dass auch bezüglich der atmosphärischen Felder auf die Verwendung von Anomalien umgestellt wird.

Warum wurde auf Jahresgang-bereinigte Grundlagendaten für die Wetterlagen umgestellt?

Dynamische Modelle sind grundsätzlich eine idealisierte Abstraktion der Realität. Sie beschreiben einen Ausschnitt der Realität und benötigen dazu Anfangs- und Randbedingungen. Beim Versuch, die beobachtete Realität mit Modellen zu simulieren, scheitert eine exakte Wiedergabe an der systeminhärenten Variabilität und dem unvollständigen Wissen über das zu modellierende System. In der Folge sind systematische Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Größen bemerkbar, der so genannte Bias.

Werden nun, wie bei WETTREG, die Grundlagen³⁾ auf Basis der Reanalysen ermittelt, so stellt sich immer die Frage der bestmöglichen Übertragung dieser Zusammenhänge auf einen Modellantrieb. Werden die atmosphärischen Felder der Reanalyse und die Felder des Globalmodells jeweils vom Jahresgang befreit, so ist das Problemfeld des systematischen Biases im Bereich der Mittelwerte nicht mehr vorhanden. Es besteht weiterhin die Möglichkeit systematischer Unterschiede in den weiteren statistischen Momenten der Verteilungen. Eine Bearbeitung dieses Problemfeldes ist aktuell noch nicht erfolgt.

3.2.2 Glättung an den Jahreszeitenübergängen

Die „Binnenstruktur“ des Klimawandels ist komplex; neben Verschiebungen in der Häufigkeitsverteilung von Klimagrößen umfasst sie u.A. auch eine zukünftige Modifikation im Jahreszyklus, d.h. der Klimawandel ist saisonal differenziert zu betrachten. Wichtige Beispiele sind die Amplitude des Erwärmungssignals, das jahreszeitlich unterschiedlich stark simuliert wird sowie die simulierte zukünftige Entwicklung des Niederschlagssignals, die Änderungen von Amplitude (Stärke des Trends) und Vorzeichen (Zunahme- bzw. Abnahmetrends) beinhaltet. In WETTREG wird dem durch jahreszeiten-spezifische Behandlung der Daten Rechnung getragen. Dabei können allerdings Sprünge an den Jahreszeitengrenzen entstehen, denn dort wechselt ja von einem zum nächsten Tag das „Regelwerk“. Im Rahmen der Erarbeitung einer TWL-Methodik wird eine Verbesserung eingeführt, die die Übergangs-Sprünge an den Jahreszeitengrenzen reduziert. Eine wichtige Maßnahme dabei ist, dass ein Korridor um den Jahreszeitenübergang herum definiert wird. Innerhalb dieses Zeitintervalls werden bei der Synthetisierung der Zeitreihen zwei Sachverhalte berücksichtigt: (i) Episoden, die kurz vor dem Ende einer Jahreszeit beginnen, werden nicht am Ende der Jahreszeit gekappt, sondern die Episoden werden bis zu ihrem Ende in voller Länge in die nächste Jahreszeit fortgeschrieben; (ii) kurz vor dem Ende einer Jahreszeit wird zugelassen, dass, quasi verfrüht, bereits eine Episode aus der nachfolgenden Jahreszeit zur Verwendung kommt.

3.2.3 Modifikation der stochastischen Reihenkonstruktion

In der gebotenen Kürze sei hier auf eine Herausforderung der stochastischen Reihenkonstruktion eingegangen: Es werden bei der Synthese Episoden aus Klimamessreihen in erster Näherung zufällig aneinander gefügt. Jede Episode bringt als Zusatzinformation das jedem Tag zugeordnete Zirkulationsmuster mit. Die Häufigkeitsverteilung der Muster ist vorgegeben und der Syntheseprozess akzeptiert resp. verwirft die Episoden, je nachdem, ob damit die Anpassung an die (vorgegebenen) Häufigkeitsverteilung verbessert wird oder nicht. Damit die syn-

³⁾Beispielsweise die Felder atmosphärischer Größen, wie Geopotenzial, Temperatur, Feuchte, relative Topografie, Divergenz, Advektion, Vorticity etc.

thetisierten Zeitreihen voneinander unterschiedlich sind, muss dieser Syntheseprozess, mit dem WETTREG seine N (in der Regel 10) Simulationen des zukünftigen Klimas erzeugt, ein wohl dosiertes Maß Zufall enthalten. Zwei Extreme gilt es zu verhindern: (i) Die einzelnen Simulationen sind identisch und (ii) die einzelnen Simulationen sind einander zu unähnlich und weichen zudem unverträglich stark vom mittleren Zustand ab.

Details und Spezifika der Reihenkonstruktion im Kontext der Transwetterlagen werden in Abschnitt 3.3 diskutiert.

3.2.4 Einführung zusätzlicher Zirkulationsmuster

Die Studie [Kreienkamp u. a. 2006a] ergab, dass aus dem Klima der Gegenwart ermittelte Zirkulationsmuster ergänzt werden sollten, da

- in einem zukünftigen Klima extreme Zustände voraussichtlich häufiger eintreten und
- durch den Wegfall von Mustern, die mit kalten Witterungsverläufen assoziiert sind, die Mustervielfalt reduziert ist. Im Bereich der „warmen“ Muster tritt hingegen eine starke Häufung auf, was den Schluss nahe legt, dass dort ergänzend weitere Muster eingeführt werden sollten.

Diese neuen Muster sind wie folgt definiert: Für rund 40 Atmosphärengrößen (beispielsweise das Geopotential, die relative Topografie, die Feuchte, die Vorticity u.a.m.) werden mittlere Felder bestimmt, in denen klassenweise die Tage zusammengefasst sind, an denen die Abweichung vom Jahresgang in den Intervallen, wie sie Tab. 3.2 wiedergibt, liegt. Zur Auswertung kommen die Klassen 9 und 10. Für eine Atmosphärengröße, z.B. das Geopotenzial in 850 hPa wird der Unterschied zwischen der Klasse 9 (basierend auf den in Tab. 3.2 definierten zweithöchsten Abweichungen vom Temperaturjahresgang) und 10 (höchste Abweichungen vom Jahresgang) bestimmt. Dieser Betrag wird auf denjenigen von Klasse 10 aufaddiert, um die 850 hPa Geopotenzialwerte für die erste TWL 11 zu erhalten. Durch Aufaddieren des doppelten Betrags entsteht die TWL 12⁴⁾. Das Hinzufügen von zwei TWL wurde bereits in [Kreienkamp u. a. 2006a] nahe gelegt.

Danach wird der Mustererkennungsprozess, der im bisherigen WETTREG-Verfahren auf 10 Klassen basierte, unter Benutzung der, wie oben beschrieben, spezifischen Felder für die 12 Klassen durchgeführt.

In Tabellen 3.3–3.6 ist dargestellt, wie sich die Häufigkeit der 10+2 Klassen, objektiv wiedererkannt in den ECHAM 5-Daten für die Dekaden 1961–70 bis 2091–2100, in allen Jahreszeiten ändert. Den Klassen 1–10 liegen die Abweichungen vom Jahresgang der Temperatur zu Grunde, die in Tab. 3.2 eingetragen sind. Klassen 11 und 12 sind die TWL. Der aus früheren Studien ohne TWL

⁴⁾Als grobe Orientierung sei angemerkt, dass in der Konsequenz die Temperaturanomalie in Klasse 11 rund 2°C und in Klasse 12 rund 4°C über den Werten der Klasse 10 liegt.

bekanntes Effekt, dass die Häufigkeitsverteilung sich im Laufe des 21. Jahrhunderts von den „kalten“ in Richtung einer Dominanz der „warmen“ Wetterlagen verändert, ist auch in Tab. 3.3–3.6, am deutlichsten im Sommer und Herbst, sichtbar. Des Weiteren erscheint eine, ebenfalls in vergangenen Studien beobachtete, Sekundärstruktur in Sommer und Herbst am deutlichsten sichtbar: Innerhalb der Klassen hoher Temperaturanomalie zeigt Klasse 8 ein sekundäres Häufigkeitsminimum. Andere Studien hingegen, wie [Jonas u. a. 2005], nehmen für die Zukunft an, dass die Häufigkeitsverteilung der Temperatur auch in Zukunft einer Gauß'schen Normalverteilungskurve ähnlich bleibt und Formveränderungen lediglich durch die Verschiebung des Mittelwertes und die Verbreiterung der Verteilungskurve (Zunahme der Varianz) zu erwarten sind. Es ist nicht klar, ob die o.e. Ausbildung des sekundären Minimums in einem physikalischen Effekt begründet ist, oder ob es sich dabei um ein Modellspezifikum handelt.

Es sei unterstrichen, dass die Klassen-bildende Größe hier nicht mehr die Temperatur selbst, sondern die Abweichung vom Jahresgang ist. Auch auf der Basis dieses transformierten Parameters treten diese Veränderungen in vergleichbarer Form auf. Die ersten Klassen, die durch hohe negative Abweichung vom Jahresgang charakterisiert sind, verlieren mehr und mehr an Bedeutung während die in der Folge höher stehenden Klassen einen deutlichen Häufigkeitszuwachs zeigen.

Eine weitere bedeutsame Erkenntnis ist, dass bei den Klassen des oberen Drittels auch im späten 21. Jahrhundert noch eine Differenzierung existiert, während bei der bisherigen Klassifikation ohne TWL dort eine starke Häufung in der höchsten Klasse erfolgte.

Es ist zudem interessant, dass die TWL 11 und 12 durchaus in den 20C-Daten und den Szenariodaten der nahen Zukunft identifiziert werden können, ihre Bedeutung jedoch erst ab der Mitte des 21. Jahrhunderts wächst.

Tabelle 3.3: Zeitliche Entwicklung im Frühjahr für die Häufigkeit der 10+2 Zirkulationsmuster von 1961–70 bis 2091–2100. In den Jahren 1961–2000 wurden die 20C-Daten von ECHAM 5 verwendet, danach das ECHAM 5-Szenario A1B. Region: Hessen.

Kl.	1961	1971	1981	1991	2001	2011	2021	2031	2041	2051	2061	2071	2081	2091
1	6,2	2,1	4,6	6,4	4,5	5,2	4,6	3,2	0,9	1,1	1,2	0,9	0,4	0,4
2	6,8	6,0	5,7	5,2	4,7	5,3	5,3	4,8	1,8	2,7	1,6	2,9	0,5	0,5
3	8,8	7,8	6,4	8,4	6,8	7,3	10,1	7,1	6,5	5,0	4,5	4,7	1,8	2,9
4	12,3	10,2	8,9	12,6	12,5	13,2	12,7	12,6	7,4	11,0	6,7	5,9	5,3	3,4
5	16,6	16,1	13,2	15,7	13,0	12,8	14,8	14,1	11,8	12,2	9,8	9,2	10,0	10,8
6	19,6	13,9	17,4	15,1	18,0	17,8	17,5	17,6	16,4	14,2	14,7	14,0	14,0	11,7
7	10,2	12,8	12,6	10,3	9,8	10,9	11,4	12,1	10,8	16,6	13,2	14,5	12,7	14,5
8	6,7	12,7	9,5	10,7	10,8	10,5	7,6	8,2	10,2	12,1	11,5	10,5	12,5	15,5
9	5,7	9,7	10,0	6,6	10,3	6,2	5,2	8,0	13,2	10,7	12,3	11,3	14,0	13,6
10	3,6	5,9	7,0	5,5	5,8	7,2	5,3	7,2	10,5	6,7	11,6	11,0	11,6	12,3
11	2,9	2,2	2,8	2,8	3,3	2,3	2,6	2,7	6,3	3,9	6,6	7,0	8,3	7,0
12	0,5	0,7	2,1	0,7	0,5	1,3	2,8	2,5	4,1	3,8	6,3	8,2	8,7	7,4
≥ 10	7,0	8,8	11,9	9,0	9,6	10,8	10,7	12,4	20,9	14,4	24,5	26,2	28,6	26,7

Tabelle 3.4: Wie Tabelle 3.3, jedoch für den Sommer.

Kl.	1961	1971	1981	1991	2001	2011	2021	2031	2041	2051	2061	2071	2081	2091
1	8,8	6,4	4,0	3,0	4,7	4,1	0,8	1,8	0,5	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0
2	16,8	15,8	11,5	11,2	9,5	8,5	7,9	6,0	4,1	3,3	2,1	1,2	0,1	0,1
3	17,5	17,7	12,7	12,2	15,9	12,5	10,4	12,1	8,7	5,3	4,6	3,3	1,3	0,8
4	14,7	12,8	14,6	15,8	14,8	15,9	10,7	10,8	10,4	8,9	6,0	6,6	3,2	2,8
5	13,3	15,9	15,0	15,7	12,8	18,6	17,8	12,6	13,8	12,6	10,4	10,7	5,5	5,5
6	10,7	9,2	13,4	13,2	9,2	13,7	14,1	11,7	14,3	16,2	10,4	12,2	8,2	9,1
7	7,8	8,0	11,3	10,3	10,9	9,7	12,2	10,5	13,8	13,7	13,8	11,7	12,4	15,1
8	3,9	6,2	5,1	9,0	5,7	4,2	5,8	9,8	9,9	9,1	5,8	7,6	9,8	9,1
9	4,9	5,0	5,3	4,7	7,2	5,2	7,2	10,0	10,3	11,1	14,6	13,9	18,2	15,5
10	1,7	2,0	3,6	3,3	6,3	4,0	6,4	8,9	7,5	8,8	12,4	10,7	12,1	12,7
11	0,3	0,8	2,5	1,2	2,4	2,1	4,6	4,2	3,5	6,6	9,0	9,5	11,4	11,2
12	0,5	0,2	1,0	0,5	0,8	1,5	2,2	1,5	3,0	4,2	10,5	12,7	17,9	17,9
≥ 10	2,5	3,0	7,1	5,0	9,5	7,6	13,2	14,6	14,0	19,6	31,9	32,9	41,4	41,8

Tabelle 3.5: Wie Tabelle 3.3, jedoch für den Herbst.

Kl.	1961	1971	1981	1991	2001	2011	2021	2031	2041	2051	2061	2071	2081	2091
1	14,8	6,4	6,4	6,5	8,1	3,7	3,3	2,7	2,9	1,6	0,7	1,2	0,1	0,3
2	8,8	10,9	7,5	8,2	6,7	5,9	5,8	3,7	5,6	2,3	1,6	1,1	1,0	0,8
3	12,0	12,4	10,7	8,2	10,1	11,0	9,7	7,8	7,6	4,7	5,9	3,7	2,9	2,2
4	11,9	15,2	14,0	14,3	13,1	12,7	9,9	10,9	12,0	6,4	7,8	5,9	5,5	4,9
5	11,4	12,5	15,6	13,6	10,3	13,0	10,4	9,3	9,2	9,6	8,7	6,8	6,8	6,9
6	11,8	11,9	11,6	12,2	13,7	17,4	13,3	10,9	11,4	13,3	10,4	10,3	9,1	7,0
7	9,6	9,0	11,1	12,2	10,3	12,6	13,6	14,3	11,9	14,6	10,1	11,2	9,8	11,3
8	7,9	8,0	9,5	10,2	8,1	7,0	11,9	10,1	9,5	11,6	8,2	10,2	9,2	8,5
9	5,2	6,5	5,6	8,6	7,9	6,7	8,9	8,1	7,9	10,2	10,1	10,4	10,2	11,5
10	3,4	4,2	3,7	4,0	4,8	5,1	6,4	6,7	7,3	10,1	12,4	12,6	12,1	12,2
11	1,9	2,4	1,5	1,4	3,3	2,9	3,8	7,5	6,5	8,5	7,6	9,3	11,1	11,5
12	1,4	0,7	2,9	0,5	3,4	2,0	3,0	7,9	8,4	7,0	16,4	17,0	22,2	22,7
≥ 10	6,7	7,3	8,1	5,9	11,5	10,0	13,2	22,1	22,2	25,6	36,4	38,9	45,4	46,4

Tabelle 3.6: Wie Tabelle 3.3, jedoch für den Winter.

