

Klimaprognose für Sachsen - Zusammenfassender Bericht

Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen mittels des statistischen Verfahrens der Wetterlagen-Klassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen

Projektdurchführung: Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie,
Prof. Dr. Werner Wehry, Dr. Wolfgang Enke,
Projektlaufzeit: 1999 – 2000
Projektbegleitung: Dipl. Met. Wilfried Kuchler,
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
(LfUG)
Zusammenfassender Bericht: Dr. Wolfgang Enke, Freie Universität Berlin
Dipl. Met. Wilfried Kuchler ,LfUG
Werner Sommer, Sächsisches Staatsministerium für
Umwelt und Landwirtschaft (SMUL)

Inhalt

1. Zusammenfassung	3
2. Stand der Klimabeobachtung und Klimaforschung	4
3. Klimamodelle	6
3.1 Globale Klimamodelle	6
3.2. Regionalisierung der Ergebnisse globaler Klimamodelle	7
4. Das Regionalisierungsverfahren für Sachsen	8
4.1 Auswahl des Modells	8
4.2 Anwendung des Modells	10
4.3 Klima und extreme Naturereignisse	17
4.4 Ergebnisse	18
5. Glossar	20
6. Literatur	22
Anhang	23

1. Zusammenfassung

Eine von der Freien Universität Berlin, Institut für Meteorologie 1999/2000 durchgeführte Klimaprognose für Sachsen ergab auf der Grundlage des globalen Klimamodells ECHAM4 des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg mit der Annahme einer Verdoppelung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre folgende Ergebnisse für Sachsen:

- Es ist mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit warmer Wetterlagen in Verbindung mit vorherrschender Südwestanströmung und damit einer Verstärkung der mit Niederschlagsabschwächung verbundenen Lee-Effekte nördlich des Erzgebirges zu rechnen.
- Die mittlere Jahrestemperatur wird um bis zu 2,7 Grad ansteigen; im Frühjahr kann es bezüglich der Maximumtemperatur bis zu 4 Grad wärmer werden.
- Die jährlichen Niederschlagssummen werden abnehmen. Ein Rückgang ist vor allem im Frühjahr und Sommer zu erwarten und damit wird es in der Vegetationsperiode wesentlich trockener.
- Auch die Sonnenscheindauer nimmt vor allem im Frühjahr und Sommer deutlich zu. Durch die Kopplung dieser Tendenz mit dem erwarteten Temperaturanstieg und der Abnahme der Niederschläge muß mit entsprechenden Konsequenzen für Wasserhaushalt und Vegetation gerechnet werden.

Es deutet sich an, dass unter den Bedingungen der globalen Erwärmung in Sachsen weiterhin strenge Winter auftreten können, zunehmend aber sehr milde Winter. Auch kühle Sommer sind nach wie vor möglich. Mit Blick auf die zu erwartenden Niederschlagsverhältnisse zeigt sich, dass im Gegensatz zur deutlichen Abnahme der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Frühling und Sommer die extremen Ereignisse, also vor allem lokale Starkniederschläge, gegenüber den simulierten Niederschlagssummen für das gegenwärtige Klima offensichtlich zunehmen werden. Dies steht im Einklang mit Untersuchungsergebnissen zum Klima in historischer Zeit, wonach sich gerade in Phasen einer raschen Klimaänderung gehäuft extreme Situationen einstellen. Der sich abzeichnende Rückgang der mittleren Niederschlagshöhen für Frühling und Sommer signalisiert aber auch, dass ausgeprägte Trockenperioden häufiger auftreten werden.

2. Stand der Klimabeobachtung und Klimaforschung

Die wissenschaftliche Beweiskette ist noch nicht lückenlos, aber alle Indizien deuten darauf hin: Wir befinden uns bereits mitten im Klimawandel.

Neueste Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes belegen, dass sich der überwiegende Anteil der Klimaveränderung durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt erklären lässt.

Der von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründete Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), in dem die führenden Klimaforscher der Welt vertreten sind, trägt in Abständen von einigen Jahren den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum anthropogenen Treibhauseffekt zusammen. Die neueste IPCC-Studie geht von einer zu erwartenden Erderwärmung zwischen 1,5 und 6,0 Grad Celsius in den nächsten 100 Jahren im Vergleich zu 1990 aus und hat damit die bisherige Prognose einer globalen Erwärmung von 1,0 bis 3,5 Grad Celsius deutlich verschärft. Die zugrundeliegenden Simulationen deuten auch auf eine Zunahme von Extremereignissen hin.

Welche Tendenzen sind gegenwärtig zu beobachten?

Global

Das 20. Jahrhundert ging mit immer neuen Wärmerekorden bezüglich der mittleren globalen Lufttemperatur zu Ende. 1999 war das 21. Jahr in Folge mit einer Durchschnittstemperatur über dem Mittelwert der Referenzperiode 1961-1990. 1998 war das im globalen Mittel mit Abstand wärmste Jahr seit Beginn weltweiter Messungen. Die weltweit wärmsten 10 Jahre seit fast 1000 Jahren traten in den 80er und 90er Jahren auf.

Die Indizien, dass der Mensch das Klima maßgeblich beeinflusst, verdichten sich weiter. Neueste Untersuchungen belegen, dass sich rund 80 % der Variabilität des Klimaparameters (globale) Lufttemperatur durch anthropogene Einflussgrößen erklären lassen, wobei der größte Anteil (fast 60 %) auf den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt zurückgeführt werden kann (UBA, 2000).

Europa

In Europa zeigen sich regionale und jahreszeitliche Differenzierungen. So sind die Winter im Zeitraum 1891- 1990 in Osteuropa deutlich wärmer (mehr als 2,5 K), in Nordskandinavien

etwa 1K kälter geworden. In Mitteleuropa spiegelt sich die globale Erwärmungstendenz eindrucksvoll wider, wenn auch die Veränderlichkeit von Jahr zu Jahr viel höher als im globalen Maßstab ist. Die Niederschlagsentwicklung der letzten 100 Jahre zeigt, dass in Nord- und Westeuropa eine Zunahme, in Südeuropa eine Abnahme der Niederschläge zu verzeichnen ist, wobei in Mitteleuropa die Linie der Trendumkehr verläuft.

Deutschland

Detaillierte Untersuchungen der vergangenen 100 Jahre dokumentieren einen Anstieg des Jahresmittels der Lufttemperatur um 0,5 bis 1K, der in den Wintermonaten der letzten Jahrzehnte sogar noch stärker war. Es zeigt sich darüber hinaus eine bemerkenswerte jahreszeitliche Umverteilung des Niederschlags derart, dass die Sommer eher trockener, die Wintermonate dagegen in weiten Teilen Deutschlands deutlich feuchter werden (RAPP & SCHÖNWIESE, 1996). In Mitteleuropa ist seit Ende der sechziger Jahre eine Zunahme der West- bis Südwestwetterlagen in den Wintermonaten zu beobachten, die in Deutschland zu insgesamt milderen und feuchteren Wintern geführt hat. Für die Sommer ist andererseits seit den fünfziger Jahren eine Abnahme der West- sowie der ebenfalls sommerkühlen Nord- und Nordwestwetterlagen und damit insgesamt eine Tendenz zu wärmeren und trockeneren Sommern festzustellen. Die gegenwärtig zu beobachtende Milderung der Winter und die zunehmende Häufigkeit wärmerer Sommer findet ihre Erklärung in veränderten Zirkulationsverhältnissen bzw. der Häufigkeitsverteilung europäischer Großwetterlagen.

