

# **Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Umwelt und die Gesellschaft im Elbegebiet (GLOWA-Elbe)**

## **Abschlussbericht**

**Fachbereich:**

**Teilprojekt:** Entwicklung von Klimaszenarien bis 2050 für ausgewählte Flusseinzugsgebiete in Deutschland

**Zuwendungsempfänger:** Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

**Förderkennzeichen:** 07-GWK 03/

**Vorhabenbezeichnung:** Analyse der raumzeitlichen klimatischen Verhältnisse im Elbeeinzugsgebiet und Entwicklung von Klimaszenarien für das Verbundprojekt GLOWA-Elbe

**Bearbeitung:** Dr. habil. F.-W. Gerstengarbe,  
Dr. habil. P.C. Werner,  
Dr. H. Österle,  
TAM U. Werner

## **1 Stand des Vorhabens**

### **1.1 Gesamtziel des Vorhabens und Realisierung**

### **1.2 Die wichtigsten Ergebnisse**

#### **1.2.1 Literaturrecherche**

#### **1.2.2 Datensammlung, -aufbereitung und -ergänzung sowie die Erstellung des Basisszenariums**

#### **1.2.3 Entwicklung des erweiterten Szenarienmodells**

##### **1.2.3.1 Stand der Forschung**

##### **1.2.3.2 Das Szenarienmodell**

##### **1.2.3.3 Szenarienergebnisse**

## **2 Vergleich des Standes der Forschung mit der ursprünglichen Planung**

### **2.1 Literaturrecherche**

### **2.2 Datenaufbereitung**

### **2.3 Szenarientwicklung**

## **3 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind**

## **4 Angabe zu Erfindungen und Schutzrechten**

## **5 Sonstiges**

### **5.1 Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen**

### **5.2 Relevanz für die praktische Anwendung**

### **5.3 Übersicht über den Mitteleinsatz**

### **5.4 Danksagung**

## **6 Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick**

## **7 Abbildungen**

## **8 Literatur**

## **9 Anlagen**

### **9.1 Gutachten**

### **9.2 Studie**

### **9.3 Veröffentlichungen**

# **1 Stand des Vorhabens**

## **1.1 Gesamtziel des Vorhabens und Realisierung**

Die klimatologischen Untersuchungen in diesem Projekt orientierten sich an den Anforderungen der anderen Projektteilnehmer. Entsprechend deren Vorgaben wurde geklärt, welche Datenbasis erforderlich war und auf welche zurückgegriffen werden konnte. Danach folgten Maßnahmen zur Datenbereitstellung.

Die vorliegenden Daten wurden mit statistischen Methoden hinsichtlich ihrer Qualität und Verwendbarkeit geprüft, gegebenenfalls ergänzt und homogenisiert und zu einem Basisszenarium zusammengestellt.

Nach der Qualitätsprüfung wurden diese Daten einer komplexen Klimaanalyse unterzogen. Unter Hinzuziehung der Daten des globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC3 für den Szenarienlauf A1 wurde die Trendentwicklung des Bezugsparameters für das erweiterte statistische Szenarienmodell bestimmt.

Unter Verwendung eines bereits vorhandenen Szenarienmodellansatzes wurde ein erweitertes statistisches Szenarienmodell entwickelt, das es erstmals ermöglicht, auf der Basis von Monte-Carlo-Simulationen Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger Klimaentwicklungen zu treffen.

Auf der Basis dieses Modells wurden 100 Realisierungen für das Szenarium A1 und den Zeitraum 2001-2055 für das Elbe-Einzugsgebiet erstellt. Daraus abgeleitet wurde die wahrscheinlichste Realisierung für diesen Zeitraum.

Nach der Qualitätsprüfung wurden diese Szenariendaten einer komplexen Klimaanalyse unterzogen und mit denen des Basisszenariums verglichen.

Insgesamt waren folgende Schwerpunktaufgaben zu lösen:

1. Literaturrecherche
2. Datenaufbereitung
3. Erstellen des Basisszenariums
4. Weiterentwicklung des Szenarienmodellansatzes
5. Erstellen des Zukunftsszenariums mit 100 Realisierungen
6. Erstellen der Klimatologien für Basis- und Zukunftsszenarium
7. Zusammenschau der Ergebnisse.

Eine detaillierte Aufstellung des Arbeitsplanes für die zu lösenden Aufgaben ist dem Forschungsantrag zu entnehmen.

## **1.2 Die wichtigsten Ergebnisse**

### **Anmerkung:**

*Im Rahmen dieses Forschungsprojektes konnte bereits die neu entwickelten Methoden zur Erstellung eines Gutachtens für den Westfläming (Anlage 9.1) sowie für eine Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg (Anlage 9.2)*

*eingesetzt werden. Dadurch wiederholen sich einige Passagen aus diesen Arbeiten bei der folgenden Darstellung der Ergebnisse.*

### **1.2.1 Literaturrecherche**

Die Literaturrecherche wurde kontinuierlich über den gesamten Projektzeitraum durchgeführt. Es wurden einschlägige Publikationen gesammelt und archiviert. Damit liegt am Ende des Projektes eine gute Übersicht zu Fragestellungen des Forschungsprojektes vor.

### **1.2.2 Datensammlung, -aufbereitung und -ergänzung sowie Erstellung des Basisszenariums**

Als Basis für das Forschungsprojekt wurden vom Deutschen Wetterdienst Rohdaten auf Tageswertbasis von 84 meteorologischen Hauptstationen und 285 Niederschlagsmessstellen für den Zeitraum 1951-2000 zur Verfügung gestellt. Die Verteilung der Stationen im Elbe-Einzugsgebiet ist Abb. 1 zu entnehmen.

Die Daten wurden hinsichtlich Vollständigkeit und Homogenität geprüft. Hierzu stand u.a. ein umfangreiches Softwarepaket zur Verfügung (Gerstengarbe, Löser, 1985). Fehlende Werte wurden unter Berücksichtigung der statistischen und klimatologischen Zusammenhänge zwischen den Stationen ergänzt, Inhomogenitäten, soweit sie nicht natürlichen Ursprungs waren, korrigiert.

Mit Hilfe eines speziellen Interpolationsprogramms wurden sämtliche meteorologischen Größen (außer Niederschlag) von den Hauptstationen auf die Niederschlagsstationen übertragen.

Damit stand letztendlich ein vollständiger, homogener Datensatz (Basisszenarium) bestehend aus 369 Stationen mit folgenden Tageswerten meteorologischer Größen, der im Datenbanksystem des PIK archiviert ist, zur Verfügung:

Lufttemperatur (Maximum, Mittel, Minimum)  
Niederschlag  
relative Luftfeuchte  
Luftdruck  
Wasserdampfdruck  
Sonnenscheindauer  
Bedeckungsgrad  
Globalstrahlung  
Windgeschwindigkeit.