Kl.	1961	1971	1981	1991	2001	2011	2021	2031	2041	2051	2061	2071	2081	2091
1	9,6	6,1	11,0	16,1	14,0	12,6	6,9	8,0	4,7	3,7	3,1	3,4	0,1	1,7
2	11,6	8,5	9,1	11,0	8,8	8,5	7,6	4,7	5,8	4,4	5,7	3,7	0,4	1,2
3	7,5	7,2	6,9	5,4	6,3	6,6	7,8	7,0	4,4	7,3	5,7	4,1	1,1	1,7
4	7,5	9,6	10,1	10,4	6,9	5,1	6,8	4,9	6,1	4,9	3,8	4,5	2,1	3,8
5	8,2	6,2	8,8	4,7	9,1	6,0	8,2	4,7	7,5	9,0	4,8	5,3	3,0	2,3
6	16,0	17,4	16,4	17,6	13,5	12,8	13,6	11,0	13,0	8,9	8,2	11,0	7,0	8,2
7	15,9	14,6	13,7	11,1	13,6	13,5	15,7	17,6	13,6	16,7	12,1	14,0	10,8	10,6
8	12,3	14,6	10,0	10,7	12,2	12,8	11,0	17,1	14,3	13,1	14,6	14,5	15,0	15,0
9	7,4	9,4	9,6	9,2	9,2	13,4	13,5	13,4	15,5	14,8	18,6	15,0	17,5	18,1
10	3,2	5,1	3,7	3,1	4,4	6,3	7,0	8,3	9,9	11,0	14,4	15,1	20,4	20,2
11	0,7	0,9	0,8	0,7	1,2	2,0	1,8	3,0	3,5	5,4	7,4	6,9	14,5	12,5
12	0,0	0,3	0,0	0,1	0,8	0,2	0,1	0,6	1,7	0,9	1,7	2,7	8,1	4,8
≥ 10	3,9	6,3	4,5	3,9	6,4	8,5	8,9	11,9	15,1	17,3	23,5	24,7	43,0	37,5

3.2.5 „Transwetter“: Transwetterlagen-Witterungsabschnitte

Wie erfolgt die Implementierung von Episoden mit Transwetter-Einfluss in die Zeitreihen? Der Wettergenerator rekombiniert bekanntermaßen Episoden aus gemessenen Klimazeitreihen. Eine Episode ist dabei ein Abschnitt aus der Zeitreihe, in dem durchweg eine positive resp. negative Abweichung vom Jahresgang auftritt. Alle Episoden befinden sich in einem Pool, aus dem der Wettergenerator frei wählen kann.

Die Situation wird durch die TWL kompliziert. Ein bedeutender Faktor ist, dass in den Episoden der gemessenen Klimazeitreihen und auch in den assoziierten Zirkulationsmustern nur sehr wenige TWL zu finden sind. Wie Tabellen 3.3–3.6 zeigen, steigt der Anteil von TWL im Laufe des 21. Jahrhunderts an. Hier tritt die Komplikation auf, denn eine sehr wichtige Steuergröße für den Wettergenerator ist die bestmögliche Anpassung der zusammengefügteten Zeitreihenabschnitte an die vorgegebene Häufigkeitsverteilung. Um diese Anpassung zu realisieren wird vom Wettergenerator „verlangt“, dass die verwendeten Episoden zahlreiche TWL enthalten.

Daher ist eine Strategie notwendig, die Zahl der Tage mit TWL in den verwendeten Episoden zu erhöhen. Es wird dazu postuliert, dass in Episoden mit besonders hoher Abweichung vom Jahresgang (Klasse 10), Abschnitte der TWL 11 und 12 vorkommen. Durch diese „Umbenennungen“ werden also Tage der Klasse 10 in 11 und 12 umgewandelt. Diese Maßnahme ist ein erster wichtiger Schritt, aber sie allein genügt nicht. Das liegt daran, dass bei der Bildung von Witterungsabschnitten auf Basis der Anomalie vom Jahresgang die Klasse 10 insgesamt relativ selten vorkommt. Zudem finden sich in den entsprechenden Abschnitten nur wenige und kurze Teilbereiche mit der Klasse 10. Um dies auszugleichen und dem Wettergenerator zusätzliche Episoden zur Verfügung zu stellen, werden weitere Witterungsabschnitte extrahiert, die hauptsächlich die Klassen 9 und 10 enthalten.

3.3 Spezifika der Reihenkonstruktion

Auf den ersten Blick erscheint das Konstruktionsprinzip für die Reihen relativ schlicht:

- Eine Episode ist dadurch definiert, dass die Grundgröße (z.B. Temperaturanomalie im Klimazeitraum 1971–2000) Nulldurchgänge besitzt – der „Pool“ besteht aus Teilstücken positiver resp. negativer Phase der Grundgröße.
- Jedes bei der Konstruktion zu verwendende Teilstück besitzt an jedem Tag neben den Wetterelementen auch eine Zuordnung zu einer der zwölf Temperaturklassen – dies sind die zehn in Tab. 3.2 definierten, sowie der beiden

in Folge der Transwetterlagen-Herangehensweise zusätzlichen Temperaturklassen⁵⁾.

- Für eine Zukunftsdekade ist eine Häufigkeitsverteilung der Temperaturklassen (d.h. der Zirkulationsmuster) vorgegeben – sie wird aus dem Szenario des globalen Klimamodells ermittelt.
- Die Entscheidung über Akzeptieren/Verwerfen einer Kandidaten-Episode für die neue Reihe erfolgt mit hoher Priorität nach Prüfung, ob die vorgegebene Häufigkeitsverteilung durch die hinzukommenden Klassen der Kandidaten-Episode gut angepasst wird. Ein weiteres Kriterium ist, dass die aneinander grenzenden Klassen zweier Episoden synoptisch sinnvolle Übergänge darstellen, d.h. die im Klimazeitraum, hier 1971–2000, analysierte Übergangswahrscheinlichkeit zwischen ihnen darf nicht zu klein sein.
- Die Güte der Verteilungsanpassung berechnet sich als Summe der quadrierten Abweichungen (Kandidat–Vorgabe) über alle Klassen – s.a. Formel 3.1 auf S. 28.

Eine Beobachtung aus bisherigen Arbeiten mit WETTREG war, dass diese Anpassung immer dann gut bis sehr gut erfolgt, wenn die Häufigkeitsverteilung nicht zu stark degeneriert ist⁶⁾. Zur Veranschaulichung: Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Episode E_x in die neue Zeitreihe eingebaut wird ist für alle Episoden im „Pool“ sehr ähnlich, sofern sich die zu reproduzierende Häufigkeitsverteilung der Klassen nur wenig vom Klima der Gegenwart unterscheidet. Nimmt, wie in den Auswertungen der GCM-Szenarios gefunden, die Zahl der Klassen am „warmen Ende“ der Häufigkeitsverteilung zu, so werden bevorzugt Episoden eingebaut, in denen sich diese Klassen wiederfinden. Im Extremfall – die Verteilung degeneriert so stark, dass nur noch die wärmste Klasse übrig bleibt – würden ausschließlich Episoden, in denen sich einzig diese Klasse befindet verwendet. In diesem pathologischen Spezialfall käme dann u.U. immer wieder die selbe Episode vor! Bei den zu konstruierenden Reihen sind die Randbedingungen zwar nicht so drastisch, aber, wie in Tab. 3.3–3.6 ersichtlich, werden zum Ende des 21. Jahrhunderts deutliche Zunahmen in den Klassen des oberen Drittels analysiert.

Die Komplexität der Situation wird dadurch erhöht, dass die Transwetterlagen eingeführt wurden und sie bis zum Ende des 21. Jahrhunderts an Häufigkeit gewinnen. In erster Näherung entspannt sich zwar, wie oben beschrieben, das Problem der unzureichenden Anpassung der Häufigkeitsverteilungen, da die bislang in der Klasse 10 befindlichen Tage auf die Klassen 10 bis 12 verteilt werden.

⁵⁾Zur Erinnerung: Ein Novum dieser Studie ist, dass es sich nicht um die Temperatur selbst sondern die Anomalie zum Jahresgang als klassifizierte Größe handelt.

⁶⁾Unter einer starken Degenerierung ist zu verstehen, dass die Verteilung deutlich von der Form der Normalverteilung abweicht. In Tab. 3.5 beispielsweise ist in den letzten Spalten erkennbar, dass die Klassen über 8 in ihrer Häufigkeit zur Klasse 12 hin nahezu kontinuierlich zunehmen. Für den Zeitbereich 2011...2051 kann die Verteilung hingegen als nicht degeneriert bezeichnet werden, denn sie besitzt ein Maximum nahe der Mitte des Wertebereichs und fällt zu beiden Seiten ab.

3.3 Spezifika der Reihenkonstruktion

Es sind aber auch nach der Einführung dieser Maßnahme verhältnismäßig wenige Tage, an denen die TWL 11 und 12 auftreten, in den Episoden des Pools vertreten. Zudem sind diese Abschnitte mit den TWL relativ kurz und in der Regel eingebettet in längere Abschnitte mit Klassen 9 und kleiner, die durchaus 30 Tage und mehr umfassen. Als Teil der TWL beinhaltenden Episoden werden also „ungebeten“ auch Tage mit andere Klassen in die Verteilung aufgenommen, die die Zählung an anderen Stellen zusätzlich erhöhen. Die Folge ist, dass die Anpassung an die vorgegebene Verteilung nicht optimal erfolgen kann. Die Problematik ist jahreszeitlich unterschiedlich: Während in Herbst, Winter und Frühjahr auch zum Ende des 21. Jahrhunderts gute Anpassungen möglich sind, bestehen beim Sommer sichtbare Anpassungsdefizite (s.a. Abb. 3.4). Das nachstehende Beispiel soll dies illustrieren.

Im Zuge der TWL-Studie wurden Optionen gefunden, die Anpassungsgüte zu verbessern. Dazu wurde der Pool der Episoden, die von Nulldurchgängen der Temperaturanomalie (Abweichung vom Jahresgang) begrenzt sind, erweitert. Hinzu kamen

1. Episoden mit fester Länge, im nachstehenden Beispiel zwischen 8 und 13 Tagen. Die Unterteilung erfolgte per Zufallsgenerator. Da sich am Ende der so erzeugten Episoden in der Regel kein Nulldurchgang befindet, erfolgte beim System, mit dem über das Akzeptieren/Verwerfen einer Episode entschieden wird eine Erweiterung: Die aneinander zu fügenden Episoden dürfen keinen zu großen Temperaturanomaliensprung besitzen.
2. Episoden, die von einem um $1^\circ \dots 5^\circ$ nach oben angehobenen „Nulldurchgang“ begrenzt sind, vgl. Abb. 3.2. Damit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, isoliert auftretende Zeitbereiche mit den TWL 11 und 12 zu erhalten. Gleichzeitig werden durch diese Maßnahme die Bereiche oberhalb des modifizierten „Nulldurchgangs“ mit zunehmender Anhebung kürzer und die „unternormalen“ Bereiche länger (im Extremfall können diese eine komplette Saison lang sein). Um synoptisch sinnvolle Episodenfolgen zu erhalten wurde auch für diese Maßnahme der Test des Temperaturanomaliensprungs an den Episodengrenzen durchgeführt.

Der oben unter 2. beschriebene Effekt ist in Abb. 3.2 illustriert. Durch das Anheben des Nulldurchgangsniveaus wachsen zunehmend benachbarte Negativ-Phasen zusammen. Die Positiv-Phasen werden kürzer und treten nicht mehr so häufig auf, wie der Rückgang der Ausschläge nach oben bei den blauen Kurven mit fortschreitenden Niveauehebung zeigt. Unverändertes Nullniveau: 155 Tage $\geq 0^\circ\text{C}$; Anhebung um 1° : 124 Tage $\geq 0^\circ\text{C}$; Anhebung um 2° : 96 Tage $\geq 0^\circ\text{C}$; Anhebung um 3° : 68 Tage $\geq 0^\circ\text{C}$; Anhebung um 4° : 41 Tage $\geq 0^\circ\text{C}$; Anhebung um 5° : 19 Tage $\geq 0^\circ\text{C}$.

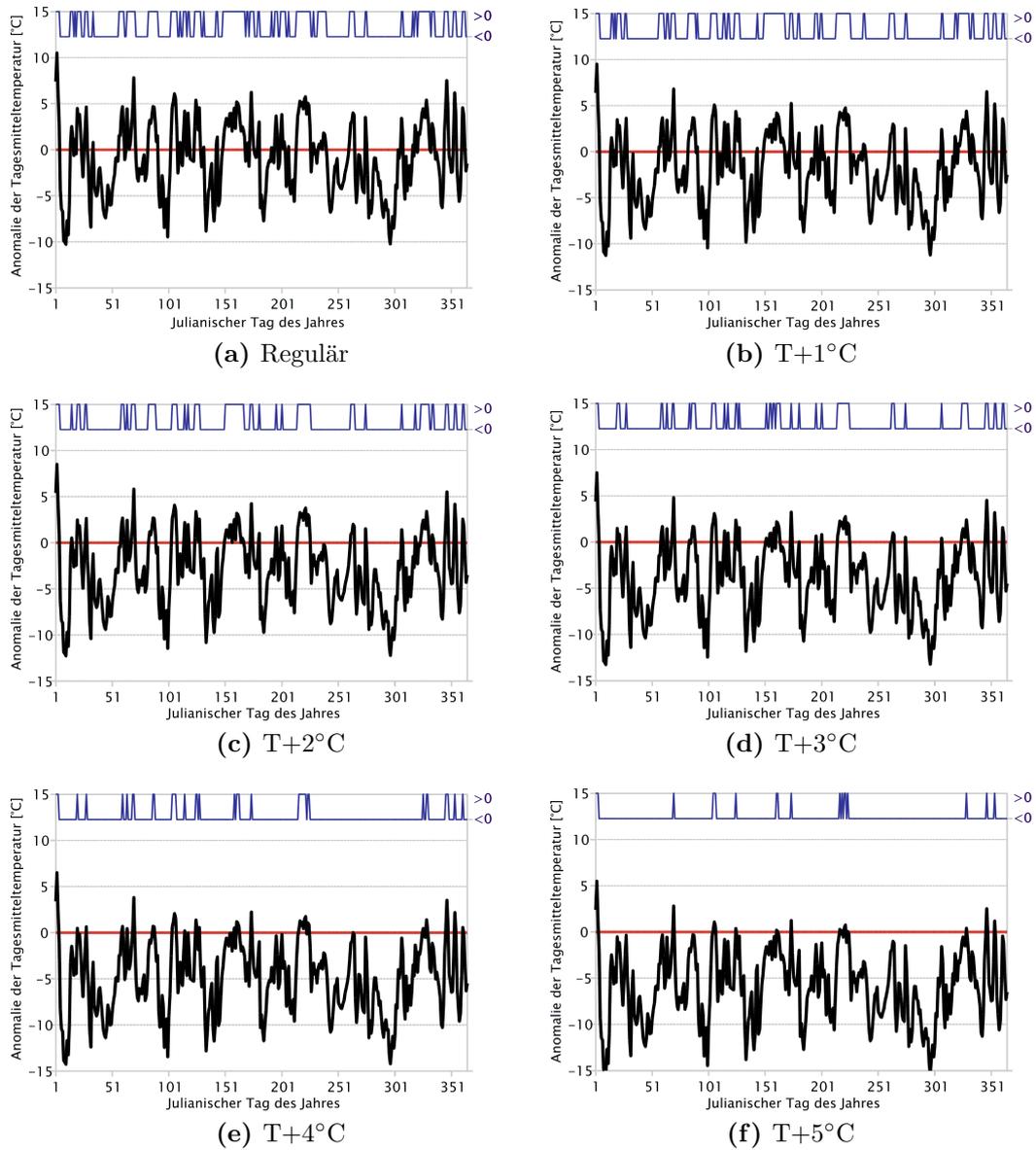


Abbildung 3.2: Anomalie der Tagesmitteltemperatur zum Jahrgang (schwarze Kurve) für das Jahr 2003 an der Beispielstation Freiburg. Die blaue Kurve zeigt die positiven bzw. negativen Phasen des Anomalieverlaufs an. In Teilfigur (b) bis (f) wurde der Jahrgang um 1...5°C nach oben verschoben.

