



Ein Klimaszenarienmodell für Deutschland

F.-W. Gerstengarbe
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
Telegrafenberg, PF 601203, 14412 Potsdam

1. Einleitung

Das Klimasystem der Erde ist ein hochgradig nichtlineares System. Das heißt, dass deren Entwicklung nicht oder nur in sehr beschränktem Maß vorhersagbar ist (Lorenz, 1963). Um trotzdem zu Aussagen über mögliche Klimaentwicklungen bzw. deren Auswirkungen zu kommen, geht man den Weg über die Szenarienentwicklung. Unter einem Szenarium versteht man dabei die Beschreibung eines sich einstellenden Klimazustandes, wenn über einen definierten Zeitraum bestimmte Annahmen zur Änderung bestimmter Einflussgrößen gemacht werden. (Bekanntestes Beispiel ist die Erhöhung der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre.) Die Art des Szenariums richtet sich nach den Änderungsgrößen, dem gewählten Maßstab sowie der spezifischen Fragestellung. Werkzeuge zur Szenarienerstellung sind sowohl Klimamodelle (Energie- Bilanz-Modelle, Zirkulationsmodelle) als auch statistische Methoden, die auch gekoppelt angewendet werden können.

2. Problemdefinition

Werden globale Klimaänderungen erwartet, sind in erster Linie deren regionale Auswirkungen von besonderem Interesse. Da globale Klimamodelle zur Zeit und in absehbarer Zukunft nicht in der Lage sind, für eine Region verwendbare Modellergebnisse meteorologischer Parameter zu liefern (IPCC, 1995), muss zur Abschätzung von Klimaentwicklungen in solchen Gebieten auf andere Möglichkeiten der Datenbereitstellung zurückgegriffen werden. Dabei darf die Konsistenz sowohl räumlich, zeitlich als auch zwischen den meteorologischen Größen nicht verletzt werden.

Drei wesentliche Methoden zur Szenarienentwicklung werden zur Zeit diskutiert:

Im Rahmen der ersten Methode wird versucht, ein regionales Klimamodell zu entwickeln, dass in ein globales eingebettet ist und von diesem mit den notwendigen Randwerten versorgt wird (z.B. Machenhauer et al., 1996). Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der physikalischen Verknüpfung großskaliger und kleinskaliger Prozesse. Der Nachteil ist, dass Verknüpfungen und Prozesse zur Zeit noch zu ungenau modelliert werden und so zu Fehlern führen, die noch zu groß sind, um die Ergebnisse in anderen Fachbereichen einzusetzen.

Die zweite Methode verwendet Klimamodellergebnisse, die über statistische Verfahren in kleinerskalige Bereiche transformiert werden (Zorita et al., 1993). Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass direkt auf die Klimamodellergebnisse zugegriffen wird, so dass eine physikalische Fehlerfortpflanzung wie bei der Kopplung von Klimamodellen entfällt. Ein Nachteil liegt darin, dass die Fehler des Klimamodells durch den statistischen Ansatz nicht beseitigt werden, sondern direkt in das Szenarium eingehen.

Die dritte Methode geht davon aus, dass die großräumigen, vom Klimamodell angegebenen Änderungen für bestimmte meteorologische Größen in einer Region im Mittel als richtig anzusehen sind. Auf der Basis einer solchen Annahme werden langjährige Beobachtungsreihen mit entsprechenden statistischen Methoden so aufbereitet, dass sie diese Änderungen in Form eines Szenariums wiedergeben. Der Vorteil der Methode besteht darin, dass die vorhandenen Klimamodellfehler bei der Szenarienbildung auf ein Minimum reduziert werden, wobei die bereits angeführte Konsistenz erhalten bleibt. Von Nachteil ist der nicht mehr vor

handene physikalische Zusammenhang zwischen den Klimamodellergebnissen und denen des Szenariums.

Da die beiden erstgenannten Vorgehensweisen zur Zeit noch keine befriedigenden Ergebnisse liefern, wird hier der Versuch gemacht, auf der Basis der letztgenannten Methode ein Modell zu entwickeln, das zu einer Resultatsverbesserung führt.

3. Szenarienaufbau

3.1 Grundidee

Basis des Szenarienaufbaus sind beobachtete Zeitreihen meteorologischer Größen. Entsprechend der Aufgabenstellung, das heißt, der Beantwortung der Frage welche Entwicklungstendenz welcher meteorologischen Größe untersucht werden soll, wird eine Bezugsgröße für die Untersuchungen ausgewählt. Berücksichtigt werden muss dabei, welche meteorologische Größe in ihrer tendenziellen Entwicklung vom Klimamodell hinreichend genau reproduziert wird. (Sieht man zum Beispiel die großräumige Temperaturerhöhung in den nächsten Jahrzehnten als ein sicheres Ergebnis der Klimamodelle an, empfiehlt es sich, die Temperatur als Bezugsgröße auszuwählen.) Nach diesen Vorgaben wird der Bezugsgröße aus den Beobachtungen die vom Klimamodell vorgegebene Änderung aufgeprägt. Dies wird in der Regel ein Trend sein. Durch einen speziellen Algorithmus (s. Abbildung 1) werden die anderen beobachteten meteorologischen Größen konsistent diesen Änderungen angepasst. Dabei wird darauf geachtet, dass deren statistische Grundeigenschaften und Zusammenhänge im wesentlichen erhalten bleiben.

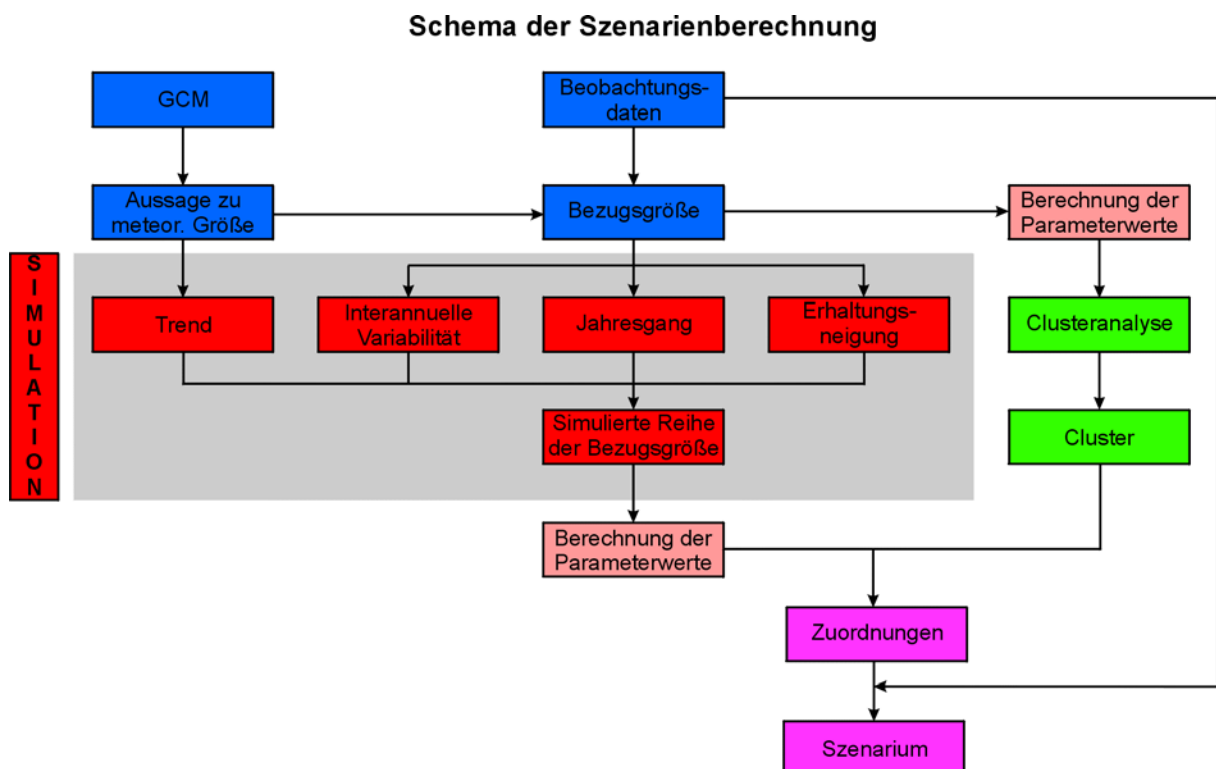


Abb.1: Schema der Szenarienberechnung



3.2 Beschreibung des beobachteten Klimas

3.2.1 Statistische Charakteristika

Da, wie bereits erwähnt, die statistischen Charakteristika des simulierten Klimas nicht wesentlich von denen des beobachteten abweichen sollen, müssen letztere in einem ersten Schritt bestimmt werden. Hierbei handelt es sich um den Mittelwert (in der Simulation zuzüglich der vorgegebenen Änderung), der Standardabweichung, der Erhaltungsneigung, dem Jahresgang sowie der interannuellen Variabilität.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Charakteristika ist hier nicht notwendig, da diese als allgemein bekannt vorausgesetzt werden. Es muss aber daraufhingewiesen werden, dass die Güte der Schätzung der Charakteristika wesentlich von der Länge der Beobachtungsreihen (Stichprobenumfang) sowie deren Qualität abhängt.