In Deutschland war das Jahr 2000 mit einer Jahresmitteltemperatur von 9,9°C das wärmste des Jahrhunderts (Abweichung +1,6 K) .

Sachsen

Eine umfassende Bestandsaufnahme des regionalen Klimas einschließlich der hierbei wichtigen Repräsentanz-, Trend- und Feldanalysen steht bislang in Sachsen noch aus (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 2000). Erste statistische Analysen vorhandener Meßdaten lassen erkennen, dass die Sommer in den vergangenen 50 Jahren z.T. trockener geworden sind, wobei sich der stärkste Rückgang der Niederschläge offensichtlich in Ostsachsen abzeichnet. Darüber hinaus zeigen Fallstudien, dass bei zunehmenden Südwestwetterlagen im Winter in Sachsen - anders als in Westdeutschland - nicht mit einer Niederschlagszunahme, sondern eher mit einer Niederschlagsabnahme zu rechnen ist.

3. Klimamodelle

3.1 Globale Klimamodelle

Das Klimasystem ist außerordentlich komplex. Da mit keiner einfachen Methode simuliert werden kann, in welchem Ausmaß sich das Klima als Reaktion auf die steigenden Treibhausgaskonzentrationen ändern wird, sind zum Verständnis des Klimawandels komplexe Computersimulationen unerlässlich.

Klimamodelle sind quantitative Beschreibungen des Klimasystems. Da eine angemessene Darstellung des Klimasystems physikalische, chemische und biologische Aspekte enthält, müssen die entsprechenden Zustände und Prozesse durch zeitabhängige mathematische Gleichungen beschrieben werden. Diese werden numerisch gelöst, was bei entsprechend vorgegebenen Randbedingungen eine Vorausberechnung in die Zukunft ermöglicht.

Heutige Klimamodelle bauen auf einem dreidimensionalen Gitter mit einer Maschenweite von derzeit ca. 250 km auf, wobei diese im wesentlichen von der derzeit verfügbaren Computerleistung begrenzt wird. Kleinräumige physikalische Prozesse, die von der Maschenweite des Gitternetzes nicht erfasst werden, müssen an den Gitterknoten geschätzt werden. Das gilt in der Atmosphäre beispielsweise besonders auch für die Bildung und Auflösung von Wolken und niederschlagsbildenden Prozessen. Weitere wichtige Teil- oder Prozessmodelle betreffen die Vegetation, die Strahlung, die Dynamik der Eisschilde, das Meereis, die Bildung und Schmelze von Schnee, die Bodenfeuchte, die Auslösung von Konvektion in der Atmosphäre, die Atmosphärenchemie (z.B. Modellierung des Kohlenstoffkreislaufes) sowie den Wasserkreislauf in Atmosphäre und Ozean. Die aktuellen Klimamodellversionen des DKRZ in Hamburg enthalten für die Atmosphäre 19 übereinanderliegende Schichten, die bis in eine Höhe von ca. 30 km reichen, für den Ozean 11 Schichten bis in eine Tiefe von 5000 m bzw. bis zum Tiefseeboden.

Die derzeit eingesetzten und kontinuierlich verbesserten Klimamodelle sind das aus heutiger Sicht bestmögliche Instrument, mögliche künftige Klimaveränderungen zu erkennen. Die Leistungsfähigkeit dieser Modelle ist auch daran zu messen, wie gut die globalen Strukturen des gegenwärtigen Klimas durch die Simulationen beschrieben werden.

Die Vorläufer vieler heutiger Klimamodelle sind Wettervorhersagemodelle. Während letztere nur den Ablauf von Prozessen bis zu zwei Wochen prognostizieren, berechnen Klimamodelle

statistische Mittelwerte und die Änderung dieser Werte bei sich wandelnden Randbedingungen (z.B. Verdoppelung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre; 2xCO₂-Szenario) über Zeiträume von Jahrzehnten bis Jahrhunderten. Solche Mittelwerte sind über einen längeren Zeitraum prognostizierbar als Wettererscheinungen in einer bestimmten Region. Im Unterschied zu Wettervorhersagen besteht die Aufgabe einer Klimaprognose nicht in der Vorhersage des konkreten Wettergeschehens für ein bestimmtes Zeitintervall, sondern in der Vorhersage statistischer Kenngrößen, die den mittleren Zustand und die Variabilität des Wettergeschehens in der Zukunft beschreiben.

3.2. Regionalisierung der Ergebnisse globaler Klimamodelle

Die globalen Klimamodelle sagen wenig über mögliche Klimaänderungen in konkreten Regionen wie dem Freistaat Sachsen aus. Regionale Klimaprognosen sind jedoch für eine Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen unerlässlich. Die heutigen globalen Modelle besitzen für regionale und lokale Prognosen eine immer noch zu große Maschenweite. Aufgrund der Komplexität der Modelle ist gegenwärtig eine direkte Simulation des regionalen Klimas auf Basis der globalen Modelle nicht möglich. Dies trifft insbesondere auch für das Klima in Sachsen zu, das aufgrund der Lage des Erzgebirges wesentlich durch Luv- und Lee-Effekte charakterisiert wird, die für das Temperatur- und Niederschlagsregime von großer Bedeutung sind.

Um dennoch zu Aussagen über regionale Auswirkungen der globalen Klimaveränderungen zu gelangen, kommen Methoden der Klima-Regionalisierung (Downscaling) zur Anwendung, die ihrerseits Prognosen globaler Modelle als Eingangsgrößen verwenden. Alle Regionalisierungsverfahren setzen voraus, dass globale Klimamodelle in der Lage sind, das derzeitige Klima zu simulieren, d.h. die Häufung und Ausprägung gefundener Wetterlagen korrekt wiederzugeben. Als Regionalisierungsansätze lassen sich statistische und dynamische Methoden unterscheiden. Grundsätzlich haben alle statistischen Modelle gegenüber dynamischen Modellen den Vorteil, hinsichtlich erforderlicher Rechenzeit und Personaleinsatz äußerst kosteneffizient zu sein. Erst nach einer weiteren Optimierung der globalen Klimamodelle und mit der Entwicklung neuer Computergenerationen kann damit gerechnet werden, dass rein dynamische Modellvarianten für Regionalisierungen erfolversprechend herangezogen werden können.