### **1.2.3 Entwicklung des erweiterten Szenarienmodells**

#### **1.2.3.1 Stand der Forschung**

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 einstellen-

den 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. Im folgenden wird ein statistisches Modell zur Entwicklung von Klimaszenarien vorgestellt, dessen Grundlage sowohl Klimamodellaussagen als auch Beobachtungsdaten sind. 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, 2001), 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 Szenarienerstellung werden zur Zeit diskutiert:

Im Rahmen der ersten Methode wird versucht, ein regionales Klimamodell zu entwickeln, das 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 eine Weiterverwendung der Ergebnisse in der Regel nicht möglich macht.

Die zweite Methode verwendet Klimamodellergebnisse, die über statistische Verfahren in kleinskalige 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 (Werner, Gerstengarbe, 1997) 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 Szenarienerstellung auf ein Minimum reduziert werden, wobei die bereits angeführte Konsistenz erhalten bleibt. Von Nachteil ist der nicht mehr vorhandene physikalische Zusammenhang zwischen den Klimamodellergebnissen und denen des Szenariums.

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

### 1.2.3.2 Das Szenarienmodell

#### a) Grundprinzip

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 globalen 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 werden die anderen beobachteten meteorologischen Größen konsistent diesen Änderungen angepasst. Dabei wird darauf geachtet, dass deren statistische Grundeigenschaften und Zusammenhänge im wesentlichen erhalten bleiben.

#### b) Beschreibung des beobachteten Klimas

- Statistisch konstante Kenngrößen

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. Bei den Kenngrößen handelt es sich um den Mittelwert (in der Simulation zuzüglich der vorgegebenen Änderung), die Standardabweichung, die Erhaltungsneigung, den Jahresgang sowie die interannuelle Variabilität.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Charakteristika ist hier nicht notwendig, da diese als allgemein bekannt vorausgesetzt werden. Es muss aber darauf hingewiesen 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).

- 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, das Temperaturverhalten der Vortage (Erhaltungsneigung) 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 dafür ein speziell entwickeltes Cluster-Analyseverfahren verwendet (Gerstengarbe, Werner, 1997, 1999). 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 Abschnitt d) erläutert.

### *c) Erstellung des simulierten Klimas*

#### - Bearbeitung der Bezugsgröße

Die Erstellung der simulierten Reihe der Bezugsgröße 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 Rangbestimmung. Die Rangbestimmung 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 Rangbestimmung.
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 seines Ranges 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.

### *d) Verknüpfung von beobachtetem und simuliertem Klima*

Mit Abarbeitung des 6. Schrittes aus Abschnitt c) ist **eine** 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. Abschnitt b) ) mit Hilfe des Abstandes von Mahalanobis

(Weber, 1980) 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 Erhaltungseigenschaft 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. Man erhält 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.

#### *e) Erzeugung einer ausreichend großen Stichprobe von Realisierungen*

Wie unter d) bereits erwähnt, wurde mit dem Algorithmus bisher nur eine Realisierung berechnet. Um eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Sicherheit des Eintretens der simulierten Klimaänderungen zu treffen, müssen entsprechend viele Realisierungen erzeugt werden. Dies wird erreicht, indem man mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation in der zeitlichen Abfolge zufällige Realisierungen berechnet. Das heißt, dass die unter c) angegebenen Arbeitsschritte 2-7 sowie der Arbeitsschritt d) für jede Realisierung neu berechnet werden. In Abbildung 2 ist die Grundstruktur des Modellaufbaus dargestellt.

### **1.2.3.3 Szenarienergebnisse**

#### *Einleitung*

Die Szenarienberechnungen beruhen auf einem vorgegebenen Temperaturtrend von 1.4 K für den Zeitraum 2001-2055. Dieser Trend wurde aus dem Klimamodelllauf ECHAM4-OPYC3 des MPI für Meteorologie Hamburg bestimmt. Diesem Lauf liegt das A1-CO<sub>2</sub>-Emissionsszenarium zugrunde, was eine relativ moderate



Temperaturerhöhung zur Folge hat. Um eine ausreichend große Stichprobe zu bekommen, wurden 100 Simulationsläufe sowohl für den Beobachtungszeitraum als auch den Simulationszeitraum durchgeführt. Aus der Verteilung der daraus gewonnenen Niederschlagstrends (s. Tabelle 1a, b) wurde die wahrscheinlichste Realisierung, die als Zukunftsszenarium verwendet werden kann, zur Interpretation ausgewählt.

Klasse Nr.	Klassengrenze	Prozentualer Anteil
1	< - 47.4 mm	2
2	< - 32.8 mm	5
3	< - 18.2 mm	10
4	< - 3.6 mm	15
5	< 11.0 mm	12
6	< 25.6 mm	18
7	< 40.2 mm	16
8	< 51.1 mm	10
9	< 65.7 mm	6
10	>= 65.7 mm	6

*Tab. 1a: Verteilung der Niederschlagstrends für die Station Magdeburg auf der Basis der simulierten Daten für den Zeitraum 2001-2055*

Klasse Nr.	Klassengrenze	Prozentualer Anteil
1	< - 69.4 mm	2
2	< - 62.0 mm	5
3	< - 47.4 mm	10
4	< - 39.8mm	15
5	< 32.5 mm	12
6	< -17.9 mm	18
7	< -6.9 mm	16
8	< 3.6 mm	10
9	< 18.2 mm	6
10	>= 18.2 mm	6

*Tab. 1b: Verteilung der Niederschlagstrends für die Station Magdeburg auf der Basis der simulierten Daten für den Beobachtungszeitraum 1951-2000*

Der Vergleich der Trendverteilungen der simulierten Werte für die Zukunft (Tab. 1a) und der für den Beobachtungszeitraum (Tab. 1b) sowie die Heranziehung des tatsächlich beobachteten Niederschlagstrends, erlaubt abzuschätzen, welche Realisierung für die Zeit 2001-2055 die wahrscheinlichste ist. Der beobachtete Trend an der Station Magdeburg (Abb. 3), als einer typischen Station für das Elbeinzugsgebiet, beträgt -81.6 mm innerhalb von 50 Jahren, der entsprechende simulierte Trend -75.0 mm und die obere Grenze der nach unten offenen Klasse der Häufigkeitsverteilung < -69.4 mm. Da davon ausgegangen wird, dass sich die Erzeugung der Trendverteilungen im statistischen Sinn nicht voneinander unterscheidet, ist die Annahme legitim, dass sich die wahrscheinlichste Realisierung in der Stichprobe der zukünftigen Niederschlagstrends an der gleichen Stelle der Verteilung befindet, wie die tatsächliche Realisierung (Beobachtung) des Niederschlagstrends in der Verteilung der aus dem Basisszenarium berechneten. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass die wahrscheinlichste Realisierung in Klasse 1 (Tab. 1a) des simulierten Zukunftsszenariums zu suchen ist. Für die Bezugsstation Magdeburg bedeutet dies eine deutliche Niederschlagsabnahme bis 2055. Die

räumliche Differenzierung der wahrscheinlichsten Realisierung wird im folgenden behandelt.

