



Ableitung von Transwetterlagen

Teilbericht zum Vorhaben

Ableitungen von Transwetterlagen und Entwicklung eines
interaktiven Diagnose- und Präsentationstools

im Auftrag der Bundesländer/Freistaaten

Baden-Württemberg

Bayern

Hessen

Rheinland-Pfalz

Sachsen

Thüringen

Frank Kreienkamp, Arne Spekat, Wolfgang Enke

Aktualisierte Fassung vom 15. Dezember 2006

Auftraggeber:

Land Baden-Württemberg, vertreten durch die **Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU-BW)** – interne Vertragsnummer 500 94836/43

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)** – Bestellnummer 4500169596

Land Rheinland-Pfalz, vertreten durch das **Landesamt für Umweltschutz, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUGW)** – Aktenzeichen 69-CK/Mo

Freistaat Sachsen, vertreten durch das **Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG)**

Freistaat Thüringen, vertreten durch die **Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG)** – Werkvertrag Nr. 05/000126

Ausführende:

Firma Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH
Telegrafenberg A31
14473 Potsdam

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: „Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland - Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland“ des Umweltbundesamtes (Förderkennzeichen 204 41 138) wurden mit der Methode WETTREG regionale Klimaszenarios bereitgestellt. Für die Erstellung der Szenarios wird die Änderung der Häufigkeit der großräumigen Wettersituation, dargestellt durch die Ergebnisse globaler Klimaszenarios, als Haupteingangsgröße genutzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich im Wesentlichen nur die Häufigkeit der Wetterlagen ändert und weniger deren Eigenschaften.

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

Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

1. Die Änderung der Eigenschaften der Wetterlagen tritt nur in den Jahreszeiten Sommer und Herbst auf.
2. Der Einfluss dieser Änderungen bezieht sich im Wesentlichen nur auf einzelne Extremereignisse.
3. Auch wenn numerische und statistische Verfahren (Beispiel: REMO des MPI-Hamburg und WETTREG) die Klimaentwicklung in vielen Aspekten sehr ähnlich darstellen, gibt es, beispielsweise bei der Temperaturentwicklung im Sommer, Differenzen; diese können aber mit den Transwetterlagen nur zu einem kleinen Teil erklärt werden.

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

Inhaltsverzeichnis

I	Hauptteil	1
1	Einleitung	3
1.1	Grundlagen	3
1.2	Weiterentwicklung der Methoden	3
1.3	Ziel des Vorhabens	5
2	Daten und Methoden	7
2.1	Daten	7
2.2	Methoden	7
2.2.1	Grundlagen	7
2.2.2	Definition Transwetterlagen	10
2.3	Untersuchung der Eigenschaften der gefundenen Gruppen	18
2.4	Anmerkungen zur Feuchte als Führungsgröße	27
3	Zusammenfassung und Ausblick	29
	Literaturverzeichnis	31
II	Anhänge	I
A	Weitere Erläuterungen und Abbildungen	III
A.1	Objektives Clusterverfahren	III
A.1.1	Prämisse	III
A.1.2	Verfahrenbeschreibung	III
A.2	Häufigkeitsverteilungen für ausgewählte Größen	V
B	Erläuterung der SRES-Szenarios	VII
C	Äquidistante Gitterpunkte	XI
D	Erläuterung der potenziellen Prediktoren	XIII
D.1	Aus einer Fläche extrahierte Größen: Geopotenzial und Temperatur – Nr. 1–8	XIV
D.2	Horizontale Differenzen – Nr. 9–12	XIV
D.3	Vorticity – Nr. 13–16	XIV
D.4	Schichtdicke und vertikale Temperaturdifferenz – Nr. 17–20	XV

D.5	Stabilitätsindex nach Enke – Nr. 21	XV
D.6	Stabilitätsindex nach Showalter – Nr. 22	XV
D.7	Thermischer Wind – Nr. 23–31	XVI
D.8	Frontenneigungswinkel nach Margules – Nr. 32	XVI
D.9	Advektion von Temperatur und relativer Feuchte – Nr. 33 und 34	XVI
D.10	Gradienten – Nr. 35–42	XVII
D.11	Pseudopotentielle Temperatur – Nr. 43	XVII

Teil I

Hauptteil

Abschnitt 1

Einleitung

1.1 Grundlagen

Zwei Grundgedanken tragen dieses Vorhaben:

1. Die Entwicklung der statistischen Methode WETTREG hat einen Grad erreicht, der zulässt, dass Feinstrukturen des Klimawandels betrachtet werden können - dazu gehören strukturelle Änderungen der großräumigen atmosphärischen Muster.
2. Es erwies sich schon in der Vergangenheit als wünschenswert, das Verhalten des Atmosphärensystems unter den Bedingungen des Klimawandels besser zu beschreiben.

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

1.2 Weiterentwicklung der Methoden

Auch die statistischen Verfahren zur Regionalisierung wurden weiterentwickelt. So ist mit der Fertigstellung der neuesten Fassung der statistischen Methode WETTREG zur Erzeugung regionalisierter Klimaszenarios auch auf diesem Gebiet ein hoher Standard erreicht worden. Die Entwicklung wurzelt in Studien und Projekten, die seit dem Jahr 1994 im Rahmen des BMBF-Schwerpunkts Klimavariabilität und Signalanalyse durchgeführt und vorgestellt wurden [Enke und Spekat 1994], [Enke und Spekat 1996], [Enke und Spekat 1997], [Enke u. a.

1999]. Zu dieser Zeit entstand eine statistische Regionalisierungsmethode, deren Aussagen allerdings auf Monatswerte eingegrenzt war. Es folgten Studien, die auf regionale Besonderheiten einzelner Bundesländer eingingen, Statistiken auf Tageswertbasis erzeugten und mit denen auch zunehmend komplexere Aussagen, wie beispielsweise zu Extremen sowie mit längeren Zeithorizonten möglich wurden [Enke 2001], [Enke 2002], [Enke 2003d], [Enke 2003c], [Enke 2003b], [Enke 2003a] und [Enke 2004]. Parallel zur Weiterentwicklung der Methodik und der Erstellung immer genauerer Szenarios erfolgten zahlreiche Präsentationen der Vorhaben auf nationalen und internationalen Tagungen (Deutsche Klimatagungen, DACH-Meteorologentagung, Jahrestreffen und Fachkonferenzen der American Meteorological Society, Jahrestagungen der European Meteorological Society). Außerdem erfolgte 2005 eine Dokumentation des Entwicklungsstands in begutachteten Zeitschriftenartikeln [Enke u. a. 2005b], [Enke u. a. 2005a]. Im Jahr 2006 wurde im Rahmen eines vom Umweltbundesamt geförderten Projekts sowohl eine statistische Regionalisierung für die Gesamtfläche Deutschlands als auch ein Vergleich dieser Regionalisierung mit dem dynamischen Ansatz REMO erreicht; die Ergebnisse werden 2007 in einem Synthesereport des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg publiziert.

Bei aller erreichten Leistungs- und Aussagefähigkeit der Methode für eine breite Palette von Bereichen

- Klimastudien
- Klimaimpaktstudien
- Naturschutz
- Zivilschutz
- Versicherungswirtschaft
- Tourismus

und der Verwendung der vom IPCC [Nakićenović u. a. 2000] (s.a. Anhang B) initiierten Emissionsszenarios, die mit *State-of-the-Art* Klimamodellen gerechnet wurden, ergeben sich Ähnlichkeiten aber auch Unterschiede im Vergleich der statistischen und dynamischen Ansätze (siehe Abb. 3.1).

Mit der von den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Sachsen und Thüringen in Auftrag gegebenen Studie, deren Ergebnisse in diesem Abschlussbericht dokumentiert sind, wird auf die Fragestellung eingegangen, welche strukturellen Änderungen im Atmosphärensystem unter den Bedingungen des Klimawandels auftreten und worin deren Auswirkungen auf das Klimasignal bestehen. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass sich in der Zukunft so genannte *Transwetterlagen* entwickeln, die sich in ihren Eigenschaften klar von den gegenwärtigen Zirkulationsmustern unterscheiden.

Die *Transwetterlagen*-Studie ist Teil eines von den oben genannten sechs Bundesländern geförderten Vorhabens. In einem weiteren Teil geht es um die Erstellung eines interaktiven Präsentations- und Diagnosetools. Die dazu von der Firma CEC Potsdam entwickelte Software IDP2006 zur explorativen Datenanalyse wurde im Bericht [Kreienkamp und Spekat 2006] vorgestellt. Dieser beinhaltet die Grundlagen und eine ausführliche, anwenderbezogene Beschreibung des Programms.

1.3 Ziel des Vorhabens

Zur Erkenntnis aus mehreren abgeschlossenen Projekten zur Regionalisierung der Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert gehört, dass sich eine Entwicklung abzeichnet, derzufolge Verschiebungen im Zirkulationssystem mit der Zeit deutlich in Erscheinung treten. Zirkulationsmuster, die beispielsweise niedrige Temperaturwerte hervorrufen, nehmen in ihrer Häufigkeit ab oder verschwinden völlig, während die hohe Temperaturwerte hervorrufenden Muster deutlich zunehmen. Ziel dieses Vorhabens ist es, diesen Aspekt des sich abzeichnenden Klimawandels zu beleuchten und dabei der Hypothese nachzugehen, dass im Laufe des 21. Jahrhunderts neue Muster, die *Transwetterlagen* entstehen. Damit wird ein besseres Verständnis der Gründe für die Klimaverschiebungen erwartet.

Mit Hilfe der *Transwetterlagen* besteht zudem die Erwartung, einen methodischen Ansatz für weitere Einblicke in das Verhalten der Extreme klimarelevanter Parameter zu erhalten. Die Untersuchung der Extreme erfordert wegen der Komplexität des Untersuchungsgegenstands eine Methodenvielfalt; Ansätze zu ihrer Beschreibung wurden beispielsweise in der von Sachsen in Auftrag gegebenen Studie zur Identifikation von Wetterlagen, die Extreme verursachen [Deutschländer und Enke 2004] oder einer im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie gefertigten Studie zur Extrapolation der Extreme in Verteilungsflanken [Enke u. a. 2006a] dokumentiert.

Abschnitt 2

Daten und Methoden

2.1 Daten

Es wurden drei Datenquellen verwendet:

1. ERA40-Reanalysen [Uppala u. a. 2005] aus den Jahren 1961–2000, die wegen der höheren räumlichen Auflösung dem NCEP-Reanalysedatensatz [Kalnay u. a. 1996] vorgezogen werden. Aus den Feldern werden potenzielle Prediktoren bestimmt, die in Anhang D beschrieben sind.
2. ECHAM5/MPI-OM T63L31 [Roeckner u. a. 2003] und [Roeckner u. a. 2004] für die Jahre 1961 bis 2100, für die Jahre bis 2000 als Control-Run, danach als Szenariorechnungen für **A1B**, **A2** und **B1**. Aus den Feldern werden potenzielle Prediktoren bestimmt, die in Anhang D beschrieben werden.
3. 282 Klimastationen und 1695 Niederschlagsstationen (insgesamt 1977 Stationen) aus den Jahren 1971–2000.

2.2 Methoden

2.2.1 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 Klimastationen zur Verfügung stehen.

Die Strategie von WETTREG beruht auf folgenden Annahmen:

- Globale Klimamodelle sind in der Lage, das Klima großräumig in hinreichender Qualität zu beschreiben;
- es gibt semi-stabile Muster in den atmosphärischen Feldgrößen (z.B. Zirkulation, Feuchte, Vorticity, u.v.a.m.), die wiederkehrend eine bestimmte Klasse von lokalen Konsequenzen (hohe/niedrige Temperatur, starker/geringer Niederschlag, etc.) hervorrufen;
- unter dem Antrieb von Emissions-Szenarios verändert sich die Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Muster, wie sie von einem globalen Klimamodell errechnet wird;

- die Beziehungen der Klassen lokaler Konsequenzen zu den atmosphärischen Mustern sind auch in der Zukunft der derzeit bestehenden Beziehung sehr ähnlich,
- die Repräsentation des sich ändernden Klimas in den von WETTREG erzeugten lokalen Simulationszeitreihen ist statistisch zutreffend, so dass Aussagen über Mittelwerte, Varianz und Extreme von Wetterelementen an den Orten der Klimamessreihen möglich sind.

Die Details der Methode, inclusive der Zusammenschau und räumlichen Homogenisierung der einzelnen Teilregionen, sind ausführlich in [Enke 2005] und in [Enke u. a. 2006b] beschrieben. Es sei daher in den folgenden Unterabschnitten nur kurz auf das Wesentliche eingegangen.

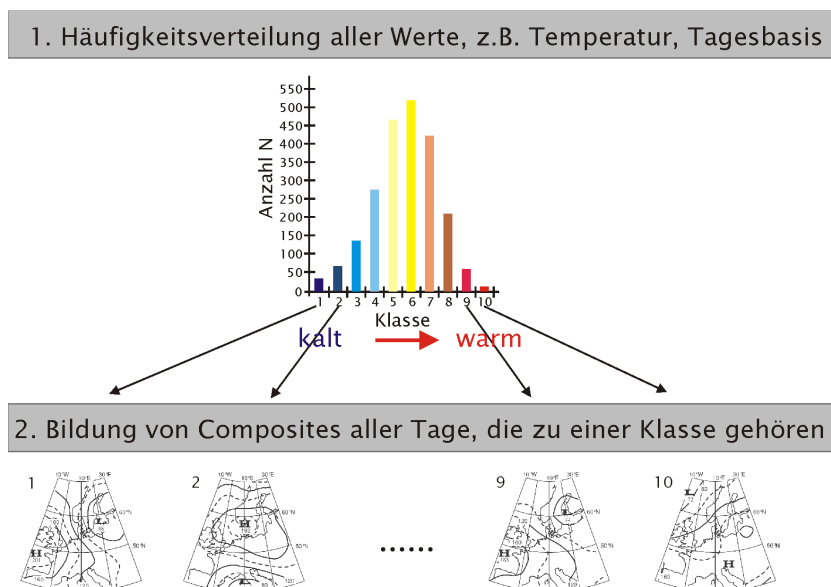


Abbildung 2.1: Prinzip der Bildung von Zirkulationsmustern.