Eine wichtige Rolle spielt außerdem die zeitliche Auflösung der vorhandenen Beobachtungsreihen, die entsprechend gewählt werden muss (z.B. Tageswerte).

3.2.2 Einbeziehung komplexer Zusammenhänge

Hat man eine Bezugsgröße festgelegt, so werden gleiche bzw. ähnliche Werte innerhalb der Beobachtungsreihe auftreten. Dabei können die Ursachen, die zu diesen Werten führen durchaus unterschiedlich sein. (Gleiche Tagesmitteltemperaturen können sowohl bei großer als auch kleiner Tagesamplitude auftreten.) Dies wiederum hat Auswirkungen auf die dazu parallel auftretenden anderen meteorologischen Größen. Um hier zu einer richtigen Erfassung dieser komplexen Zusammenhänge zu kommen, muss die Bezugsgröße durch mehrere sie beschreibende Parameter charakterisiert werden. (Bei der angeführten Temperatur können dies das Tagesminimum, das Tagesmaximum und die Tagesamplitude sein. Müssen die jahreszeitlichen Variationen noch berücksichtigt werden, ist ein weiterer Parameter zur Beschreibung nötig, wie zum Beispiel die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer.)

Nach Festlegung der die Bezugsgröße beschreibenden Parameter kann man diese mit Hilfe multivariater Verfahren exakt klassifizieren. In dem vorliegenden Modell wird dazu ein speziell dafür entwickeltes Cluster-Analyseverfahren verwendet (Gerstengarbe, Werner, 1996). Diese Methode ermöglicht es, die Werte der Bezugsgröße in statistisch signifikant voneinander getrennte Cluster einzuteilen bei gleichzeitig automatischer Bestimmung der optimalen Cluster-Anzahl. Dabei erfolgt die Clusterung nach einer vorgegebenen Elementauswahl, in diesem Fall nach der Zeiteinheit (z.B. Tag). Man erhält also eine Anzahl von Clustern, in denen jeweils eine bestimmte Menge von Elementen (Tage einer Zeitreihe) enthalten ist.

Somit lassen sich jedem Element in einem Cluster die konkreten Werte der anderen meteorologischen Größen exakt zuordnen.

Die weitere Verwendung der mit der Cluster-Analyse aus der Beobachtungsreihe gewonnenen Ergebnisse wird in Kapitel 3.3.2 erläutert.

3.3 Erstellung des simulierten Klimas

3.3.1 Bearbeitung der Bezugsgröße

Die Erstellung der simulierten Reihe der Bezugsgröße (Temperatur) erfolgt in mehreren Schritten. Gegeben sind dazu die Tagesmittelwerte einer mehrjährigen Beobachtungsreihe.

1. Schritt

Berechnung der Jahresmittelwerte aus den Beobachtungen, Bestimmung der interannuellen Variabilität und Einteilung in unternormale, normale und übernormale Fälle. Die Kategorisierung ist notwendig, um die Witterungscharakteristik der einzelnen Jahre besser erfassen zu können.

2. Schritt

Erzeugung einer simulierten Reihe der Jahresmittelwerte mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators unter Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften der Beobachtungsreihe und Einteilung in unternormale, normale und übernormale Fälle.

3. Schritt

Aufprägung der vorgegebenen Änderung (Trend) auf die simulierte Reihe.

4. Schritt

Bestimmung der Anomalien zwischen Tageswert und Jahresmittelwert für jedes Jahr der Beobachtungsreihe.

5. Schritt

Jedem simulierten Jahr werden entsprechend seiner Einteilung in die drei Kategorien die entsprechenden Anomalien der Tageswerte zufällig zugeordnet. Dabei setzt sich jeder Tageswert zusammen aus Summe von Jahresmittelwert, dem Wert der Änderung und dem Anomaliewert.

6. Schritt

Da der Erhalt der statistischen Charakteristika eine wichtige Randbedingung darstellt, muss die simulierte Reihe entsprechend überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden.

7. Schritt

Um im folgenden auf die Beobachtungsgrößen zurückgreifen zu können, werden die gleichen, die Bezugsgröße beschreibenden Parameter (s. Cluster-Analyse) für die simulierte Reihe bestimmt.

3.3.2 Verknüpfung von beobachtetem und simuliertem Klima

Mit Abarbeitung des 6. Schrittes aus Kap. 3.3.1 ist die Simulation der Bezugsgröße vollständig abgeschlossen. Dieser Bezugsgröße müssen nun die anderen meteorologischen Größen zugeordnet werden. Dazu werden die im 7. Schritt berechneten Parameterkombinationen verwendet. Jede dieser Parameterkombinationen lässt sich in eines der berechneten Cluster der Beobachtungsreihe (s. Kap. 3.2.2) mit Hilfe eines Distanzmaßes (Abstand von Mahalanobis, euklidische Distanz) einordnen. Danach wird ein Element (Tag) aus diesem Cluster "bedingt zufällig" ausgewählt. Dadurch können die anderen meteorologischen Größen unter Wahrung der Konsistenz dem jeweiligen Tag in der simulierten Reihe zugeordnet werden. "Bedingt zufällig" bedeutet dabei, dass zur Sicherung der Erhaltungsneigung der jeweilig davor liegende Tag bei der Auswahl berücksichtigt wird.

Behandelt werden muss jetzt noch die Situation, dass aufgrund der vorgegebenen Änderung (Trend) Werte in der simulierten Reihe der Bezugsgröße auftreten, die außerhalb des Wertebereichs der Beobachtungsreihe liegen. In diesem Fall wird angenommen, dass die Werte der anderen meteorologischen Größen ihren beobachteten Wertebereich nicht verlassen.



Dieses Vorgehen ist berechtigt, da Voruntersuchungen gezeigt haben, dass in diesem Fall der Fehler deutlich geringer ist als bei einer nicht gesicherten Extrapolation dieser Größen. Damit ist es möglich, die zuzuordnenden Elemente entsprechend der geschilderten Vorgehensweise aus den den extremalen Bereich beschreibenden Clustern zu entnehmen.

Damit erhält man für eine Station ein vollständig simuliertes Klima, das durch die vorgegebenen meteorologischen Größen charakterisiert ist.

Zur Beschreibung der räumlichen Struktur des Klimas sind in der Regel mehr als nur eine Station notwendig. Sind mehrere Stationen (Beobachtungsreihen) vorhanden, muss bei der Erstellung des simulierten Klimas die beobachtete räumliche Struktur erhalten bleiben. Um dies zu gewährleisten wird wie folgt vorgegangen:

Bei der Beschreibung regionaler Klimaänderungen kann man davon ausgehen, dass das Untersuchungsgebiet im großräumigen Maßstab ein einheitliches Klimagebiet darstellt. Aus diesem Grund wird in einem ersten Schritt eine Bezugsstation ausgewählt, die die mittleren klimatischen Verhältnisse dieser Region am besten widerspiegelt. Für diese Station wird das simulierte Klima wie oben beschrieben erstellt. Da aufgrund dieser Vorgehensweise bekannt ist, welches Element (Tag) der Beobachtungsreihe an welcher Stelle der simulierten Reihe eingesetzt wurde, kann man für jede weitere Beobachtungsreihe eine entsprechende simulierte Reihe erzeugen. Dabei bleibt die räumliche Konsistenz aufgrund der vorgegebenen Annahmen erhalten.

Anmerkung: Zusätzlich muss bei der Abarbeitung des geschilderten Algorithmus darauf geachtet werden, dass neben der Erhaltung der statistischen Eigenschaften der meteorologischen Größen die physikalische Gesetze nicht verletzt werden und innerhalb der simulierten Reihen keine Brüche entstehen (z.B. an Jahresübergängen).

3.4 Nachweis der Leistungsfähigkeit der Methodik

3.4.1 Vorgehensweise

Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit der Methodik wurden aus der gesamten zur Verfügung stehenden Beobachtungsreihe der Station Potsdam (1893 - 1994) ein sogenanntes Schätzkollektiv (1893 - 1922) und ein Testkollektiv (1965 - 1994) herausgezogen. Aus dem Testkollektiv wurde der Temperaturtrend bestimmt, und dem Schätzkollektiv entsprechend der vorgestellten Methodik aufgeprägt. Das heißt, es wurde auf der Basis des Schätzkollektivs ein Szenarium für den Testzeitraum erstellt. Anschließend wurden die Szenarienwerte mit den Beobachtungen des Testzeitraumes verglichen. Die wichtigsten Ergebnisse werden im folgenden diskutiert.

3.4.2 Ergebnisse

Gute Simulationsergebnisse liegen dann vor, wenn Mittelwert und Standardabweichung der einzelnen Größen gut miteinander übereinstimmen, die Verteilungen in ihrer Struktur erhalten bleiben sowie die charakteristische Erhaltungsneigung für jede Größe möglichst exakt wiedergegeben wird. Das bedeutet für die Verteilungen nicht, dass die Simulations- bzw. Beobachtungsgrößen aus ein und derselben Grundgesamtheit stammen müssen. (Wäre dies der Fall, bekäme man kein Szenarium sondern eine Prognose, was der Aufgabenstellung nicht entsprechen würde.)