### *Klimatologische Beschreibung der wahrscheinlichsten Realisierung*

#### Niederschlag

Eine erste Interpretation der Niederschlagsentwicklung im Szenarienzeitraum kann anhand der Abbildung 4a (Zeitraum 1951/2000) und 4b (Zeitraum 2046/2055) vorgenommen werden. Dabei umfassen die miteinander verbundenen Farbskalen den jeweiligen Wertebereich der Abbildung. Man erkennt, dass sich das Gebiet mit einer jährlichen Niederschlagssumme  $< 500$  mm deutlich vergrößert. Es gibt in diesem Bereich sogar Regionen, in denen bis 2055 die Niederschlagssumme unter 400 mm pro Jahr sinkt, wie zum Beispiel im Leebereich des Harzes. Zieht man zur weiteren Analyse die Differenzkarte des Niederschlags 2046/55-1951/00 heran (Abb. 4c) erkennt man, dass es Regionen mit einer Niederschlagsabnahme  $> 200$  mm gibt (z.B. im Gebiet um Luckau oder auch im Lee des Fichtelbergs). Andererseits ist eine Niederschlagszunahme bis zu 300 mm in den westlich gelegenen Gebirgsregionen (Harz und Thüringer Wald) zu beobachten. Dabei ist die Niederschlagsentwicklung jahreszeitlich deutlich differenziert. Aus den Abbildungen 5a bis 5c kann man erkennen, dass im Sommer für das gesamte Gebiet ein Niederschlagsrückgang zu verzeichnen ist. Im Winter dagegen (Abb. 6a bis 6c) nimmt der Niederschlag nur in einigen Teilregionen ab, in den Gebirgsregionen dagegen deutlich zu.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass große Teile des Elbeeinzugsgebietes bei der vorgegebenen Entwicklung mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem deutlichen Niederschlagsrückgang betroffen werden.

#### Temperatur

Für die Temperatur ist die Entwicklung in den Abbildungen 7a und 7b ( $T_{\max}$ ), 8a und 8b ( $T_{\text{mit}}$ ) und 9a und 9b ( $T_{\min}$ ) dargestellt. Da für die Temperatur die Änderungen entsprechend der Modellphilosophie vorgegeben wurden, kann auf eine Diskussion der Differenzkarten verzichtet werden. Aus den Abbildungen erkennt man, dass die räumlichen Strukturen der Temperaturverteilung in der Simulation erhalten bleiben.

#### Relative Luftfeuchte

Die räumliche Struktur der Jahresmittel der relativen Luftfeuchte zeigt für beide Untersuchungszeiträume (Abb. 10a und 10b) etwa die gleiche Struktur, allerdings auf unterschiedlichem Niveau. Im Mittel liegt das Niveau für den Zeitraum 2046/55 um 3% niedriger als für den Bezugszeitraum. Dabei ist die relative Feuchte in den Gebirgen und im Norden des Untersuchungsgebietes höher als in den restlichen Teilen des Elbeeinzugsgebietes. Die Differenzkarte (Abb. 10c) zeigt, dass sich besonders in den trockenen Bereichen die Tendenz zu einer Verstärkung dieses Zustandes im Szenarienzeitraum durch eine Abnahme der relativen Luftfeuchte weiter fortsetzt.

Die räumlichen Strukturen bleiben sowohl im Sommer (Abb. 11a und 11b) als auch im Winter (Abb. 12a und 12b) erhalten. Unterschiedlich sind die jeweiligen

Differenzen: Im Sommer (Abb. 11c) ist eine wesentlich stärkere Abnahme als im Winter (Abb. 12c) zu verzeichnen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Szenarienzeitraum ein Rückgang der relativen Feuchte im Untersuchungsgebiet zu verzeichnen ist, der im Sommer stärker als im Winter ausfällt.

#### Luftdruck

Die Luftdruckverteilung ist graphisch nicht dargestellt, da sie räumlich (bis auf die Gebirgsregionen) wenig strukturiert ist und im Szenarienzeitraum nur eine gleichmäßige Erhöhung von ca. 2 hPa aufweist.

#### Wasserdampfdruck

Die räumliche Struktur der Jahresmittelwerte des Wasserdampfdrucks (Abb. 13a und 13b) entspricht sowohl im Bezugs- als auch im Szenarienzeitraum den geographischen und orographischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes (im NW höhere Werte, in den Gebirgen niedrigere Werte). Wie aus Abb. 13c zu ersehen ist, nimmt der Wasserdampfdruck im gesamten Untersuchungsgebiet im Szenarienzeitraum leicht zu, im Sommer mehr als im Winter (hier nicht dargestellt).

#### Sonnenscheindauer

Die wenig gegliederte räumliche Struktur der Jahresmittelwerte der Sonnenscheindauer ist für beide Untersuchungszeiträume in den Abbildungen 14a und 14b dargestellt. Eine deutliche Zunahme der Sonnenscheindauer im Szenarienzeitraum ist für die Sommerperiode zu verzeichnen. Die Differenzkarte Abb. 15 weist Regionen mit einer Zunahme bis zu 1.5h/d aus. Im Winter sind die Änderungen vernachlässigbar gering.

#### Bedeckungsgrad

Ähnlich wie bei der Sonnenscheindauer ist der Bedeckungsgrad räumlich nur schwach gegliedert (Abb. 16a und 16b). Invers zur Sonnenscheindauer nimmt der Bedeckungsgrad im Szenarienzeitraum im Jahresmittel ab, im Sommer (Abb. 17) deutlich stärker als im Winter (Abb. 18), wobei hier sogar einige Regionen eine leichte Zunahme verzeichnen.

#### Globalstrahlung

Bei der Globalstrahlung ist der Szenarienzeitraum (Abb. 19b) räumlich deutlich stärker differenziert als der Bezugszeitraum (Abb. 19a). Wie aus den Differenzkarten (Abb. 20 und Abb. 21) zu ersehen ist, nimmt die Globalstrahlung insgesamt zu, wobei der Trend im Sommer wesentlich stärker ausgeprägt ist als im Winter.

#### Windgeschwindigkeit

Da es hinsichtlich der Messung der Windgeschwindigkeit keine einheitliche Vorschrift gibt (z.B. unterschiedliche Höhen des Messgerätes) können die räumlichen

Strukturen nicht als repräsentativ angesehen werden. Daher können nur die Differenzkarten zur Interpretation von Windgeschwindigkeitsänderungen herangezogen werden. Aus Abbildung 22 erkennt man, dass im Sommer die Windgeschwindigkeit fast im gesamten Untersuchungsgebiet abnimmt. Im Winter dagegen (Abb. 23) ist eine deutliche Zunahme zu verzeichnen.