Klassifikationsschritt

Am Anfang steht das Herstellen von räumlichen Mustern atmosphärischer Größen. Dazu werden aus den Messwerten an Klimastationen für das Temperaturregime 10 und für das Feuchteregime 8 Größenklassen gebildet, in denen sich von kalt nach warm, bzw. von trocken nach niederschlagsreich die entsprechenden Tage wiederfinden. Die Jahreszeiten-spezifischen Wertebereiche für die Klasseneinteilungen finden sich in Tab. 2.1 bzw. 2.2. Danach werden klassenweise Komposita der atmosphärischen Felder gebildet (Abb. 2.1). Dieser Prozess findet zudem nach Jahreszeiten differenziert statt. Außerdem werden die räumlichen

Tabelle 2.1: Jahreszeitenabhängige Wertebereiche für die Einteilung in Temperaturklassen [in °C].

<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	-2.8	11.0	-1.9	-11.1
3	0.5	13.0	1.2	-8.1
4	3.8	15.0	4.2	-5.2
5	7.0	17.0	7.3	-2.2
6	10.2	19.0	10.4	0.7
7	13.5	21.0	13.5	3.6
8	16.8	23.0	16.5	6.6
9	20.0	25.0	19.6	9.5
10	> 20.0	> 25.0	> 19.6	> 9.5

Tabelle 2.2: Wie in Tab. 2.1 aber für die Niederschlagsklassen [in mm].

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

Muster in drei Breitenkreisstreifen separat erzeugt, so dass die unterschiedlichen Ausprägungen der Zirkulation im Norden, der Mitte und im Süden Deutschlands Eingang finden. Alle Felder werden auf ein äquidistantes Gitter (s. Anhang C) transformiert. Der Verfahrensschritt, in dem die Klassen und die Komposita gebildet werden, ist in [Enke u. a. 2005b] und in [Enke u. a. 2006b] beschrieben.

Für die Identifikation von Transwetterlagen wird dabei der mittlere Breitenkreisstreifen (von 52,5°N bis 49,5°N und von 6°O bis 16°O) verwendet. In ihm liegt der Flächenmittelpunkt Deutschlands. Zusätzlich umfasst er eine größere landschaftliche Vielfalt (von Flachlandregionen bis zu Mittelgebirgen) als die Breitenkreisstreifen im Norden bzw. Süden Deutschlands. Es ist zu beachten, dass bei den Abbildungen 2.4, 2.5, 2.6 und 2.11 zwar die Felder der relativen Topografie 850/1000 hPa bzw. des Geopotenzials 700 hPa für das gesamte Mit-

teleuropa dargestellt sind, jedoch die Identifikation und die Wiedererkennung der Zirkulationsmuster nur im o.g. Breitenkreisstreifen erfolgt.

Nachdem die 10 (bzw. bei der Feuchte 8) atmosphärischen Muster für das Klima der Jetztzeit identifiziert wurden, wird dekadeweise analysiert, an welchen Tagen und wie häufig diese unter Szenariobedingungen in den Rechnungen des globalen Klimamodells auftreten; dazu werden die identifizierten Muster mit Hilfe des Euklidischen Distanzmaßes¹⁾ im Szenario wiedererkannt. Es sei hinzugefügt, dass das Klimamodell natürlich keine Wetterprognosen für konkrete Tage in der Zukunft erzeugt, jedoch die Atmosphäre mit ihrem Strömungsverhalten realistisch abzubilden anstrebt. Der Antrieb (Emissionsszenarios) bewirkt Szenario-spezifische Verschiebungen in der Häufigkeit der Muster.

Nun steht eine entscheidende Frage im Raum. Beschreiben die gefundenen objektiven Wetterlagen auch die Muster in den Szenarios? Oder treten in den Eigenschaften geänderte Muster oder gar neue Muster auf? Dieser Thematik widmet sich der folgende Bericht.

2.2.2 Definition Transwetterlagen

Eine wesentliche Frage muss zu Beginn geklärt werden:

Was verstehen wir unter Transwetterlagen?

Dazu einige Vorbemerkungen/vorbereitende Schritte. Zur Bestimmung der Transwetterlagen wird zunächst im Zeitraum des Control Runs (1961–2000) die Häufigkeitsverteilung des Distanzmaßes zu der Klasse berechnet, die für den jeweiligen Tag zugeordnet wurde. Das ist notwendig, da im bisher verwendeten WETTREG-Verfahren jeder Tag derjenigen Wetterlagenklasse zugeordnet wurde, zu der er das kleinste Distanzmaß hat. Diese Zuordnung ist erzwungen, d.h. der *Betrag* des jeweiligen Distanzmaßes wird nicht zur Auswertung herangezogen. Das Ganze hat den Charakter einer Unschärferelation: Der Vorteil der stringenten Zuordnung ist, dass keine „Restklasse“ aus schwer klassifizierbaren Fällen entsteht; aber der Nachteil ist, dass die bestehenden Klassen unter Umständen mit Tagen, die nur mit „sanfter Gewalt“ zugeordnet werden konnten, kontaminiert sind.

Die Grundidee ist nun, die Forderung, dass es keine Restklasse geben darf, fallenzulassen, und Kriterien zu finden, nach denen schwer klassifizierbare Tage einen Sonderstatus erhalten – dazu wird außerdem zu untersuchen sein, ob solche

¹⁾Bei der Clusteranalyse geht es um die Segmentierung von Daten. Die Quantifizierung von Ähnlichkeit und Unähnlichkeit erfolgt durch das so genannte Distanzmaß. Es entsteht, indem aus vieldimensionalen Daten eine Maßzahl gebildet wird. Die Clusteranalyse wird bei einer Vielzahl von Datenarten eingesetzt; das Spektrum umfasst u.a. in Kategorien erfasste Merkmale und metrisch skalierte Messgrößen, die z.B. in der Atmosphärenphysik häufig auftreten. In der Nomenklatur der Clusteranalyse heißt ein Distanzmaß *Euklidisch*, wenn es die Ähnlichkeit/Unähnlichkeit zwischen zwei feldartig verteilten, metrisch skalierten Größen berechnet, indem es Wertepaare der Felder an Feldkoordinaten miteinander in Beziehung setzt, wie es in Formel A.1 in Anhang A.1 beschrieben ist.

aussortierten Tage einer einzigen Klasse angehören, oder ob in ihnen weitere Strukturen identifizierbar sind, die in den bisherigen Klassen unterdrückt wurden.

Identifikation fehlzugeordneter Tage

Als erster Schritt auf dem Weg zu den Transwetterlagen wird postuliert, dass 5% der Zuordnungen möglicherweise fehlerhaft sind. Somit wird der Betrag des Distanzmaßes, welcher das 95%-Perzentil im Control Run ausweist, als Schwellwert festgelegt. In der Schlußfolgerung heißt dies, dass die Wettersituation eines jeden Tages, beim dem eine Zuordnung mit einem Distanzmaß größer als das 95%-Perzentil erfolgt, zu einer neuartigen Wetterlage gehören *kann*. Diese Tage werden als „fehlzugeordnet“ bezeichnet – was eine vorläufige Rubrizierung ist. In weiteren Schritten muss sich zeigen, ob es wirklich neue Wetterlagen sind, die z.B. den Ereignisraum der bisherigen Klassen verlassen. Sollten entsprechende Kriterien eintreten, wären damit *Transwetterlagen* identifizierbar.

Zwei Fragen lassen sich aus dieser Definition formulieren.

1. Welche meteorologische Situation herrscht bei einer identifizierten Transwetterlage im Klima der Jetztzeit (d.h. im 30-jährigen Zeitraum am Ende des 20. Jahrhunderts)?
2. Wie sieht bei einer Transwetterlage die meteorologische Situation und die Häufigkeit ihres Auftretens in den Szenarios aus?

In diesem Vorhaben wurde der Schwerpunkt auf die Frage 2 gelegt. Dazu wurden als erster Schritt die Häufigkeitsverteilungen der Distanzmaße für die drei Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** ermittelt. In ihnen wurden außerdem jeweils 30 Jahre (bzw. 40 Jahre für den Anfang des 21. Jahrhunderts) zusammengefasst: 2001–2040, 2041–2070 und 2071–2100. Die Verteilungen für die vier Zeiträume (Controlrun 1961–2000 und die drei oben genannten Zeitspannen in den Szenarios) sind in Abb. 2.2 für den meteorologischen Sommer einander gegenübergestellt. Auffällig ist, dass die Kurven des Control Run und der ersten beiden Szenario-Zeitspannen nahezu deckungsgleich sind. Erst im Zeitraum 2071–2100 (jeweils die blaue Kurve) zeigen sich geänderte Verhältnisse in Form einer Verschiebung zu höheren Distanzmaßen, also weniger guter Zuordnung. Im Szenario **A1B** deutet sich diese Verschiebung bereits im Zeitraum 2041–2070 an.

Das 95%-Perzentil als Schwellwert wurde anhand des Control Runs (graue Kurven in Abb. 2.2) definiert. Die Verschiebung der farbigen Kurven zu den höheren Werten des Distanzmaßes zeigt an, dass die Zuordnung in der Zukunft schlechter ist.

Jahresgang der Fehlzuordnungen

Als nächstes stellt sich die wichtige Frage, ob die Zahl der Aussortierungen über alle Jahreszeiten gleichmäßig verteilt ist, oder ob es besondere Charakteristika in den Jahreszeiten gibt. Abb. 2.3 zeigt zunächst einmal in den grauen Teilen der

Säulen, dass am Anfang des 21. Jahrhunderts bereits eine Zahl der Fehlzuordnungen zwischen rund 150 (Winter) und 300 (Sommer) gefunden wird. Bei der Veränderung zum Ende des 21. Jahrhunderts hin gibt es deutliche saisonale Unterschiede. Im Frühjahr und Winter bleiben die Fehlzuordnungen relativ selten, was sich in nur sehr kleinen roten Säulenteilen in Abb. 2.3 widerspiegelt – wenn sie denn überhaupt sichtbar sind. Für Sommer und Herbst zeigen sich sehr viel deutlichere Veränderungen, die wesentliche Folgen für die Szenarios auf der Basis von WETTREG haben können. In den Szenarios **A1B** und **A2** sind es im Sommer rund 900 fehlzugeordnete Tage in der 30-Jahresspanne 2071–2100 – eine Zunahme gegenüber dem Beginn des 21. Jahrhunderts um rund 600! Der Vergleich mit **B1** zeigt, dass unter den für dieses Szenario charakteristischen Antriebsbedingungen ein deutlich schwächeres Signal zu erkennen ist, was aber immerhin am Ende des 21. Jahrhunderts im Sommer noch zu mehr als 600 fehlzugeordneten Werten führt.

Es soll an dieser Stelle noch einmal unterstrichen werden, dass die Fehlzuordnung in erster Linie ein mathematisches Konstrukt ist, mit dessen Hilfe lediglich Tage identifiziert werden, deren Unähnlichkeit zu einer Klasse einen Schwellwert überschreitet. Nicht alle so gekennzeichneten Tage sind in ihren meteorologischen Eigenschaften grundverschieden von jenen der anderen Tage, deren Abstandsmaß unter der 95%-Schwelle liegt. In den folgenden Abschnitten wird das Konstrukt mit Leben erfüllt, indem sowohl der „Ursprung“, also die Klasse, zu der die Zuordnung ursprünglich erfolgte, als auch die Existenz möglicher meteorologischer Ähnlichkeiten innerhalb der aussortierten Tage analysiert wird.

Welche Eigenschaften haben die Tage mit den Fehlzuordnungen?

Es wird ein zweites Postulat aufgestellt: Nicht alle Tage, die als Fehlzuordnung gekennzeichnet wurden, besitzen einheitlich die gleichen meteorologischen Eigenschaften, sondern es gibt in ihnen objektiv unterscheidbare Strukturen – ähnlich den Wetterlagen, die durch die WETTREG-Klassen definiert sind²⁾. In so genannten „Gruppen“ werden Tage zusammengefasst, die ähnliche atmosphärische Eigenschaften haben. Das statistische Werkzeug zu einer solchen Gruppierung, eine Clusteranalyse, wurde im Rahmen des BMBF-Schwerpunkts Klimavariabilität und Signalanalyse entwickelt [Enke und Spekat 1997]. Für eine Erläuterung soll hier auf die Ausführungen im Anhang A.1 verwiesen werden. Seinerzeit waren zwei Strategien verfolgt worden, bei denen es um die Art der Bildung einer Startpartition für die Clusteranalyse geht: Es ist einerseits möglich, fest vorzuschreiben, wie viele Cluster gebildet werden, indem die Startpartition eine im Vorhinein festgelegte Zahl maximal unähnlicher Wettersituationen ist, denen sukzessive die ihr ähnlichen Tage zugeordnet werden – vergleichbar der Bildung der

²⁾Zur Erinnerung: Bei WETTREG werden Klassen gebildet, indem z.B. mit der Temperatur als Führungsgröße Tage zusammengefasst werden, die einem bestimmten Temperaturintervall entsprechen. Danach werden die atmosphärischen Felder für diese (bei der Temperatur: 10) Klassen spezifisch gebildet; es entstehen also mittlere Felder, die in Zusammenhang mit kalten oder warmen Temperaturwerten stehen.

Klassen in WETTREG; andererseits können auch alle Tage gemeinsam betrachtet werden und eine Zusammenfassung zu Gruppen so lange erfolgen, bis eine nach objektiven Kriterien messbare optimale Komplexität erreicht ist. Letztere Variante kam für die Identifikation ähnlicher Eigenschaften auf dem Weg zu den Transwetterlagen zum Einsatz.