In der Tabelle 1 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Größen für den beobachteten bzw. simulierten Fall angegeben. Man erkennt, dass in jedem Fall die Abweichungen gering sind.

Tab. 1: Statistische Standardwerte zum Vergleich zwischen Beobachtungen (b) und Simulation (s) im Zeitraum 1965 - 1994 für die Station Potsdam

Größe	Mittelwert		Standardabweichung	
	b	s	b	s
TMAX	13.3	13.3	0.88	0.81
TMIT	8.9	9.0	0.74	0.71
TMIN	5.0	5.1	0.70	0.68
NIED	594.6	592.7	102.68	80.20
RELF	78.4	77.7	1.79	1.90
LUDR	1004.7	1004.8	1.17	1.18
DADR	9.5	9.6	0.30	0.38
BEW	6.8	6.4	0.38	0.31
SON	1699.6	1715.9	139.36	150.55

Für das Testkollektiv wurde ein Trend von 0.8 K berechnet und als Vorgabe im Schätzkollektiv verwendet. Als Beispiel ist in Abbildung 2 das Jahresmittel des Tagesmaximums der Lufttemperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der simulierte Trend sehr gut mit dem beobachteten übereinstimmt. Gleichzeitig bleibt die interannuelle Variabilität erhalten, allerdings ohne Beibehaltung eines synchronen Verlaufs, was auch nicht vorgesehen war (Prognose!). Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 3 erkennt man, dass sowohl die zweigipflige Struktur der Temperatur als auch ihre relative Häufigkeit in den einzelnen Klassen erhalten bleiben obwohl simulierte und beobachtete Größe nicht aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Eine weitere wesentliche statistische Eigenschaft ist die Erhaltensneigung. Sie kann mit Hilfe der Andauerhäufigkeitsverteilung oder auch der Autokorrelationsfunktion überprüft werden. Beide Verfahren sind wiederum für das Tagesmaximum der Lufttemperatur in den Abbildungen 4 bzw. 5 dargestellt. In beiden Fällen stimmen Beobachtung und Simulation sehr gut überein.

Gleich gute Ergebnisse werden für die anderen Temperaturgrößen erzielt (hier nicht dargestellt).

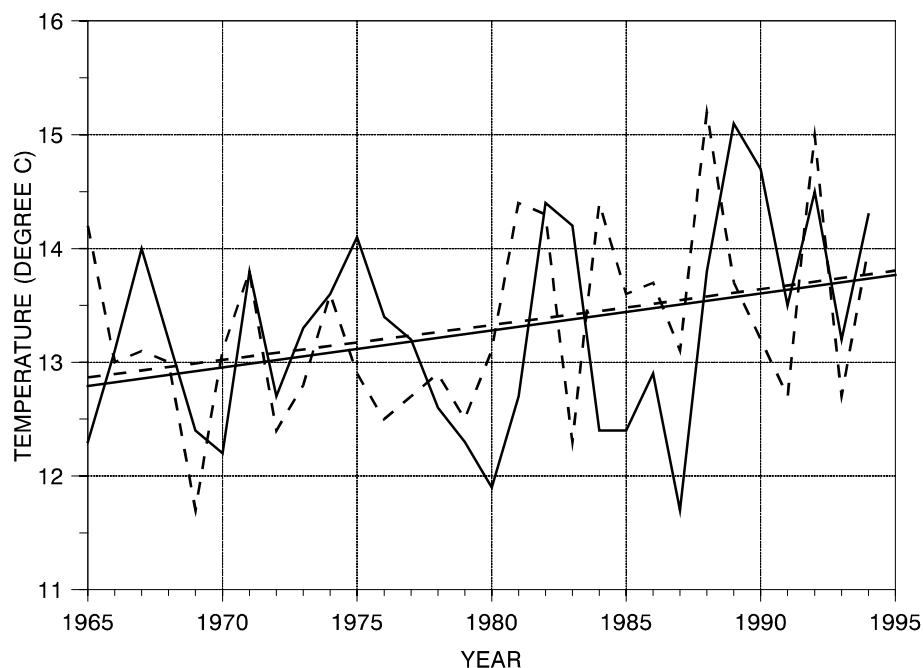


Abb.2: Jahresmittel des Tagesmaximums der Lufttemperatur, Potsdam 1965 - 1994 (durchgezogene Linie - beobachtet; gestrichelte Linie - simuliert)

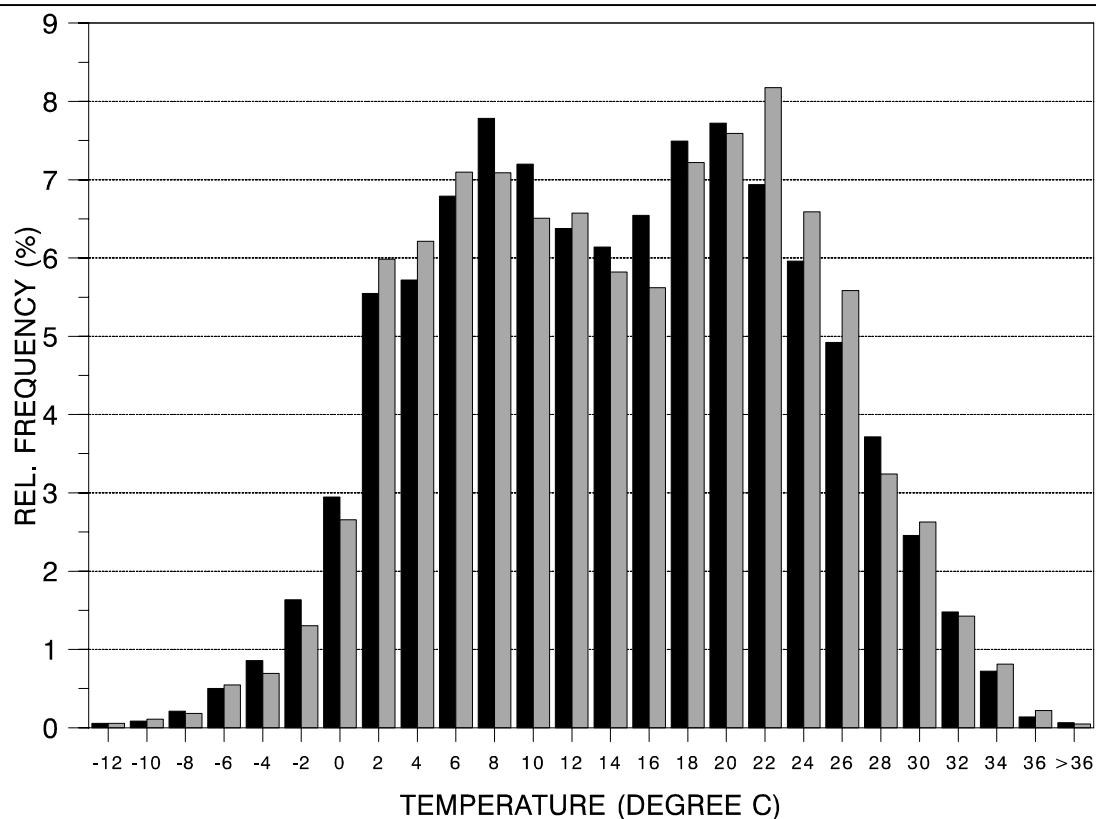


Abb.3: Relative Häufigkeit des Tagesmaximums der Lufttemperatur, Potsdam 1965 - 1994 (schwarz - beobachtet; grau - simuliert)