### *Zusammenfassung*

Das gewählte globale Szenarium von 1.4 K Temperaturanstieg bis 2055 stellt für das Elbeinzugsgebiet ein im Sinne der IPCC-Definition moderates Szenarium dar. Die Auswertung der wahrscheinlichsten Realisierung zeigt, dass das Untersuchungsgebiet außer in den Kammlagen der Gebirge insgesamt trockener wird, der Niederschlagsrückgang im Winter moderater ausfällt als im Sommer und sich die Strahlungsbedingungen im Sommer deutlich verändern (längere Sonnenscheindauer bei geringerer Bewölkung und damit erhöhter Globalstrahlung). Die Winter sind charakterisiert durch einen Anstieg der mittleren Windgeschwindigkeit, was auf eine verstärkte Westwindzirkulation zurückzuführen ist. Alle beschriebenen Entwicklungstendenzen sind in ihrem Ursprung schon im Basisszenarium zu beobachten.

## **2 Vergleich des Standes der Forschung mit der ursprünglichen Planung**

### **2.1 Literaturrecherche**

#### *Geplant:*

Zusammenstellung projektrelevanter Literatur.

#### *Erreicht:*

Es wurden regelmäßig Recherchen in den aktuellen Publikationen durchgeführt und ausgewertet.

### **2.2 Datenaufbereitung**

#### *Geplant:*

Bereitstellung der notwendigen meteorologischen Beobachtungsdaten durch den PIK-Kooperationspartner Deutscher Wetterdienst, Homogenitätsprüfung und Datenergänzung.

#### *Erreicht:*

Aufstellen eines homogenen, vollständigen Basisdatensatzes.

#### *Zusätzlich:*

Recherche zur Stationsgeschichte der verwendeten Beobachtungsstationen und Einbeziehung der gewonnenen Erkenntnisse in die Homogenisierung der Datenreihen.

## **2.3 Szenarientwicklung**

### *Geplant:*

- Erweiterung des Szenarienmodells
- Erstellen eines Basisszenariums
- Erstellen eines Zukunftsszenariums mit 100 Realisierungen
- Klimatologische Auswertung der Ergebnisse

### *Erreicht:*

- Das Ausgangsmodell wurde zur Erzeugung beliebig vieler Realisierungen um einen Monte-Carlo-Algorithmus erweitert.
- Aufbau eines Algorithmus zur Auswahl der wahrscheinlichsten Realisierung.
- Bereitstellung des Basisszenariums unter Verwendung von 369 Stationen für den Zeitraum 1951-2000.
- Bereitstellen von 100 Realisierungen eines transienten Zukunftsszenariums unter Verwendung des IPCC-Szenariums A1 für alle Stationen des Elbe-Einzugsgebiets und den Zeitraum 2001-2055.
- Zusammenfassung der Ergebnisse zu einer einheitlichen klimatologischen Betrachtung der Entwicklung im Untersuchungsgebiet.

### *Zusätzlich:*

- Erarbeitung eines Gutachtens zur klimatischen Entwicklung im Westfläming unter Verwendung der erstellten Szenarien (Auszug aus dem Gutachten s. Anlage 9.1).
- Bereitstellung von Daten für eine Promotionsarbeit zur Hydrologie der Flusseinzugsgebiete von Weida und Wipper (Harz).
- Erarbeitung einer Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg (Auszug s. Anlage 9.2).

## **3 Ergebnisse Dritter, die für das Vorhaben von Bedeutung sind**

Für das Vorhaben waren Ergebnisse Dritter nicht relevant.

## **4 Angaben zu Erfindungen und Schutzrechten**

Erfindungen wurden nicht gemacht und Schutzrechte nicht in Anspruch genommen.

## **5 Sonstiges**

### **5.1 Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen**

#### *Geplant:*

Enge Zusammenarbeit mit den Arbeitsgruppen innerhalb des Projektes, für die die Klimaszenarien Grundlage ihrer Forschungsarbeiten sind.

*Erreicht:*

- Enge interne Abstimmung mit den beiden anderen Arbeitsgruppen des Fachbereichs Klimatologie
- Fachgespräche zur Struktur der zu berechnenden Klimaszenarien mit den Arbeitsgruppen des Fachbereichs Hydrologie
- Vorabbereitstellung von Testszenarien zur Weiterentwicklung der hydrologischen Modelle
- Vorfristige Bereitstellung von Basisszenarium und 100 Realisierungen des Zukunftsszenariums für das Elbe-Einzugsgebiet (u.a. auf CD)
- Teilnahme an Workshops der anderen Fachbereiche

## **5.2 Relevanz für die praktische Anwendung**

Die erstellten Klimaszenarien liefern die Datengrundlage zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen durch die beteiligten Fachgebiete. Damit ist es möglich, im Rahmen eines integrierten Ansatzes alle notwendigen Informationen zur Erstellung einer realistischen Planungsgrundlage bereitzustellen. Mit der Erarbeitung neuer statistischer Verfahren wurde zum Teil wissenschaftliches Neuland betreten. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind auch für andere Forschungsbereiche von Relevanz und werden bereits praktisch umgesetzt. Außerdem wurde das gesamte Forschungskonzept so umgesetzt, dass eine Nutzung der Verfahren und Modelle auch in anderen Regionen ohne umfassende Neuentwicklungen möglich ist.

## **5.3 Übersicht über den Mitteleinsatz**

Die geplanten Mittel wurden entsprechend den Vorgaben eingesetzt. Eine detaillierte Aufstellung des Mitteleinsatzes liegt in der Verwaltung des PIK zur Einsicht vor.