3.3 Spezifika der Reihenkonstruktion

Tabelle 3.7: Beginn des Episoden-Pools. Die erste Spalte enthält den Episoden-Zähler, in der zweiten Spalte ist die Episodenlänge vermerkt und die Spalten 3 bis 15 enthalten für die n Tage die jeweils in der Episode auftretenden Abweichungsklassen (vgl. Tab. 3.2.)

<i>Nr.</i>	<i>Länge [Tage]</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>
1	10	8	9	9	9	8	6	6	4	4	4			
2	13	3	2	2	3	3	1	1	1	2	3	3	4	4
3	9	4	5	6	4	3	1	1	3	5				
4	9	7	7	7	7	8	9	9	8	9				
5	10	7	5	4	4	4	4	3	2	1	2			
6	12	3	5	5	7	7	7	7	7	7	8	7	7	
7	12	9	6	6	6	7	4	5	6	5	4	5	7	
8	10	6	5	6	8	10	9	8	7	5	4			
9	13	6	7	5	5	6	5	3	2	2	4	6	8	7
10	11	5	3	3	3	3	4	4	4	4	3	3		
11	12	4	4	2	4	4	3	3	5	7	8	5	5	
12	11	5	3	2	3	5	6	5	5	6	7	5		
13	9	2	3	4	5	7	9	10	10	10				
14	9	9	9	9	8	7	7	5	3	3				
15	11	5	5	3	3	3	2	2	3	6	7	7		
16	11	6	6	6	6	7	8	7	5	5	2	1		
17	11	3	3	2	3	4	4	4	4	4	4	4		
18	11	3	7	5	5	4	4	6	6	5	6	6		
19	10	4	7	7	3	4	6	6	6	6	5			
20	9	3	5	5	5	7	8	10	9	7				
...										

In Tabelle 3.7 finden sich die ersten 20 Episoden des insgesamt mehr als 3200 Episoden umfassenden Pools, aus dem die neuen Zeitreihen zusammengesetzt wird. Beispielsweise hat Episode # 13 eine Länge von 9 Tagen. Sie beginnt mit einem Tag der Klasse 2 (die Definition der Klassengrenzen ist in Tab. 3.2 ersichtlich), gefolgt von je einem Tag der Klassen, 3, 4, 5, 7 und 9 und endet mit drei Tagen der Klasse 10. Es handelt sich in der Tab. 3.7 um Episoden mit fester Länge zwischen 8 und 13 Tagen, wie oben geschildert, die die ersten rund 650 Bestandteile des Pools (Teil I) bilden. Ihnen folgen rund 650 Episoden, die von Nulldurchgängen der Grundgröße begrenzt sind (Teil II). Im Anschluss finden sich rund 650 Episoden, die sich an einem um 1° nach oben verschobenen Nulldurchgangsniveau orientieren (Teil III); im Anschluss folgen 550 Episoden mit einer Verschiebung des Nulldurchgangs um 2° (Teil IV), knapp 400 mit einer 3° -Verschiebung (Teil V), rund 200 mit einer 4° -Verschiebung (Teil VI) und etwa 150 mit einer 5° -Verschiebung (Teil VII).

Für eine Dekade in einer Beispielsregion sei die vorgegebene Häufigkeitsverteilung HV_v der 12 Wetterlagenklassen k im Sommer für die Dekade 2091/2100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,5	0,0	0,0	2,5	3,5	7,5	15,9	12,6	11,4	12,8	10,2	22,9

Diese Verteilung ist durch die Wahl von Episoden aus dem Pool möglichst gut zu approximieren. Die erste Episode E_1 im Pool ist 10 Tage lang (vgl. erste Zeile in Tab. 3.7)

8	9	9	9	8	6	6	4	4	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Die zugehörige, auf 100 normierte Häufigkeitsverteilung der ersten Episode HV_{E_1} für die k Wetterlagenklassen ist.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,0	0,0	0,0	30,0	0,0	20,0	0,0	20,0	30,0	0,0	0,0	0,0

Das Anpassungsmaß A errechnet sich für die n -te Episode aus den k Klassen

$$A = \sum_{k=1}^{12} [HV_v(k) - HV_{E_n}(k)]^2 \quad (3.1)$$

Im oben aufgeführten Beispiel hat A einen Wert von 2372,8, m.a.W. die Anpassung ist sehr schlecht. In Tab. 3.8 ist ersichtlich, auf welchem Wege die Selektion einer Episode zu Stande kommt: Nacheinander wird A für alle 3200 Kandidaten-Episoden des Pools bestimmt und diejenige ausgewählt, bei der das Anpassungsmaß ein Minimum besitzt. Im Beispiel ist dies bei der Episode 595 der Fall. Mit ihr beginnt die synthetisierte Zeitreihe.

Nun kann die zweite Episode bestimmt werden; damit die Variabilität des Klimas in den synthetisierten Zeitreihen gut repräsentiert ist, wird verhindert, dass diese Anschluss-Episode identische mit der voran gegangenen ist⁷⁾. Der Häufigkeitsverteilung jeder Kandidaten-Episode wird dazu diejenige der selektierten ersten Episode hinzugefügt. Diese Kombination aus den beiden Verteilungen wird durch Berechnung des Anpassungsmaßes A mit der Vorgabe verglichen. Somit wird diejenige Episode identifiziert, bei der die Anpassung gemeinsam mit der bereits gefundenen ersten Episode am besten ist. Sie setzt die synthetisierte Zeitreihe fort, es sei denn (s.o.), die gefundene Anschluss-Episode ist identisch mit der vorher gehenden.

Nach diesem Prinzip fährt die Reihensynthese fort, weitere Episoden zu identifizieren. Diese sollen, in Kombination mit den bereits gefundenen, eine möglichst gute Anpassung der Häufigkeiten der Klassen an die Vorgabe der jeweiligen Dekade besitzen.

Wichtig ist es hier anzumerken, dass die Reihenkonstruktion nicht, wie hier im Beispiel, mit der Optimierung beginnt, sondern mit der Wahl eines zufälligen Abschnittes. Nur so ist die Konstruktion von 10 unabhängigen Reihen möglich.

⁷⁾Es sollen aber nur Serien der selben Episode unterbunden werden. Im weiteren Reihenverlauf ist es deshalb zugelassen, dass bereits verwendete Episoden erneut zum Einsatz kommt.

3.3 Spezifika der Reihenkonstruktion

Tabelle 3.8: Erster Arbeitsschritt des Wettergenerators. Auszug aus der Bestimmung der ersten Episode der synthetisierten Zeitreihe. Die erste Zeile enthält die vorgegebene Häufigkeitsverteilung für die Dekade 2091–2100. In den Folgezeilen ist für die ersten fünf Episoden des Pools (vgl. Tab. 3.7) sowie ausgewählte weitere Episoden die relative Häufigkeit der Klassen und darunter die Differenz Δ zur Vorgabe aufgeführt. Ziel ist die Minimierung der Einträge in der Δ -Zeile. Am Ende der Differenzen-Zeile findet sich jeweils fettgedruckt das mit Formel 3.1 errechnete Anpassungsmaß A .

<i>Bez.</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	<i>A</i>
Vorgabe	1,5	0,0	0,0	2,5	3,5	7,5	15,9	12,6	11,4	12,8	10,2	22,9	
Episode 1	0,0	0,0	0,0	30,0	0,0	20,0	0,0	20,0	30,0	0,0	0,0	0,0	
Δ	1,5	0,0	0,0	27,5	3,5	12,5	15,9	7,4	18,6	12,8	10,2	22,9	2372,8
Episode 2	23,1	23,1	38,5	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Δ	21,6	23,1	38,5	12,9	3,5	7,5	15,9	12,6	11,4	12,8	10,2	22,9	4209,9
Episode 3	22,2	0,0	22,2	22,2	22,2	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Δ	20,7	0,0	22,2	19,7	18,7	3,6	15,9	12,6	11,4	12,8	10,2	22,9	3005,9
Episode 4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,4	22,2	33,3	0,0	0,0	0,0	
Δ	1,5	0,0	0,0	2,5	3,5	7,5	28,5	9,6	21,9	12,8	10,2	22,9	2253,3
Episode 5	10,0	20,0	10,0	40,0	10,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Δ	8,5	20,0	10,0	37,5	6,5	7,5	5,9	12,6	11,4	12,8	10,2	22,9	3192,8
...													
Episode 8	0,0	0,0	0,0	10,0	20,0	20,0	10,0	20,0	10,0	10,0	0,0	0,0	
Δ	1,5	0,0	0,0	7,5	16,5	12,5	5,9	7,4	1,4	2,8	10,2	22,9	1214,8
...													
Episode 272	0,0	0,0	0,0	7,7	7,7	7,7	23,1	7,7	15,4	15,4	7,7	7,7	
Δ	1,5	0,0	0,0	5,5	4,5	0,2	7,2	4,9	4,0	2,6	2,5	15,2	388,7
...													
Episode 595	0,0	0,0	0,0	0,0	9,1	9,1	18,2	9,1	18,2	0,0	18,2	18,2	
Δ	1,5	0,0	0,0	2,5	5,6	1,6	2,3	3,5	6,8	12,8	8,0	4,7	356,1

Die Anpassungsgüte, wie in der Prinzipskizze Abb. 3.3 erkennbar, hat über die nach und nach hinzukommenden Episoden, aus denen die Reihe geformt wird, einen genähert U-förmigen Verlauf. Es gibt darin drei Phasen

1. *Einschwingen* – Die ersten Episoden werden zum Einbau in die Zeitreihe akzeptiert, auch wenn sie keine sehr gute Anpassung besitzen. Im konkreten Fall einer stark von der Form der Gaußkurve abweichenden vorgegebenen Häufigkeitsverteilung (erste Zeile in Tab. 3.8), wie sie für die Klimaverhältnisse im späten 21. Jahrhundert erwartet werden kann, ist es sehr schwierig, die Vorgabe durch Einzelepisoden zu realisieren. Das “Ansammeln” von mehr und mehr Einzelepisoden verbessert die Situation deutlich.
2. *Optimum* – Die Anpassung wird mit zunehmender Zahl von Episoden, aus denen sich die synthetisierte Reihe aufbaut zunächst besser. Sie erreicht nach einigen Syntheseschritten ein Optimum/Minimum.
3. *Reihenkomplettierung* – Mit weiter zunehmender Zahl der Episoden in der synthetisierten Zeitreihe nimmt die Anpassungsgüte wieder ab, d.h. A wird größer. Dies liegt zum Teil an der Zusatzregel, dass aus Gründen der physikalischen Konsistenz keine Serien identischer Episoden auftreten sollen. Außerdem sind die Episoden mit 8 und mehr Tagen relativ lang. Als Konsequenz tritt der folgende Effekt auf: Auch solche Episoden mit starken Anomalien zum Jahresgang, d.h. gut ausgeprägter Besetzung der Klassen 9...12, verfügen häufig neben diesen für die Anpassung an die Vorgabe “förderlichen” Eigenschaften über Tage, an denen geringere Anomalien auftraten, was die Anpassung verschlechtert.

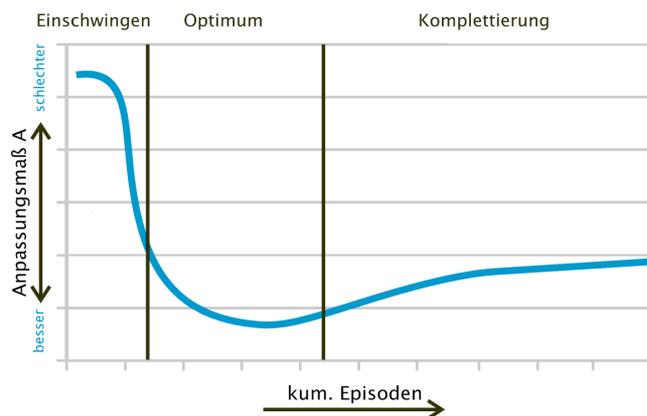


Abbildung 3.3: Veränderung des Anpassungsmaßes A bei fortschreitender Reihensynthese.

Es sei an dieser Stelle auf die am Anfang dieses Kapitels angesprochene Problematik der Anpassungsgüte eingegangen: Die Verteilung ist degeneriert, d.h. nicht Gauß-verteilt. Der wichtigste Grund dafür liegt in der Form der anzupassenden Verteilung: Die große Häufigkeit der Klasse 12 kann nicht adäquat durch die Episoden repräsentiert werden. Wie oben erwähnt, stehen nur wenige Episoden mit dieser stark geforderten Klasse zur Verfügung. In Tab. 3.9 sind Beispiele

3.3 Spezifika der Reihenkonstruktion

aus Teil I (Episoden mit einer Länge von 8–13 Tagen) und II (Episoden, die durch Nulldurchgange begrenzt sind) des Pools aufgeführt.

Tabelle 3.9: Beispiele für Episoden des Pools, die die Klasse 12 enthalten.

Nr.	Länge [Tage]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
272	13	8	9	9	11	12	10	10	7	7	7	5	4	6
394	11	2	1	10	11	12	11	9	7	5	5	6		
420	10	11	12	12	12	11	7	8	7	6	6			
432	10	9	9	10	11	12	11	9	8	8	8			
502	10	10	11	12	11	9	8	8	10	9	7			
541	13	6	8	10	11	12	12	12	11	7	4	4	6	6
595	11	2	5	6	8	9	9	11	12	12	11	7	7	
609	9	11	12	12	12	12	12	12	12	11				
633	11	9	10	11	12	11	9	9	10	11	10	9		
1056	13	4	5	6	10	11	12	12	12	11	7	8	7	6
1184	11	5	6	8	10	11	12	12	12	11	7	4		

Bei der vom Wettergenerator gebildete Beispielsimulation besteht aus insgesamt 65 Episoden. Dabei wurden aus dem Pool die Episoden 420, 432 (zweimal) und 595 (fünfmal) als besonders „förderlich“ zur Anpassung an die Vorgabe selektiert.