Bei einer **dynamischen Klimaregionalisierung** wird in das vorliegende globale Modell ein wesentlich höher aufgelöstes Modell, also ein Modell mit einer z.B. für die Berücksichtigung des Einflusses der Alpen oder des Erzgebirges auf die Witterung geeigneten geringeren Maschenweite, eingebettet (das hochauflösende Gitter des Regionalmodells wird als "Nest" in das relativ grobe Gitter des Globalmodells eingehängt). Diese Modelle sollten in der Lage sein, das derzeit herrschende Klima gut zu beschreiben, wenn ihnen Beobachtungswerte zur Verfügung gestellt werden. Die nächsten Schritte bestehen darin, den Regionalmodellen Werte aus globalen Simulationen des heutigen und des künftigen Klimas vorzugeben. Das regionale Modell wird dabei vom globalen Modell gesteuert und übernimmt dadurch direkt auch mögliche Fehler der globalen Modelle.

Bei einer **statistischen Klimaregionalisierung** werden Beziehungen zwischen lokalen Beobachtungen der Klimaelemente an Bodenstationen (z.B. Temperatur- und Niederschlagsreihen) und großräumigen meteorologischen Datenfeldern der freien Atmosphäre (z.B. Zirkulationsmuster) aufgestellt. Zu den verbreitetsten statistischen Methoden der Klimaregionalisierung gehört die multiple Regressionsanalyse. Die statistischen Verfahren werden an vorliegenden meteorologischen Beobachtungen entwickelt und auf die Prognosen von globalen Klimamodellen angewandt, um regionale und lokale Klimaeigenschaften in der Zukunft zu bestimmen. Man setzt dabei voraus, dass die lokalen Änderungen ausschließlich durch Änderungen der großräumigen Zirkulation hervorgerufen werden.

4. Das Regionalisierungsverfahren für Sachsen

4.1 Auswahl des Modells

Eine wesentliche Aufgabe der Klimamodellierung besteht darin, die globalen Klimasimulationsergebnisse auf einen regionalen Maßstab zu übertragen (Regionalisierung). Dadurch können die berechneten klimatischen Änderungen direkt zu ihren möglichen Auswirkungen im sächsischen Raum in Beziehung gesetzt werden.

Aufgrund der Spezifik des sächsischen Klimas insbesondere im Luv- und Lee-Bereich des Erzgebirges wurde als Hypothese angenommen, dass in Sachsen bei einer globalen Erwärmung voraussichtlich Klimaveränderungen eintreten werden, die sich deutlich von der

Entwicklung in anderen Regionen Deutschlands unterscheiden. Vor diesem Hintergrund hat das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie die Freie Universität Berlin (Dr. W. Enke) mit der Entwicklung einer Klimaprognose für Sachsen beauftragt, um die konkreten Auswirkungen des erwarteten globalen Wandels auf das künftige Klima in Sachsen untersuchen zu lassen (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 1999).

Nach eingehenden fachlichen Recherchen wurde das statistische Enke-Spekat-Modell (ENKE & SPEKAT, 1997) für die Beschreibung und Prognose typisch sächsischer Witterungsverhältnisse als besonders geeignet ausgewählt und damit als Grundlage für die Klima-Regionalisierung in Sachsen herangezogen (Abb.1). Dieses Modell wurde im Rahmen des 1998 abgeschlossenen BMBF-Forschungsschwerpunktes "Klimavariabilität und Signalanalyse" entwickelt und getestet.

Es basiert auf einer Regionalisierung der globalen Modellergebnisse mit Hilfe statistischer Beziehungen (Kombination von Wetterlagenklassifikation und nachfolgender multipler Regression) und erlaubt die Berücksichtigung großräumiger Prozesse. Die Stärke dieses Regionalisierungsansatzes globaler Klimamodelldaten besteht in der statistischen Kopplung zwischen großräumigen meteorologischen Datenfeldern der freien Atmosphäre (Wetterlagen) und Messreihen der Klimaelemente an Bodenstationen in Sachsen.

Das Verfahren stützt sich auf Ergebnisse von Simulationen des globalen Klimamodells ECHAM4-OPYC-T42 des DKRZ Hamburg. Die globale Prognose erfolgte unter der Annahme einer Verdopplung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre (2xCO₂-Szenario) und umfasst einen Zeitraum von etwa 2040 bis 2060. Eine Verdopplung des CO₂-Gehaltes wird angesichts der derzeit weltweiten CO₂-Zunahme als ein realistisches Szenario angesehen.

Das Verfahren bietet u.a. folgende Vorteile:

- Systematische Fehler des globalen Klimamodells können eliminiert werden,
- Auswirkungen großräumiger Prozesse können direkt untersucht werden,
- Kosten für Modellanpassung und Aktualisierungen der Simulationen sind vergleichsweise gering.

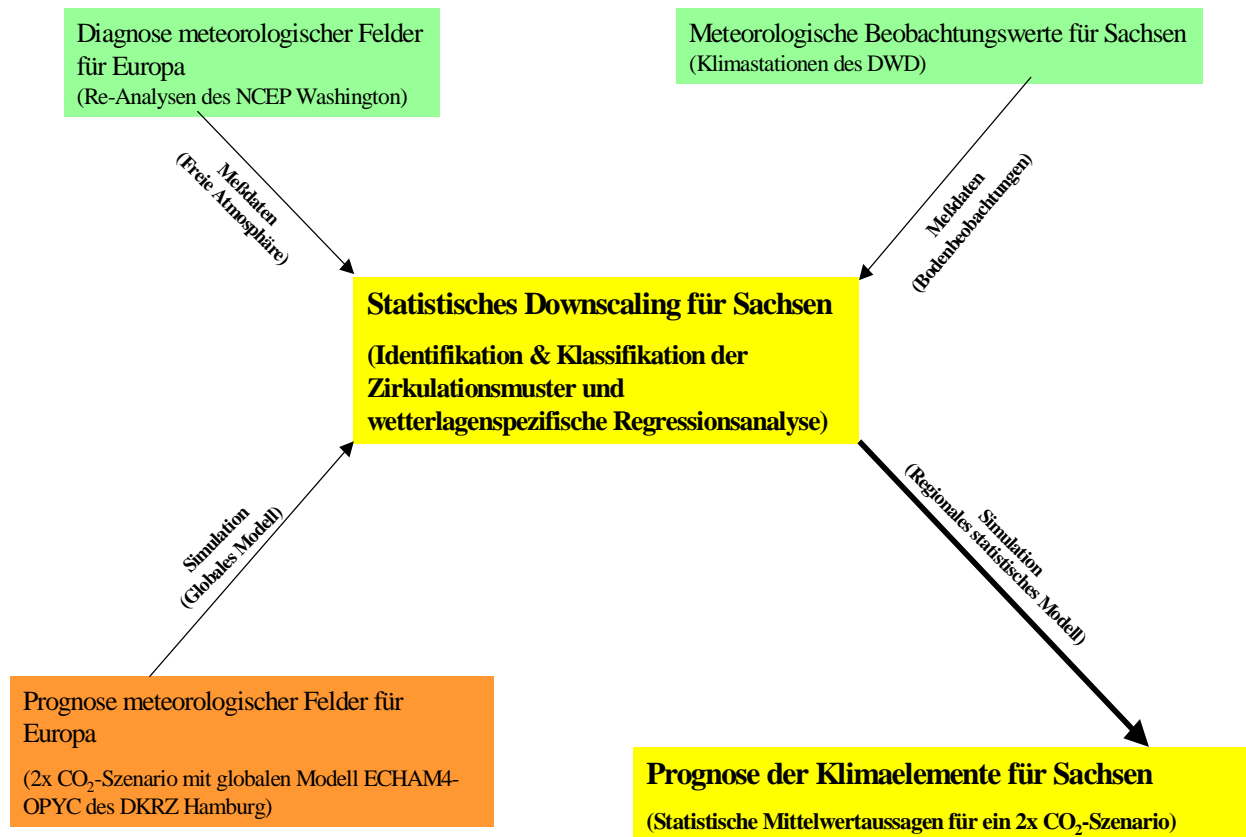


Abb. 1: Prinzipskizze des sächsischen Regionalisierungsverfahrens (Enke-Spekat-Modell)