## **5.4 Danksagung**

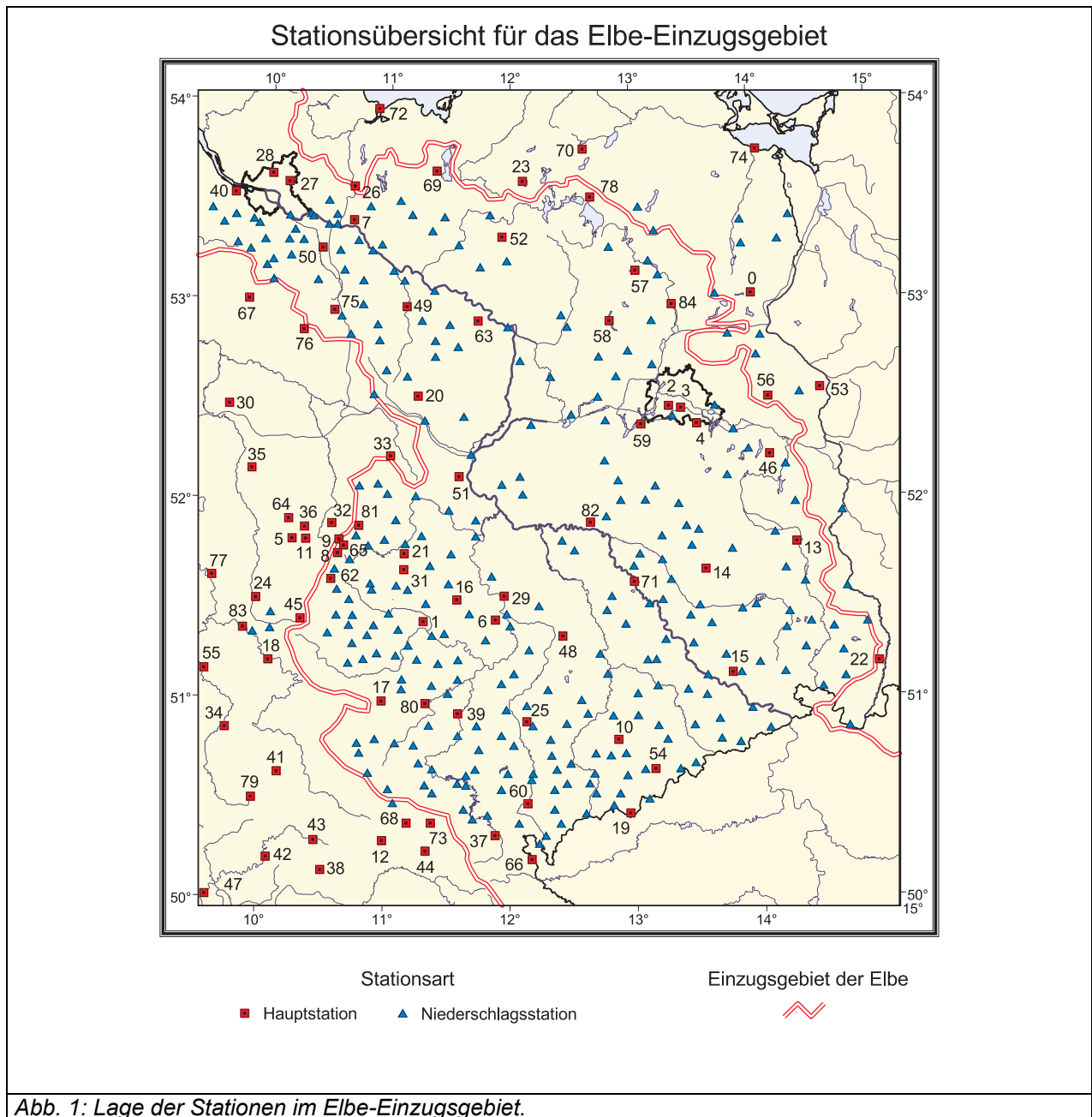
Die Projektbearbeiter danken dem Deutschen Wetterdienst und dem Max-Planck-Institut für Meteorologie sowie dem Deutschen Klimarechenzentrum für die Bereitstellung der für das Projekt benötigten Daten.

## **6 Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick**

Folgende wichtige Ergebnisse wurden erzielt:

- Aufbau eines klimatologischen Datensatzes für das Elbe-Einzugsgebiet
- Weiterentwicklung eines Klimaszenarienmodells auf statistischer Basis unter Einbeziehung von großräumigen Informationen zu Klimaänderungen und regionalen Beobachtungsdaten
- Bereitstellung eines Klimaszenariums mit 100 Realisierungen für den Zeitraum 2001-2055 unter Annahme des IPCC A1-Szenariums
- Erstellung einer beschreibenden Klimatologie für den Ist-Zustand (1951-2000) und die wahrscheinlichste zukünftige Entwicklung zwischen 2001 und 2055

## 7 Abbildungen



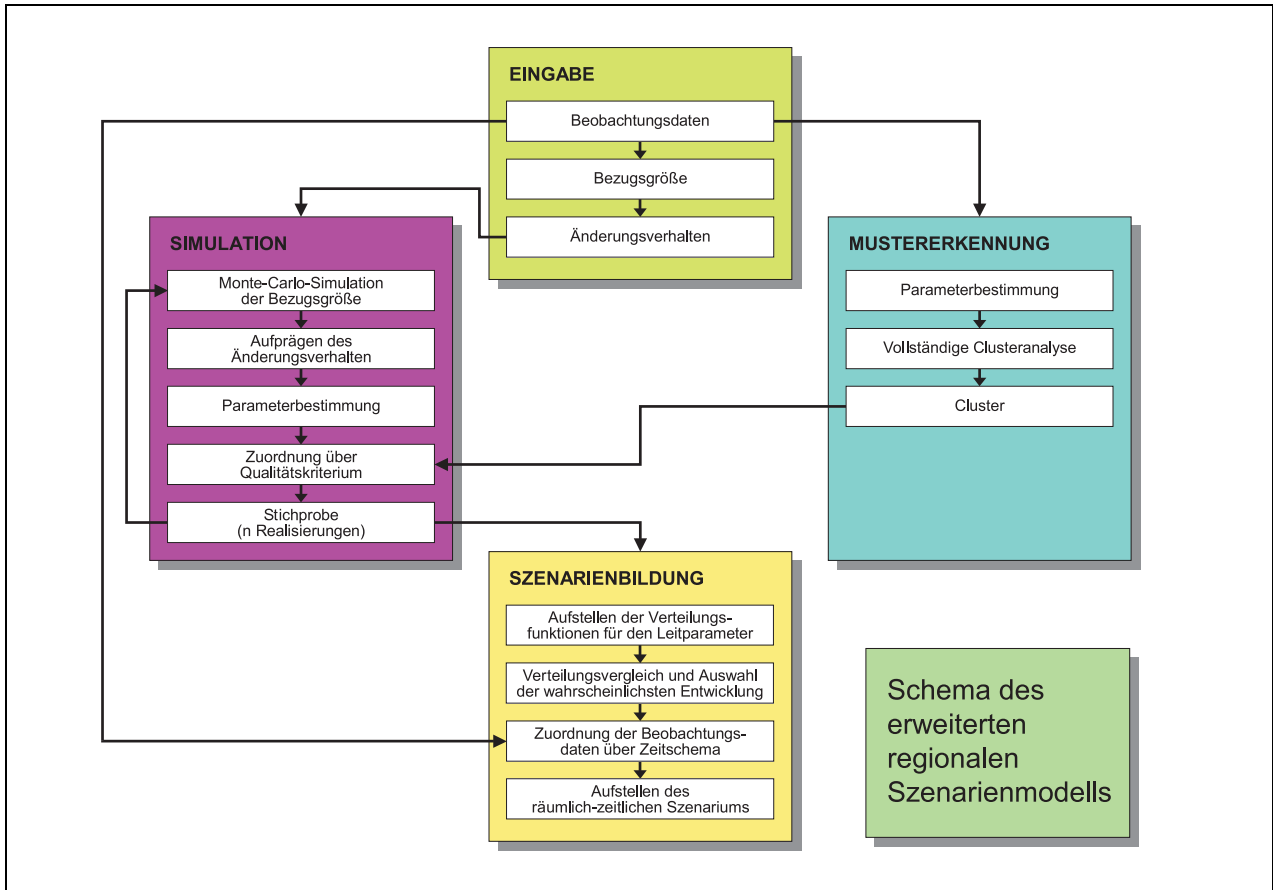


Abb. 2: Modellschema.