Wie oben beschrieben, besteht der Pool aus mehreren Teilen, wovon der erste (lfd. Nr. 1 bis 650) Episoden mit einer Länge zwischen 8 und 13 Tagen enthält. In der Beispielzeitreihe entstammt die Hälfte aller Episoden diesem Teil I⁸⁾. In einem Experiment wurde untersucht, ob es einen Einfluss der Periodenlänge auf die mit A berechnete Anpassungsgüte gibt. Dazu wurden dem Wettergenerator nur Episoden aus Teil II (vgl. S. 25) des Pools zugänglich gemacht. Diese sind im Mittel länger als die Episoden in anderen Teilen des Pools. Es zeigte sich, dass die Anpassungsgüte A am Ende der Reihensynthese deutlich schlechter war als bei Verwendung des vollständigen Pools.

Ein weiteres Detail der Reihenkonstruktion hat geringen Einfluss auf die Anpassungsqualität: Wie in Abschnitt 3.2.3 angesprochen, gilt es zu verhindern, oder zumindest das Risiko zu minimieren, dass die Simulationen identisch sind. Dazu wird jede n -te Episode⁹⁾ zufällig, d.h. ohne Test auf Anpassungskriterien (jedoch mit Test auf Anschlusskriterien, wie z.B. Temperatursprung) eingefügt.

Die jahreszeitenspezifische Änderung des Anpassungsmaßes A für die 14 Dekaden 1961/1970 bis 2091/2100 (die ersten vier Dekaden verwenden die Häufigkeitsverteilung der 12 Klassen im 20C-Lauf, die nachfolgenden Dekaden verwenden das A1B-Szenario von ECHAM 5 Lauf 1) sind für eine Beispielregion (Nordwesten) in Abb.3.4 wiedergegeben. Hier ist erkennbar, dass die vom Wettergenerator

⁸⁾Es ist interessant zu bemerken, dass auch solche Episoden selektiert wurden, die die Klasse 12 nicht enthalten, obwohl dies bei der Berechnung von A stark „bestraft“ wird.

⁹⁾ n ist eine empirische Größe kleiner als 10

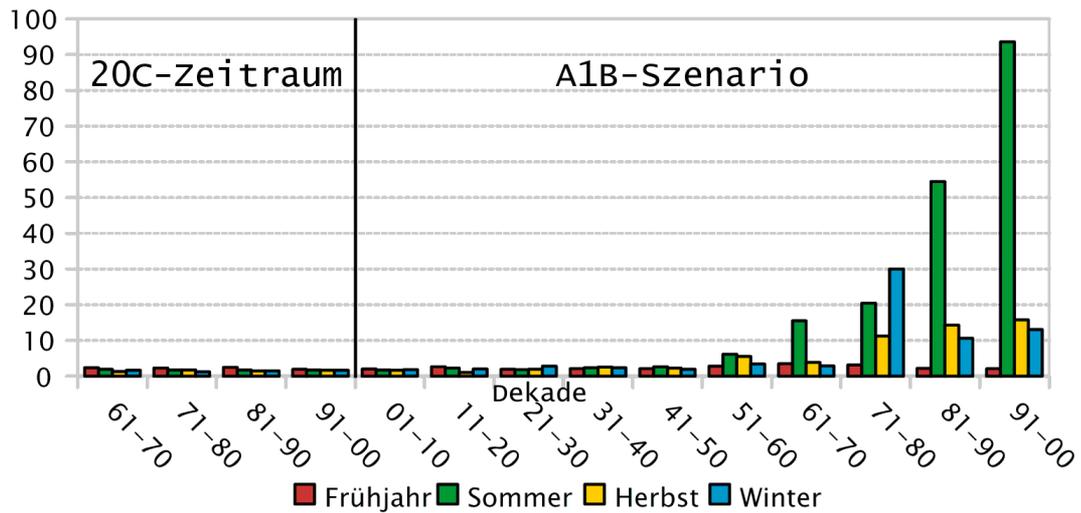


Abbildung 3.4: Zeitliche Veränderung des Anpassungsmaßes A für die vier Jahreszeiten.

synthetisierten Zeitreihen bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts das wichtigste steuernde Kriterium sehr gut erfüllen können: Die Häufigkeitsverteilung der Temperaturanomalie-Klassen in den selektierten Episoden entspricht der Vorgabe durch die Szenarios des großräumigen Klimamodells. Im weiteren Zeitverlauf zeigt sich, dass diese Anpassung, saisonal unterschiedlich, in ihrer Güte nachlässt. Im Sommer und in den letzten Dekaden des Szenarios für das 21. Jahrhundert tritt dies deutlich hervor.

Fazit: Die Verwendung von Transwetterlagen hat die Notwendigkeit unterstrichen, den Prozess der Anpassung an die Häufigkeitsverteilung stärker zu beachten. Eine Verbesserung der Anpassungsgüte ist durch die Verwendung von alternativ definierten Episoden möglich – allerdings kann bei stark degenerierenden Verteilungen auf diese Weise keine perfekte Anpassung erzielt werden.

Abschnitt 4

Ergebnisse und Diskussion

4.1 Transwetter in der Gegenwart?

Wie in Tab. 3.3–3.6 erkennbar, häufen sich die Tage, an denen Transwetterlagen auftreten zwar zum Ende des Jahrhunderts; es gibt aber durchaus bereits in der vom 20C-Lauf simulierten Gegenwart Tage, an denen solche Lagen in Erscheinung treten. Der Anteil liegt für die Klasse 11 bei bis zu 3%.

Die Klassen 11 und 12 entstehen als extreme Ausprägung der zehnten Klasse. Ihnen wird die Signatur der Differenz zwischen den Feldern der Klassen 9 und 10 aufgeprägt. Die Musterwiedererkennung wird auf das gegenwärtige Klima angewandt. Dazu werden nicht die in der Gegenwart geformten 10 sondern die 12 des um die TWL erweiterten Bestands bei der Ähnlichkeitsuntersuchung angeboten. Es zeigt sich, dass einzelne Tage, die bisher der Klasse 10 zugeordnet waren, allein auf Grund der auftretenden atmosphärischen Muster den TWL 11 bzw. 12 angehören könnten.

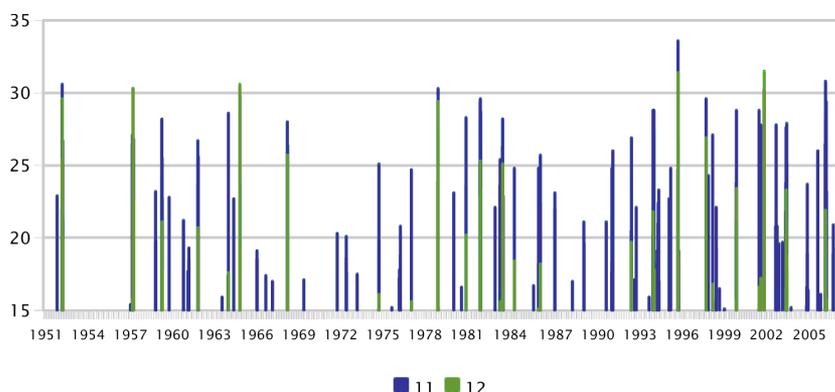


Abbildung 4.1: Auftreten von Fällen in Sommermonaten, an denen die prozentuale Zuordnung von TWL 11 und 12 über 15% liegt. Region: Hessen.

In den folgenden Unterabschnitten werden exemplarisch drei Sommer-Fälle vorgestellt – es gibt aber in allen Jahreszeiten des untersuchten Klimazeitraums 1951–2007 (vgl. Kap. 2.3) Abschnitte, in denen die objektive Wiedererkennung einzelnen Tagen TWL zuordnet (s. Abb. 4.1). Auch wenn die Zuordnung jedes Ta-

ges dezidiert zu einer Klasse erfolgt (jeweils vierte Spalte in den Tabellen 4.1–4.3), so ist eine Zugehörigkeit zu anderen, benachbarten Klassen nicht ausgeschlossen. Vielmehr tritt häufig der Fall auf, dass die Marge zur nächstniedrigeren prozentualen Zugehörigkeit klein ist. In den Tabellen sind die relativen Zugehörigkeiten der vorgestellten Tage zu allen 12 Klassen angegeben. Weitere Mittel zur Illustration der jeweiligen Wettersituation sind die registrierten Tageshöchst-, -mittel und -tiefstwerte der Temperatur an drei Stationen sowie die synoptische Situation – hier wurden das Geopotenzial und die Temperatur in 850 hPa verwendet.

Anmerkung: Es ist anschaulicher, für die Episoden die Temperatur selbst zu beschreiben – Basis der Analyse sind jedoch die weniger anschaulichen Klassen der *Abweichung* der Temperatur vom Jahresgang (Anomalie).

4.1.1 Beispiel 1: Sommer 1952

Ende Juni/Anfang Juli 1952 gab es eine längere Folge von Tagen mit besonders hoher Temperatur. Tabelle 4.1 zeigt eine rasche Entwicklung von der relativ kalten Klasse 3 am 24.6. zu einem Plateau um Klasse 10 herum zwischen 30.6. und 6.7.1952 zurück zu normal warmen Klassen ab dem 9.7.1952. An mehreren Tagen liegt die prozentuale Zugehörigkeit bei der konkret zugeordnete Klasse nur um 2 Prozentpunkte oder weniger oberhalb der nächstfolgenden Klasse – es handelt sich also um „knappe Entscheidungen“.

Der Charakter der Temperaturentwicklung findet sich in Abb. 4.2. Die Station Hamburg-Fuhlsbüttel zeigt, insbesondere bei Maximum- und Mitteltemperatur, die höchsten Werte am 2.7., dem Tag, an dem die Klassen 11 und 12 nahezu gleich hohe prozentuale Zugehörigkeiten aufwiesen. Am 3. und 4.7. erfolgt ein deutlicher Temperaturrückgang sowie eine Klassenzuordnung bei 9 und 10 mit klarem Rückgang der prozentualen Zugehörigkeit der Klassen 11 und 12. An den Folgetagen wird kurzzeitig erneut eine erhöhte Zugehörigkeit im Bereich 10 bis 12 mit nachfolgendem Rückgang gefunden.

Die Synoptische Situation (Abb. 4.3) zeigt Deutschland in den ersten Tagen noch in einer kühlen nordwestlichen Strömung. Nach dem 27.6. erreicht ein intensiver Hochkeil rasch die Region und ermöglicht einen Vorstoß extrem warmer Luft (mehr als 30°C in 850 hPa über dem östlichen Mittelmeer!) nach Mitteleuropa, der am 2.7. seinen Höhepunkt erreicht.

4.1 Transwetter in der Gegenwart?

Tabelle 4.1: Prozentuale Zugehörigkeit der Tage zu den Zirkulationsmustern 1–10 und den zwei Transwetterlagen 11 und 12 für den Zeitraum 24. Juni–10. Juli 1952. Die Klasse mit dem höchsten Zugehörigkeitswert ist fett gekennzeichnet.

<i>Jahr</i>	<i>Monat</i>	<i>Tag</i>	<i>Muster</i>	<i>Kürzel</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
1952	6	24	3	seKa	12,9	22,7	23,8	19,4	11,3	6,3	2,5	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0
1952	6	25	5	Nor-	1,1	5,5	12,8	20,3	21,7	19,8	11,2	5,5	1,9	0,2	0,0	0,0
1952	6	26	6	Norm	0,1	1,6	6,9	16,7	23,1	26,1	15,3	7,5	2,4	0,3	0,0	0,0
1952	6	27	6	Norm	0,0	0,2	2,2	8,1	19,0	28,5	23,4	13,4	4,7	0,5	0,0	0,0
1952	6	28	7	Nor+	0,0	0,0	0,4	2,6	10,5	23,7	30,1	22,6	9,0	1,1	0,0	0,0
1952	6	29	8	Warm	0,0	0,0	0,1	0,6	2,8	8,8	17,9	28,3	25,9	11,9	3,2	0,5
1952	6	30	10	exWa	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	2,1	5,1	11,6	19,4	28,8	22,0	10,2
1952	7	1	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	1,3	3,1	6,8	11,5	21,9	29,5	25,4
1952	7	2	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	1,0	2,6	5,5	10,0	20,3	30,6	29,6
1952	7	3	9	seWA	0,0	0,0	0,1	1,2	4,1	10,8	16,9	19,0	21,0	16,4	8,0	2,3
1952	7	4	10	exWa	0,0	0,0	0,0	0,2	0,9	3,0	6,6	12,1	18,3	25,7	21,6	11,5
1952	7	5	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	2,1	4,7	9,2	13,3	23,0	26,7	20,1
1952	7	6	10	exWa	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	3,0	6,7	13,5	17,8	24,2	21,2	12,4
1952	7	7	8	Warm	0,0	0,0	0,1	1,0	4,0	11,3	20,7	27,4	21,4	10,8	3,0	0,4
1952	7	8	8	Warm	0,0	0,0	0,1	1,2	5,1	14,6	24,8	27,4	18,7	6,8	1,3	0,1
1952	7	9	6	Norm	0,0	0,1	1,4	6,6	20,1	27,9	27,0	2,3	4,1	0,5	0,0	0,0
1952	7	10	6	Norm	0,0	0,4	3,4	11,3	27,8	28,5	19,1	6,9	2,3	0,2	0,0	0,0

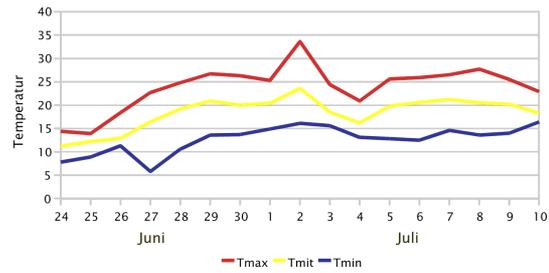


Abbildung 4.2: Verlauf von Tagesmaximum, Tagesmittel und Tagesminimum im Zeitraum 24.6.–10.7.1952 an der Station Hamburg-Fuhlsbüttel.