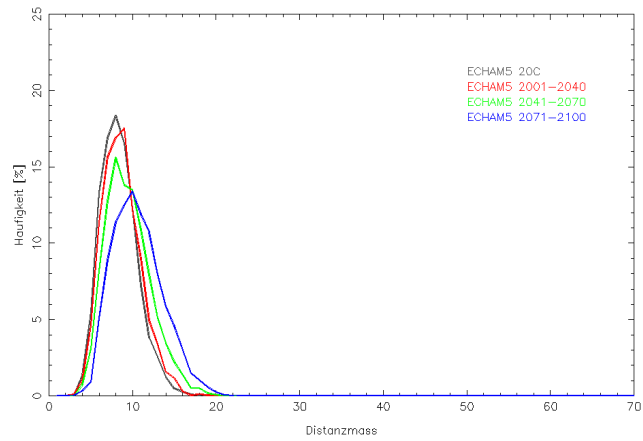
Im Vorhinein ist hierbei nicht bekannt, wie viele Gruppen entstehen werden. Das Clusterverfahren ist diesbezüglich offen gestaltet, und die Anzahl der Gruppen wird nach folgendem Algorithmus bestimmt: Der Start besteht darin, dass die Gesamtheit der fehlzugeordneten Tage in zwei Gruppen aufgeteilt wird. Dabei wird eine Art Dipol der beiden einander unähnlichsten zwei Tage gesucht, und jenen werden alle verbleibenden Tage per Ähnlichkeitsmaß zugeordnet. Das Verfahren wird mit zunehmender Gruppenzahl wiederholt. Am Ende der jeweiligen Gruppierungsphase wird geprüft, wie viele Tage zu jeder Gruppe gehören. Existiert eine Gruppe, in der sich weniger als 5 Tage oder aber weniger als 5% der Gesamtanzahl befinden, so wird die Gruppe aufgelöst und die Zuordnung nur noch ein weiteres Mal durchgeführt. Damit wird das Clusterverfahren definiert beendet (Abbruchkriterium). In der Mehrzahl der Fälle wurde die Suche nach der optimalen Gruppenzahl bei 4 bis 9 Gruppen abgebrochen. Um Verwechslungen mit den WETTREG-Klassen 1 bis 10 zu vermeiden, wurden die mit dem Clusterverfahren gefundenen Gruppen mit Nummern ab 20 bezeichnet. Die nach der Clusterung entstandene Zahlenfolge sagt aber nichts über die Eigenschaften der Gruppe aus, ist also beispielsweise keine Sortierung nach der Temperatur oder anderen meteorologischen Größen. Die Gruppen sind Wetterlagen-artige Strukturen, die Gemeinsamkeiten besitzen und könnten als „Kandidaten für Transwetterlagen“ bezeichnet werden. Es gilt nunmehr zu zeigen, ob sie sich in ihren Eigenschaften grundlegend von den bisherigen WETTREG-Klassen, denen sie ja laut des ersten Postulats nicht optimal zugeordnet worden sind, unterscheiden.

In Tab. 2.3 wird für die drei Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** aufgezeigt, wie viele Gruppen (Spalten) durch die Clusteranalyse der fehlzugeordneten Tage entstehen und aus welcher WETTREG-Klasse (Zeilen, 1: tiefste Temperatur; 10: höchste Temperatur) wie viele Tage in welche Gruppe einsortiert werden. Fehlt eine Gruppennummer – wie in der Tabelle für **A1B** die 24 oder bei **A2** und **B1** jeweils die 26 – so zeigt dies an, dass diese Gruppe im Zuge des Abbruchkriteriums vom Clusterverfahren aufgelöst wurden, weil die Wertezahl in ihr zu gering war.

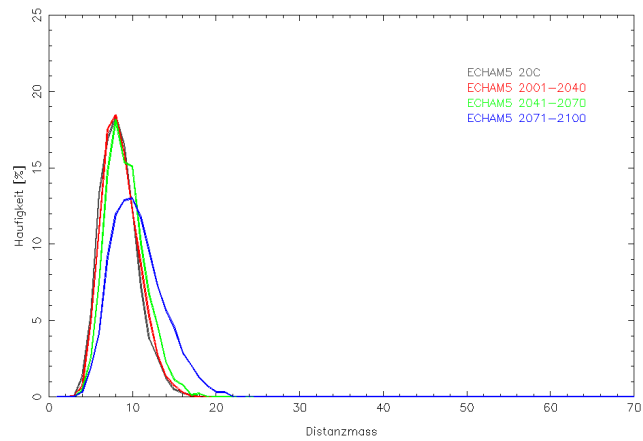
Die unterste Zeile in jeder Tabelle gibt die Anzahl aller in einer Gruppe vereinigten Tage an, also 75 in Gruppe 21 oder 192 in Gruppe 26; zusammen ergibt dies die Gesamtzahl der fehlzugeordneten Tage, wie sie in Abb. 2.3 gezeigt wurde (die großen, roten Anteile der jeweiligen Sommer-Säulen). Eine Zeilensumme, die nicht in der Tabelle aufgeführt ist, würde die Gesamtzahl der Tage angeben, die aus einer WETTREG-Klasse „abgewandert“ sind.

Des Weiteren ist aus der Tabelle nicht nur ablesbar, wie viele Tage sich in den einzelnen Gruppen zusammenfinden, sondern auch, ob dies potenziell kalte/warme/mitteltemperierte Klassen sind. Dabei ist zu betrachten, *woher* die Gruppenmitglieder kommen. Die folgenden Analysen beziehen sich alle auf das Szenario **A1B** im oberen Tabellendrittel. Dort sind als Quelle für Gruppe 22

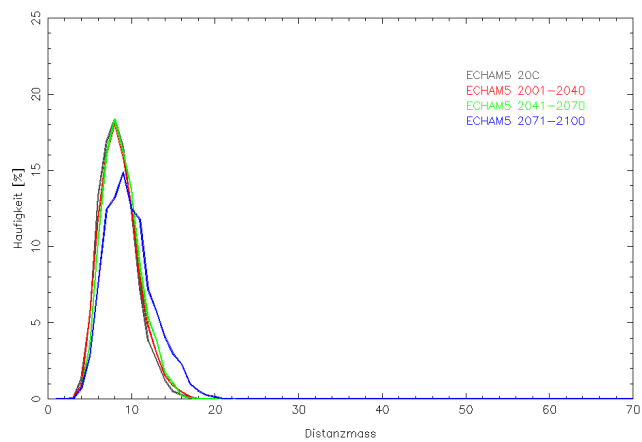
überwiegend die WETTREG-Klassen 5 (96 Fälle) und 6 (100) erkennbar. Da diese beiden Klassen die Mitte des Temperaturintervalls charakterisieren, sollten die aus ihnen abwandernden Tage auch ähnliche thermische Eigenschaften besitzen. Die mittleren Temperaturbereiche der WETTREG-Klassen werden zudem auch an Gruppe 28 abgegeben, aber in geringerer Zahl. Typische, sich aus fehlzugeordneten Tagen der wärmsten WETTREG-Klasse 10 zusammensetzende Gruppen sind 23 und 27. Gruppe 29, die zudem nur eine geringe Anzahl von Tagen (55) beinhaltet, besitzt die Besonderheit, ihren Bestand aus einer Vielzahl von WETTREG-Klassen zu beziehen. Dass in allen Tabellen die WETTREG-Klassen 1 bis 4 praktisch keine Werte enthalten liegt daran, dass sich dort die besonders kalten Temperaturwerte vereinigen, was zwei Folgen hat: (i) Die Klassen 1 und 2 enthalten zum Ende des 21. Jahrhunderts auf Grund des sich erwärmenden Klimas praktisch keine Tage mehr, die sie ggfs. als fehlzugeordnet abgeben könnten und (ii) die wenigen in den Klassen verbleibenden Werte sind zumeist von WETTREG korrekt zugeordnet.



(a) A1B



(b) A2



(c) B1

Abbildung 2.2: Häufigkeitsverteilung der Distanzmaße für den meteorologischen Sommer für die Wetterlagen der Region Mitteldeutschland.

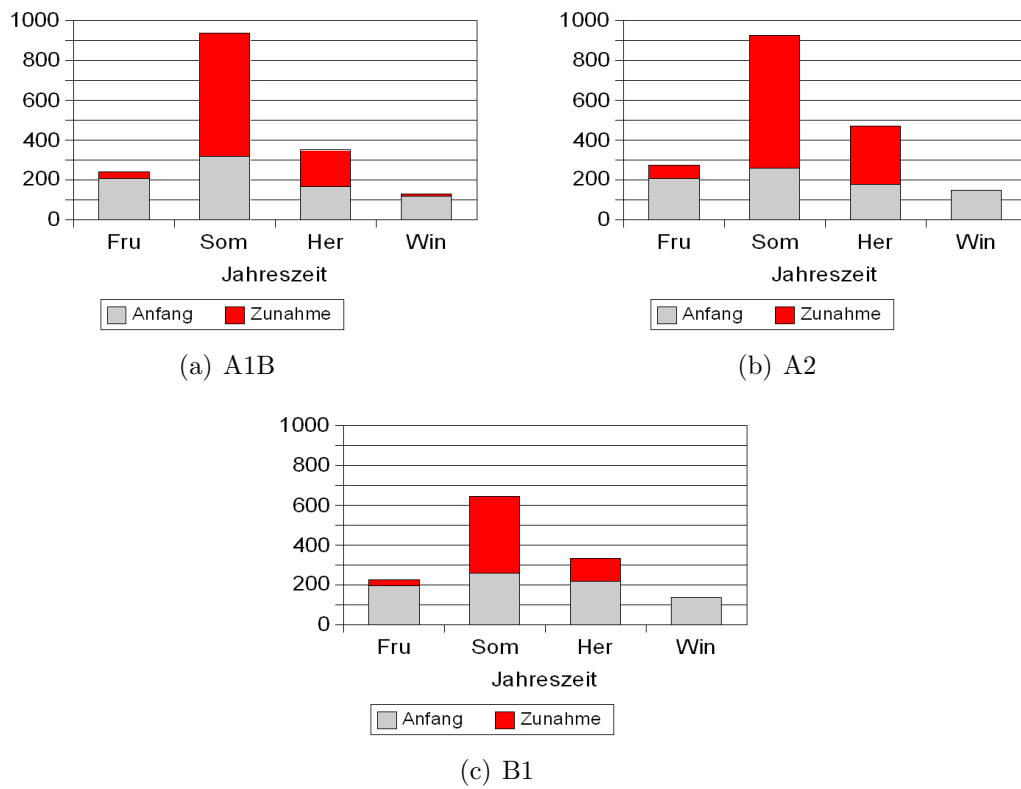


Abbildung 2.3: Zahl der Fehlzuordnungen im Zeitabschnitt 2011-2040 (grau) und Anstieg der Fehlzuordnungen vom Zeitabschnitt 2011-2040 auf die Periode 2071-2100 (rot) in der Region Mitteldeutschland (52,5°N–49,5°N; 6°O–16°O).

Tabelle 2.3: Anzahl der Übergänge von den mit WETTREG bestimmten Wetterlagen (WL) hin zur jeweiligen Gruppe (Mitteldeutschland, Sommer, Periode 2071–2100).

A1B		Gruppennummer							
WL	21	22	23	25	26	27	28	29	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	1	0	0	0	0	3	2	
5	0	96	0	1	0	0	40	5	
6	0	100	0	34	14	0	30	12	
7	15	14	0	8	93	0	40	3	
8	8	1	0	54	17	0	1	21	
9	27	0	0	5	3	8	0	12	
10	25	0	69	41	65	70	0	0	
Sum	75	212	69	143	192	78	114	55	

A2		Gruppennummer						
WL	21	22	23	24	25	27	28	
1	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	3	0	0	0	6	
5	20	1	19	0	0	0	89	
6	78	45	26	0	0	0	52	
7	74	6	46	0	42	0	14	
8	11	45	13	0	7	1	8	
9	0	4	1	5	23	16	0	
10	7	42	0	103	56	63	0	
Sum	190	143	108	108	128	80	169	

B1		Gruppennummer					
WL	21	22	23	24	25	27	
1	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	1	0	0	
3	0	1	0	0	0	0	
4	0	8	2	7	0	0	
5	2	70	3	47	0	0	
6	21	68	2	36	0	12	
7	2	11	12	38	19	68	
8	32	4	4	0	3	7	
9	3	0	9	0	8	3	
10	28	0	2	0	59	54	
Sum	88	162	34	129	89	144	

Zwischenbilanz

Als das Konzept der Transwetterlagen entwickelt wurde, bestand die Vermutung, dass sich diese im Wesentlichen am „warmen“ Rand der Häufigkeitsverteilung der WETTREG-Klassen finden werden. Genährt wurde diese Vermutung durch die Beobachtung, dass die kalten WETTREG-Klassen 1 und 2 im Verlauf des 21. Jahrhunderts praktisch vollständig verschwinden, während die warmen Klassen 8 bis 10, die in der Gegenwart nur selten auftreten, an Gewicht gewinnen. Dies entspricht der Klimaerwärmung. Zudem hat der Häufungseffekt eine jahreszeitliche Differenzierung und tritt am deutlichsten im Winter auf, wo in der wärmsten Klasse 10 ein regelrechtes „Aufstauen“ von Tagen zu verzeichnen ist.

Die Fehlzuordnungen sind, wie die Untersuchungen dieser Studie ergaben, im Winter jedoch *besonders gering*, so dass die scheinbar offenkundige These, gerade in dieser Jahreszeit zusätzliche Muster mit neuer Morphologie identifizieren zu können, deren Quelle in den wärmsten WETTREG-Klassen liegt, aufgegeben werden musste. Es gibt zu ihrer Aufrechterhaltung zu wenige Fehlzuordnungen im Winter. Stattdessen kristallisierte sich eine modifizierte Hypothese heraus: Die aus den fehlzugeordneten Tagen identifizierten Gruppen sind dadurch charakterisiert, dass ihre Herkunft überwiegend *inmitten* der WETTREG-Klassen liegt, d.h. sie sind nicht wegen einer Wertebereichsüberschreitung fehlzugeordnet, sondern weil sich die Beträge von meteorologischen Größen in WETTREG-Klassen und somit der Charakter dieser Klassen in der Zukunft ändert. Zusätzlich ist der Sommer die Jahreszeit, in der sich die neuen Gruppen bilden.