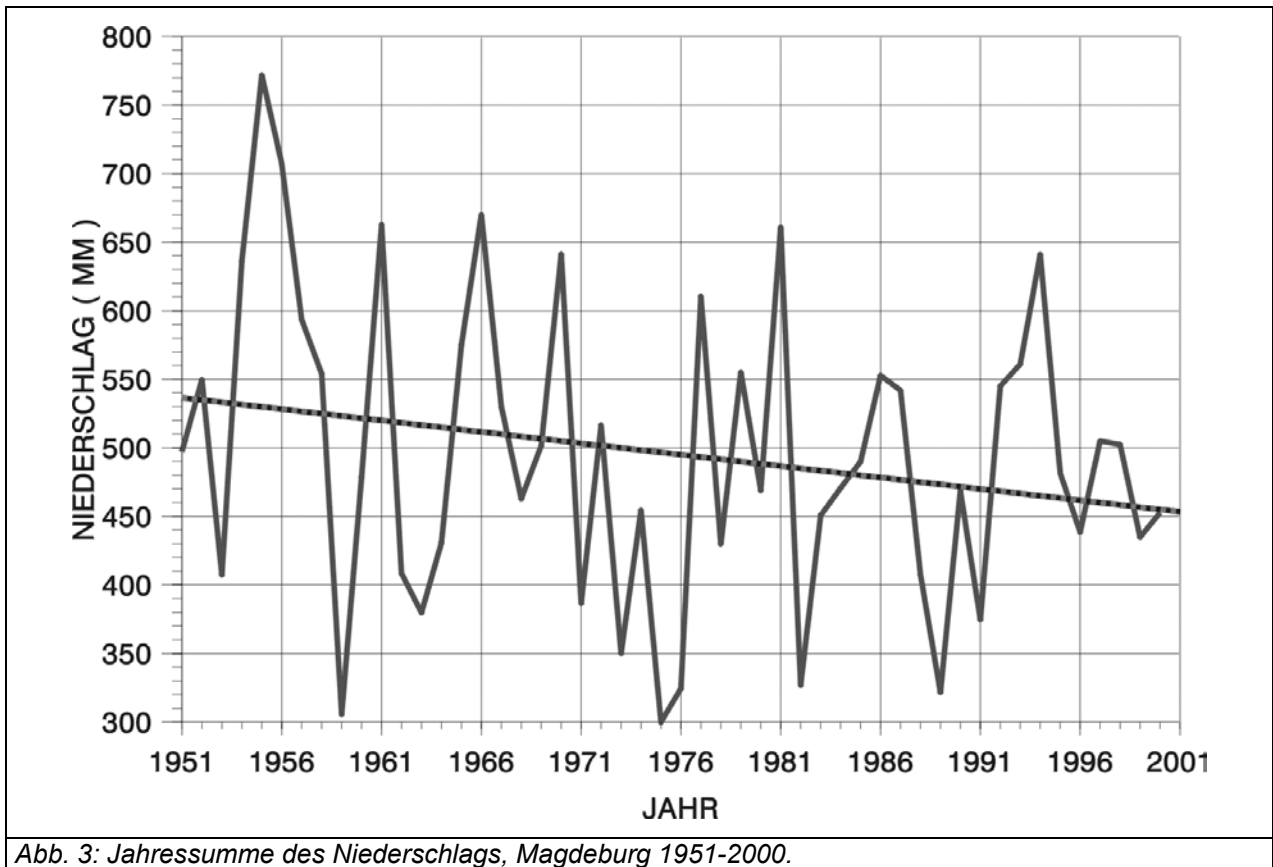


Abb. 3: Jahressumme des Niederschlags, Magdeburg 1951-2000.



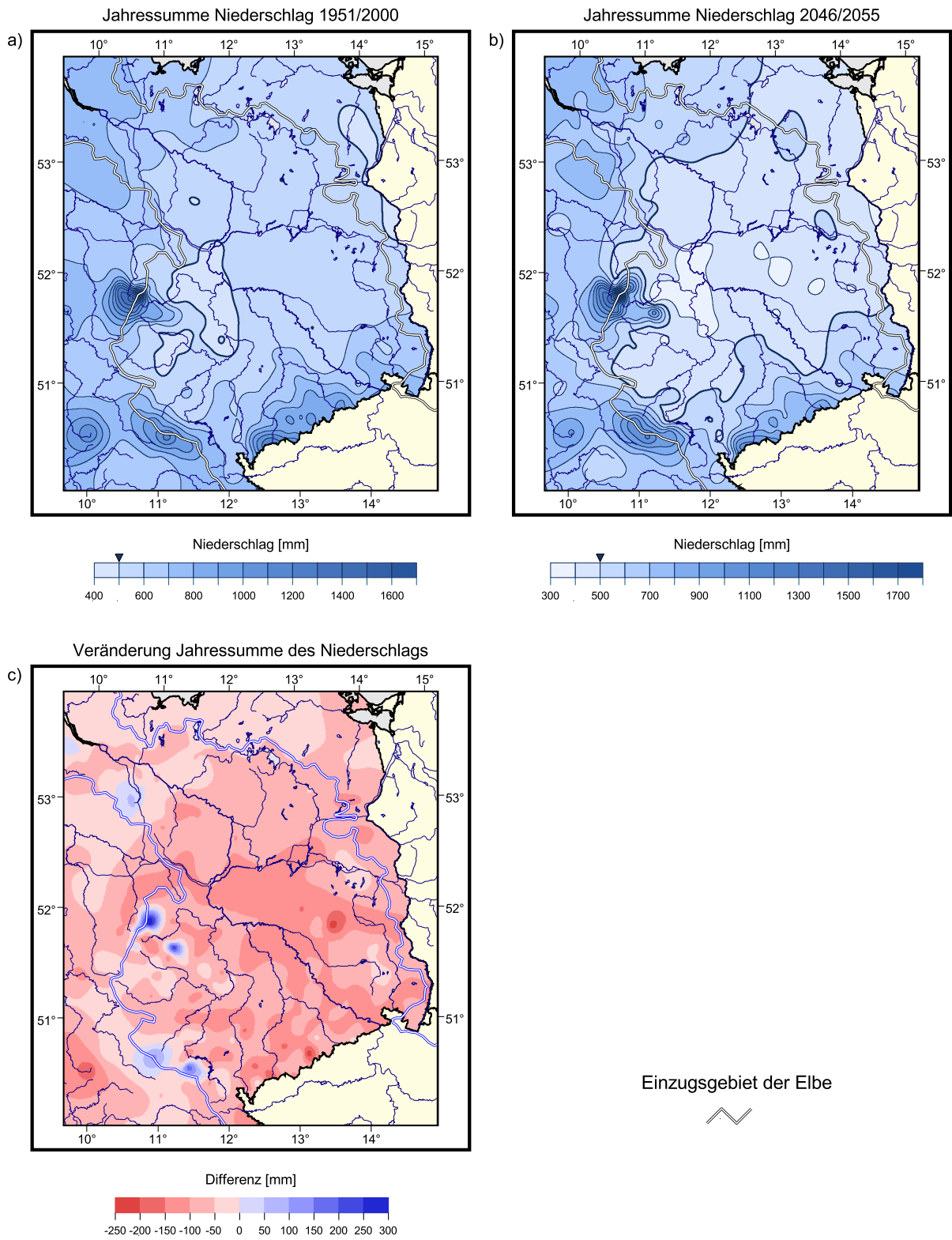


Abb. 4: Räumliche Verteilung der Jahressumme des Niederschlags  
 a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055,  
 c) Differenz transientes – Basisszenarium.