4.2 Anwendung des Modells

4.2.1 Übersicht zur Methodik

Entwicklung und Anwendung des Enke-Spekat-Modells erfolgen in den nachfolgend aufgeführten methodischen Schritten:

1. Entwicklung des Modells

- Ableitung täglicher objektiver Wetterlagen auf der Basis von Analysedaten für den Zeitraum 1970-1997. Die Ableitung der Wetterlagen für Sachsen erfolgt getrennt für Temperatur- und Feuchteregime.

- Für die selektierten Wetterlagen werden mittlere Werte der Klimaelemente bestimmt und Regressionsgleichungen für die Klimaelemente abgeleitet (Kopplung zwischen Beobachtungen in der "freien" Atmosphäre und am Boden).
- Überprüfung der Stabilität des Verfahrens.

2. Anwendung des Modells auf den Kontroll-Lauf

- Grundlage ist eine ECHAM4-OPYC-Simulation des DKRZ Hamburg für das Klima der siebziger und achtziger Jahre
- Vergleich der prozentualen Häufigkeiten der Wetterlagen für den Kontroll-Lauf (Simulationsebene) mit den auf der Basis der Beobachtungsdaten der "freien" Atmosphäre abgeleiteten Wetterlagen (Entwicklungsebene)
- Modellkorrektur (Beseitigung vorhandener systematischer Abweichungen zwischen Entwicklungsebene und Simulationsebene)
- Modell ist jetzt einsatzbereit für Szenarienrechnungen.

3. Anwendung des Modells auf ein 2xCO₂-Szenario

- Grundlage ist die ECHAM4-OPYC-Simulation, Szenario A (CO₂-Verdopplung), des DKRZ Hamburg für 20 Jahre (Zeitabschnitt 2040-2060/ zentriert um 2050)
- Vergleich der Resultate für Kontroll-Lauf und 2xCO₂-Szenario (Unterschiede der Wetterlagenhäufigkeiten; Änderung der statistischen Mittelwerte der einzelnen Klimaparameter)
- Interpretation der bestehenden Unterschiede (zu erwartende Klimaänderung) für die Modellvarianten *Klass.* (reines Klassifikationsverfahren) und *Klass.+Reg.* (kombiniertes Klassifikations- und Regressionsverfahren).

4.2.2 Resultate des Klassifikationsverfahrens für den Kontroll-Lauf

Da Klimamodelle sehr komplex sind, d.h. viele Prozesse der Atmosphäre und des Ozeans modellieren, ist es eine entscheidende Frage, ob das konkrete Modell unter den derzeitigen Randbedingungen auch das derzeit beobachtete Klima zutreffend beschreiben kann. Diese Simulation wird als Kontroll-Lauf des Klimamodells bezeichnet. Im allgemeinen treten mehr oder weniger große Differenzen zwischen Kontroll-Lauf und real beobachtetem Klima auf.

Welche Ergebnisse und Schlussfolgerungen ergeben sich aus dem Kontroll-Lauf des Enke-Spektr-Modells?

Für den Kontroll-Lauf wurden vom DKRZ Hamburg für eine Zeitscheibe von 20 Jahren, die die siebziger und achtziger Jahre repräsentieren, tägliche Klimasimulationen des ECHAM4-OPYC-T42-Modells zur Verfügung gestellt. Mit diesem Datensatz wurden für jede Jahreszeit tägliche Wetterlagen, getrennt für das Temperatur- und Feuchteregime bestimmt. Auf die Bedeutung dieser Unterteilung soll an dieser Stelle nur hingewiesen werden, eine detaillierte Begründung wird im Abschlußbericht (ENKE, 2001) gegeben. Die Leistungsfähigkeit dieses Klassifikationsverfahrens zur Erzeugung objektiver Wetterlagen wurde unter Verwendung des in der Wettervorhersage gebräuchlichen RV-Maßes (siehe Anhang) eingeschätzt. Es zeigt sich, dass das verwendete statistische Modell die Zeitreihen der Lufttemperatur, aber auch der mittleren Niederschlagssummen weitgehend zutreffend wiedergibt.

Temperaturregime

Das Klassifikationsverfahren ergab 13 objektive Wetterlagen, optimiert an 16 Klimastationen für die Klimaelemente Temperaturmaximum, Temperaturminimum und Sonnenscheindauer, unterteilt nach Jahreszeiten. Die entsprechenden wetterlagenspezifischen Mittelwerte können dem Abschlussbericht (ENKE, 2001) entnommen werden. Es ist bemerkenswert, dass für die Temperatur eine Differenz zwischen der wärmsten und kältesten Klasse je nach Jahreszeit von mehr als 20 K auftritt. Die Trennschärfe der Wetterlagen für das Temperaturregime kann dabei mit RV-Werten zwischen 59 und 86 % als sehr gut eingeschätzt werden. Diese Resultate sprechen für die Leistungsfähigkeit des im Vorhaben zugrundegelegten Verfahrens der objektiven Wetterlagenklassifikation.

Feuchteregime

Das Klassifikationsverfahren ergab 17 objektive Wetterlagen, optimiert an 16 Klimastationen für die Klimaelemente Niederschlagssumme und Bedeckungsgrad, unterteilt nach Jahreszeiten. Dem Abschlussbericht (ENKE, 2001) können die entsprechenden wetterlagenspezifischen Mittelwerte entnommen werden. Im Vergleich zur Wetterlagenklassifikation für das Temperaturregime fällt die höhere Anzahl von Wetterlagen (17 gegenüber 13) auf, die zur Charakterisierung der Niederschlagsverhältnisse notwendig ist. Dies ist auf die Komplexität der Wetterprozesse zurückzuführen, die zur Niederschlagsbildung führen können. So genügen zur Beschreibung der

Temperaturverhältnisse im Winter 5 Klassen; zur Beschreibung der Niederschlagsverhältnisse in dieser Jahreszeit werden hingegen 11 Klassen benötigt. Die Komplexität der Niederschlagsprozesse wird auch bei Betrachtung der mittleren Niederschlagssummen in den Klassen deutlich. Gegenüber dem Temperaturregime sind die Unterschiede zwischen den 17 Klassen hier deutlich geringer.