Im folgenden Abschnitt soll nun analysiert werden, welche Eigenschaften die im Sommer fehlzugeordneten Tage aufweisen und ob diese auch bezüglich ihrer meteorologischen Eigenschaften den Ereignisraum der WETTREG-Klassen verlassen.

2.3 Untersuchung der Eigenschaften der gefundenen Gruppen

Atmosphärische Strukturen innerhalb der fehlzugeordneten Tage

Nachdem das Clusterverfahren genutzt wurde, um, je nach Szenario 6 bis 8 voneinander abgegrenzte Gruppen zu identifizieren, sollen diese nun in Form von Karten für die drei Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** vorgestellt werden. Danach erfolgt eine Diagnose weiterer Eigenschaften der in den Gruppen zusammengefassten Tage. Dazu wird das Augenmerk erneut auf die letzten 30 Jahre des 21. Jahrhunderts gelegt. Für eine detaillierte Analyse wird im zweiten Teil dieses Abschnitts das Szenario **A2** verwendet; in diesem findet sich die stärkste Zunahme der fehlzugeordneten Tage im 21. Jahrhundert (vgl. Abb. 2.3).

Für die identifizierten Gruppen wurden Composita, also mittlere Felder, aller 43 in Anhang D aufgeführten Größen erstellt. Dabei lässt sich das Profil der neu identifizierten Gruppen bei einigen dieser Größen deutlicher erkennen als bei anderen. In diesem Abschnitt wurden zunächst die Felder der relativen Topografie (ReTop) 850/1000 hPa ausgewählt. Diese Größe, auch als Schichtdicke

bezeichnet, ist in hohem Maße mit dem Wärmeinhalt der entsprechenden Atmosphärenschicht gekoppelt – eine niedrige ReTop bedeutet, dass die Luftsäule an dieser Stelle kalt ist und ein hoher Wert der ReTop steht für hohe Temperatur. Es ließe sich sogar aus der ReTop auf die Bodentemperatur schließen. Für die Kärtchen in Abb. 2.4 bis 2.6 wurden die von der Clusteranalyse gefundenen Gruppen in eine synoptisch sinnvolle Reihenfolge gebracht, bei der, genähert, das erste Feld die in der Mitte Deutschlands kälteste und das letzte Feld die dort wärmste Gruppe charakterisieren. Der Vergleich mit Tab. 2.3 zeigt, dass die im vorigen Abschnitt geschilderten thermischen Eigenschaften der Gruppen zu einer vergleichbaren Reihung führen. Bei Szenario **A1B** (Abb. 2.4) wurden beispielsweise die Gruppen 22 und 28 dem niedrigeren und die Gruppen 23 und 27 dem höheren Temperaturwertebereich zugeordnet; für Szenario **A2** (Abb. 2.5) sind 28 und 21 die kältesten Gruppen; 24 und 27 hingegen beziehen ihre Tage so gut wie ausschließlich aus der wärmsten WETTREG-Klasse 10 (vgl. Tab. 2.3), weshalb diese Gruppen auch durch hohe ReTop-Werte gekennzeichnet sind.

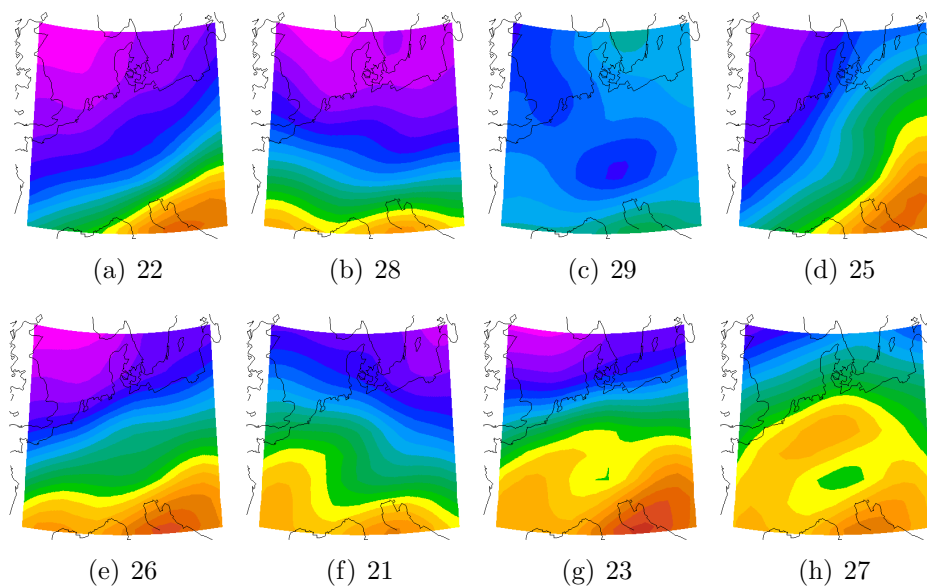


Abbildung 2.4: Mittelbilder der relativen Topografie 850/1000 hPa der identifizierten Gruppen (vgl. Tab 2.3) für das Szenario **A1B**. Dargestellt ist das mittlere Europa (Zeitraum: 2071–2100, Sommer).

Die Farbskala wurde für alle drei Abbildungen gleich gewählt: Der Wertebereich wird von 1325 (lila) bis 1420 (rot) Geopotenziellen Metern in 24 Farbbänder aufgeteilt.

Quantitative Eigenschaften der neu identifizierten Gruppen – Erarbeitung eines Profils der Transwetterlagen: (i) Temperatur

Sind alle identifizierten Gruppen auch wirklich Transwetterlagen? Im Detail wird dem durch die Betrachtung der Eigenschaften für Gruppen aus dem Szenario

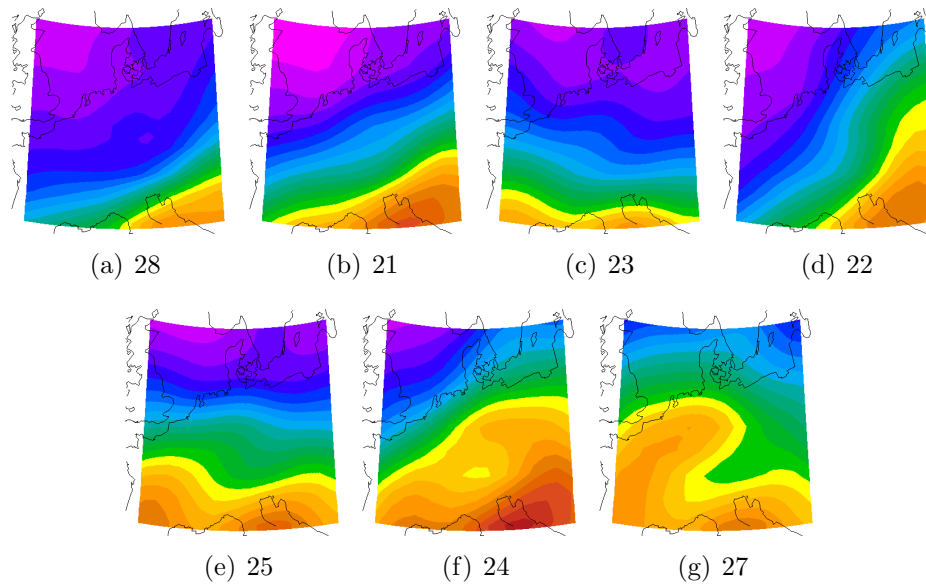


Abbildung 2.5: Wie 2.4, jedoch für Szenario **A2**.

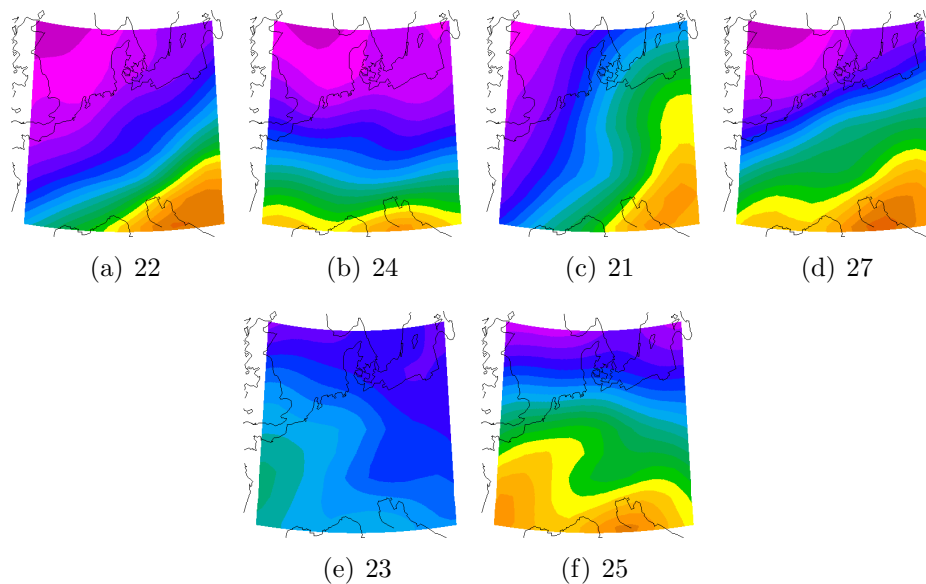


Abbildung 2.6: Wie 2.4, jedoch für Szenario **B1**.

A2 (Abb. 2.5) nachgegangen. Zu diesem Zweck ist in den Abb. 2.7 bis 2.10 sowohl für die WETTREG-Klassen 1–10³⁾ als auch für die in **A2** neu identifizierten Gruppen 21–28⁴⁾ die Häufigkeitsverteilung für die Klassen bzw. Gruppen dargestellt. In diesen Abbildungen befinden sich also Kurven, denen Tage unter-

³⁾Die Klasse 1 existiert deshalb nicht, weil sie am Ende des 21. Jahrhunderts nicht mehr auftritt.

⁴⁾Die Gruppe 26 existiert deshalb nicht, weil sie im Zuge des Abbruchkriteriums – wie im vorigen Abschnitt bei der Beschreibung der Clustermethode erwähnt – auf Grund ihrer geringen Größe aufgelöst wurde.

halb des 95%-Perzentils der Abstandsmaß-Häufigkeitsverteilung zu Grunde liegen (WETTREG-Klassen 2–10) und Kurven, die Tage oberhalb des 95%-Perzentils beschreiben (neu identifizierte Gruppen 21–28); dabei sind die Kurven für die WETTREG-Klassen aus folgenden Gründen dünn gezeichnet: (i) Das Auge des Betrachters soll nicht mit einer überbordenden Fülle farbiger Kurven überfordert werden; (ii) die wichtigen Kurven sind diejenigen, die den Wertebereich der neu identifizierten Gruppen darstellen, weshalb diese auch dick und farbig gezeichnet wurden.

In Abb. 2.7 ist die Häufigkeitsverteilung der relativen Topografie dargestellt. Diese ist ein Maß für den Temperaturinhalt, und da die WETTREG-Klassen aufsteigend nach der Temperatur gebildet wurden, ist die Zuordnung dennoch möglich, denn es gehört die am weitesten links liegende Kurve zur kältesten hier dargestellten Klasse (2) und die am weitesten rechts liegende dünne Kurve gehört zur wärmsten Klasse (10). Die wärmste WETTREG-Klasse (10) ist zudem dünn und rot gezeichnet, um sie ein wenig als „Außengrenze“ des Ereignisraums der WETTREG-Klassen hervorzuheben.

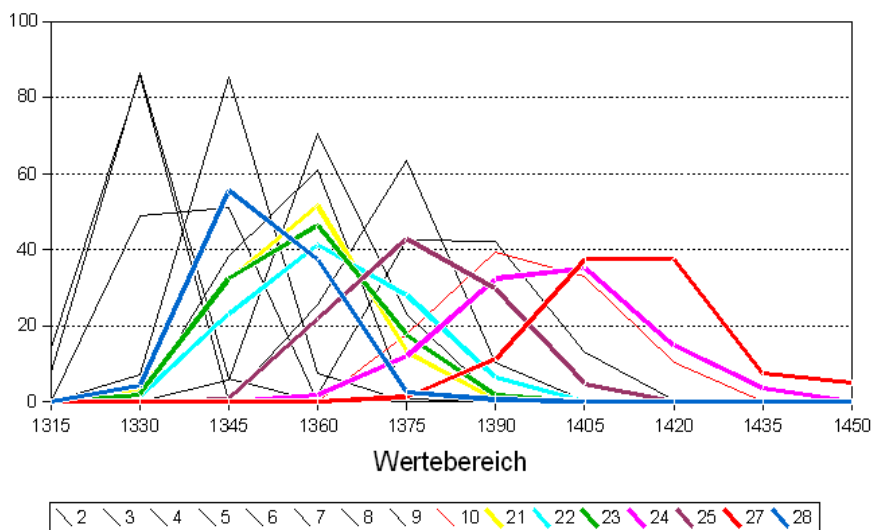


Abbildung 2.7: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der relativen Topografie 1000/850 hPa für die WETTREG-Klassen 2–10 und die 7 neu identifizierten Gruppen. (Szenario: **A2**, Zeitraum 2071–2100, Sommer, Gitterpunkt 51°N, 10°O).

Man stelle sich den gesamten Ereignisraum der WETTREG-Klassen als die Einhüllende der dünnen Kurven vor. Die meisten neu identifizierten Gruppen befinden sich vollständig innerhalb dieses Raums – zusätzlich liegt der Wertebereich der kältesten Gruppe aus Abb. 2.5 auch am weitesten links (Gruppe 28, blaue Kurve in Abb. 2.7), was den visuellen Eindruck der Kartendarstellung von Gruppe 28 in Abb. 2.5 unterstreicht und auch durch die WETTREG-Klassen, aus denen die Tage in Gruppe 28 stammen, bestätigt wird (vgl. Tab. 2.3). Die Häufigkeitsverteilungen der Gruppen 21 (gelb), 23 (grün), 22 (türkis) und 25 (violett) befinden sich ebenfalls unter der gedachten Einhüllenden der WETTREG-

Klassen. Die einzigen Kurven, die in Abb. 2.7 mit einem Teil ihrer Verteilung in einen neuen Wertebereich vorstoßen, sind die der Gruppen 24 (rosa) und 27 (rot). Eine erste Charakterisierung wird möglich:

- Die Tage in den außerhalb des Wertebereichs der WETTREG-Klassen liegenden Gruppen sind durch außergewöhnlich hohe Temperaturwerte gekennzeichnet.