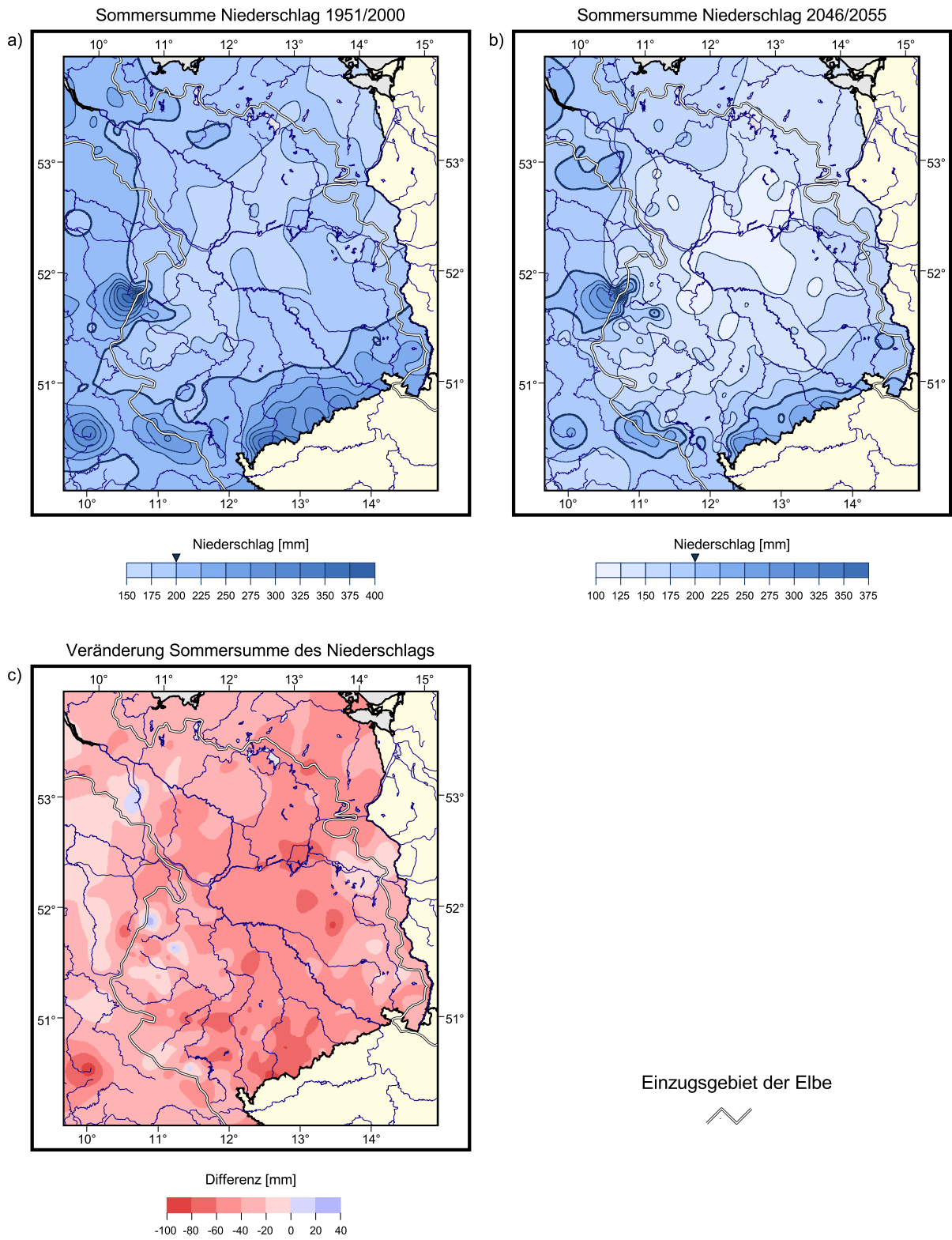


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Sommersumme des Niederschlags  
 a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055,  
 c) Differenz transientes – Basisszenarium.