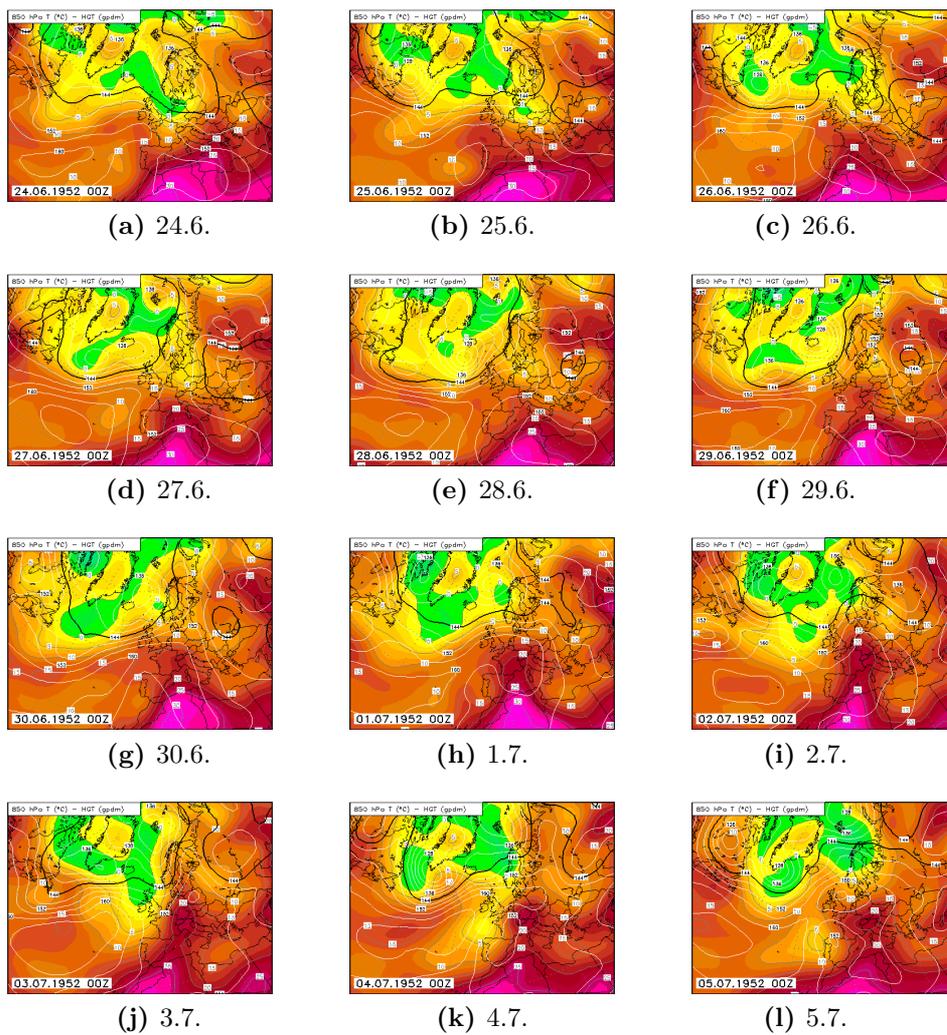


Abbildung 4.3: Verlauf des Geopotenzials (weiße Linien) und der Temperatur (farbige Flächen) im 850 hPa-Niveau (NCEP-Reanalysen). Zeitraum: 24.6.–5.7.1952. Quelle: www.wetterzentrale.de.

4.1 Transwetter in der Gegenwart?

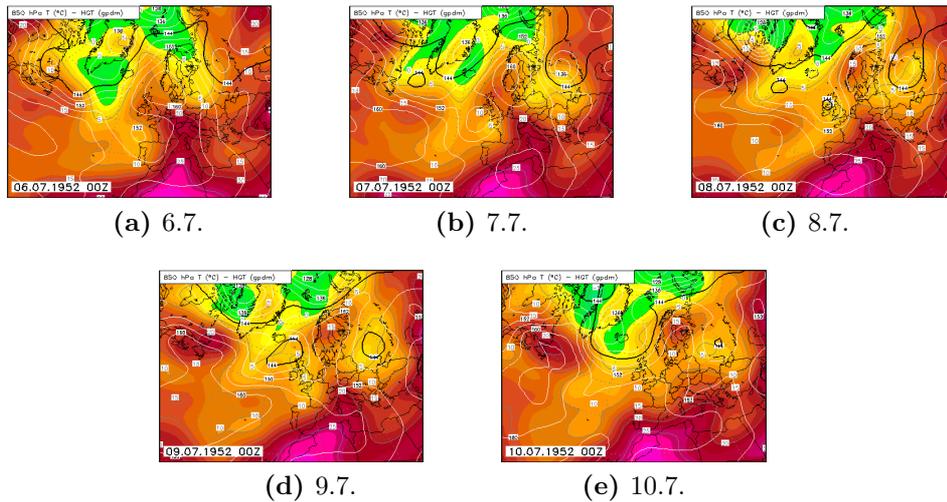


Abbildung 4.4: Fortsetzung von Abb. 4.3 für die Zeit vom 6.–10.7.1952.

4.1.2 Beispiel 2: Juni 2002

Beim Beispiel aus dem Sommer 2002 handelt es sich um eine im Vergleich zum Beispiel aus dem Jahr 1952 noch raschere, sehr intensive Erwärmung mit nachfolgender ebenso rascher Abkühlung. Tabelle 4.2 zeigt den Anfang dieser Episode im Bereich der moderat kalten Klassen. Am 17. und 18.6.2002 werden die beiden TWL 11 und 12 im objektiven Identifikationsverfahren gefunden. An beiden Tagen beträgt der Abstand zur höchsten „regulären“ Klasse über 10 Prozentpunkte – an diese beiden Tage herrschen also besonders deutlich die in den TWL definierten Atmosphärenbedingungen.

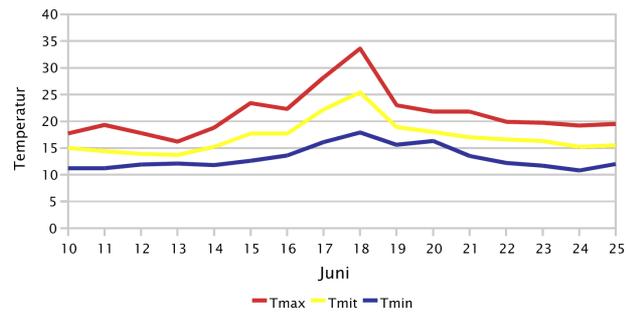
Der Verlauf von Tageshöchst-, -mittel und -tiefsttemperatur (Abb. 4.5) zeigt für alle drei ausgewählten Stationen einen deutlichen steilen Peak am 18.6. Das Temperaturniveau ist an den Stationen in Nordwest- und Nordostdeutschland ähnlich; in Wiesbaden beginnt es in einem ähnlichen Wertebereich, nimmt dann aber nach dem kurzen Höhepunkt nicht so klar ab.

Die synoptische Situation (Abb. 4.6) weist, anders als im Beispiel aus dem Jahr 1952, die für den Sommer sehr intensive Entwicklung einer Zyklone über der Irischen See auf. Bei gleichzeitiger Bewegung eines Hochkeils von Marokko über die Iberische Halbinsel und Frankreich nach Mitteleuropa entsteht ein intensiver, aber auch kurzlebiger Zustrom sehr warmer Luft. Nach dem 18.6.2002 dreht die Strömung zügig von südliche auf westliche Richtungen und die heiße Luft wird nach Osten abgedrängt.

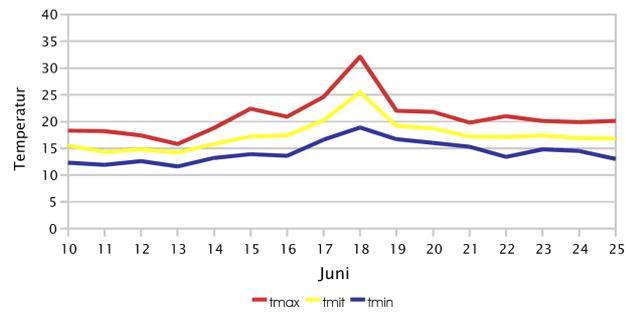
Tabelle 4.2: Wie Tab. 4.1, jedoch für den Zeitraum 10.–25. Juni 2002.

<i>Jahr</i>	<i>Monat</i>	<i>Tag</i>	<i>Muster</i>	<i>Kürzel</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
2002	6	10	4	Kalt	4,4	11,2	22,3	23,2	20,3	10,5	5,5	1,9	0,7	0,1	0,0	0,0
2002	6	11	4	Kalt	4,9	13,3	26,1	27,0	16,3	7,8	3,2	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0
2002	6	12	5	Nor-	0,3	2,3	8,2	20,7	25,7	25,2	11,9	4,3	1,4	0,1	0,0	0,0
2002	6	13	6	Norm	0,0	0,2	2,3	11,0	20,4	32,8	20,5	9,0	3,3	0,4	0,0	0,0
2002	6	14	8	Warm	0,0	0,0	0,2	1,7	5,3	15,3	20,4	23,9	18,5	10,7	3,5	0,6
2002	6	15	9	seWA	0,0	0,0	0,1	0,7	2,6	7,9	14,5	19,8	22,1	19,3	10,0	3,2
2002	6	16	9	seWA	0,0	0,0	0,1	0,7	2,7	8,4	14,3	20,8	20,9	18,7	10,0	3,3
2002	6	17	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	1,1	2,7	6,2	10,6	20,9	30,2	27,9
2002	6	18	12	euex	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,9	2,4	5,3	10,0	19,8	29,7	31,5
2002	6	19	9	seWA	0,0	0,0	0,1	0,6	2,3	6,5	12,0	16,7	21,5	21,0	13,6	5,8
2002	6	20	9	seWA	0,0	0,0	0,1	0,7	2,7	7,5	13,8	17,9	21,9	19,9	11,4	4,1
2002	6	21	7	Nor+	0,0	0,0	0,3	2,9	8,9	21,6	25,2	20,3	13,9	5,7	1,1	0,1
2002	6	22	7	Nor+	0,0	0,0	0,2	1,8	6,0	17,7	23,4	23,1	16,7	8,5	2,3	0,3
2002	6	23	6	Norm	0,0	0,0	0,4	4,1	10,9	25,6	25,2	17,8	10,9	4,3	0,7	0,0
2002	6	24	6	Norm	0,2	1,8	7,6	20,7	24,4	25,9	13,1	4,7	1,4	0,2	0,0	0,0
2002	6	25	4	Kalt	1,0	4,9	13,7	25,6	25,0	18,1	8,0	2,8	0,8	0,1	0,0	0,0

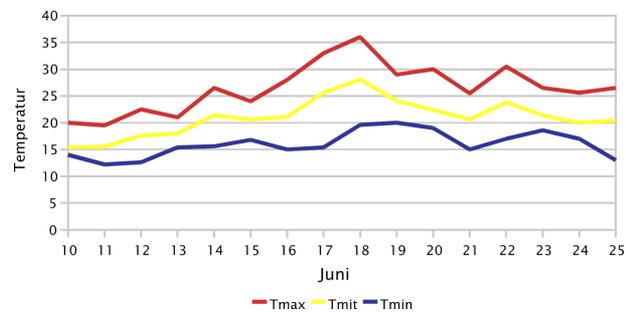
4.1 Transwetter in der Gegenwart?



(a) Hamburg



(b) Rostock



(c) Wiesbaden

Abbildung 4.5: Verlauf von Tagesmaximum, Tagesmittel und Tagesminimum im Zeitraum 10.–25.6.2002 an drei Klimastationen.

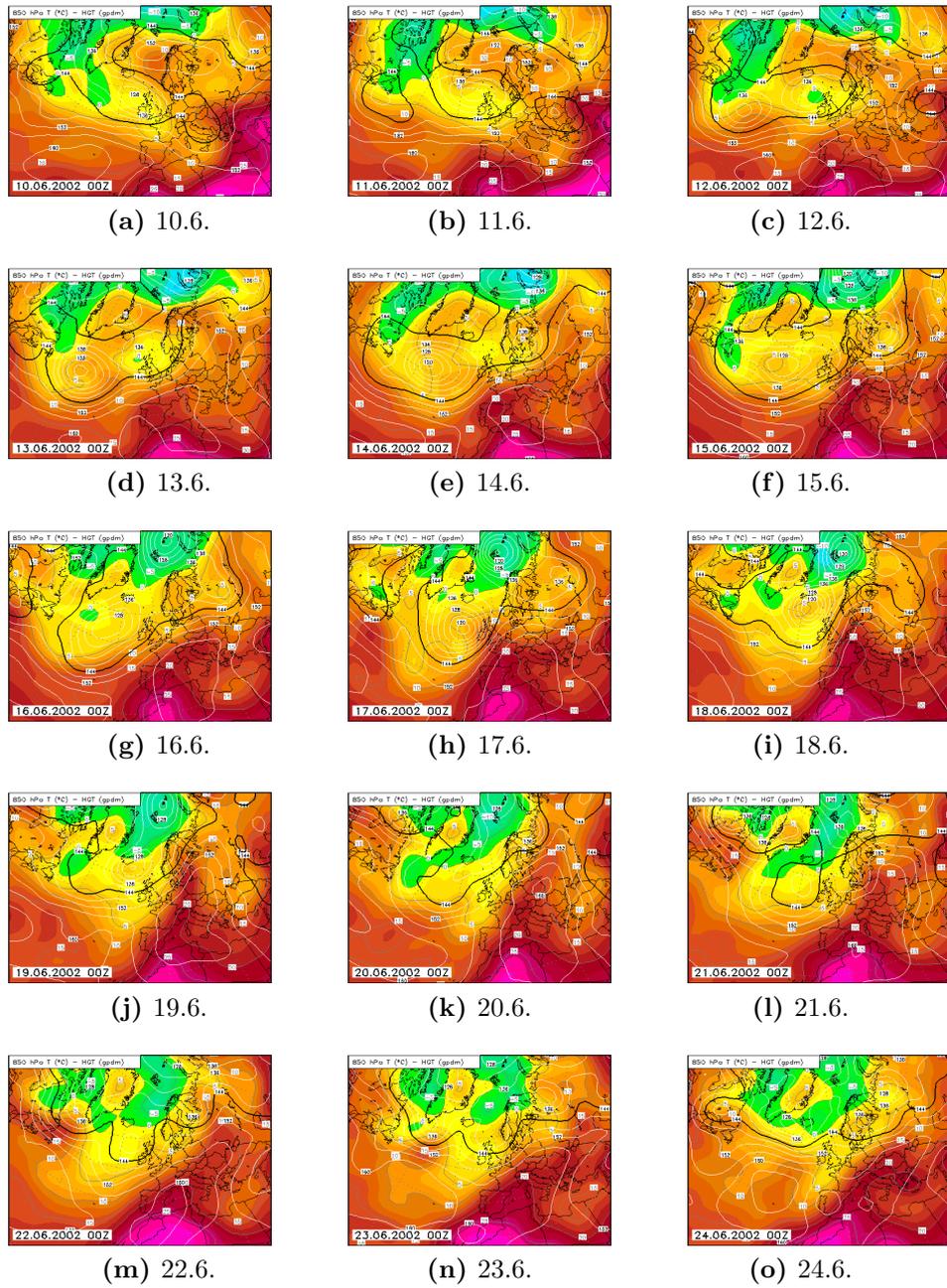


Abbildung 4.6: Wie Abb. 4.3. Zeitraum: 10.–24.6.2002.

4.1.3 Beispiel 3: August 2003

In diesem Beispiel wird die Hitzewelle beschrieben, die 2003 zahlreiche Opfer in Europa forderte. Wie in Tabelle 4.3 ersichtlich, beginnt diese Episode mit der Zuordnung zum „normalen“ Temperaturbereich. Die objektive Wiedererkennung findet ab dem 4. August die höchsten prozentualen Zugehörigkeiten zu den Klassen 10 oder 11. Im Kern der Episode (8.–10. August) sind zwar die Zugehörigkeiten zur TWL 11 am größten, aber es werden Zugehörigkeiten zur 12 von mehr als 20% verzeichnet. Nach dem 13.8.2003 wird der Bereich der TWL sehr rasch verlassen.