4.2.3 Resultate des Regressionsverfahrens für Kontroll-Lauf und Szenario

Wetterlagenspezifische Regressionsanalysen wurden auf Kontroll-Lauf und Szenario angewandt. Untersucht wurden dabei die Zusammenhänge zwischen den an Klimastationen erfassten Werten Tagesmaximum, Tagesminimum, Tagesmitteltemperatur, Tagesmittel der relativen Feuchte, Sonnenscheindauer, Tagessumme des Niederschlages und Tagesmittel des Gesamtbedeckungsgrades und den Geopotential- und Temperaturanalysen der "freien" Atmosphäre sowie daraus abgeleiteten Größen.

Die wetterlagenspezifische Regressionsanalyse führt gegenüber dem reinen Klassifikationsverfahren zu einer deutlichen Verbesserung der Regionalisierungsergebnisse um 10 bis 25 %. Auch nach durchgeführter Regression ist die Fehlerstreuung beim Temperaturregime (RV-Werte 80-90 %) erwartungsgemäß deutlich niedriger als beim Feuchteregime (RV-Werte 40-50 %). Die Reproduktion der Niederschlagsreihen durch das verwendete statistische Modell ist dennoch positiv einzuschätzen, da eine analoge Bewertung von Vorhersagen der Niederschlagshöhen unter Nutzung aktueller Wettervorhersagemodelle im Mittel zu etwa vergleichbaren RV-Werten führt (siehe Anhang).

Tabelle 1 enthält die prognostizierten Klimaänderungen gegenüber den Referenzwerten 1970-1997 als Mittel über alle für das entsprechende Klimaelement zur Verfügung stehenden Klimastationen in Sachsen für das reine Klassifikationsverfahren (Klass) und das kombinierte Klassifikations- und Regressionsverfahren (Klass+Reg). Die Änderung der Mitteltemperaturen bestimmt sich aus dem Mittel der prognostizierten Änderung von Temperatur-Maximum und Temperatur-Minimum. Die quantitativen Unterschiede zwischen reiner Klassifikation und der vollständigen Simulation mittels Klassifikation und wetterlagenspezifischer multipler Regression zeigen die mögliche Spannweite der zu erwartenden Änderungen.

Insgesamt sind die stärksten Änderungen für Sachsen im Frühling und Sommer zu erwarten; in diesen Jahreszeiten muß neben der Temperaturzunahme auch mit einem deutlich trockneren Klima gerechnet werden.

Klimaelement	Frühling		Sommer		Herbst		Winter	
	Klass	Klass & Reg	Klass	Klass & Reg	Klass	Klass & Reg	Klass	Klass & Reg
Temperatur-Maximum[K]	3.1	4.0	2.0	3.3	1.9	3.2	1.8	2.9
Temperatur-Minimum [K]	2.2	2.1	1.2	1.7	1.3	1.9	1.8	2.6
Relative Feuchte [%]	-2.1	-5.1	-5.0	-6.9	-0.1	-2.6	0.4	1.6
Gesamtbedeckung [/10]	-0.1	-0.6	-0.7	-1.2	-0.1	-0.4	-0.0	-0.1
Sonnenscheindauer [h/Monat]	18	60	39	50	8	29	3	5
Niederschlagssumme [mm/Monat]	-9	-14	-13	-12	-2	-3	-2	-3

Tab. 1: Prognostizierte Klimaänderung für den Freistaat Sachsen als Differenz zwischen Kontroll-Lauf und 2xCO₂-Szenario der ECHAM4-OPYC-Klimasimulation des DKRZ Hamburg

In den Abbildungen 2 bis 4 werden die prognostizierten Änderungen für die Klimaelemente Temperaturmaximum, Sonnenscheindauer und Niederschlagssumme graphisch dargestellt.

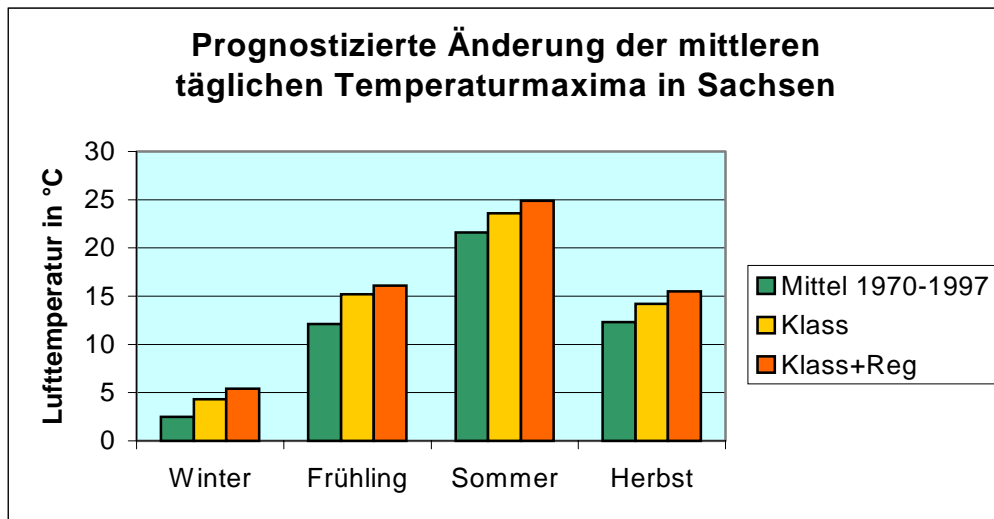


Abb.2 : Prognostizierte Änderung der mittleren täglichen Temperaturmaxima in Sachsen bis 2050 im Vergleich mit Referenzwerten für den Zeitraum 1970 -1997

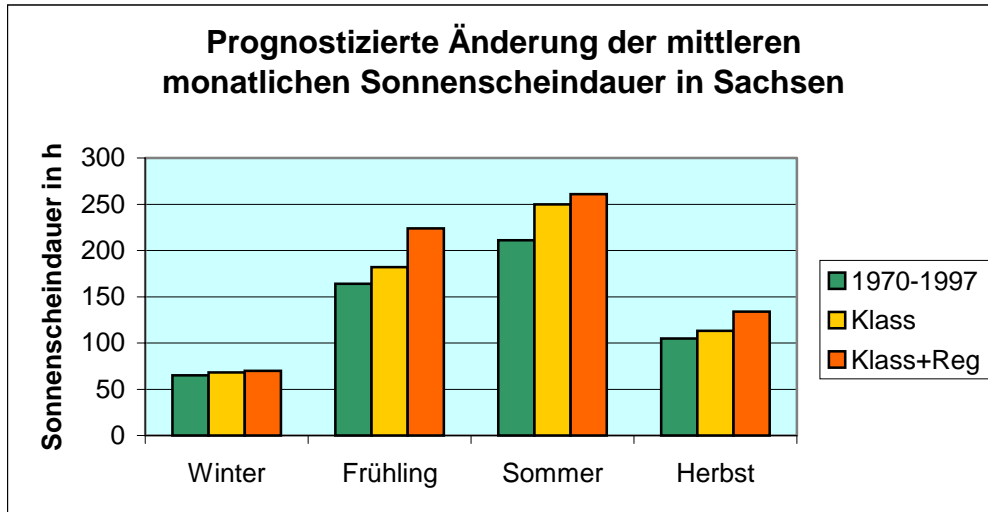


Abb.3 : Prognostizierte Änderung der mittleren monatlichen Sonnenscheindauer in Sachsen bis 2050 im Vergleich mit Referenzwerten für den Zeitraum 1970 -1997