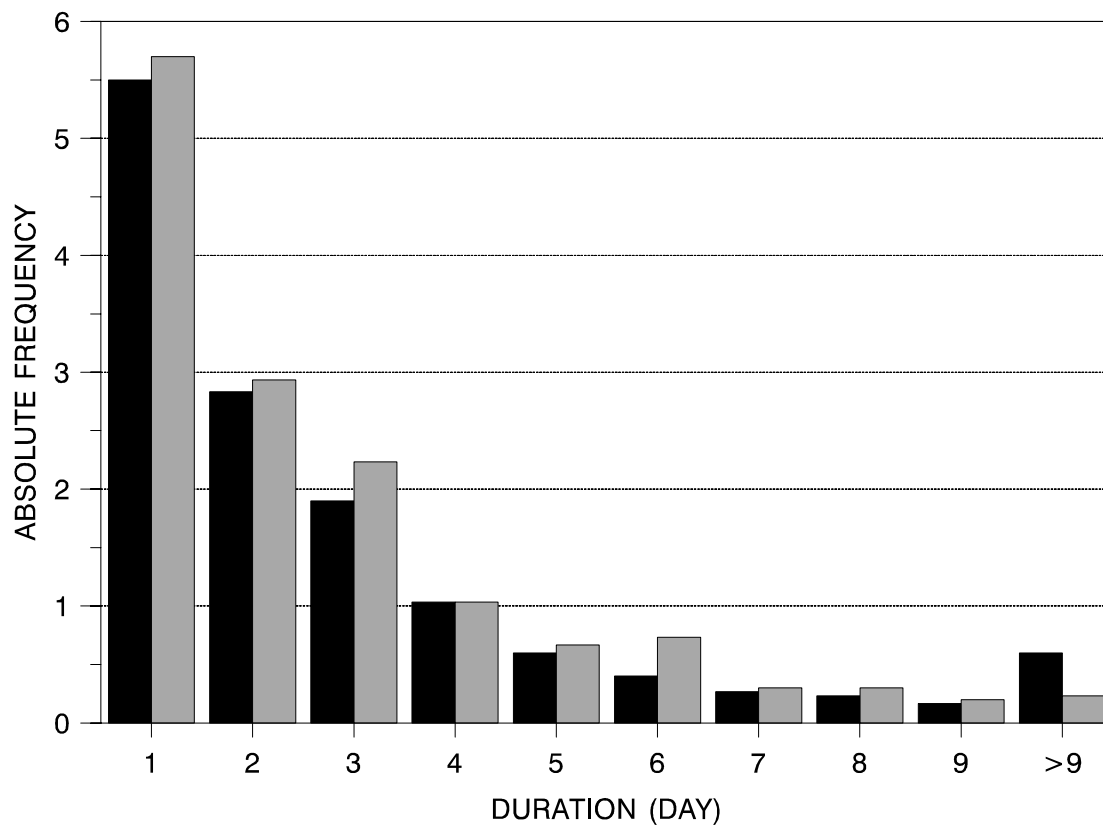


Abb.4: Häufigkeitsverteilung der Andauern von Tagen pro Jahr mit einem Maximum der Lufttemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$, Potsdam 1965 - 1994 (schwarz - beobachtet; grau - simuliert)

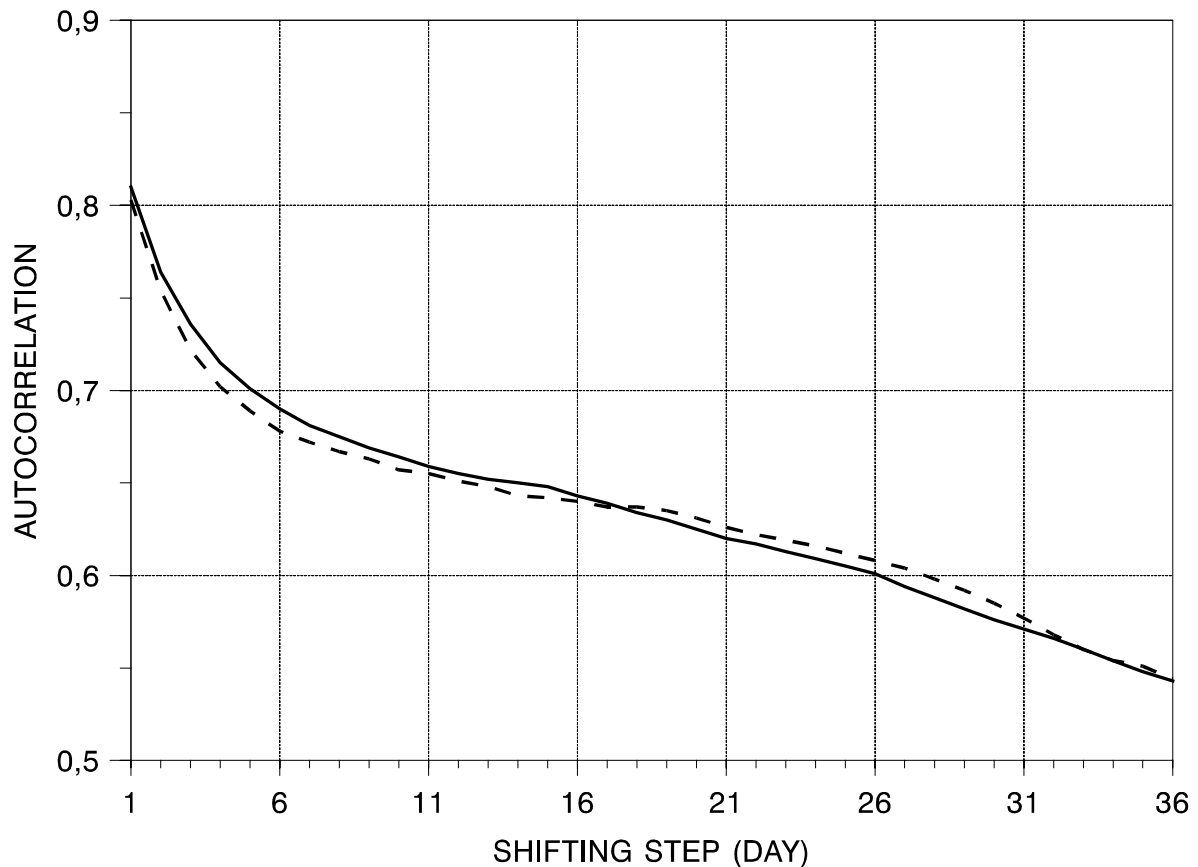


Abb.5: Autokorrelationsfunktion des Tagesmaximums der Lufttemperatur, Potsdam 1965 - 1994 (durchgezogene Linie - beobachtet; gestrichelte Linie - simuliert)

Da als Bezugsgröße die Temperatur gewählt wurde, verläuft die Szenarienbildung der übrigen meteorologischen Größen über das oben beschriebene Verfahren der Clusterbildung und -zuordnung. Dies ist methodisch gesehen ein anderes Vorgehen als bei der Simulation der Temperatur, so dass die Ergebnisse gesondert betrachtet werden müssen. Als exemplarisches Beispiel werden im folgenden die Ergebnisse der Niederschlagssimulation vorgestellt. Diese Größe wurde gewählt, weil sie meteorologisch gesehen nur geringe konservative Eigenschaften aufweist (zeitlich und räumlich inkonsistentes Auftreten).

In Abbildung 6 ist der zeitliche Verlauf der Jahressummen des Niederschlags wiedergegeben. Man erkennt, dass Simulation und Beobachtung gut übereinstimmen, was durch die Werte für Mittel und Standardabweichung in Tabelle 1 bestätigt wird. Ein gleichgutes Ergebnis liefern die relativen Häufigkeiten der Tagessummen des Niederschlags in Abbildung 7. Da der Niederschlag vom Charakter her eine sehr geringe Erhaltungsneigung besitzt, ist eine Betrachtung der Autokorrelationsfunktion nicht sinnvoll. In diesem Fall kann man nur auf einen Vergleich der Andauerhäufigkeitsverteilungen für Tage ohne Niederschlag zurückgreifen (s. Abbildung 8). Man erkennt, dass die simulierten Andauern bis zu drei Tagen deutlich über den beobachteten liegen. Gleichzeitig sind die sehr langen Andauern unterrepräsentiert. Ursache dafür ist der Informationsverlust, der bei der Abarbeitung des Zuordnungsalgorithmus' auftritt. Hier ist prinzipiell keine Verbesserung möglich. Allerdings liegt der Fehler noch im Rahmen der Genauigkeit, die für Szenarien vertretbar ist.

Für alle anderen untersuchten meteorologischen Größen (hier nicht graphisch dargestellt) weisen deren Simulationen bezüglich der Genauigkeit die gleichen Charakteristiken wie beim Niederschlag beschrieben, auf.



Damit ist nachgewiesen, dass die Methodik zur Lösung der vorgesehenen Aufgabe verwendet werden kann.

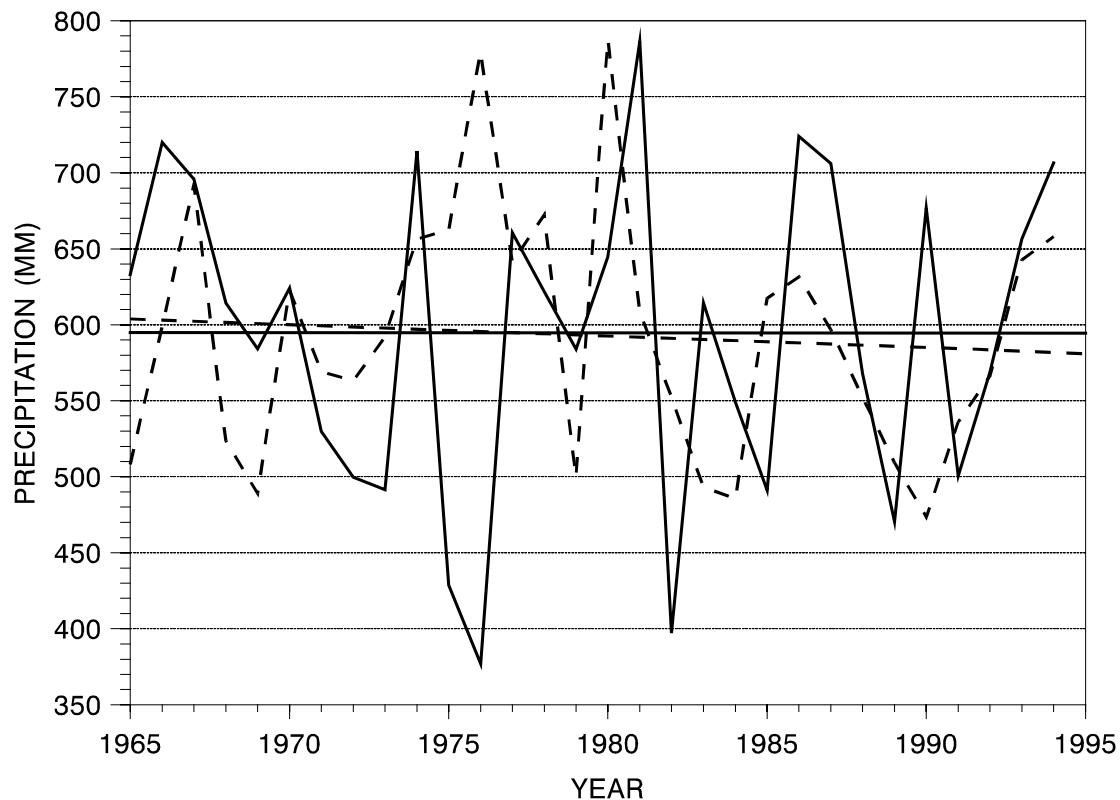


Abb.6: Jahressumme des Niederschlags, Potsdam 1965 - 1994 (durchgezogene Linie beobachtet; gestrichelte Linie - simuliert)