Es ist zu beachten, dass sich die Wertebereiche der Gruppen 24 und 27 nicht vollständig außerhalb des bisherigen Ereignisraums befinden – insbesondere Gruppe 24 liegt nur knapp höher als die wärmste WETTREG-Klasse 10.

Wird eine sehr vereinfachte Abschätzung der 2 m-Temperatur aus der relativen Topografie 850/1000 hPa eingesetzt, so ergeben sich mittlere maximale Temperaturwerte für die Gruppe 24 von 33°C und für Gruppe 27 von 36°C. An Einzeltagen können Höchsttemperaturwerte von 40 und 42°C auftreten.

(ii) Feuchte

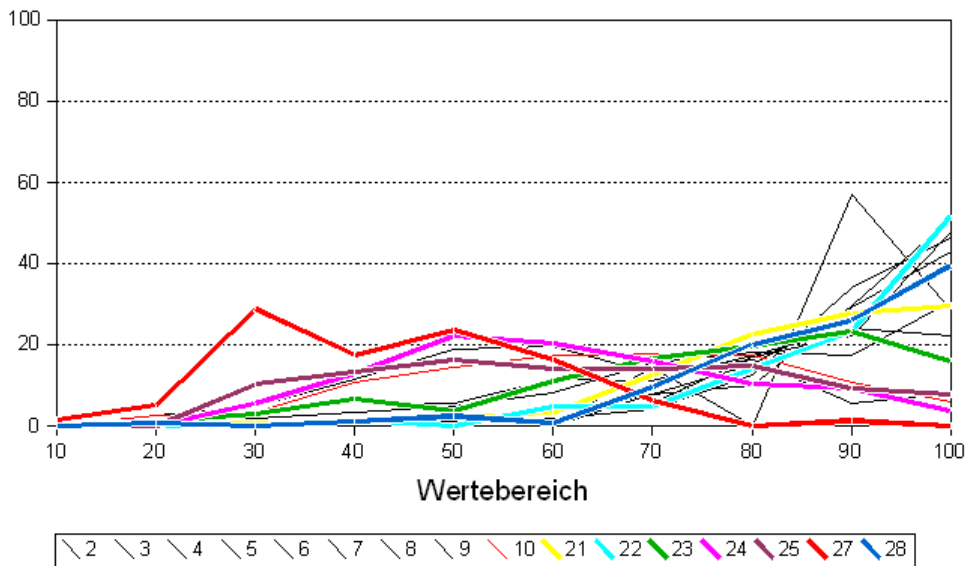


Abbildung 2.8: Wie in Abb. 2.7, jedoch für die relative Feuchte in 850 hPa.

Lässt sich das Profil der sich abzeichnenden Transwetterlagen auch bezüglich der Feuchte schärfen? Diese Frage kann mit Hilfe von Abb. 2.8 beantwortet werden. In ihr ist, ähnlich wie in Abb. 2.7, der Wertebereich für die WETTREG-Klassen 2–10 und die sieben neu identifizierten Gruppen 21–28 dargestellt. Die atmosphärische Größe ist die relative Feuchte in 850 hPa. Die meisten Gruppen liegen innerhalb des Wertebereichs der aus den WETTREG-Klassen gebildeten Einhüllenden; nur die Gruppen 24, 25 und 27 liegen außerhalb – Gruppe 27 am deutlichsten. Es gibt folglich eine weitere Charakterisierung der sich abzeichnenden Transwetterlagen:

- Die Tage in den außerhalb des Wertebereichs der WETTREG-Klassen liegenden Gruppen sind durch außergewöhnlich geringe Feuchte in 850 hPa gekennzeichnet.

Ähnlich wie bei den Aussagen zur relativen Topografie ist zu beachten, dass sich die Wertebereiche der Gruppen 24, 25 und 27 nicht vollständig außerhalb des von den WETTREG-Klassen aufgespannten Ereignisraums befinden.

(iii) Vertikale Stabilität/Labilität

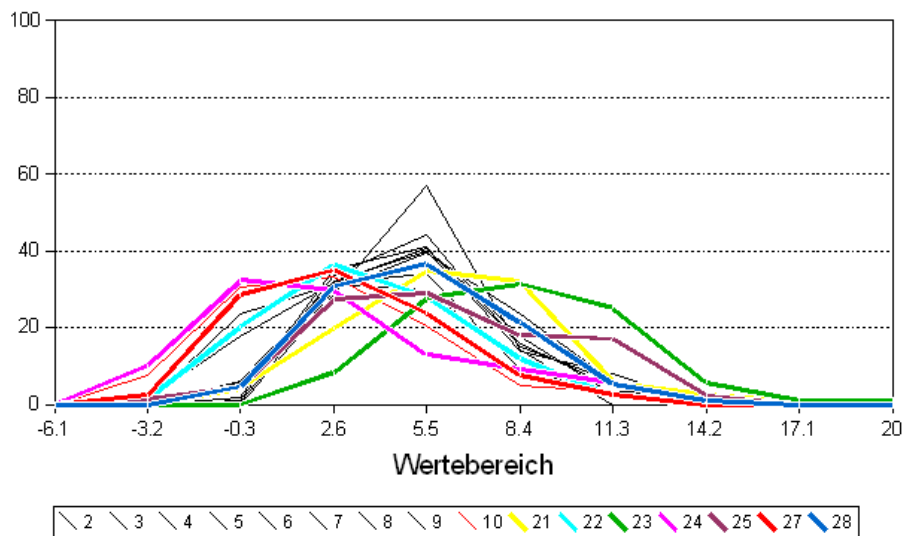


Abbildung 2.9: Wie in Abb. 2.7, jedoch für den Stabilitätsindex nach Showalter.

Die Eigenschaften der neu identifizierten Gruppen können durch Betrachtung von Stabilitätsindizes weiter eingegrenzt werden. Solche Indizes werden zum Beispiel in der Wettervorhersage verwendet, um abzuschätzen, welches Potenzial in einer Luftmasse ist, Konvektion zu bilden (oder zu reduzieren) und wie intensiv Niederschlagsprozesse sein können. Der Index nach Showalter ist in Anhang D.6 beschrieben. In ihm wird die Labilität mit Hilfe von Temperatur und Feuchtemaßen ausgedrückt, das heißt es wird die durch Kondensationsprozesse freiwerdende latente Wärme in die Labilitätsabschätzungen einbezogen. Ein niedriger Indexwert steht dabei für besonders labile Schichtungsverhältnisse mit starkem vertikalen Wolkenwachstum und intensiven Niederschlagsprozessen. Interessanterweise liegen bezüglich des Showalter-Index besonders viele neu gefundene Gruppen mit ihrem Wertebereich am Rande des durch die WETTREG-Klassen vorgegebenen Ereignisraums oder verlassen diesen. Dabei sind die Kandidaten für die sich abzeichnenden Transwetterlagen, Gruppe 24 und 27 (s. Abb. 2.9), im stark labilen negativen Wertebereich angesiedelt und liegen im Bereich der wärmsten und labilsten WETTREG-Klasse 10, übertreffen diesen allerdings nicht. Die bei der Feuchte (s.o.) ebenfalls auffällige Gruppe 25 ist, wie auch die kühleren Gruppen

21 und 23, in ihrem Wertebereich zur atmosphärischen *Stabilität* hin verschoben. In ihnen herrscht Absinken, verringertes Wolkenwachstum und das Auftreten von Niederschlagsprozessen geringer Intensität vor.

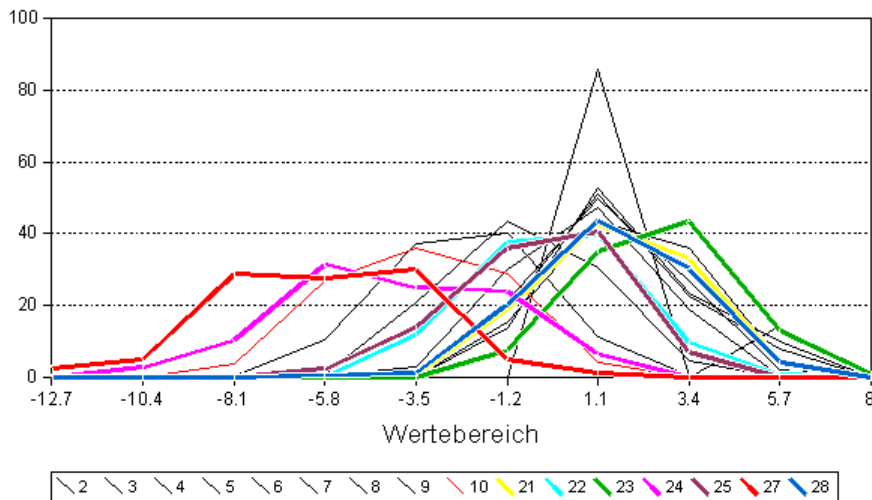


Abbildung 2.10: Wie in Abb. 2.7, jedoch für den Stabilitätsindex nach Enke.

Ein weiterer Stabilitätsindex ist der nach Enke (s. Anhang D.5). In ihm wird die Labilität als eine Art „Pumpe“ beschrieben, deren Leistung von den Temperaturunterschieden in zwei Luftschichten sowie vom Unterschied der Temperatur eines aufsteigenden Luftpakets zur umgebenden Luft abhängt. Der Index nach Showalter und der nach Enke ergänzen sich, denn ob im Zuge der Vertikalbewegung von Luftpaketen auch Wolkenbildung auftritt, ist beim Enke-Index nicht relevant. Während der Showalter-Index die Unterschiede zwischen WETTREG-Klassen und neu indentifizierten Gruppen eher auf der stabilen Seite (positive Index-Werte) herausarbeitet, also effizient zur Beschreibung von Gruppen, in denen die Niederschlagsprozesse gedämpft werden, dient, liegt beim Enke-Index die Stärke in der Trennschärfe auf der labilen Seite. Das heißt, mit diesem Index lassen sich Gruppen isolieren, in denen das Potenzial zur Auslösung von Vertikalbewegungen, in deren Folge verstärkte Niederschlagsprozesse auftreten, groß ist. Die beiden in den bisherigen Identifikationsschritten am häufigsten auffallenden Gruppen 24 und 27, deren Charakter bereits mit „warm und trocken“ beschrieben wurde, sind, wie ihre Lage im Bereich hoher negativer Indexwerte in Abb. 2.10 zeigt, besonders labil geschichtet. Bezüglich des Enke-Index sind sie zudem mit weiten Bereichen der Verteilung deutlich außerhalb des Wertebereichs der ebenfalls sehr warmen und labilen WETTREG-Klasse 10 angesiedelt. Es gibt auch Abweichungen auf der „stabilen Seite“ der Verteilung des Enke-Index. Die kühlere Klasse 23 verlässt den Wertebereich dieses Index bezüglich der WETTREG-Klassen am deutlichsten in Richtung Stabilität, d.h. Dämpfung von Vertikalbewegung.

Somit kann der Charakteristik der sich abzeichnenden Transwetterlagen Folgendes hinzugefügt werden:

- Es gibt bezüglich der Labilität sowohl neu gefundene Gruppen, die sich durch erhöhte Labilität auszeichnen, wie auch Gruppen, die durch erhöhte Stabilität charakterisiert sind. Dabei sind die Gruppen mit *labiler* Schichtung die gleichen, die auch schon bei der Untersuchung von Wärmeinhalt und Luftfeuchte außerhalb des Ereignisraums der WETTREG-Klassen gefunden wurden.

Das bedeutet: Bei der Betrachtung der Bereichsüberschreitungen für die relative Topografie 850/1000 hPa und die Feuchte in 850 hPa fanden sich Besonderheiten nur bei den trocken-warmen Gruppen 24 und 27. Auch wenn die Stabilitätsbetrachtungen in diesem Abschnitt weitere, zu *stabiler* Schichtung neigende auffällige Gruppen zutage förderten, sind doch die Gruppen 24 und 27 in der Zusammenschau der Indizien als Transwetterlagen zu bezeichnen.

(iv) Advektion

Schlussendlich soll für die Transwetterlagen in den Gruppen 24 und 27 noch die Advektion betrachtet werden, d.h. gezeigt werden, welches die mittleren Strömungsverhältnisse dieser Transwetterlagen sind. In Abb. 2.11 sind dazu Composita des 700 hPa-Geopotentials dargestellt. In diesem Niveau, das deutlich außerhalb des Reibungseinflusses der bodennahen Luftschicht liegt, lässt sich die Anströmung⁵⁾ und damit die Herkunft der zu erwartenden Luftmassen gut erkennen. Den in Abb. 2.11 dargestellten Karten liegt ein Wertebereich von 2950 bis 3100 geopotenziellen Metern zu Grunde, der in bis zu acht Farbbänder eingeteilt ist, wobei die niedrigen Werte durch Grün- (so niedrige Werte kommen allerdings in den beiden dargestellten Karten nicht vor) und Gelbtöne und die hohen durch Rottöne gekennzeichnet sind.

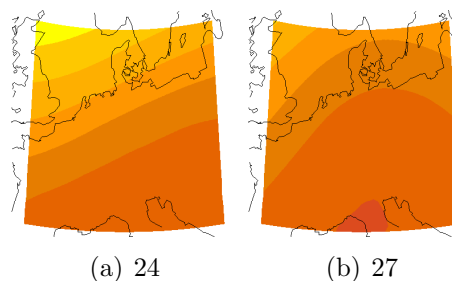


Abbildung 2.11: Mittelbilder des Geopotentials 700 hPa der Gruppen 24 und 27 für das Szenario A2 der Region Mitteldeutschland. (Zeitraum 2071-2100, Sommer)

⁵⁾Die Strömung verläuft parallel zu den in Abb. 2.11 farbig abgegrenzten Bändern mit hohen Geopotenzialwerten zur rechten und niedrigen zur linken Seite, d.h. in beiden Karten von SW nach NO.