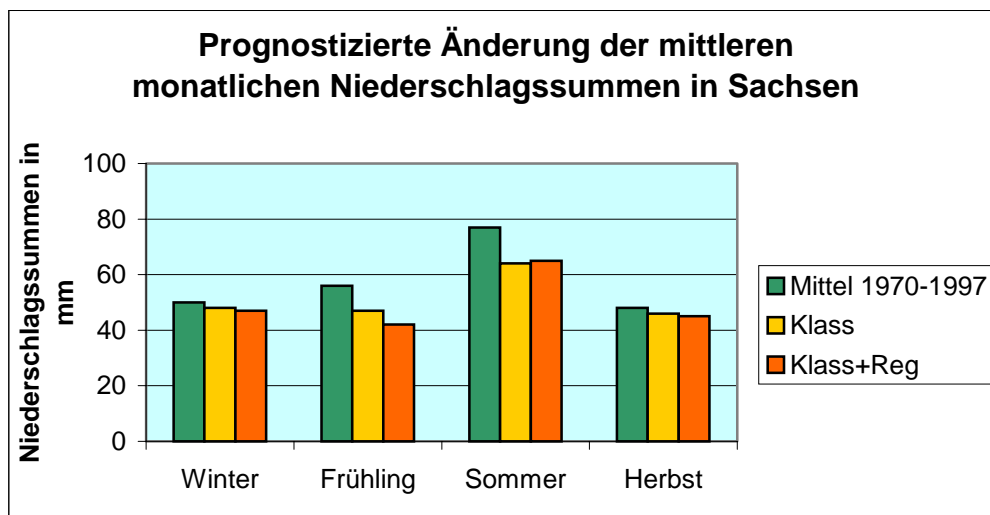


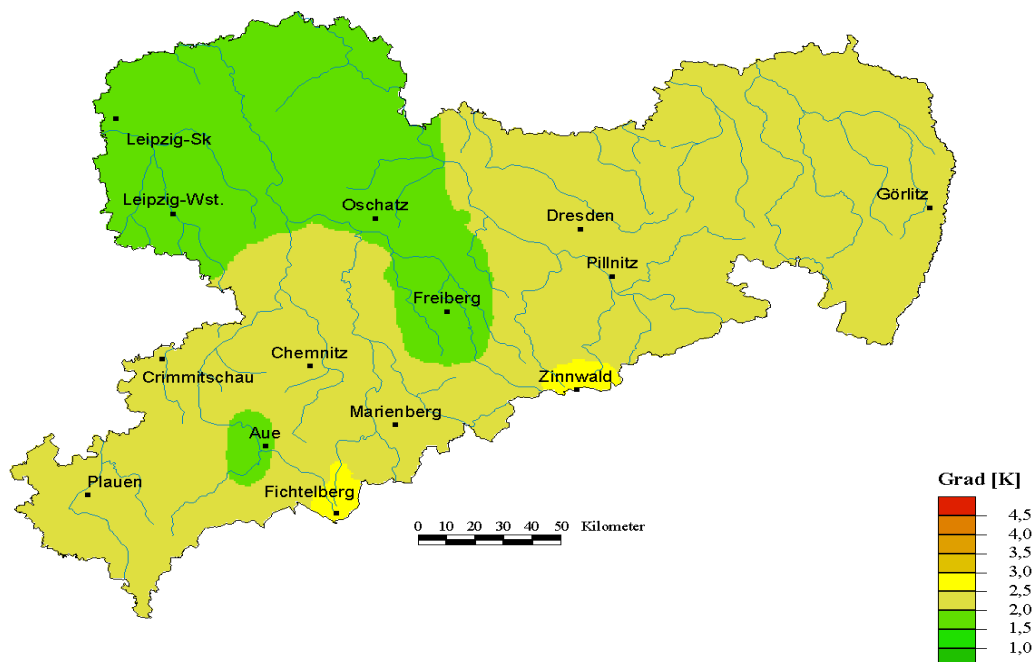
Abb.4 : Prognostizierte Änderung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Sachsen bis 2050 im Vergleich mit Referenzwerten für den Zeitraum 1970 -1997

Eine flächenhafte Darstellung (Interpolation) der verwendeten Stationswerte ist für die dargestellten Änderungen der Klimaelemente (Differenzen zwischen Szenariodaten und Kontroll-Lauf) sinnvoll, da diese Differenzen weitgehend unabhängig von der Stationshöhe sind. In den Abbildungen 5 bis 7 werden prognostizierte Änderungen der Klimaelemente Temperaturmaximum, Temperaturminimum, Niederschlag für das Frühjahr flächenhaft dargestellt. In Abhängigkeit vom Klimaelement und der Jahreszeit spiegeln sich teilweise auch Luv- und Lee-Effekte am Nordrand des Erzgebirges wider.



Änderung des Temperatur-Maximums (Frühling)

Abb. 5: Prognostizierte Änderung der täglichen Maxima der Lufttemperatur im Frühjahr in Sachsen bis 2050



Änderung des Temperatur-Minimums (Frühling)

Abb. 6: Prognostizierte Änderung der täglichen Minima der Lufttemperatur im Frühjahr in Sachsen bis 2050

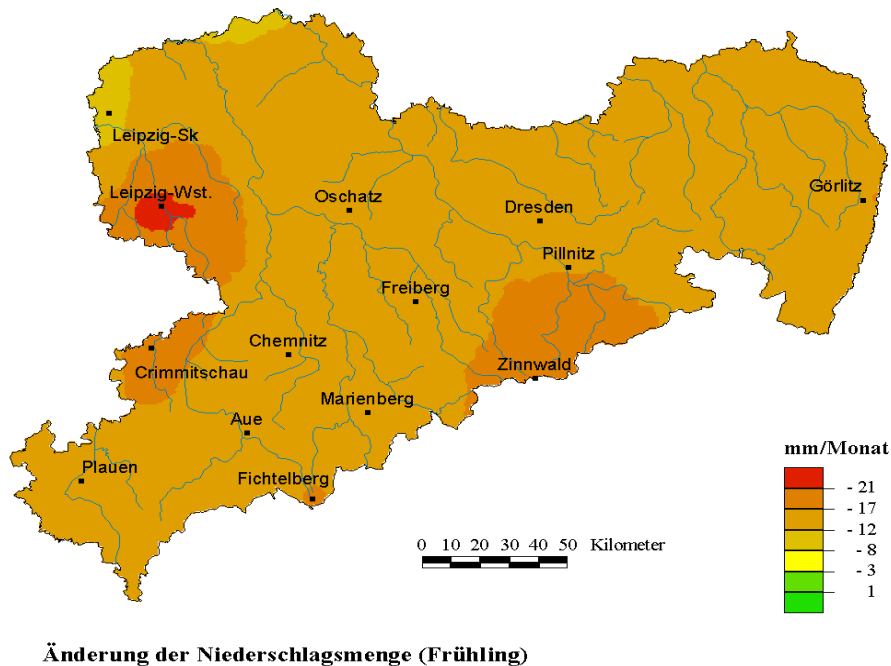


Abb. 7: Prognostizierte Änderung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Frühjahr in Sachsen bis 2050