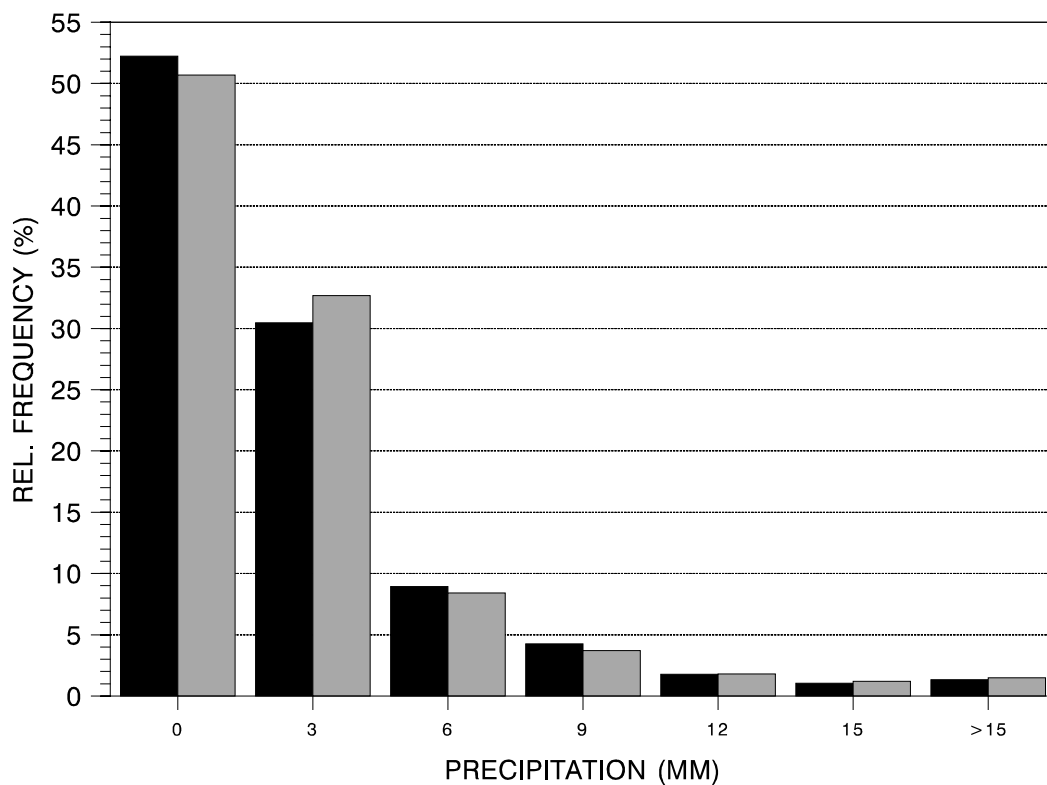


Abb.7: Relative Häufigkeit der Tagessumme des Niederschlags, Potsdam 1965 - 1994 (schwarz - beobachtet; grau - simuliert)

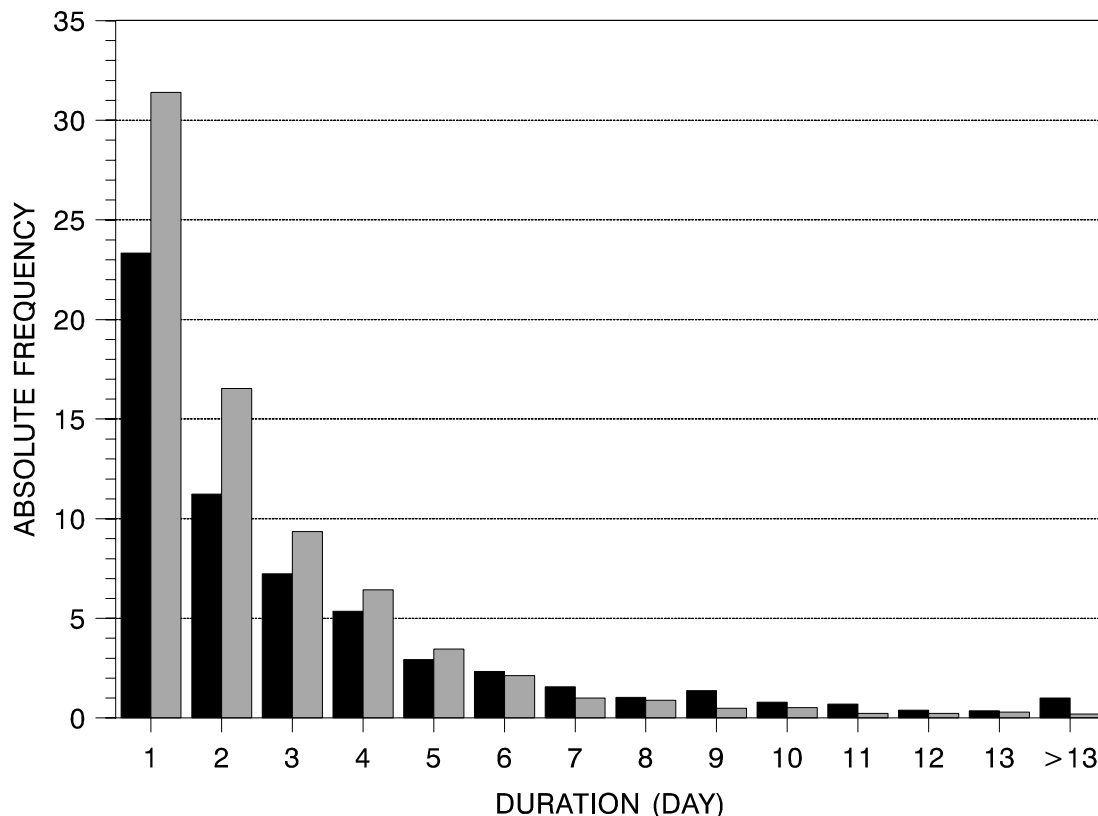


Abb.8: Häufigkeitsverteilung der Andauern von Tagen pro Jahr ohne Niederschlag, Potsdam 1965 - 1994 (schwarz - beobachtet; grau - simuliert)

4. Realisierung verschiedener Szenarien

4.1 Ausgangsbedingungen

Im folgenden soll die Frage beantwortet werden, welche Klimaentwicklung für das Land Brandenburg bis zum Jahr 2050 zu erwarten ist. Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden folgende Ausgangsbedingungen angenommen:

Die meisten Untersuchungen zu zukünftigen Klimaszenarien mit Hilfe von Klimamodellen gehen von einer globalen Erwärmung zwischen 1.5 bis 4.5 K bis zum Jahr 2100 im Falle eines weiterhin ungebremsen Anstieges der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre aus (IPCC, 1995). Im Fall vorbeugender Maßnahmen, wie zum Beispiel der Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen, sinkt der Betrag der Temperaturerhöhung auf Werte um 1 K. Insgesamt werden sich die Kontinente und die polnahen Gebiete stärker erwärmen als die Ozeane und die äquatornahen Regionen. Das heißt, dass für Mitteleuropa im genannten Zeitraum mit einer Temperaturerhöhung von 2 - 4 K zu rechnen ist. In einer ersten Näherung kann man von einem linearen Trend ausgehen. Es gibt aber durchaus Hinweise, dass die Temperaturanstiegsrate zunimmt oder dass der Anstieg nach einer gewissen Zeit gedämpft fortgeführt wird. Differenzierungen bezüglich der Jahreszeiten sind zur Zeit noch nicht möglich.

Die hier diskutierten Angaben zur Klimaentwicklung können im Vergleich zu anderen meteorologischen Größen als gut gesichert angesehen werden (Enquete-Kommission, 1991). Es liegt daher nahe als Bezugsgröße die Lufttemperatur auszuwählen und zwar auf Tageswertbasis, einem Zeitmaßstab, der typisch für die Modelle in der Klimawirkungsforschung ist. Für den angenommenen Trend soll nicht zwischen dem Tagesmittel, dem Tagesmaximum und dem Tagesminimum unterschieden werden, da erstens die drei Parameter hoch miteinander korreliert sind und sich zweitens der bisher beobachtete zeitliche Verlauf der Differenz zwi



schen dem Tagesmaximum und dem Tagesminimum der Lufttemperatur an verschiedenen Stationen in Mitteleuropa sehr unterschiedlich (zunehmend, abnehmend, gleichbleibend) verhält.