Fazit

Das Kriterium für die Kennzeichnung von Tagen, an denen außergewöhnliche Wettersituationen auftreten, war in dieser Studie das Überschreiten einer Schwelle bei der Berechnung des Abstandsmaßes. Dieses quantifiziert die Ähnlichkeit einer einzelnen, an einem Tag auftretenden Wettersituation mit der mittleren Wettersituation, welche aus allen in einer WETTREG-Klasse zusammengefassten Tagen gebildet wird. Eine große Zahl von Fehlzuordnungen tritt im Sommer auf, während das Überschreitungskriterium im Winter nur sehr wenige Tage aussortiert. Wie in der Zwischenbilanz auf S. 18 konstatiert, stammt ein nicht unerheblicher Teil der neuen Gruppen aus dem Bereich der WETTREG-Klassen 5 bis 8, der nicht mit hohen sondern mit mittelhohen Temperaturwerten assoziiert ist. Zur Veranschaulichung sei dies am Szenario **A2** gezeigt: Im **A2**-Segment von Tab. 2.3 ist insbesondere bei den Gruppen 21, 23 und 28 das Mittelfeld der WETTREG-Klassen die Quelle, in nicht so dominierendem Maße trifft das auch auf andere Gruppen zu. Ein zweiter Schwerpunkt der Herkunft ist die wärmste WETTREG-Klasse 10. Wie die detaillierte Analyse in Abschnitt 2.3 zeigt, sind keineswegs alle neu gefundenen Gruppen auch durch Überschreitungen des in den WETTREG-Gruppen auftretenden Wertebereichs (z.B. für die relative Topografie 1000/850 hPa, die Feuchte in 850 hPa oder die vertikale Stabilität der atmosphärischen Schichtung) charakterisiert. Vielmehr lassen sich im Szenario **A2** nur zwei (nämlich 24 und 27) der sieben neuen Gruppen als Transwetterlagen erkennen. Diese wiederum haben überwiegend die wärmste WETTREG-Klasse als Quelle.

In den nächsten beiden Absätzen folgen Aussagen zu den Transwetterlagen in den Jahreszeiten.

Für die Klimaänderungen im Sommer kann der Transwetterlagen-Ansatz zu einem Teil erklären, weshalb das Erwärmungssignal der WETTREG-Regionalisierung von dem numerisch-dynamischer Ansätze abweicht (vgl. Abb. 3.1) und nur relativ geringe Zunahmen bei den Beträgen der Temperaturextreme auftreten ([Enke u. a. 2006]): Die *Ausprägung und Intensität* der in den WETTREG-Klassen zusammengefassten Zirkulationsmuster ändert sich. Da das WETTREG-Verfahren seinen Antrieb aus der Häufigkeit und Reproduzierfähigkeit großräumiger Muster im globalen Zirkulationsmodell ECHAM5 bezieht, ist es auch sensitiv bezüglich der Fähigkeit des globalen Modells, die Vielfalt und die Intensität der Muster jetzt und für die Zukunft hinreichend genau darzustellen. Das Auftreten von Transwetterlagen, welche Muster mit neuen Eigenschaften sind, reduziert die Schärfe der Zuordnung. Zudem kristallisiert sich in den sommerlichen Transwetterlagen ein Signal im Bereich der besonders hohen Temperaturwerte heraus. Das heißt, die WETTREG-Klassen stellen gerade die wärmsten Tage subadäquat dar – numerisch-dynamische Modelle, in denen die physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre direkt simuliert werden, scheinen diesen Effekt nicht zu besitzen und daher z.B. eine höhere Mitteltemperatur zu „produzieren“.

Nun tritt aber eine Klimaerwärmung auch im Winter auf, einer Jahreszeit,

in der es kaum fehlzugeordnete Tage und damit eine nur sehr geringe Wahrscheinlichkeit für Transwetterlagen gibt. Das heißt, die WETTREG-Muster erklären die Klimaerwärmung im Winter hinreichend genau. Wie der Vergleich mit numerisch-dynamischen Modellen zeigt (s. Abb. 3.1), sind in dieser Jahreszeit die Erwärmungssignale der Modelle einander sehr viel ähnlicher als im Sommer. Der Ursprung der Erwärmung liegt also im Winter nicht in neuen oder intensivierten Mustern, sondern in der sich verändernden *Herkunft* der Luftmassen, also der zunehmenden Advektion der Luft aus zu dieser Jahreszeit wärmeren Regionen in unsere Breiten.

2.4 Anmerkungen zur Feuchte als Führungsgröße

Benutzt man zur Einteilung der WETTREG-Klassen als Führungsgröße nicht die Temperatur sondern den Niederschlag, so ist festzuhalten: Bei den Wetterlagen des Feuchteregimes ist eine Zunahme der Fehlzuordnungen innerhalb des Szenarios nicht feststellbar. Somit kann davon ausgegangen werden, dass es für dieses Regime keine Transwetterlagen gibt.

Abschnitt 3

Zusammenfassung und Ausblick

Es ist nach Isolierung fehlzugeordneter Tage, deren Abstandsmaße zu den WETTREG-Klassen außerhalb des 95%-Perzentils liegen, und der Suche nach Strukturen in den isolierten Tagen festzustellen, dass nur wenige so gebildete neue Gruppen tatsächlich Transwetterlagen sind, die auch den Wertebereich der bisherigen WETTREG-Klassen verlassen. Aus den sieben Gruppen, die innerhalb der fehlzugeordneten Tage für das Szenario **A2** (Sommer) gebildet werden konnten, erfüllen zwei Gruppen diese Definition. Ihre Charakteristika sind:

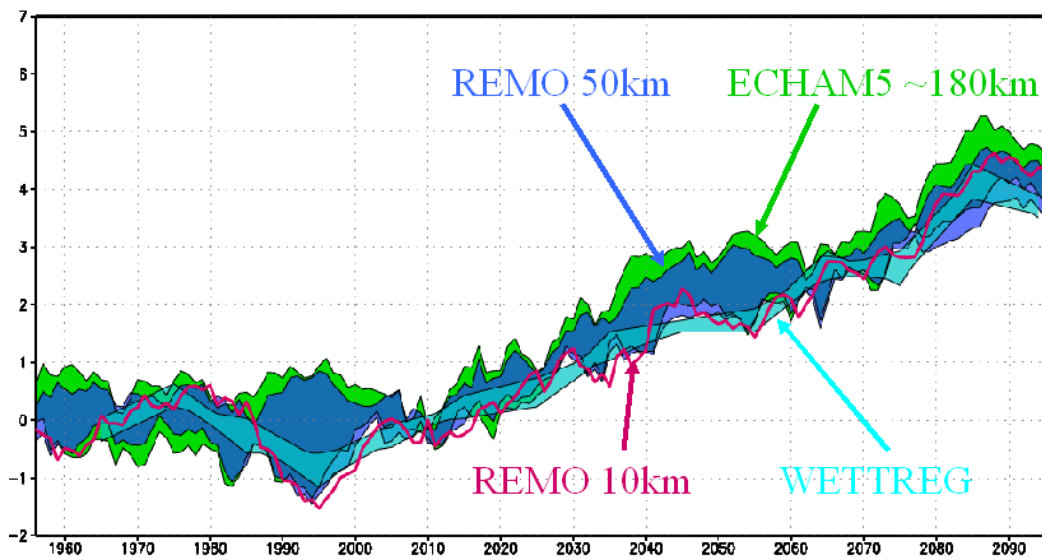
- Besonders hohe Temperaturwerte;
- geringe relative Feuchte;
- hohe statische Labilität.

Die beiden Transwetterlagen des Szenarios **A2** treten an 188 von 2760 Tagen auf (30 Sommer zu 92 Tagen der Jahre 2071–2100) auf. Das entspricht einer Häufigkeit von 6.8%. Für das Szenario **A1B** (vgl. Anhang A.2) kann nur eine Gruppe (Nr. 27) als Transwetterlage bezeichnet werden. Sie hat eine Häufigkeit von 2.8% (78 Fälle).

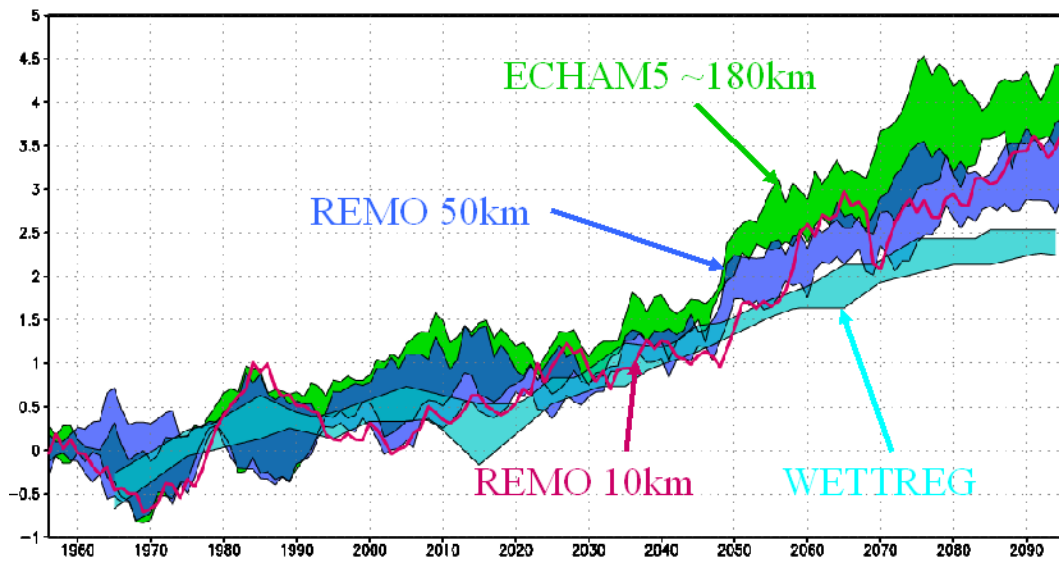
Somit ist zwar ein Einfluss der Transwetterlagen auf das Ergebnis der statistischen Regionalisierung zu konstatieren, er kann aber als nicht sehr stark eingestuft werden. Das heißt aber nicht, dass die Informationen für Einzeltage, wie sie die Transwetterlagen aufzeigen, ohne Bedeutung sind. Die Information, dass sehr heiße Tage mit besonderen meteorologischen Bedingungen, die so nicht im UBA-WETTREG-Szenario enthalten sind, dennoch auftreten können, ist nicht zu unterschätzen. Gerade solche Extreme können zu sehr starken Belastungen für uns alle, aber auch für Flora und Fauna führen.

Die vorliegenden Ergebnisse sollten auch im Kontext des Vergleichs zwischen verschiedenen Modellierungsansätzen gesehen werden. Abbildung 3.1 (b) zeigt einen Unterschied am Ende des Szenariozeitraumes zwischen REMO und WETTREG (Sommer) von etwa 1°C bei der Jahreszeitenmitteltemperatur. Allein über die Transwetterlagen kann das **NICHT** erklärt werden. Weitere Untersuchungen, bei denen beide Verfahren (REMO und WETTREG) im Detail verglichen werden, müssen folgen. Diese sind geplant.

Beim Winter [s. Abbildung 3.1 (a)] treten keine Unterschiede auf. Hier kann die Änderung der Mitteltemperatur allein über die Änderung der Anströmung (Wetterlage) erklärt werden.



(a) Winter



(b) Sommer

Abbildung 3.1: Verlauf der Entwicklung der Jahreszeitenmitteltemperatur im Szenario A1B für die Modelle ECHAM5 (Gitterpunkte in Deutschland, drei Läufe), REMO 50 km (Gitterpunkte in Deutschland, drei Läufe), REMO 10 km (Gitterpunkte in Deutschland, ein Lauf) und WETTREG (10 Realisierungen zu 20 Jahren) für Winter und Sommer.