4.3 Klima und extreme Naturereignisse

Regelmäßig wird in den Medien der anthropogene Treibhauseffekt für einzelne extreme Wetterereignisse verantwortlich gemacht. Andererseits wird aber auch immer wieder eine globale Klimaveränderung aufgrund einzelner aus dem Zusammenhang herausgegriffener wissenschaftlicher Erkenntnisse in Frage gestellt. Deshalb erscheinen noch einige Klarstellungen erforderlich.

Solange Klimaelemente um einen langjährigen Mittelwert pendeln, bleibt das Klima unverändert. Erst wenn sich der Mittelwert und die Variabilität der Extreme langfristig erkennbar (d.h. statistisch signifikant) verändern, liegt eine Klimaänderung vor. Beispielsweise stellen einzelne ungewöhnlich warme Sommer, wie z.B. 1994 und 1995 in Europa, keinen Beweis für eine vom Menschen verursachte Klimaänderung dar, wie umgekehrt kalte Winter (z.B. 1995/96) oder kühle Sommer (z.B. 1996) den anthropogenen Treibhauseffekt nicht widerlegen. Solche Einzelereignisse liegen meist noch im natürlichen

Schwankungsbereich und können nicht - wie des öfteren in den Medien zu finden - als Beweis für oder gegen den anthropogenen Klimawandel herangezogen werden.

Gegenwärtig noch nicht eindeutig bestimmbar sind mögliche Veränderungen des Golfstroms infolge des globalen Klimawandels. So ist eine Abschwächung der Golfstromzirkulation bei einer globalen Erwärmung nicht auszuschließen. Diese würde in Nord- und Westeuropa im Unterschied zu den meisten Regionen der Welt zu einer Abkühlung führen. Es ist aber andererseits auch möglich, dass der Golfstrom dann durch Intensivierung der Tiefenwasserbildung aktiviert wird mit der Folge einer stärkeren Erwärmung über dem Nordatlantik. Mehrere Berechnungen der allerjüngsten Zeit haben jedoch eine Schwächung der nordatlantischen Konvektion zum Ergebnis (CUBASCH & KASANG, 2000). Das Risiko eines menschlichen Eingriffs in eine 10 000 Jahre lang stabile Zirkulation des Ozeans mit erheblichen Konsequenzen für das Klima in Europa ist also gegeben.

4.4 Ergebnisse

Das statistische Verfahren der Wetterlagenklassifikation mit nachgeordneter Regressionsanalyse interpretiert Änderungen großräumiger Strömungsmuster, wie sie durch globale Klimamodelle prognostiziert werden für den lokalen Bereich. Auf der Grundlage eines 2xCO₂-Szenarios mit dem ECHAM4-OPYC-Modell wurden sowohl für das Klassifikationsverfahren als auch für die Kombination Klassifikation und nachfolgende wetterlagenspezifische Regressionsanalyse Mittelwerte der Klimaelemente in Bodennähe für Monate, Jahreszeiten und Jahre an sächsischen Klimastationen statistisch abgeleitet.

Es ist mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit warmer Wetterlagen in Verbindung mit vorherrschender Südwestanströmung und damit einer Verstärkung der mit Niederschlagsabschwächung verbundenen Lee-Effekte nördlich des Erzgebirges zu rechnen.

Die **mittlere Jahrestemperatur** wird um bis zu 2,7 Grad ansteigen, im Frühjahr kann es bezüglich der Maximaltemperatur bis zu 4 Grad wärmer werden (Abb. 2).

Auch die **Sonnenscheindauer** nimmt vor allem im Frühjahr und Sommer deutlich zu (Abb.3). Durch die Kopplung dieser Tendenz mit dem erwarteten Temperaturanstieg und der Abnahme der Niederschläge muß mit entsprechenden Konsequenzen für Wasserhaushalt und Vegetation gerechnet werden.

Die **jährlichen Niederschlagssummen** werden abnehmen. Ein Rückgang ist vor allem im Frühjahr und Sommer zu erwarten. Damit wird es in der Vegetationsperiode wesentlich trockener (Abb. 4).

Bedingt durch die häufigere Zufuhr von Luftmassen aus Südwest wird gemäß der räumlichen Strukturen der prognostizierten täglichen Temperaturminima die nächtliche Abkühlung besonders in den Höhenlagen des Erzgebirges im Frühling und Sommer Jahreszeit gebremst. Insgesamt treten im Winter die höchsten Zunahmen auf. Die prognostizierte Änderung der täglichen Temperaturmaxima der Lufttemperatur lässt keine räumlichen Strukturen erkennen. Lee-Effekte beeinflussen das Niederschlagsgeschehen vor allem unmittelbar nördlich des Erzgebirgskammes. Das resultierende Niederschlagsdefizit wird in Richtung Brandenburg deutlich abgemildert.

Insgesamt sind die stärksten Änderungen für Sachsen im Frühling und Sommer zu erwarten; in diesen Jahreszeiten muß neben der markanten Temperaturzunahme auch mit einem deutlich trockeneren Klima gerechnet werden. Es deutet sich an, dass unter den Bedingungen der globalen Erwärmung in Sachsen weiterhin strenge Winter auftreten können, zunehmend aber sehr milde Winter. Auch kühle Sommer sind nach wie vor möglich. Mit Blick auf die zu erwartenden Niederschlagsverhältnisse zeigt sich, dass im Gegensatz zur deutlichen Abnahme der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Frühling und Sommer die extremen Ereignisse, also vor allem lokale Starkniederschläge, gegenüber den simulierten Niederschlagssummen für das gegenwärtige Klima offensichtlich zunehmen werden. Dies steht im Einklang mit Untersuchungsergebnissen zum Klima in historischer Zeit, wonach sich gerade in Phasen einer raschen Klimaänderung gehäuft extreme Situationen einstellen (GERSTENGARBE & WERNER, 1996). Der sich abzeichnende Rückgang der mittleren Niederschlagshöhen für Frühling und Sommer signalisiert aber auch, dass ausgeprägte Trockenperioden häufiger auftreten werden.

Bei den prognostizierten Änderungen klimatologischer Parameter handelt es sich um statistische Mittelwertaussagen. Das sächsische Regionalisierungsverfahren prognostiziert statistische Kenngrößen für relevante Klimaparameter unter einem angenommenen Szenario. Diese Mittelwertaussagen sind weit zuverlässiger als Prognosen über die konkreten Temperatur- und Niederschlagsreihen selbst. Die Güte der regionalen Prognosen hängt im wesentlichen von der Prognoseleistung des globalen Klimamodells ab.