4.2 Szenarien

Wie in 4.1 schon erwähnt gibt es eine relativ große Spannbreite bezüglich der zu erwartenden Klimaänderungen. Es liegt daher nahe, mehrere Szenarien zu berechnen, um so einen besseren Überblick über die möglichen Entwicklungen zu bekommen. Folgende Szenarien wurden ausgewählt:

Das Basisszenarium - BASZ

Das Basisszenarium spiegelt das heutige Klima im Zeitraum von 1951 - 1990 wider. Es dient als Ausgangspunkt zur Bewertung der Änderungen innerhalb der Simulationen sowie zur Eichung von Modellen der Klimawirkungsforschung, die Änderungsszenarien benutzen.

Das Gleichgewichtsszenarium - SG15

Um eine Aussage über das sich am Ende des Bearbeitungszeitraumes einstellende Klima auf einer größeren Datenbasis machen zu können, wurde ein Gleichgewichtsszenarium der Länge 55 Jahre für die bereits beschriebenen Änderungen aufgestellt. Mit diesem Szenarium wird abgeschätzt, welches Klima sich einstellt, wenn sich die Temperatur um 2050 auf einen Wert einpendelt, der im Mittel um 1.5 K höher liegt als der Wert um 1995.

4.3 Datenbasis

Folgende Stationen standen für die Szenarienbildung im Land Brandenburg zur Verfügung: Potsdam (Bezugsstation), Marnitz, Angermünde, Zehdenick, Müncheberg, Lindenberg, Wittenberg, Cottbus, Doberlug-Kirchhain.

Der Beobachtungszeitraum betrug 40 Jahre (1951 - 1990).

Folgende meteorologische Größen auf Tageswertbasis wurden bearbeitet:

Temperatur (Maximum, Mittel, Minimum)	°C	TMAX, TMIT, TMIN
Niederschlag	mm	NIED
Relative Luftfeuchte	%	RELF
Luftdruck	hPa	LUDR
Wasserdampfdruck	hPa	DADR
Sonnenscheindauer	h	SON
Bedeckung des Himmels mit Wolken	1/10	BEW
Globalstrahlung	J/cm ²	GBS
Sättigungsdefizit	hPa	SD
Windgeschwindigkeit	m/s	WIND

Zusätzlich wurde die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer bereitgestellt.

Anmerkung: Es muss darauf hingewiesen werden, dass nicht in allen Fällen alle Größen für alle Stationen zur Verfügung standen.

4.4 Realisierung

Geht man in das Schema zur Szenarienberechnung (Abb. 1) ist zu erkennen, dass bezüglich Klimamodell, Bezugsgröße und Beobachtungsdaten bereits alle notwendigen Informationen vorliegen (s.a. Kap. 4.1 - 4.3). Als nächster Schritt schließt sich die Cluster-Analyse an. Als

Parameter wurden das Tagesmaximum, das Tagesminimum und Tagesamplitude der Lufttemperatur sowie die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer ausgewählt. Danach wurde die Simulation der Bezugsgröße in der im Schema dargestellten Reihenfolge durchgeführt. Aus den Ergebnissen wurden die Parameterwerte abgeleitet und den Clustern zugeordnet. Im letzten Schritt wurde unter Einbeziehung der Beobachtungsdaten das entsprechende Szenarium aufgestellt und die Verknüpfung der einzelnen Stationen untereinander realisiert.

4.5 Ergebnisse

4.5.1 Einleitende Bemerkungen

In Kap. 3.4 wurde bereits gezeigt, dass die vorgeschlagene Methodik den gestellten Anforderungen genügt. Deshalb soll im folgenden nur noch an ausgewählten Beispielen für das Szenarium SG15 dargestellt werden, welche Klimaänderungen für das Land Brandenburg unter den gemachten Annahmen ab dem Jahr 2050 zu erwarten sind. Dies geschieht im wesentlichen durch die Bewertung von zeitlichen und räumlichen Änderungen der Mittelwerte, Andauern, Häufigkeitsverteilungen sowie der Extremwerte.

4.5.2 Das Szenarium SG15

Die wesentlichsten Ergebnisse des Vergleichs zwischen BASZ und SG15 sind in der Tabelle 2 für alle verwendeten Stationen dokumentiert.

Für alle Temperaturgrößen geht aus der Tabelle hervor, dass die vorgegebene Änderung von 1.5 K mit einer Schwankungsbreite von +0.3 bis -0.2 K gut wiedergegeben wird. Damit bleibt die räumliche Struktur der Temperaturverteilung erhalten. Ebenfalls erhalten bleibt die Struktur der statistischen Parameter. Als Beispiel dafür sind in Abbildung 9 die zweigipfligen Häufigkeitsverteilungen des Tagesmaximums der Lufttemperatur der Station Potsdam für die Szenarien BASZ und SG15 dargestellt. Man erkennt, dass die angenommene Temperaturerhöhung von 1.5 K durch eine Verschiebung der SG15-Verteilung zu höheren Werten widerspiegelt wird.

Der Charakter der Niederschlagsverteilung wie aus Abbildung 10 ersichtlich bleibt im wesentlichen erhalten. Aus der Abbildung lässt sich erkennen, dass im Szenarium SG15 die niederschlagsfreien Tage zunehmen, diejenigen bis zu 3 mm Tagessumme abnehmen und die Häufigkeit in den Klassen >3 mm etwa gleich bleibt.

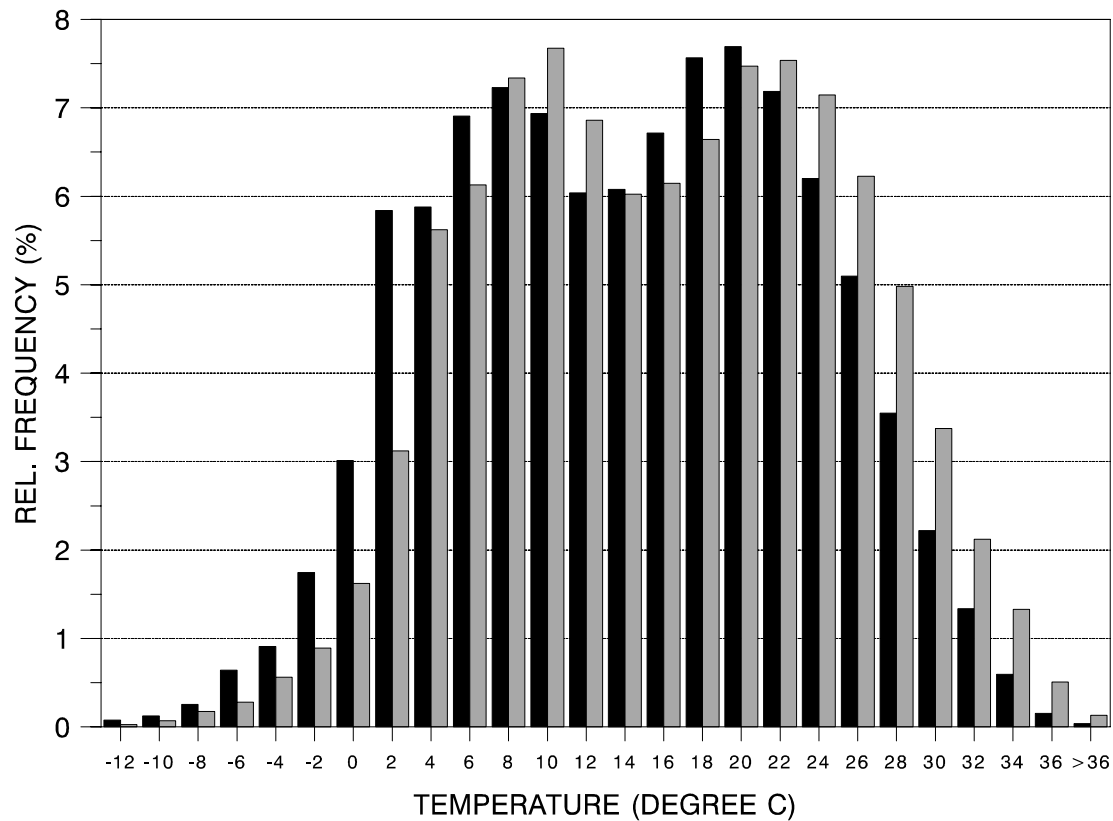


Abb.9: Relative Häufigkeit des Tagesmaximums der Lufttemperatur, Potsdam (schwarz - Basisszenarium 1951 - 1980; grau - Gleichgewichtsszenarium 1996 - 2050)