Literaturverzeichnis

- [Cubasch u. a. 2001] Kap. 9 In: CUBASCH, U. ; MEEHL, G.A. ; BOER, G.J. ; STOUFFER, R.J. ; DIX, M. ; NODA, A. ; SENIOR, C.A. ; RAPER, S. ; YAP, K.S.: *Projections of Future Climate Change*. Cambridge, New York, Oakleigh, Madrid, Cape Town : Cambridge University Press, 2001, S. 526–582
- [Deutschländer und Enke 2004] DEUTSCHLÄNDER, Th. ; ENKE, W.: Abschlussbericht: Ableitung von Wetterlagen aus großräumigen Zirkulationsmustern zur Identifikation von extremen Witterungsperioden mit Schwerpunkt lang anhaltender Trockenheit und deren Projektion in Klimaszenarien (WEREX III). 2004 (13-8802.3521/57). – Forschungsbericht
- [DWD 1987] DWD: *Leitfaden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst. Nr. 1 Allgemeine Meteorologie*. Offenbach am Main : Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1987
- [Enke 2001] ENKE, W.: Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen. Abschlussbericht / Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Dresden, 2001. – Forschungsbericht
- [Enke 2002] ENKE, W.: Abschätzung der zukünftigen Klimatischen Entwicklung in Süddeutschland. 2002 (Werkvertrag B. - Nr. 10029524/43 KLIWA). – Forschungsbericht
- [Enke 2003a] ENKE, W.: Abschlussbericht: Anpassung der Sachsen-Wetterlagenklassifikation für Thüringen und Anwendung auf das Szenario ECHAM4 OPYC3 des Klimasimulationslaufes B2 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Thüringen - REWA Thüringen. 2003. – Forschungsbericht
- [Enke 2003b] ENKE, W.: Anwendung Einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM4 Klimasimulationslaufes (Szenario B2) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland. 2003 (Werkvertrag B. Nr. 50000099 KLIWA). – Forschungsbericht
- [Enke 2003c] ENKE, W.: Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM OPYC3 Klima-Simulationslaufes, bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen / Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen, Wiesbaden. 2003 (Werkvertrag 2003/00082). – Forschungsbericht

- [Enke 2003d] ENKE, W.: Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit Hilfe globaler Klimasimulationen / Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2003. – Forschungsbericht
- [Enke 2004] ENKE, W.: Abschlussbericht: Erweiterung der Sächsischen Klimaprognose WEREX II für das Zeitfenster 2050 bis 2100 für die Emissionsszenarien B2 und A2 (WEREX 2100) / Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2004. – Forschungsbericht
- [Enke 2005] ENKE, W.: Zusammenfassende Bearbeitung und Bewertung der für einzelne Bundesländer vorhandenen Klimaszenarien; im Unterauftrag des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg. UBA-Projekt: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland / Umweltbundesamt. 2005 (204 41 138). – Forschungsbericht
- [Enke u. a. 2005a] ENKE, W. ; DEUTSCHLÄNDER, Th. ; SCHNEIDER, F. ; KÜCHLER, W.: Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. In: *Meteorol. Z.* 14 (2005), S. 247–257
- [Enke u. a. 2005b] ENKE, W. ; SCHNEIDER, F. ; DEUTSCHLÄNDER, Th.: A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. In: *Theor. Appl. Climatol.* 82 (2005), S. 51–63
- [Enke und Spekat 1994] ENKE, W. ; SPEKAT, A.: Verbundprojekt: Klimavariabilität und Signalanalyse. Teilthema: Signalanalyse zur Regionalisierung von Klimamodell-Outputs mit Hilfe der Erkennung synoptischer Muster und statistischer Analysemethoden. 1994 (07KV01/1 (161/30)). – Forschungsbericht
- [Enke und Spekat 1996] ENKE, W. ; SPEKAT, A.: A Two-Step Method to transform Climate Model Outputs into regional and local Weather Elements. In: *Preprints, 13th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, 21-23 February 1996, San Francisco*. Boston : American Meteorological Society, 1996, S. 370–373
- [Enke und Spekat 1997] ENKE, W. ; SPEKAT, A.: Downscaling Climate Model Outputs into local and regional Weather Elements by Classification and Regression. In: *Climate Research* 8 (1997), S. 195–207
- [Enke u. a. 2006a] ENKE, W. ; SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F.: Analyse und Projektion extremer Wettererscheinungen mit physikalisch-statistischen Methoden / Abschlussbericht für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie. 2006 (Werkvertrag Nr. 4500165655). – Forschungsbericht

- [Enke u. a. 2006b] ENKE, W. ; SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F.: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES Szenarien B1, A1B und A2. Zwischenbericht: Szenario A2 / Meteo-Research, Potsdam. 2006. – Forschungsbericht
- [Enke u. a. 1999] ENKE, W. ; SPEKAT, A. ; WEHRY, W.: Signalanalyse zur Regionalisierung von Klimamodell-Outputs mit Hilfe der Erkennung Synoptischer Muster und Statistischer Analysemethoden / Abschlußbericht des BMBF-Forschungsschwerpunktes Klimavariabilität und Signalanalyse. 1999 (Teilprojekt 07VKV01/30). – Forschungsbericht
- [Giorgi 2005] GIORGI, F.: Climate Change Prediction. In: *Clim. Change* 73 (2005), S. 239–265
- [IPCC 1996] IPCC ; HOUGHTON, J.T. (Hrsg.) ; FILHO, L.G. M. (Hrsg.) ; CALLANDAR, B.C. (Hrsg.) ; HARRIS, N. (Hrsg.) ; KATTENBERG, A. (Hrsg.) ; MASKELL, K. (Hrsg.): *Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Oakleigh : Cambridge University Press, 1996
- [IPCC 1998] IPCC ; WILSON, R.T. (Hrsg.) ; ZINYOWERA, M.C. (Hrsg.) ; MOSS, H. (Hrsg.): *The Regional Impacts of Climate Change - An Assessment of Vulnerability*. Cambridge, United Kingdom : Cambridge University Press, 1998 (A Special Report of the IPCC Working Group II). – 517 pp
- [IPCC 2001a] IPCC ; HOUGHTON, J.T. (Hrsg.) ; DING, Y. (Hrsg.) ; GRIGGS, D.J. (Hrsg.) ; NOGUER, M. (Hrsg.) ; LINDEN, P.J. V. (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, New York, Oakleigh, Madrid, Cap Town : Cambridge University Press, 2001a
- [IPCC 2001b] 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, 2001b
- [IPCC 2001c] IPCC ; METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O. (Hrsg.) ; SWART, R. (Hrsg.) ; PAN, J. (Hrsg.): *Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

Change. Cambridge, New York, Oakleigh, Madrid, Cape Town : Cambridge University Press, 2001c

- [Kalnay u. a. 1996] KALNAY, E. ; KANAMITSU, M. ; KISTLER, R. ; COLLINS, W. ; DEAVEN, D. ; GANDIN, L. ; IREDELL, M. ; SAHA, S. ; WHITEA, G. ; WOOLEN, J. ; ZHU, Y. ; CHELLIAH, M. ; EBISUZAKI, W. ; HIGGINS, W. ; JANOWIAK, J. ; MO, K. ; ROPELEWSKI, C. ; WANG, J. ; LEETMAA, A. ; REYNOLDS, R. ; JENNE, R. ; JOSEPH, D.: The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. In: *Bull. Am. Met. Soc.* 77 (1996), S. 437–471
- [Kreienkamp und Spekat 2006] KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A.: IDP2006. Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse. Teilbericht zum Vorhaben: Ableitungen von Transwetterlagen und Entwicklung eines interaktiven Diagnose- und Präsentationstools / Land Baden-Württemberg vertreten durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU-BW), Freistaat Bayern vertreten durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU-BY) Dienstort München, Land Hessen vertreten durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Land Rheinland-Pfalz vertreten durch das Landesamt für Umweltschutz, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUGW), Freistaat Sachsen vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), Freistaat Thüringen vertreten durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG). 2006 (BW: 500 94836/43, HE: 4500169596, RP: 69-CK/Mo, TH: 05/000126). – Forschungsbericht
- [Linke und Baur 1970] LINKE, F. ; BAUR, F.: *Meteorologisches Taschenbuch. Neue Ausgabe, Band II. 2. Auflage.* Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, 1970
- [Lucarini u. a. 2006] LUCARINI, V. ; CALMANTI, S. ; DELL’AQUILA, A. ; RUTI, P.M. ; SPERANZA, A.: Intercomparison of the Northern Hemisphere Winter Mid-Latitude Atmospheric Variability of the IPCC Models. In: *Clim. Dyn.* 26 (2006), S. (in press)
- [Nakićenović u. a. 2000] NAKIĆENOVIĆ, N. ; ALCAMO, J. ; VRIES, B. de ; FENHANN, J. ; GAFFIN, S. ; GREGORY, K. ; GRÜBLER, A. ; JUNG, T.Y. ; KRAM, T. ; ROVERE, E.L. L. ; MICHAELIS, L. ; MORI, S. ; MORITA, T. ; PEPPER, W. ; PITCHER, H. ; PRICE, L. ; RAIHI, K. ; ROEHL, A. ; ROGNER, H.-H. ; SANDOVSKI, A. ; SCHLESINGER, M. ; SHUKLA, P. ; SMITH, S. ; SWART, R. ; ROOIJEN, S. van ; VICTOR, N. ; DADI, Z.: *IPCC Special Report on Emission Scenarios.* Cambridge, U.K. und New York, USA : Cambridge University Press, 2000
- [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
- [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

Teil II

Anhänge

Anhang A

Weitere Erläuterungen und Abbildungen

A.1 Objektives Clusterverfahren

Im Folgenden wird eine Kurzbeschreibung für ein objektives Clusterverfahren nach [Enke und Spekat 1997] vorgestellt.

A.1.1 Prämisse

Globale Klimamodelle geben die großräumigen Zirkulationsstrukturen und deren Änderungen unter Szenariobedingungen gut wieder.

A.1.2 Verfahrenbeschreibung

Das Vorgehen ist mehrstufig. Wichtige Zusatzinformation: Die Ähnlichkeit, resp. Unähnlichkeit wird mit Hilfe des RMSD bestimmt. Er berechnet Unterschiede zwischen Wertepaaren zweier Felder.

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

mit $RMSD_{j,k,l}$: Abstand des j -ten Tages zur l -ten Klasse (Cluster) bei Verwendung des k -ten potentiellen Prediktorenfeldes; $o_{i,j,k}$: Feldwert am Gitterpunkt i ; $\hat{o}_{i,k,l}$ Feldwert des k -ten Feldes in der "Mittelkarte" des l -ten Clusters am Gitterpunkt i .

Die erste Stufe der Clustering Phase besteht darin, dass eine Anfangspartition gesucht wird, die aus den X maximal unähnlichsten Mustern (täglichen Feldern) besteht. Die verbleibenden Tage werden den ihnen ähnlichsten Mustern zugeordnet, durch ihre Addition entstehen Komposita/Cluster. Die Trennung zwischen den Clustern ist nach dem erstmaligen Durchlaufen dieses Schritts noch suboptimal. Geometrisch lässt sich dieser Zustand so veranschaulichen, dass in der ersten Stufe an *Kondensationskernen* (Startpartition, in der Prinzipskizze mit a1 bis a4 bezeichnete Objekte) weitere Tage angelagert werden. Es entstehen Volumina, Orbitalwolken des Bohr'schen Atommodells vergleichbar, deren Schwerpunktlage und Größe durch die Spannweite der in ihnen befindlichen Tage definiert ist (in der Abbildung A.1 durch die Ellipsen um die mit b bezeichneten Objekte markiert). Anfangs gibt es Überschneidungsbereiche und somit Einzelfälle, die nicht optimal zugeordnet sind. In einer iterativen Serie von Austauschvorgängen

wird eine Optimierung der Zuordnung und somit der Trennschärfe betrieben, bis ein stabiler Endzustand (Prinzipskizze: Mit c bezeichnete Objekte) erreicht ist. Zusätzlich besteht die Repräsentativitäts-Forderung, derzufolge die Cluster nicht zu klein werden dürfen und widrigenfalls aufgelöst werden. Außerdem ist anzumerken, dass die Clustering jeden Tag zwingend einem Muster zuordnet, also keine Wittersituation als unklassifizierbar verworfen wird.

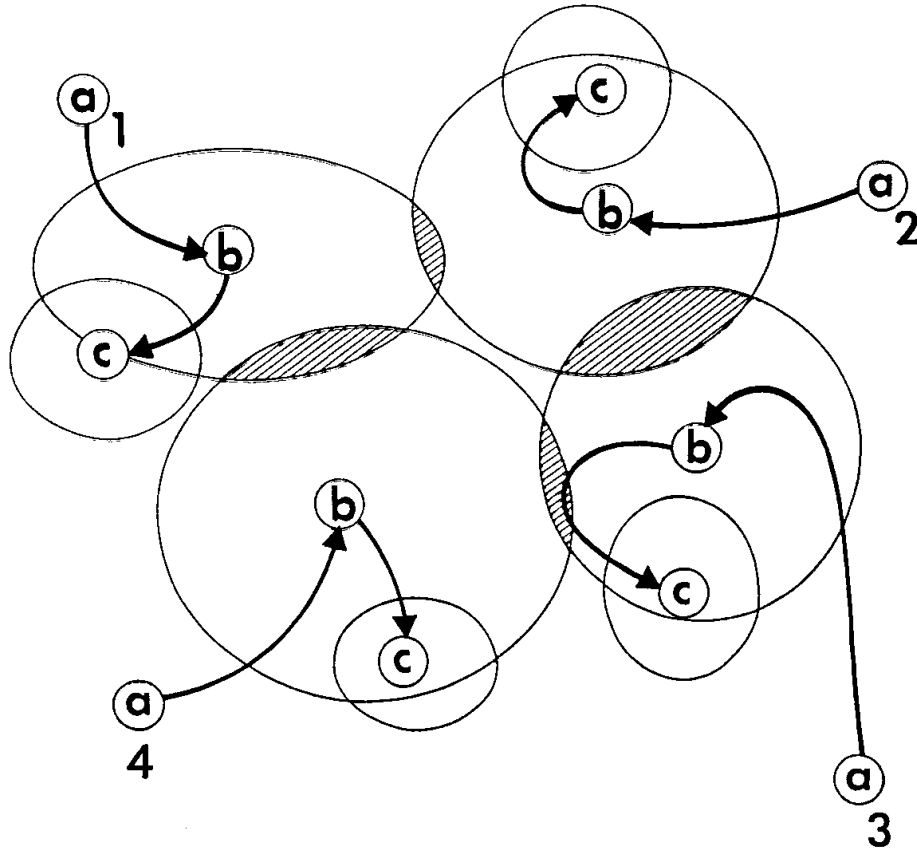


Abbildung A.1: Prinzipskizze Clustering Phase.

A.2 Abbildungen der Wetterlagen und Gruppen spezifischen Häufigkeitsverteilungen ausgewählter Felder für Szenario A1B

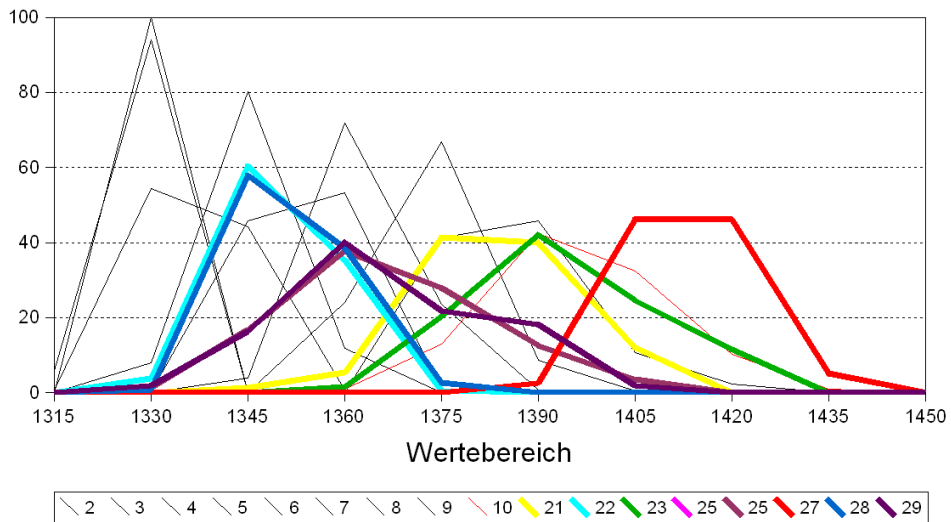


Abbildung A.2: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der relativen Topografie 1000/850 hPa der 9 WETTREG-Klassen mit den 8 gefundenen Gruppen. (Szenario A1B, Zeitraum 2071–2100, Sommer, Gitterpunkt 51°N, 10°O).