5. Glossar

Advektion	Horizontale Verlagerung von Luftmassen mit ihren verschiedenen Eigenschaften im Zusammenhang mit Zirkulationsprozessen.
antizyklonal	Luftströmung im Uhrzeigersinn (Nordhalbkugel) um eine Antizyklone (Hochdruckgebiet). Auch zur Kennzeichnung einer Wetterlage unter Hochdruckeinfluss.
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg
Feuchteregime	hier die Klimatelemente: Niederschlag, Bedeckungsgrad und relative Luftfeuchte
Großwetterlage	Charakteristische Luftdruck- bzw. Strömungsverteilung, die in der Regel drei Tage oder mehr anhält. Regelt Art und Reihenfolge der Wettervorgänge (Wetter kann wechseln; Gepräge der Witterung bleibt erhalten).
Großwettertyp	Zusammenfassung verwandter Großwetterlagen (z.B. Westlage, Nordlage, Hoch über Mitteleuropa)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change. 1988 von WMO (World Meteorological Organization) und UNEP (United Nations Environmental Programme) gegründetes zwischenstaatliches Gremium zum Klimawandel.
Klima	Klima ist die Synthese des Wetters (Wettergesamtheit) über einen Zeitraum, der lang genug ist, um dessen statistische Eigenschaften bestimmen zu können. Nach Empfehlung der Meteorologischen Weltorganisation werden 30jährige Perioden als Referenzzeiträume verwendet (z.Zt. 1961/90). <i>oder einfacher ausgedrückt:</i> Durchschnittliches Wetter und seine Extremwerte eines bestimmten Gebietes in einem bestimmten Zeitraum.
Klimatelemente	Das Klima bestimmende meteorologische Größen (z.B. Solarstrahlung, Niederschlag, Luftdruck, Temperatur)
Klimafaktoren	Prozesse und Zustände, die das Klima generieren, aufrechterhalten und verändern (z.B. Höhe über Meeresniveau, Zusammensetzung der Atmosphäre, Land- und Meerverteilung).
Klimasystem	Gesamtheit der Subsysteme (Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre). Das Klimasystem ist ein nicht-lineares System.
Kontroll-Lauf	Modell-Simulation des <i>realen</i> Klimas ohne veränderte Randbedingungen
Konvektion	In der Atmosphäre mit dem Aufsteigen erwärmter Luft bei gleichzeitigem

Absinken kühlerer Luft verbunden. Form der Wärmeübertragung.

NCEP	National Center for Environmental Prediction in Washington/USA
Re-Analyse	Erneute Analyse der Originaldaten der freien Atmosphäre durch das NCEP Washington/DC nach einem einheitlichen Analyseverfahren. Anhand dieser in Gitterpunktform vorliegenden Daten werden Strömungsmuster bzw. Wetterlagen abgeleitet.
RV-Maß	Beurteilungsmaß für die Güte von Prognoseverfahren. Maß für die Reproduzierbarkeit der Variabilität der Messreihe in %
Szenarien	Modell-Simulation des <i>künftigen</i> Klimas unter verschiedenen Annahmen über die Randbedingungen
Temperatur-regime	hier die Klimaelemente: Lufttemperaturmaximum, -minimum, Tagesmitteltemperatur und Sonnenscheindauer

6. Literatur

BAYERISCHER KLIMAFORSCHUNGSVERBUND (1999): Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen, Abschlußbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes, München, November 1999

CUBASCH, U., KASANG, D. (2000): Anthropogener Klimawandel, Klett-Perthes Verlag, Gotha und Stuttgart

ENKE, W., SPEKAT, A. (1997): Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression, *Climate Research*, Vol. 8, 195-207

GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P. (1996): Szenarien zur Klimaentwicklung im Land Brandenburg bis zum Jahr 2050, Pilotstudie, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam 1996

GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P. (1997): Proposal for the development of climate scenarios, *Climate Research*, Vol. 8, 171-182

GRABL, H. (1998): Szenarien der Klimaveränderungen durch den Menschen - eine anhaltende Herausforderung für die Wissenschaft. In: Warnsignal Klima - Das Klima des 21. Jahrhunderts, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg 1998

RAPP, J., SCHÖNWIESE, CH. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990, Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten: Ser. B, Meteorologie und Geophysik; Bd. 5, Frankfurt am Main, 1996

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1999): Forschungsvorhaben „Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen mit Hilfe des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse“, Az.: 13-8802.3521/44

ENKE, W. (2001): Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen mit Hilfe des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse, Abschlußbericht, Berlin, Januar 2001

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2000): Forschungsvorhaben „Statistische Untersuchungen regionaler Klimatrends in Sachsen“, Az.: 13-8802.3521/48

UBA (2000): "Klimafaktor Mensch": Die Indizien verdichten sich, Presse-Info, Nr.24/2000

Anhang

RV- Ein Beurteilungsmaß für die Güte von Prognoseverfahren

RV-Maß (Reduction of Variance) = Maß für die Reproduzierbarkeit der Variabilität der Messreihe in %

$$RV = (1 - (s_p^2 / s_r^2)) * 100 = ((s_r^2 - s_p^2) / s_r^2) * 100 \text{ [%]}$$

s_p^2 : Streuung der simulierten Reihe

s_r^2 : Streuung der Referenzreihe

RV ist ein geeignetes Maß zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Verfahrens, in diesem Fall für die Simulation täglicher Temperatur -und Niederschlagswerte. Da die Streuung in die Gleichung eingeht, werden Abweichungen bezüglich der Spitzenwerte "hart bestraft". Für die Berechnung der Streuungen wurde der Gesamtzeitraum verwendet, der für die Modell-Entwicklung herangezogen wird und für den praktisch gemessene Datenreihen vorliegen.

Bei der Simulation der Niederschlagshöhen werden erwartungsgemäß die mittleren Verhältnisse gut erfasst, Extremereignisse jedoch nur unbefriedigend simuliert.

Aufgrund der unbefriedigenden Reproduktion bzw. Simulation der Niederschlagsextremwerte liegt das RV-Maß schon bei der simulierten täglichen Niederschlagsmenge entsprechend niedrig. Bei der Simulation der Lufttemperatur ist die Leistungsfähigkeit des Verfahrens insofern deutlich besser. So erreicht die Leistungsfähigkeit des Klassifikationsverfahrens zur Erzeugung objektiver Wetterlagen z.B. für die Tagesmaxima der Lufttemperatur RV-Werte bis etwa 80-90 %, für die Niederschlagsmenge etwa 40-50 %.

Hinsichtlich Einschätzung der Resultate für die Niederschlagsmenge ist anzumerken, dass die analoge Bewertung von Vorhersagen der konkreten Niederschlagsmengen unter Nutzung aktueller Wettervorhersagemodelle im Mittel zu etwa vergleichbaren RV-Werten führt. Die Reproduktion der Niederschlagsreihen durch das verwendete statistische Modell ist also durchaus positiv einzuschätzen.