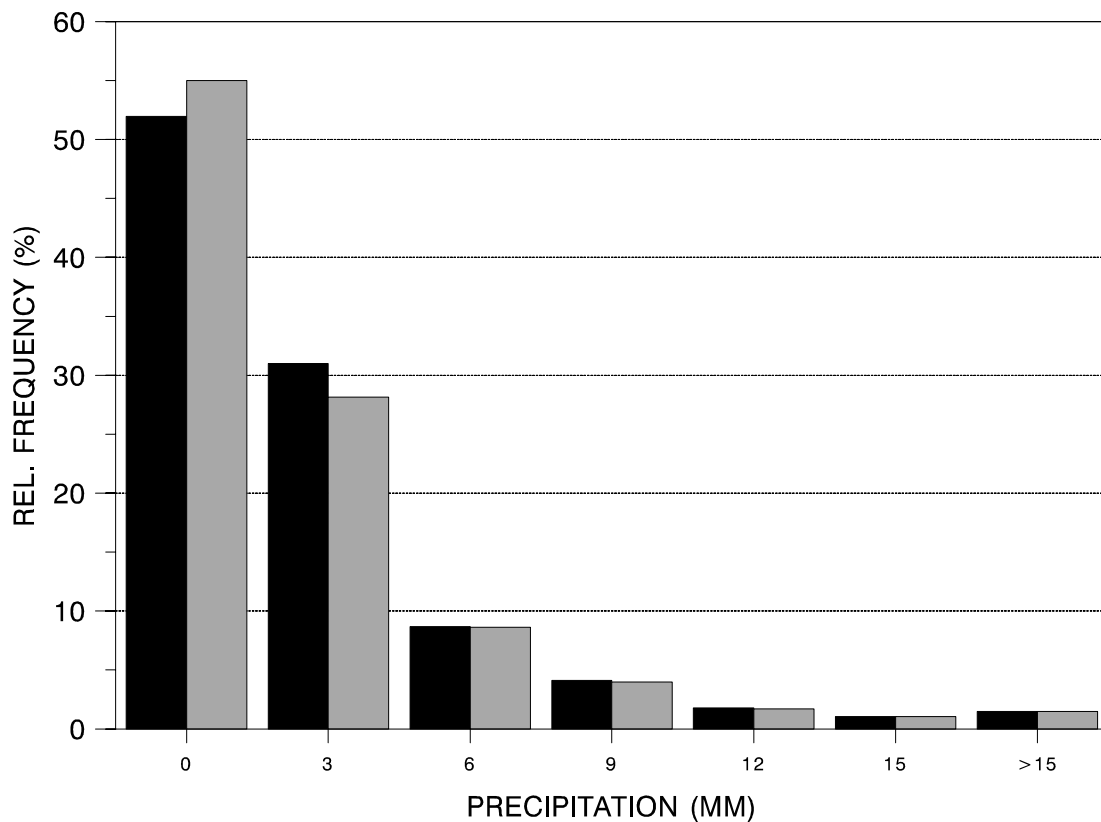


Abb.10: Relative Häufigkeit der Tagessumme des Niederschlags, Potsdam (schwarz - Basisszenarium 1951 - 1990; grau - Gleichgewichtsszenarium 1996 - 2050)

Für den Niederschlag sind im Szenarium SG15 an einer Reihe von Stationen deutliche Änderungen zu verzeichnen. Dabei fallen diese von Station zu Station unterschiedlich aus. In Abbildung 11a ist die räumlich gemittelte Niederschlagsverteilung des Basisszenariums angegeben. Abbildung 11b zeigt die des Gleichgewichtsszenariums und in Abbildung 11c ist die Niederschlagsänderung für das Land Brandenburg zwischen den beiden Szenarien dargestellt. Man erkennt, dass im gesamten Gebiet eine deutliche Abnahme des Niederschlags zu verzeichnen ist. Dabei bleibt die großräumige Struktur der Niederschlagsverteilung im wesentlichen erhalten.

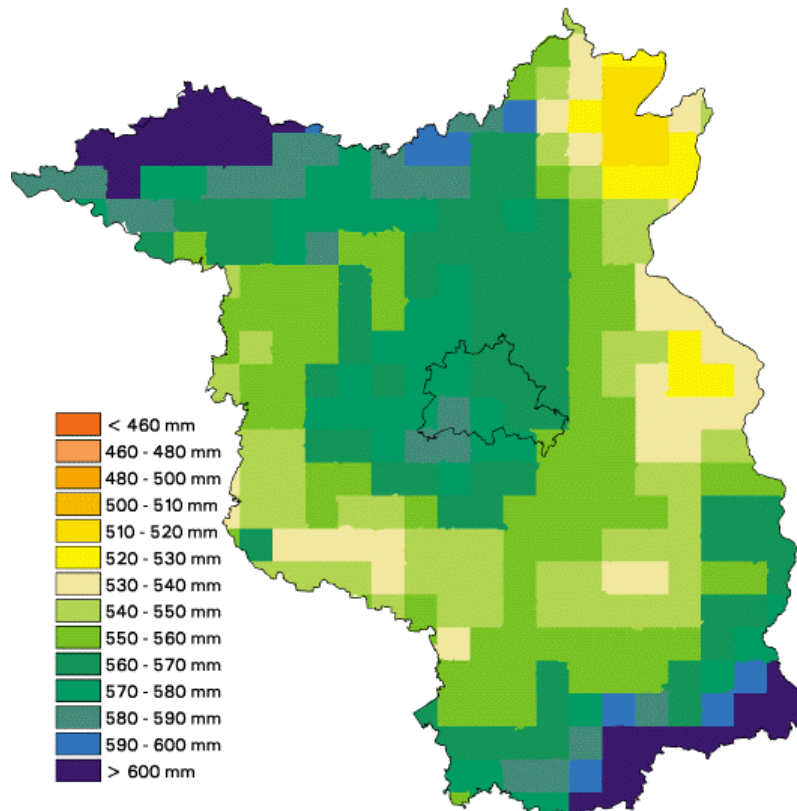


Abb.11a: Mittlere jährliche Niederschlagsverteilung in Brandenburg
(a: BASZ, 1951 - 1990; b: SE15, 1996 - 2050; c: Änderung SE15 - BASZ)

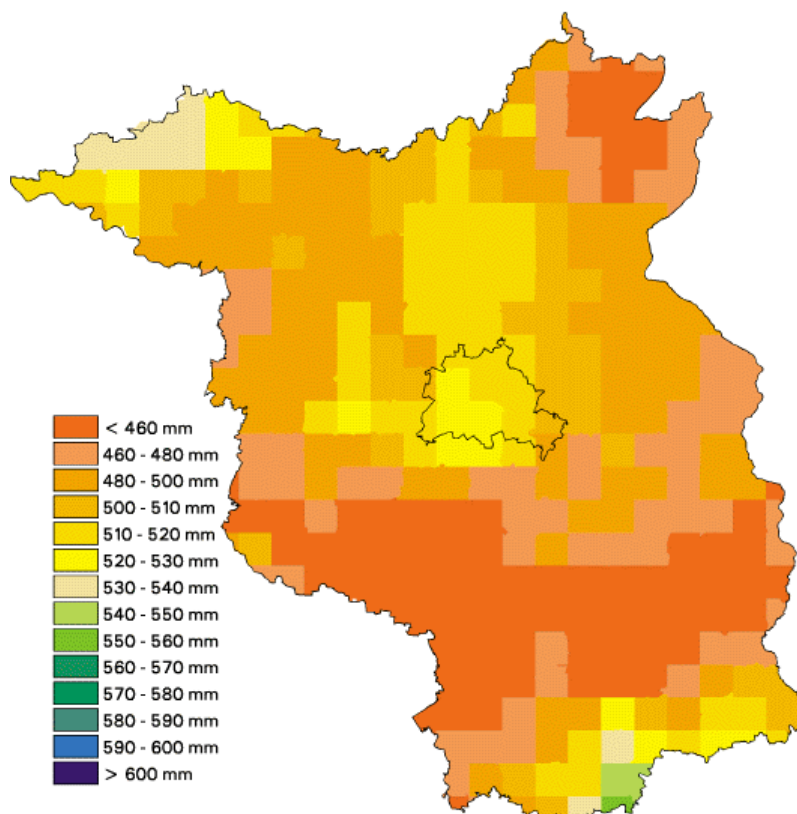


Abb.11b: Mittlere jährliche Niederschlagsverteilung in Brandenburg
(a: BASZ, 1951 - 1990; b: SE15, 1996 - 2050; c: Änderung SE15 – BASZ)