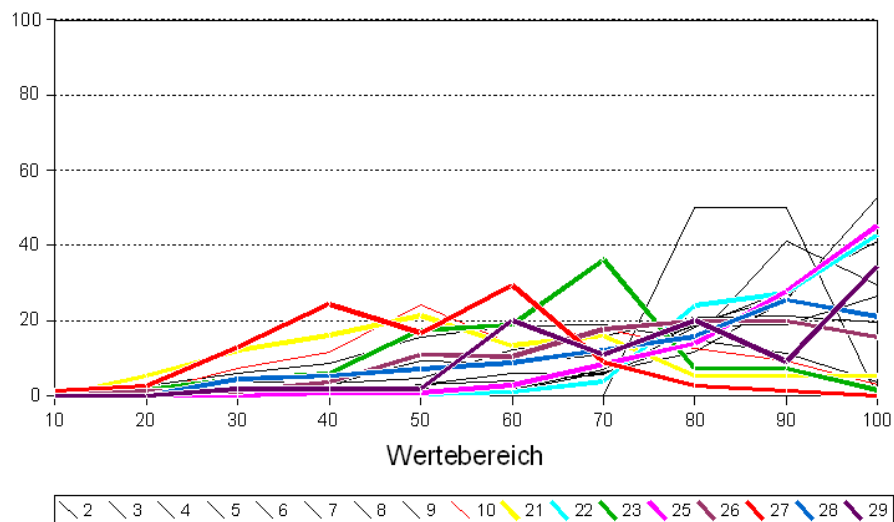


Abbildung A.3: Wie in Abb. A.2, jedoch für die relative Feuchte in 850 hPa.

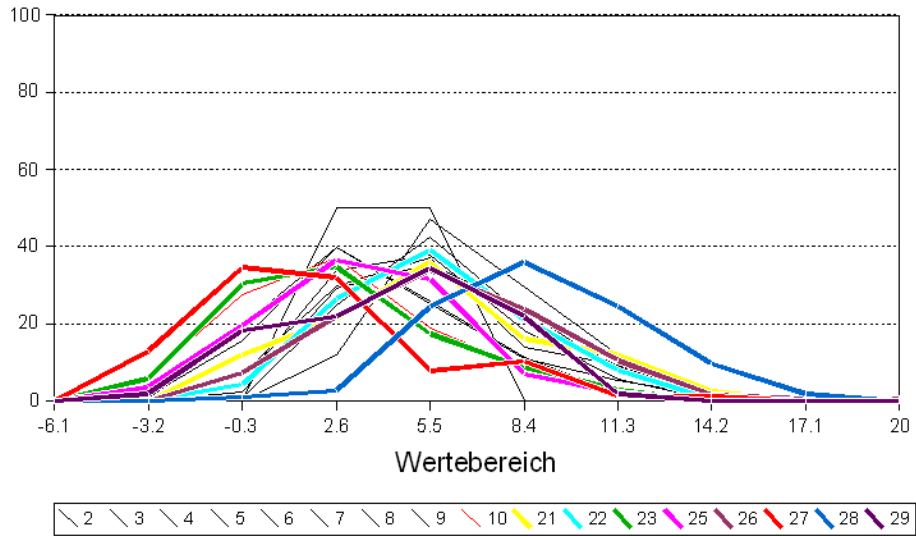


Abbildung A.4: Wie in Abb. A.2, jedoch für den Stabilitätsindex nach Showalter.

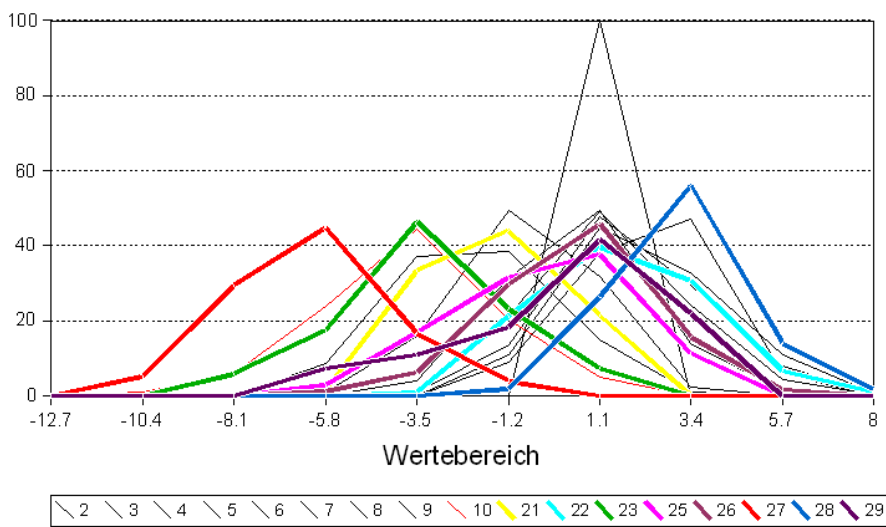


Abbildung A.5: Wie in Abb. A.2, jedoch für den Stabilitätsindex nach Enke.

Anhang B

Erläuterung der SRES-Szenarios

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

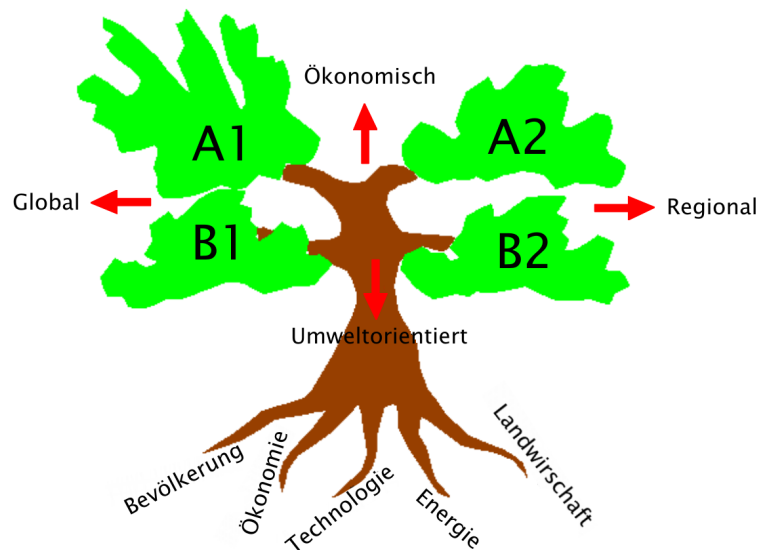


Abbildung B.1: Grundstruktur der IPCC-SRES Emissionsszenarios.

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

Die aus den einzelnen Szenarios resultierenden globalen Temperaturänderungen finden sich in Abb. B.4. Aus ihr geht hervor, dass die stärkste Erwärmung unter den Bedingungen von **A1F1** und **A2** stattfindet, wobei bis zur Dekade 2040–

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

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

2050 die Erwärmung hinter der von Szenario **A1T** zurückbleibt. Das in diesem Zwischenbericht vorgestellte regionalisierte **A2**-Szenario stellt also die angenommenen Auswirkungen einer, insbesondere bei einem längeren Zeithorizont, global besonders erwärmungsträchtigen Entwicklung dar.

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

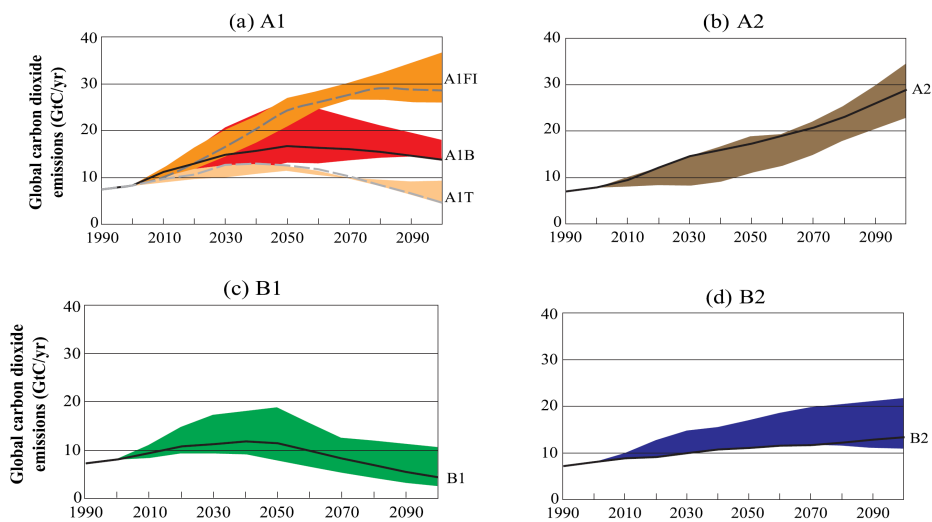


Abbildung B.3: Zeitlicher Verlauf der Emission von CO₂ in den IPCC-SRES-Emissionsszenarios (nach [IPCC 2001c]).

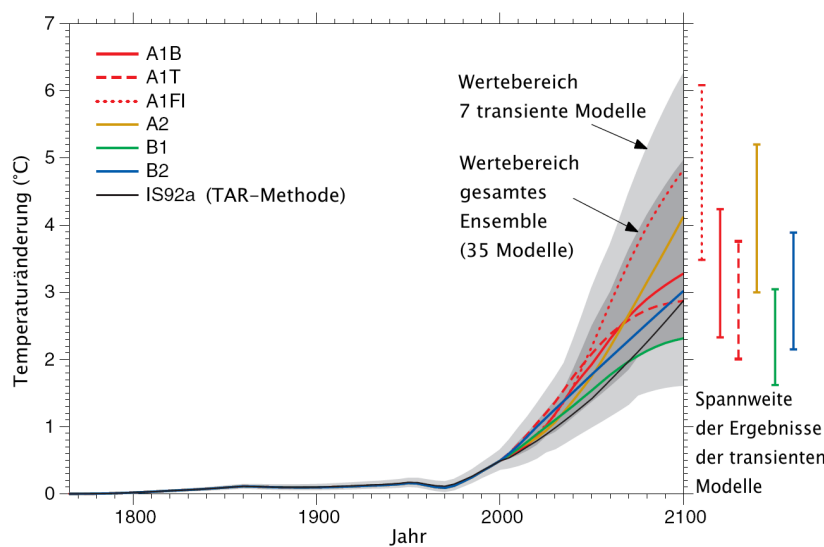


Abbildung B.4: Entwicklung der globalen Mitteltemperatur seit dem Ende des 20. Jahrhunderts und im 21. Jahrhundert in Abhängigkeit von den sechs SRES-Emissionsszenarios. Die Ergebnisse wurden sowohl mit dem vollen Ensemble von 35 globalen Modellen als auch einer Untermenge, die transiente Rechnungen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

Anhang C

Äquidistante Gitterpunkte

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

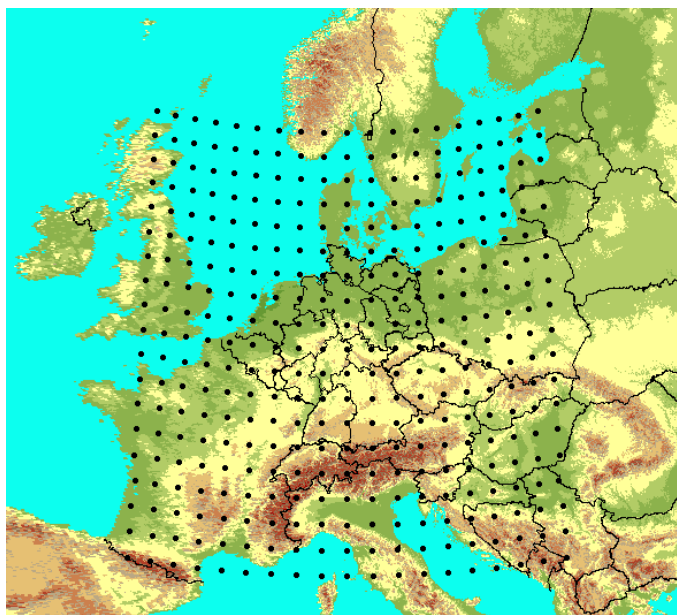


Abbildung C.1: Äquidistantes Gitter in stereographischer Projektion. Die 19×19 Gitterpunkte sind in einem Abstand von 100 km aufgetragen.

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

Anhang D

Erläuterung der potenziellen Prediktoren

Tabelle D.1: Liste der verwendeten Prediktoren.

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

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

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

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

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

Diese Größen werden direkt aus den Modell-Feldern extrahiert.

D.2 Horizontale Differenzen – Nr. 9–12

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

D.3 Vorticity – Nr. 13–16

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

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

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

Diese Größen werden am Ort aus zwei Flächen hergeleitet.

D.5 Stabilitätsindex nach Enke – Nr. 21

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

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

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

$$\Delta T_f = T_{f_{850}} - T_{f_{600}} \quad (\text{D.3})$$

oder

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

mit

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

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

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

D.6 Stabilitätsindex nach Showalter – Nr. 22

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

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

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

D.7 Thermischer Wind – Nr. 23–31

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

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

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

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

D.8 Frontenneigungswinkel nach Margules – Nr. 32

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

D.10 Gradienten – Nr. 35–42

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

D.11 Pseudopotentielle Temperatur – Nr. 43

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

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

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

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

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