Der Temperaturverlauf an den drei Beispielstationen (Abb. 4.7) zeigt ein breites Plateau im Bereich hoher Werte. So wurde in Hamburg zwischen dem 7. und dem 13.8. jeden Tag ein Maximum über 30°C erreicht und in Wiesbaden verzeichnete jeder Tag zwischen dem 2. und 13.8. ein Maximum über 35°C (!). Das Kriterium für Tropennächte (Minimum 20° oder höher) wird in Wiesbaden zwischen dem 3. und dem 14.8. an nahezu jedem Tag erfüllt – in Hamburg sind nur die Nächte 2./3.8. und 12./13.8. nahe des Wertebereichs der Tropennacht. Der Höhepunkt der Hitzewelle ist an den Stationen Hamburg und Wiesbaden am 12.8.2003. Die Station Rostock weist in dieser Episode ein im Vergleich deutlich niedrigeres Temperaturniveau auf. Hier zeigt sich, dass die Hitzewelle von 2003 im Nordosten Deutschlands nicht so stark ausgeprägt war; die wärmsten Sommer treten in dieser Region in anderen Jahren auf.

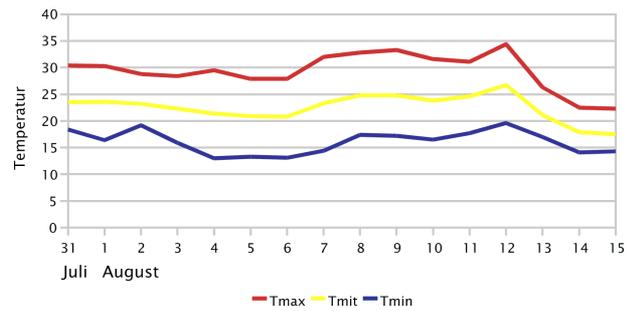
Die synoptische Situation (Abb. 4.8) zeigt am 31.7.2003 noch einen Rest polarer Meeresluft über Westeuropa. Der nachfolgende Vorstoß der tropischen Luftmasse erfolgt über die Iberische Halbinsel und Frankreich. Die 20°-Isotherme in 850 hPa (grobe Orientierung für einen Bereich, in dem im Flachland Tagesmaxima von 35°C übertroffen werden können) dehnt sich zum 5.8. von Frankreich bis nach West- und Süddeutschland aus und wird nach dem 14.8. durch den Zustrom kühlerer Luft nach Osten abgedrängt. Der Nordosten Deutschlands blieb dabei die ganze Zeit im Randbereich einer kühleren Luftmasse, die von Mittelskandinavien zum Baltikum reichte – daher wurden die starken Extreme im Nordosten auch nicht erreicht.

Fazit: Auch in der Gegenwart gibt es Einzelfälle, in denen sich Extreme, wie sie durch die TWL beschrieben werden sollen, wiederfinden. Aus ihnen lassen sich Charakteristika von Wetterereignissen, deren häufigeres Auftreten in der Zukunft vom ECHAM-Modell simuliert wird, abschätzen.

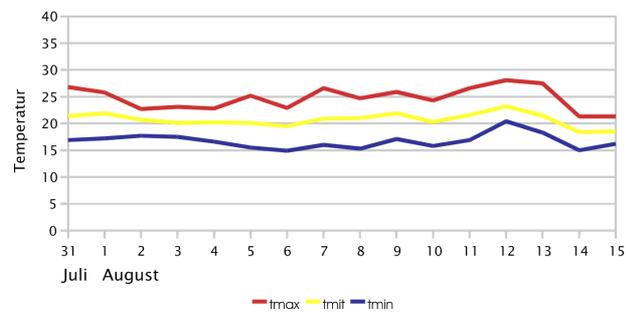
Tabelle 4.3: Wie Tab. 4.1, jedoch für den Zeitraum 31. Juli–15. August 2003.

<i>Jahr</i>	<i>Monat</i>	<i>Tag</i>	<i>Muster</i>	<i>Kürzel</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
2003	7	31	5	Nor-	0,1	1,2	6,6	13,6	25,9	21,4	18,4	8,8	3,6	0,4	0,0	0,0
2003	8	1	8	Warm	0,0	0,0	0,2	1,3	5,8	13,1	25,5	27,3	20,8	5,4	0,7	0,0
2003	8	2	8	Warm	0,0	0,0	0,1	1,0	4,3	12,8	23,3	27,1	21,8	7,9	1,5	0,1
2003	8	3	9	seWA	0,0	0,0	0,1	0,6	2,5	7,9	15,0	22,8	24,6	17,6	7,2	1,8
2003	8	4	10	exWa	0,0	0,0	0,0	0,3	1,1	3,6	7,6	14,5	19,9	25,1	18,9	9,1
2003	8	5	10	exWa	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	3,1	6,5	12,9	17,2	23,8	21,8	13,4
2003	8	6	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,2	0,8	2,4	5,4	11,4	16,0	23,5	23,8	16,5
2003	8	7	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	1,7	4,3	9,9	15,5	24,5	25,7	17,7
2003	8	8	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	1,4	3,7	8,5	14,0	24,0	27,6	20,2
2003	8	9	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	1,5	3,7	8,3	12,9	22,3	27,6	23,3
2003	8	10	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	1,7	4,0	8,8	13,6	23,0	27,0	21,2
2003	8	11	10	exWa	0,0	0,0	0,0	0,2	0,9	2,8	6,2	12,8	18,0	24,4	21,8	13,0
2003	8	12	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	1,5	3,7	8,3	14,3	25,0	27,9	18,8
2003	8	13	11	sexW	0,0	0,0	0,0	0,2	0,7	2,4	5,2	9,5	15,2	23,7	25,1	18,0
2003	8	14	7	Nor+	0,0	0,0	0,3	2,9	8,4	21,7	23,9	20,2	14,0	6,8	1,7	0,2
2003	8	15	5	Nor-	0,3	2,2	8,2	21,3	25,5	25,2	11,7	4,2	1,3	0,1	0,0	0,0

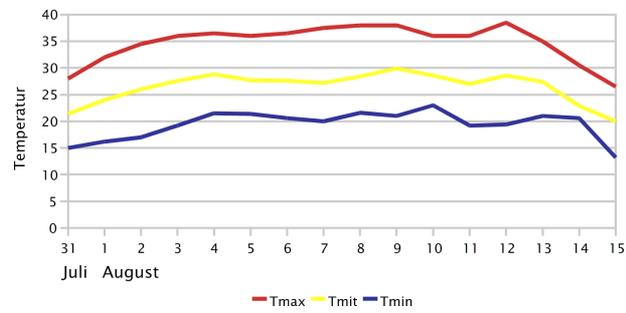
4.1 Transwetter in der Gegenwart?



(a) Hamburg



(b) Rostock



(c) Wiesbaden

Abbildung 4.7: Verlauf von Tagesmaximum, Tagesmittel und Tagesminimum im Zeitraum 31.7.–15.8.2003 an drei Klimastationen.

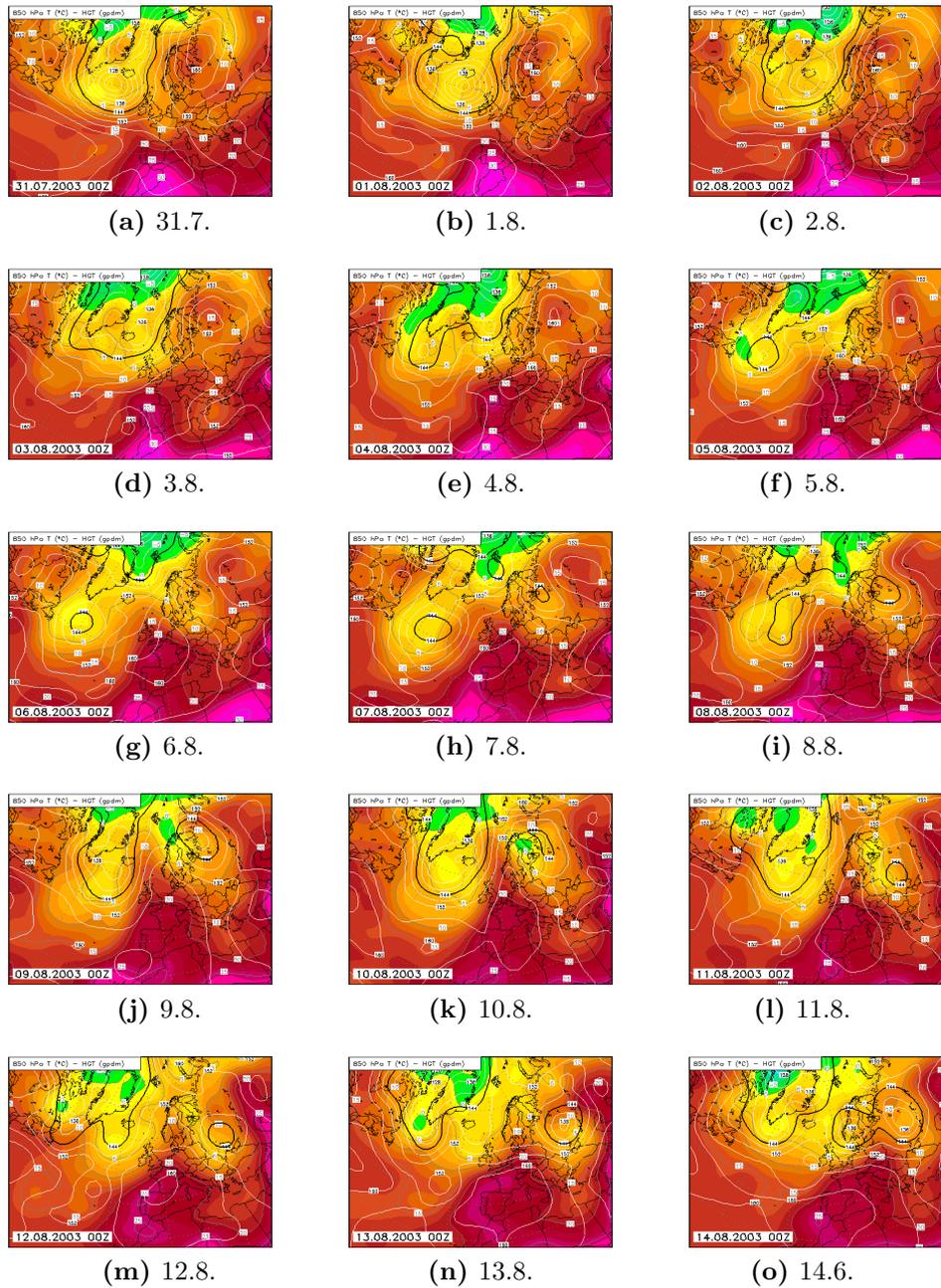


Abbildung 4.8: Wie Abb. 4.3. Zeitraum: 31.7.–14.8.2003.

4.1.4 TWL im Winter

Auch wenn die mit Transwetterlagen verbundenen Perioden im Sommer nachhaltiger in Erinnerung bleiben: In anderen Jahreszeiten sind mindestens ebenso starke positive Abweichungen vom Jahresgang anzutreffen. Zudem werden die TWL 11 und insbesondere 12 im Winter in den NCAR-Daten häufiger als beispielsweise im Sommer identifiziert.

4.1 Transwetter in der Gegenwart?

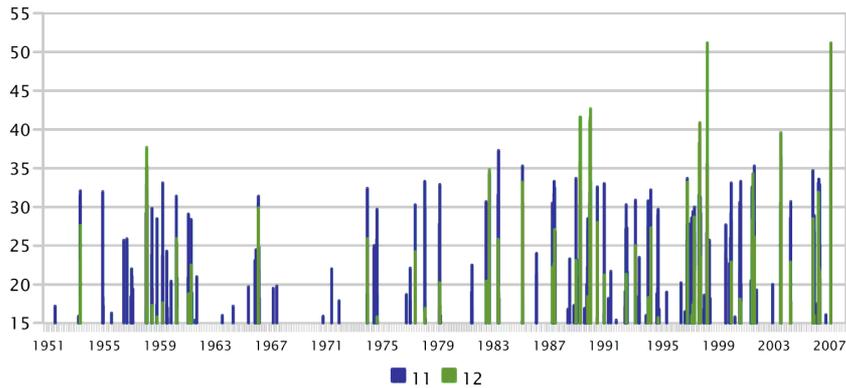


Abbildung 4.9: Auftreten von Fällern in Wintermonaten, an denen die prozentuale Zuordnung von TWL 11 und 12 über 15% liegt.

Wie Abb. 4.9 zeigt, ist das Besondere aber nicht nur die Häufigkeit, sondern die Stringenz, mit der TWL im Winter auftreten. Die prozentualen Zuordnungen erreichen im Sommer (vgl. Abb. 4.1) rund 30%, während im Winter 40 und auch 50% übertroffen werden.

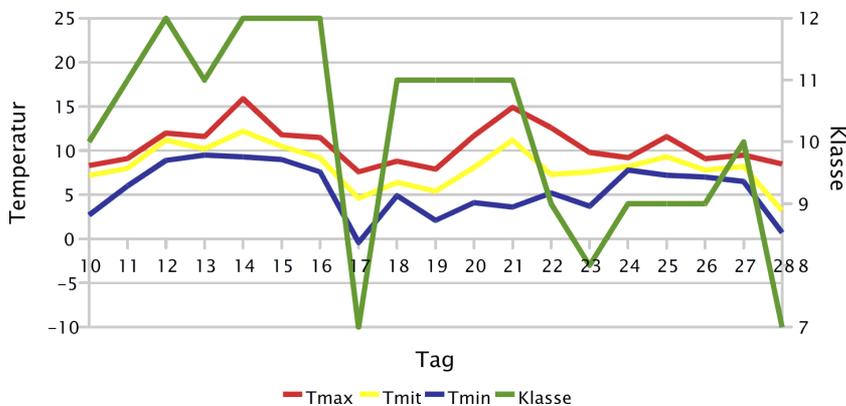


Abbildung 4.10: Verlauf von Tagesmaximum, Tagesmittel, Tagesminimum und zugeordneter Klasse im Zeitraum 10.–28.2.1998 an der Klimastation Hamburg.

Ein Beispiel aus dem Februar 1998 – Abb. 4.10 – soll dies illustrieren. Zu dieser Zeit ist an der Beispielstation der Jahresgang-bereinigte Wert der Mitteltemperatur bei rund 0° , d.h. die Anomalie hat also eine Größenordnung von $+10^\circ$ (!), derartig starke Abweichungen vom Jahresgang treten in Sommermonaten nicht auf. Es ist erkennbar, dass die höchsten Temperaturwerte mit den TWL-Klassen 11 und 12 assoziiert sind – auch der Rückgang der Temperatur und das kurzzeitige „Einbrechen“ auf Klasse 7 am 17.2.1998 sind im Zeitverlauf gut erkennbar.