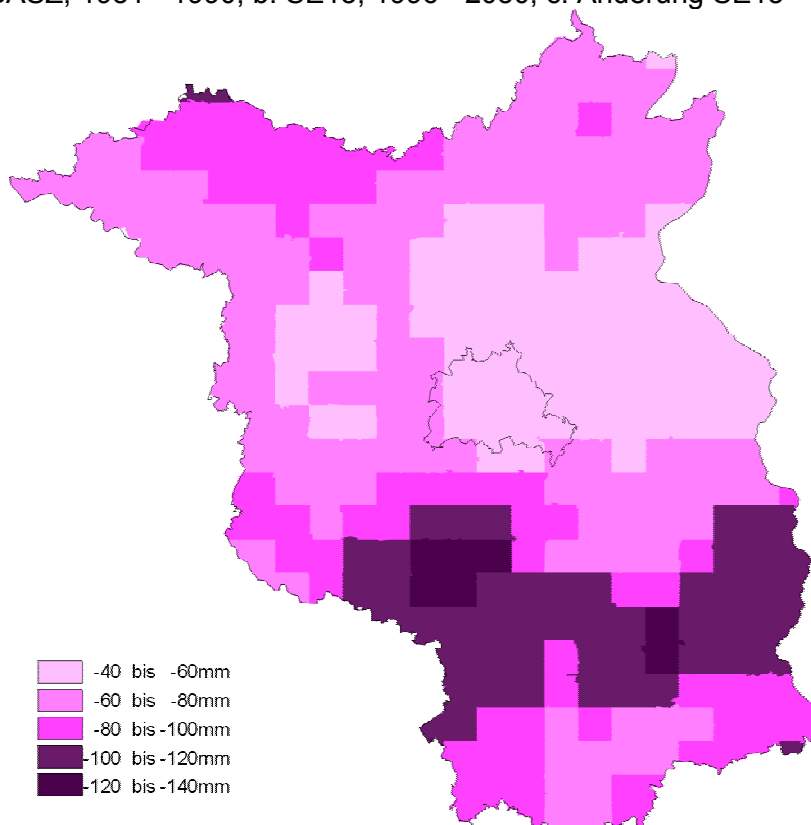


Abb.11c: Mittlere jährliche Niederschlagsverteilung in Brandenburg
(a: BASZ, 1951 - 1990; b: SE15, 1996 - 2050; c: Änderung SE15 – BASZ)

Parallel dazu ist im größten Teil des Gebietes eine Abnahme der relativen Luftfeuchte (s. Tabelle 2) zu beobachten.

Tab. 2: Jahreswerte für ausgewählte meteorologische Elemente und Stationen für das Basisszenarium 1951 - 1990 sowie die Abweichungen zum Gleichgewichtsszenarium 1996 - 2050 für 1.5 K (nähere Erläuterungen siehe Text) (* + 1000)

Größe	Pdm.	Mar.	Ang.	Zeh.	Mün.	Lin.	Wit.	Cot.	Dob.
TMAX	13.4	12.3	12.9	12.7	12.9	13.1	13.5	13.9	13.4
Delta	1.5	1.8	1.6	1.8	1.5	1.6	1.5	1.4	1.5
TMIT	9.0	8.5	8.6	8.6	8.7	8.8	9.0	9.2	8.9
Delta	1.5	1.5	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
TMIN	5.1	5.1	4.7	4.8	4.9	5.2	5.3	5.1	4.8
Delta	1.5	1.3	1.5	1.3	1.3	1.6	1.5	1.6	1.4
NIED	595.3	660.8	534.6	551.8	532.2	561.0	573.1	566.1	559.2
Delta	-46.5	-117.8	-57.5	-32.8	-42.7	-67.6	-50.3	-89.6	-85.7
RELf	78.4	80.5	79.5	78.6	79.3	77.8	77.5	77.1	78.6
Delta	-1.5	-3.6	-1.6	-2.9	-1.5	-2.2	-3.8	-3.1	-3.8
LUDR*	4.9	5.2	8.0	9.3	6.1	2.7	3.0	7.2	3.8
Delta	-0.7	0.6	0.4	0.3	-1.2	-0.7	0.1	0.5	0.4
DADR	9.4	9.3	9.3	9.2	9.3	9.2	9.3	9.4	9.4
Delta	0.6	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2
BEW	6.9	6.9	6.8	6.5	6.7	6.6	6.7	6.6	6.6
Delta	-0.6	-0.5	-0.6	-0.1	0.8	-0.7	-0.8	-0.9	-0.7

Die Änderungen von Luftdruck und Wasserdampfdruck sind vernachlässigbar gering.

Die Zunahme der Sonnenscheindauer bei gleichzeitiger Abnahme der Bewölkung ist ebenfalls ein Merkmal für die physikalische Konsistenz des Szenariums.

Neben den bisher geschilderten mittleren Verhältnissen sind die Extreme von besonderer Bedeutung. Wichtige Daten dazu sind in Tabelle 3 angegeben. Dies sind:

- der absolut größte bzw. kleinste aufgetretene Wert (Extremwert)
- die Schranke des natürlichen Extremwertbereichs (Dieser Bereich definiert alle Werte oberhalb bzw. unterhalb einer Schranke, die nicht mehr zur Grundgesamtheit der Stichprobe gehören (Gerstengarbe, Werner, 1988).
- die Summe der 10 größten Andauern für einen vorgegebenen Schwellenwert.

Bei den Extremwerten spiegelt sich die vorgegebene Temperaturerhöhung am deutlichsten beim Tagesminimum der Lufttemperatur wider ($-24.5^{\circ}\text{C} \rightarrow -22.7^{\circ}\text{C}$).

Deutliche Veränderungen im Extremwertbereich sind besonders bei den Temperaturen sowie dem Niederschlag zu beobachten (z.B. TMAX von $34.8^{\circ}\text{C} \rightarrow 36.5^{\circ}\text{C}$).

Die markantesten Änderungen bezüglich des Extremwertverhaltens lassen sich aus den Andauern ableiten. So nehmen zum Beispiel die Andauern der heißen Tage ($\text{TMAX} \geq 30^{\circ}\text{C}$) um ca. 55% zu, während die sehr kalten Tage gleichzeitig um ebenfalls 19% abnehmen. Ähnlich deutlich fallen die Änderungen beim Niederschlag und der relativen Feuchte aus. Damit bestätigt sich die Hypothese, dass Klimaänderungen sich zuerst in einer deutlichen Änderung der Extreme bemerkbar machen.



Tab. 3: Vergleich des Extremwertverhaltens von Basisszenarium (basz) und statistischem Gleichgewichtsszenarium mit einer Temperaturerhöhung von 1.5 K (sg15) für die Station Potsdam (nähere Erläuterungen siehe Text)

Größe	Extremwert		Extremwertbereich		Andauer	
	basz	sg15	basz	sg15	basz	sg15
TMAX ($\geq 30^{\circ}\text{C}$)	38.4	40.2	34.8	36.5	71	96
TMIN ($< -10^{\circ}\text{C}$)	-24.5	-22.7	-20.8	-18.3	109	80
NIED (= 0.0 mm)	104.8	104.0	41.7	38.7	208	190
RELF ($< 60\%$)	25.0	22.3	35.0	33.3	122	103
SON ($< 12\text{ h}$)	-	-	-	-	83	86
BEW ($< 2/10$)	-	-	-	-	66	68
BEW ($> 9/10$)	-	-	-	-	120	114

5. Zusammenfassung

In den vorliegenden Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die vorgeschlagene Methodik sehr effektiv zur Entwicklung von Klimaszenarien eingesetzt werden kann. Die Methodik ist prinzipiell in einem weiten Rahmen offen für Annahmen zu möglichen Klimaentwicklungen, die als Eingangsinformation in die Berechnung einfließen. Damit erlaubt die Methode, auf die Bezugsgröße zurückzugreifen, für die die sicherste Aussage bezüglich ihrer möglichen zukünftigen Entwicklung vorliegt. Die Voraussetzung, dass die beobachteten Zusammenhänge zwischen den verschiedenen meteorologischen Größen und den statistischen Charakteristika ihrer Zeitreihen bei einer Klimaänderung im wesentlichen erhalten bleiben, stellt eine gewisse Einschränkung dar. Praktisch kommt diese Einschränkung aber nicht zur Wirkung, da zur Zeit keine quantitativen Angaben zu möglichen Änderungen der interanuellen Variabilität, der Variation des Jahresganges, der Häufigkeit extremer Ereignisse und weiterer Charakteristika vorliegen (z.B. abgeleitet aus Klimamodellergebnissen). Insgesamt stellt damit die vorgestellte Vorgehensweise die zur Zeit günstigste Variante zur Erstellung von Szenarien dar.

6. Literatur

- Cubasch, U., Hasselmann, K., Hoeck, H., Reimer, E.-M., Mikolajewicz, U., Santer, B.D., Sausen, R. (1992): "Time-depended greenhouse warming computation with a coupled ocean- atmosphere-model", *Climate Dynamics*, 8, 55-69
- Enquete-Kommission (1991): "Schutz der Erde", Bd. I, Economica Verl., Bonn
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (1988): "A method for the statistical definition of extreme value regions and their application to meteorological time series", *Z. Meteor.* 38 (4), 224-226
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (1997): "A method to estimate the statistical confidence of cluster separation", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 57, No. 1-2
- IPCC (1995): "Climate change 1995", Summary for policymakers, Cambridge University Press, Cambridge UK
- Lorenz, E.N. (1963): *J. Atm. Sciences*, 20 (130), 448
- Machenhauer, B., Windelband, M., Potzet, M., Jones, R.G., Déqué, M. (1996): "Validation of present-day regional climate simulations over Europe: Nested LAM and variable resolution global model simulations with observed or mixed layer ocean boundary conditions", Max- Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 191
- Schönwiese, C.-D., Rapp, J., Fuchs, T., Denhard, M. (1993): "Klimatrend-Atlas 1891 -1990", J.W. Goethe-Universität, Berichte des Zentrums für Umweltforschung, Nr. 20, ZUF-Verlag, Frankfurt a. M.
- Zorita, E., Hughes, J.P., Lettemaier, D.P., Storch, H. v. (1993): "Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation", Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 109