4.2 Temperatursignale bei der Verwendung von Transwetterlagen

Unter Verwendung der WETTREG-Version, in der TWL berücksichtigt werden, erfolgten transiente Simulationen. Diese wurden angetrieben mit ECHAM 5-Daten – 20C, Lauf 1 für den Zeitraum 1971–2000 und Szenario A1B, Lauf 1 für den Zeitraum 2001–2100. In den Graphen sind zeitliche Verläufe dargestellt. Die Größe ist das Jahres- resp. Jahreszeitenmittel der Temperatur. Das Modell ECHAM 5 wurde auf verschiedene Weise benutzt, um eine Abschätzung der Temperatursignale vorzunehmen. Es gibt nachfolgend drei Arten von Abbildungen:

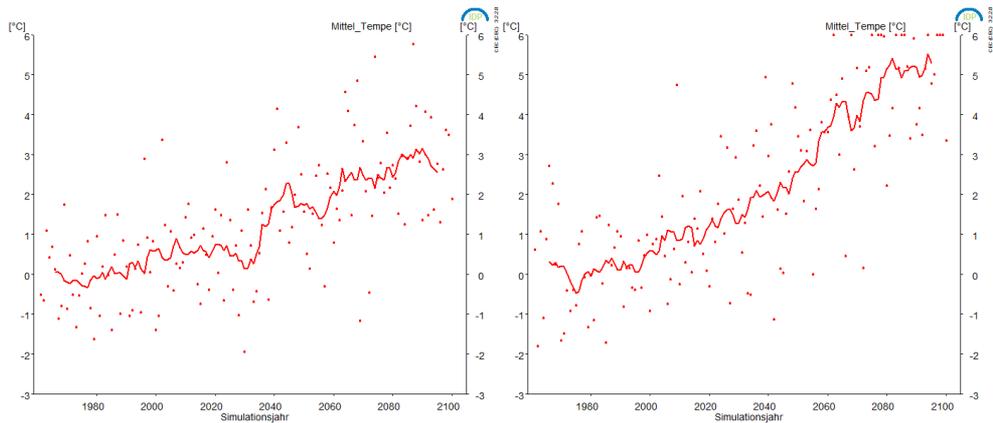
1. Temperaturanomalie (relativ zu 1971–2000) pro Jahr (nach Saison und als Jahresmittel) für einen Gitterpunkt von ECHAM 5, über der Mitte Deutschlands (→ Abb. 4.11).
2. Temperaturentwicklung (Anomalie zu 1971–2000) in den Jahreszeiten und als Jahresmittel aus den Häufigkeitsverteilung der Zirkulationsmuster in ECHAM 5 – da jedem Muster ein Temperaturintervall zugeordnet ist, errechnet sich die Temperatur als gewichtetes Mittel unter Verwendung der mittleren Temperatur und der Häufigkeit jedes Musters (→ Abb. 4.12).
3. Temperaturanomalie (relativ zu 1971–2000) pro Jahr (nach Saison und als Jahresmittel) für transiente und TWL berücksichtigende Simulation der Mitteltemperatur für Regionen in Deutschland mit der WETTREG-Methode, angetrieben von ECHAM 5-Daten (→ Abb. 4.13).

Anmerkung: Die in Punkt 1 der Aufstellung und als Basis für Abb. 4.11 verwendeten Gitterpunktdaten von ECHAM 5 dienen der groben Orientierung, welche Stärke des Temperatursignals direkt vom großräumigen Klimamodell produziert wird. Sie können nicht als Regionalaussage Verwendung finden.

Für Abb. 4.11 wurden ECHAM 5 T63 L31-Daten des Szenarios A1B direkt verwendet. Die Simulationsläufe erzeugen eine Vielzahl von atmosphärischen Größen, darunter auch die Temperatur in 2m Höhe. Es geht in diesem Beispiel lediglich um die Illustration des Trends; dazu wurden die Temperaturwerte an einem Gitterpunkt, der etwa in der Mitte Deutschlands liegt betrachtet. In den geglätteten (durchgezogenen) Kurven ersichtlich, treten am gewählten ECHAM 5-Gitterpunkt Temperatursignale zwischen 1971–2000 und 2071–2100 im Frühjahr von rund $+3^{\circ}\text{C}$ und im Sommer von rund $+5^{\circ}\text{C}$ auf, was etwas über den Signalstärken liegt, die durch die simple Häufigkeitsbetrachtung der Temperatur-verbundenen Zirkulationsmuster (s. Abb. 4.12) bestimmt wurden.

In Abb. 4.12 erfolgte die Aufbereitung der Daten auf diese Weise: In der Gegenwart wurden Zirkulationsmuster erstellt, die bestimmten Temperaturintervallen entsprechen. In den täglichen Realisierungen des ECHAM 5-Szenarios A1B Lauf 1 wurden die in der Gegenwart ermittelten Zirkulationsmuster mit einem objektiven, auf Ähnlichkeitsmaßen beruhenden Verfahren wiedererkannt und die Häufigkeitsverteilung der Muster wurde für jede Dekade bestimmt.

4.2 Temperatursignale bei der Verwendung von Transwetterlagen



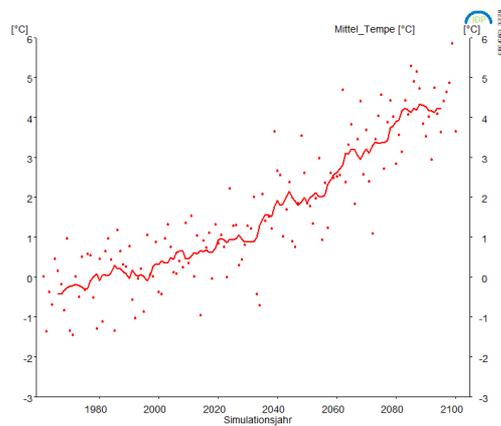
(a) Frühjahr

(b) Sommer



(c) Herbst

(d) Winter



(e) Jahr

Abbildung 4.11: Temperaturverlauf von 1961 bis 2100 in den einzelnen Jahreszeiten und dem Jahr, aus simulierten ECHAM 5-Daten am Gitterpunkt 15.22 in der Mitte Deutschlands. Die Werte sind als Abweichung vom Mittel 1971–2000 dargestellt. Quelle: 1961–2000: ECHAM 5 20C-Daten. 2001–2100: ECHAM 5 Szenario A1B. Die durchgezogene Kurve ist das gleitende 11-Punkte-Mittel.

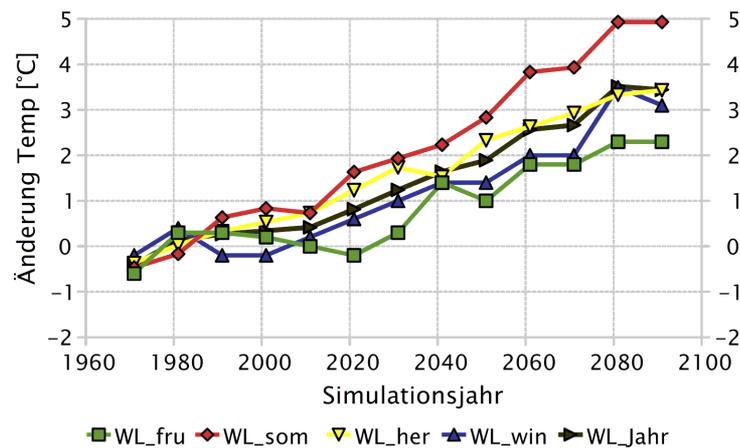


Abbildung 4.12: Temperaturverlauf von 1971–2100 in den einzelnen Jahreszeiten und für das Jahr, abgeschätzt als Resultat der sich ändernden Häufigkeitsverteilung der Zirkulationsmuster, bestimmt aus dem ECHAM 5-Modell. 1971–2000: 20C-Daten. 2001–2100: Szenario A1B. Ein Datenpunkt steht für die Mitteltemperatur der nachfolgenden Dekade.

Da die Temperaturintervalle bekannt sind¹⁾, wurden die Temperaturwerte, die den jeweiligen Intervallmitten entsprechen, gewichtet gemittelt. Die Gewichte waren die Häufigkeiten, mit denen die Zirkulationsmuster auftraten.

Als Folge der Häufigkeitsveränderungen der in ECHAM 5 wiedererkannten Muster ergaben sich die in Abb. 4.12 gezeigten zeitlichen Verläufe. Temperaturveränderungen sind also nicht direkt aus dem Globalmodell abgelesen worden; vielmehr wurde die Fähigkeit des Modells, die Klimaänderungen auf dem Wege der Häufigkeit bestimmter atmosphärischer Muster zu reflektieren benutzt, um einen Jahreszeiten-spezifischen und Emissionsszenario-spezifischen Temperaturtrend wiederzugeben. In den verwendeten Mustern sind keine TWL enthalten.

Die WETTREG-Regionalisierung unter Verwendung der TWL, dargestellt in Abb. 4.13 zeigen Temperaturentwicklungen, die etwas stärker als die in [Spekat u. a. 2007a] errechneten sind. Für das Frühjahr finden sich bei Anwendung des TWL berücksichtigenden WETTREG Anstiegsraten von 1971–2000 auf 2071–2100 von rund 2°C. Im Sommer liegt das Temperatursignal für diese Zeitbereiche bei rund 4°C; im Herbst werden rund 3°C und im Winter mehr als 4°C Anstieg erreicht.

Die in Abschnitt 4.3 in den Vergleich einbezogene Methode STAR [Orlowsky 2007] ist ebenfalls eine statistische Regionalisierung. Sie geht von der Prämisse aus, dass ein großräumiger Trend der Temperatur von den Szenarios vorgegeben ist; dieser Trend (der Jahresmittelwert der 2m Temperatur) dient als Antrieb für die Synthese von Zeitreihen. In WETTREG wird die direkte Temperaturinformation des antreibenden Modells hingegen nicht verwendet – Trendentwicklungen der Temperatur entstehen vielmehr als Konsequenz der Regionalisierung, wobei der zentrale antreibende Faktor die Veränderung der Häufigkeit von atmosphärischen Mustern ist, die das großräumige Modell simuliert.

¹⁾Ein Beispiel findet sich in Tab. 3.2.

4.2 Temperatursignale bei der Verwendung von Transwetterlagen

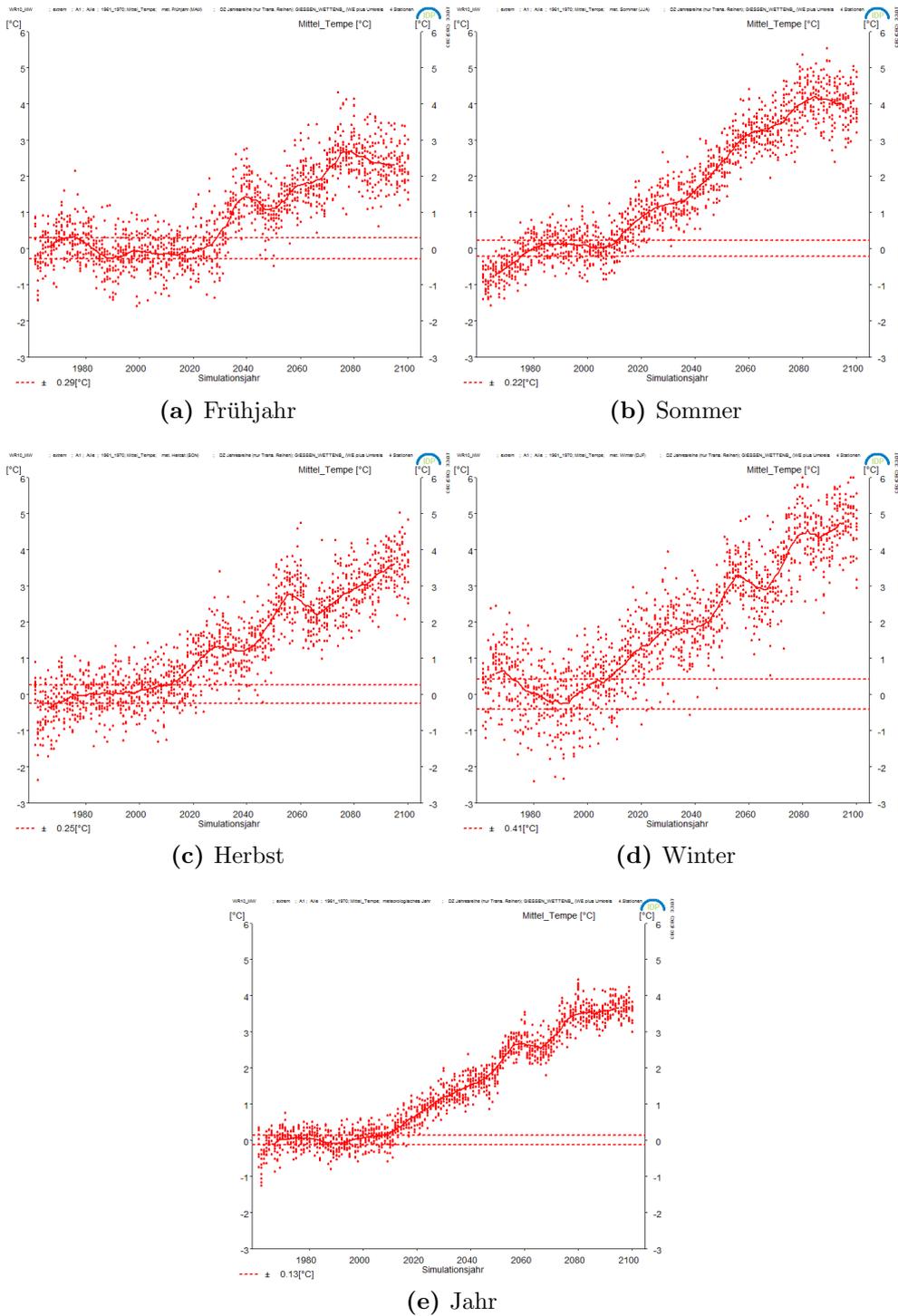


Abbildung 4.13: Temperaturverlauf für das Mittel aus der Station Giessen und vier Umgebungsstationen (Waldems-Reinborn, Dillenburg, Homberg und Bad Nauheim) von 1961–2100 in den einzelnen Jahreszeiten und dem Jahr, aus 10 WETTREG-Simulationen mit der TWL-Version, angetrieben mit ECHAM 5-Daten. Die Werte sind als Abweichung vom Mittel 1971–2000 dargestellt. Quelle: 1961–2000: ECHAM 5 20C-Daten. 2001–2100: ECHAM 5 Szenario A1B. Die durchgezogene Kurve ist das gleitende 11-Punkte-Mittel.

4.3 Vergleiche mit bestehenden Datensätzen

In diesem Abschnitt werden die Regionalisierungen mit verschiedenen Methoden einander gegenüber gestellt.

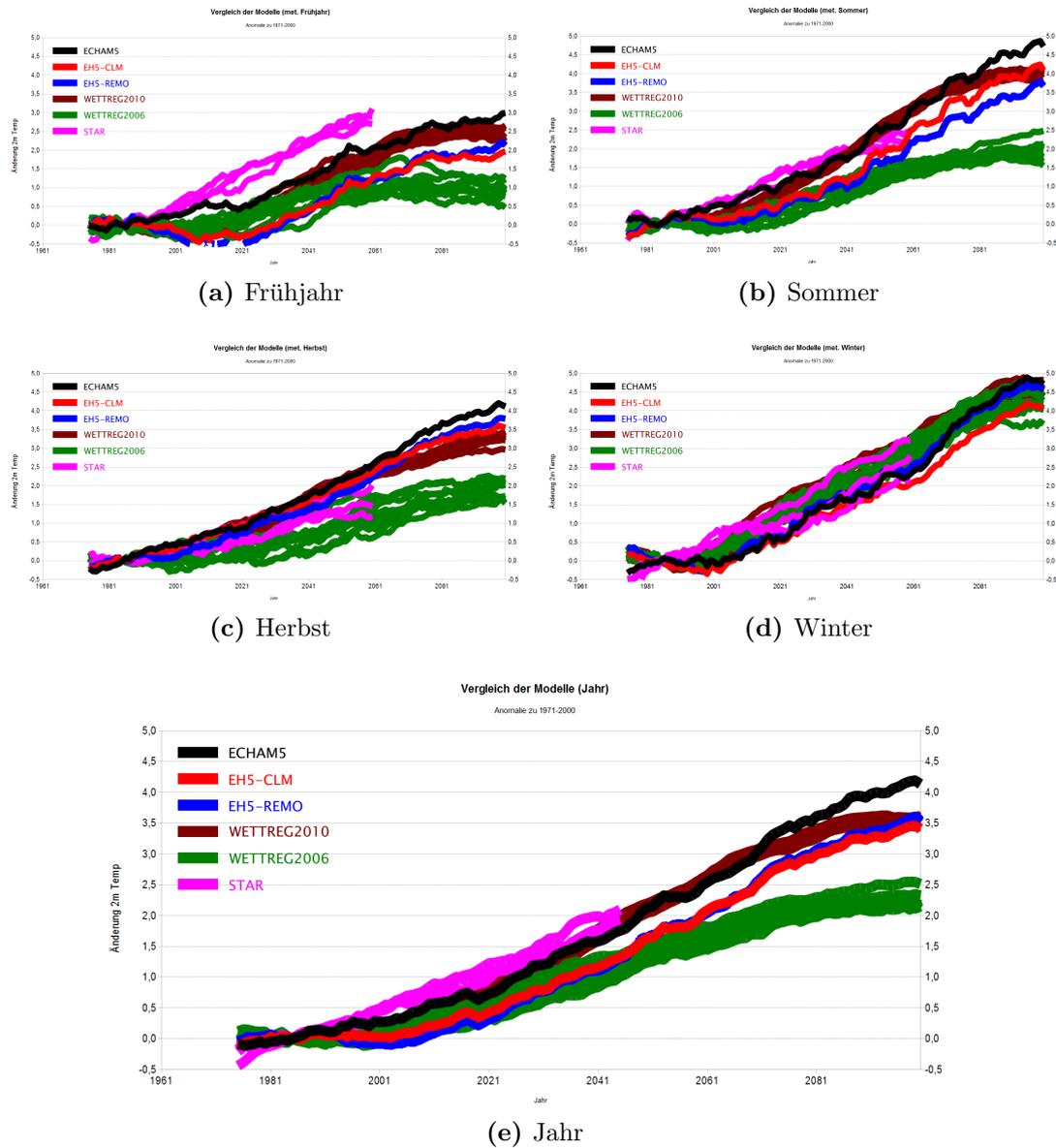


Abbildung 4.14: Verlauf der Tagesmitteltemperatur-Anomalie (Abweichung vom Niveau 1971–2000) über das 21. Jahrhundert im Vergleich mehrerer Regionalisierungen. Bei den Verfahren STAR, WETTREG2007 und WETTREG2010 wurde ein Korridor aus mehreren Realisierungen dargestellt.

- REMO [Jacob und Podzun 1997], [Jacob 2001] und [Jacob u. a. 2007], angetrieben mit ECHAM 5, Lauf 1, Szenario A1B.
- CLM [Böhm u. a. 2006] und [Rockel u. a. 2008], angetrieben mit ECHAM

4.3 Vergleiche mit bestehenden Datensätzen

5 Lauf 1, Szenario A1B.

- STAR [Orlowsky 2007], drei Realisierungen für den Zeitraum bis 2050.
- WETTREG2006, Datensatz: [Kreienkamp u. a. 2006b], Bericht: [Spekat u. a. 2007a], Version von 2006 ohne Transwetterlagen, angetrieben mit ECHAM 5 Lauf 1, Szenario A1B, zehn Simulationen des Mittels aus den 2006 verfügbaren 27 Klimastationen in Hessen.
- WETTREG2010 – für dieses Projekt erstellte Aktualisierung des WETTREG-Verfahrens mit Transwetterlagen, angetrieben mit ECHAM 5, Lauf 1, Szenario A1B, zehn Simulationen des Mittels aus den für diese Studie verfügbaren 36 Klimastationen in Hessen.

In Abb. 4.14 sind die Temperatursignale der verschiedenen Methoden sowohl für die Jahreszeiten als auch das Jahr einander gegenüber gestellt.

Dem Gros der Regionalisierungen ist gemeinsam, dass sie im Frühjahr das geringste Anstiegssignal (Ausnahme: STAR) zeigen. Die dynamischen Regionalisierungen folgen dem Randantrieb von ECHAM 5 qualitativ recht genau; es besteht sowohl bei REMO als auch bei CLM die Neigung zu einer geringeren Signalstärke, was zum Ende des 21. Jahrhunderts am klarsten erkennbar ist.

Werden die beiden WETTREG-Versionen von 2006 und 2010 verglichen so ist erkennbar, dass durch die Einführung der Transwetterlagen in allen Jahreszeiten, abgesehen vom Winter, eine Erhöhung des Temperatursignals modelliert wird. Das Signal von WETTREG2010 ist von vergleichbarer Größenordnung wie die Signale der übrigen Modelle, während es bei WETTREG2006 darunter lag.

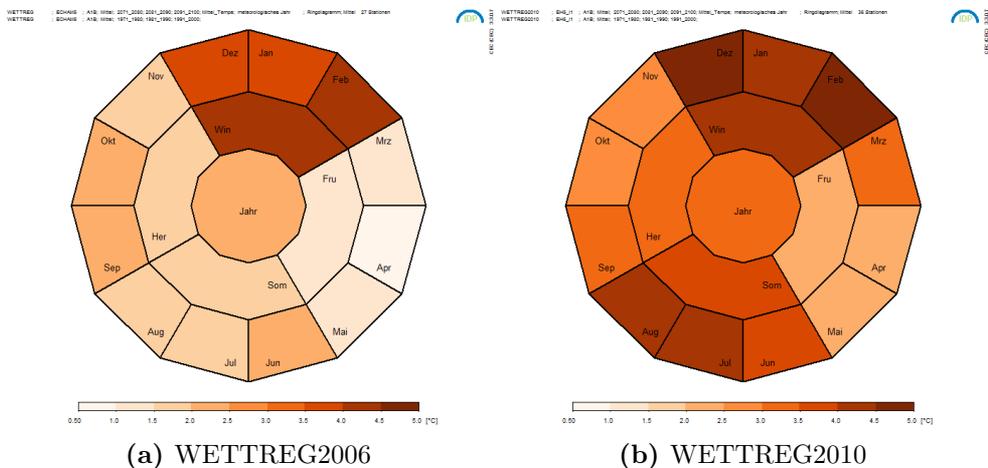


Abbildung 4.15: Ringdiagramme für das Temperatursignal 2071–2100 (Szenario A1B) bezogen auf 1971–2000 (20C) der WETTREG2006-Versionen ohne Transwetterlagen [Spekat u. a. 2007a] und mit Transwetterlagen (dieser Bericht). Die äußeren Ringsegmente zeigen die Temperatursignale für die einzelnen Monate, der mittlere Ring zeigt die Signale in den Jahreszeiten und das zentrale Zwölfeck beinhaltet das Jahressignal. Datenbasis: Mittel aus 27 (WETTREG2006) bzw. 36 (WETTREG2010) Klimastationen in Hessen.

In Abb. 4.15 ist dargestellt, welche Struktur die Stärke des Temperatursignals im Jahresverlauf besitzt. Dabei treten sowohl in WETTREG2006 als auch 2010 die stärksten Temperatur-Änderungssignale im Winter und die schwächsten im Frühjahr auf. Zusätzlich zu dieser Grundstruktur zeigt sich, dass bei WETTREG2010 das Niveau des Temperatursignals in jedem der Monate höher als bei WETTREG2006 ist.

Abschnitt 5

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 globalen und regionalen 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 Klimamodelle genutzt, den Klimawandel in Form von Änderungen von atmosphärischen Mustern zu reproduzieren. Eine zielführende Aktualisierung von WETTREG war der Inhalt dieser von den Ländern getragenen Studie. Ohne diese wäre eine, durch einen Anschlussauftrag des UBA, zu realisierende Aktualisierung der seit 2006 verfügbaren [Kreienkamp u. a. 2006b] und 2007 vom UBA publizierten WETTREG2006-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. Erste Ergebnisse dieses Berichtes weisen darauf hin, dass gegenüber der WETTREG2006-Studie [Spekat u. a. 2007a] unter Anderem Veränderungen in folgenden Bereichen zu erwarten sind:

- Stärkere Anknüpfung der WETTREG-Resultate an das antreibende Modell (ECHAM 5);
- höhere Amplituden der Temperatursignale;
- stärkere Extreme.

Des Weiteren wird im vorliegenden WETTREG2010-Bericht gezeigt, dass die Transwetterlagen keine marginale Erscheinung in einem zukünftigen Klima sein

werden. Vielmehr nehmen sie von einer geringfügigen Größenordnung in der Gegenwart beständig zu und werden zum Ende des 21. Jahrhunderts die häufigsten der auftretenden Atmosphärenmuster sein, wie in den Tab. 3.3–3.5 ersichtlich ist. Abgesehen vom Winter (Tab. 3.6) sind ab etwa 2061–70 die TWL 11 und 12 gemeinsam zahlreicher als jede andere Klasse. Einzelfallstudien identifizieren Charakteristika von TWL-Episoden, da es, wenn auch selten, durchaus in der Gegenwart Anzeichen für ihr Auftreten gibt.

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 WETTREG-TWL-Daten sind aber in jedem Fall für neue Impaktstudien und Vergleiche mit den Ergebnissen auf der Basis der Daten von 2006 geeignet.

Literaturverzeichnis

- [Böhm u. a. 2006] BÖHM, U. ; KÜCKEN, M. ; AHRENS, W. ; BLOCK, A. ; HAUF-FE, D. ; KEULER, D. ; ROCKEL, B. ; WILL, A.: CLM – The Climate Version of LM: Brief description and long-term applications. In: *COSMO Newsletter* 6 (2006)
- [Cassel-Gintz 2000] CASSEL-GINTZ, M.: *GIS-gestützte Analyse globaler Muster anthropogener Waldschädigung. Eine sektorale Anwendung des Syndrom-Konzepts.*, Fachbereich Geowissenschaften. Freie Universität Berlin, Diss., 2000. – PIK-Report Nr. 71
- [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. 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
- [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
- [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
- [Hansen u. a. 2008] HANSEN, J. ; SATO, M. ; KHARECHA, P. ; BEERLING, D. ; MASSON-DELMOTTE, V. ; PAGANI, M. ; RAYMO, M. ; ROYER, D.L. ; ZACHOS, J.C.: Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim? In: *Open Atmos. Sci. J.* 2 (2008), S. 217–231. – DOI: 10.2174/1874282300802010217; arXiv: 0804.1126v3 [physics.ao-ph]
- [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 2001] IPCC ; HOUGHTON, J.T. (Hrsg.) ; DING, Y. (Hrsg.) ; GRIGGS, D.J. (Hrsg.) ; NOGUER, M. (Hrsg.) ; LINDEN, P.J. van d. (Hrsg.) ; DAI, X. (Hrsg.) ; MASKELL, K. (Hrsg.) ; JOHNSON, C.A. (Hrsg.): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, U.K. und New York, USA : Cambridge University Press, 2001
- [IPCC 2007] IPCC ; SOLOMON, S. (Hrsg.) ; QIN, D. (Hrsg.) ; MANNING, M. (Hrsg.) ; CHEN, Z. (Hrsg.) ; MAQUIS, M. (Hrsg.) ; AVERYT, K.B. (Hrsg.) ; 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)
- [Jacob 2001] JACOB, D.: A Note to Simulation of the Annual and Inter Annual Water Budget of Baltic Sea Drainage. In: *Meteorol. Atmos. Phys.* 77 (2001), S. 61–73
- [Jacob u. a. 2007] JACOB, D. ; BÄRRING, L. ; CHRISTENSEN, O.B. ; CHRISTENSEN, J.H. ; HAGEMANN, S. ; HIRSCHI, M. ; KJELLSTRÖM, E. ; LENDERINK,

LITERATURVERZEICHNIS

- G. ; ROCKEL, B. ; SCHÄR, C. ; SENEVIRATNE, S.I. ; SOMOT, S. ; ULDEN, A. van ; HURK, B. van d.: An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. In: *Clim. Change* 81 (2007), S. 31–52
- [Jacob und Podzun 1997] JACOB, D. ; PODZUN, R.: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. In: *Meteorol. Atmos. Phys.* 63 (1997), S. 119–129
- [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://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/BrowserExperiments.jsp?proj=WETTREG-UBA> / Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH. 2006. – 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

- [Lüdeke und Petschel-Held 1997] Kap. Syndromes of Global Change: An Information Structure for Syndromes of Global Change: An Information Structure for Syndromes of global change: An information structure for sustainable development In: LÜDEKE, M. ; PETSCHHEL-HELD, G.: *SCOPE 58 Sustainability Indicators: A Report on the Project on Indicators of Sustainable Development*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1997, S. 96–98
- [Orlowsky 2007] ORLOWSKY, B.: *Setzkasten Vergangenheit – ein kombinatorischer Ansatz für regionale Klimasimulationen*, Department Geowissenschaften der Universität Hamburg, Diss., 2007
- [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
- [Rockel u. a. 2008] ROCKEL, B. ; WILL, A. ; HENSE, A.: Special Issue: COSMO-CLM. In: *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17,4, 2008
- [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
- [Solomon u. a. 2009] SOLOMON, S. ; PLATTNER, G.-K. ; KNUTTI, R. ; FRIEDLINGSTEIN, P.: Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 106 (2009), S. 1704–1709. – DOI: 10.1073/pnas.0812721106 und www.pnas.org/cgi/content/full/0812721106/DCSupplemental
- [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

LITERATURVERZEICHNIS

- 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
- [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
- [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
- [WBGU 1994] WBGU ; BEESE, F.O. (Hrsg.) ; GRASSL, H. (Hrsg.) ; HEMPEL, G. (Hrsg.) ; KLEMMER, P. (Hrsg.) ; KRUSE-GRAUMANN, L. (Hrsg.) ; LABITZKE, K. (Hrsg.) ; MÜHLE, H. (Hrsg.) ; SCHELLNHUBER, H.-J. (Hrsg.) ; SIMONIS, U.E. (Hrsg.) ; THOENES, H.-W. (Hrsg.) ; VELSINGER, P. (Hrsg.) ; ZIMMERMANN, H. (Hrsg.): *Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). Gutachten 1997. Welt im Wandel: Die Gefährdung der Böden*. Economica Verlag, Bonn, 1994
- [Williams u. a. 2007] WILLIAMS, J.W. ; JACKSON, S.T. ; KUTZBACH, J.E.: Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 104 (2007), S. 5738–5742
- [Wolfram 2002] WOLFRAM, S.: *A new kind of science*. Wolfram Media, Champagne, Ill, USA, 2002
- [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