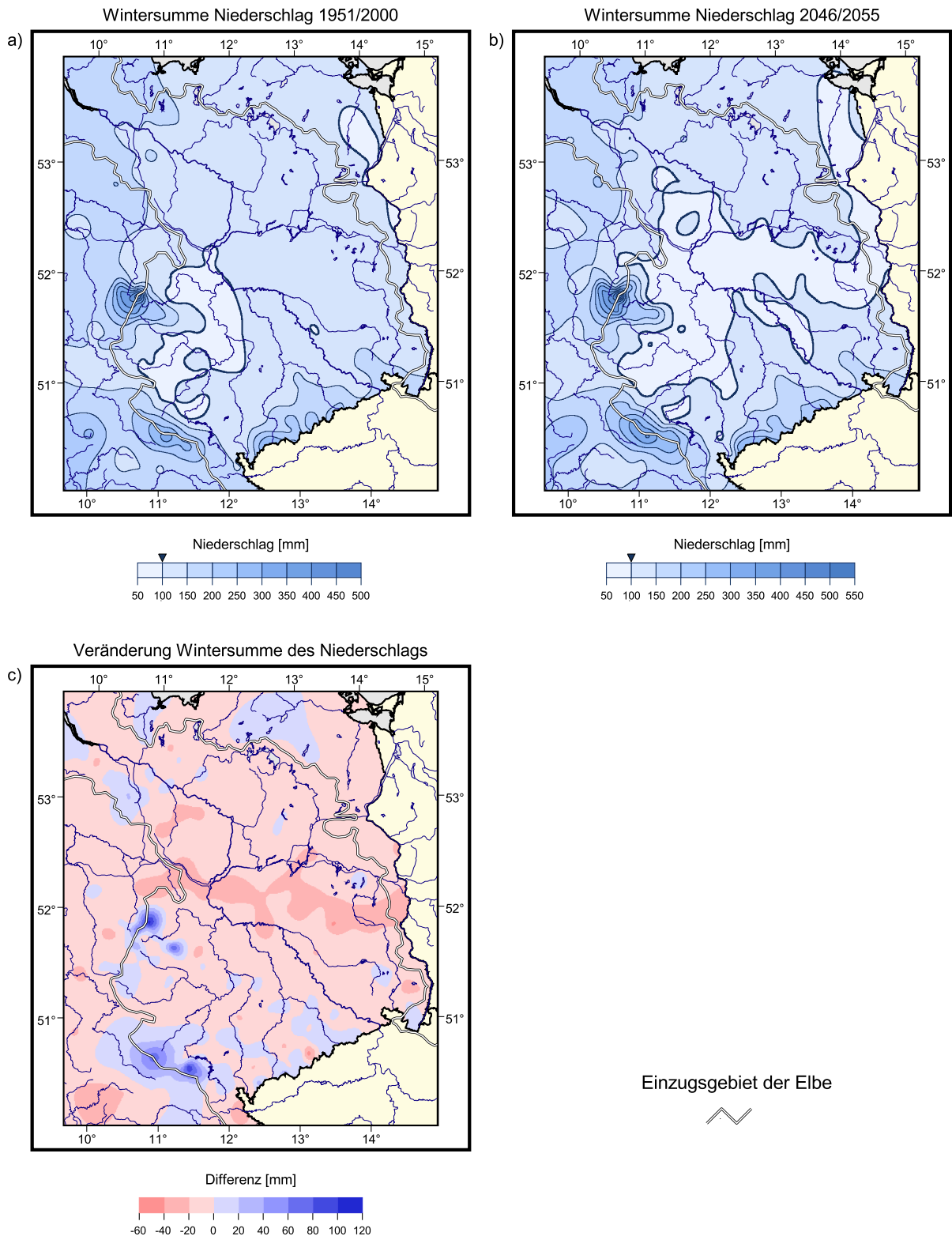
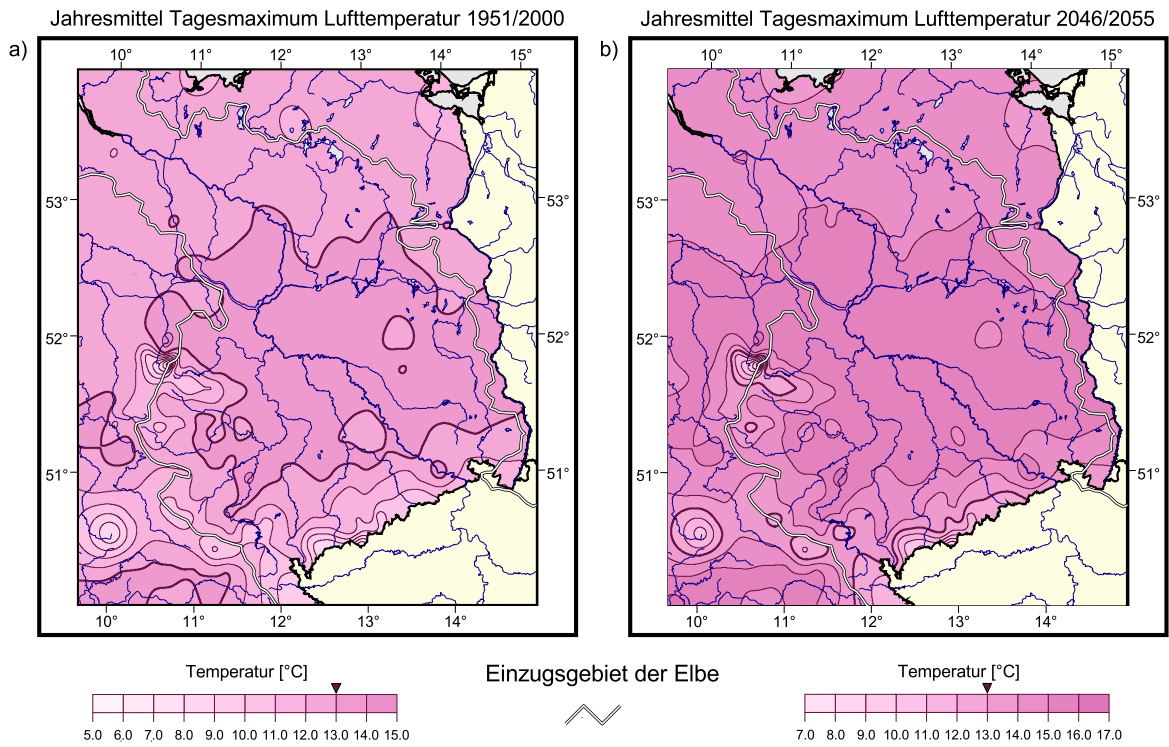
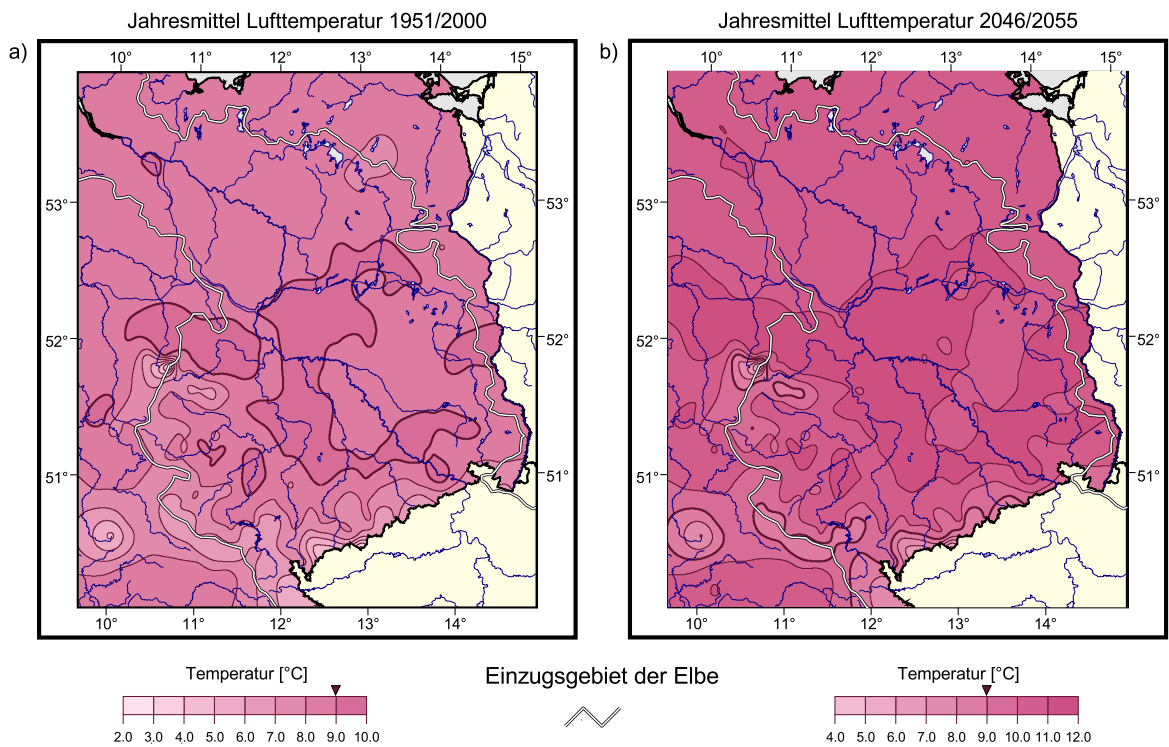


Abb. 6: Räumliche Verteilung der Wintersumme des Niederschlags  
 a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055,  
 c) Differenz transientes – Basisszenarium.



**Abb. 7: Räumliche Verteilung des Jahresmittels des Tagesmaximums der Lufttemperatur**  
a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055.



**Abb. 8: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der Lufttemperatur**  
a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055.

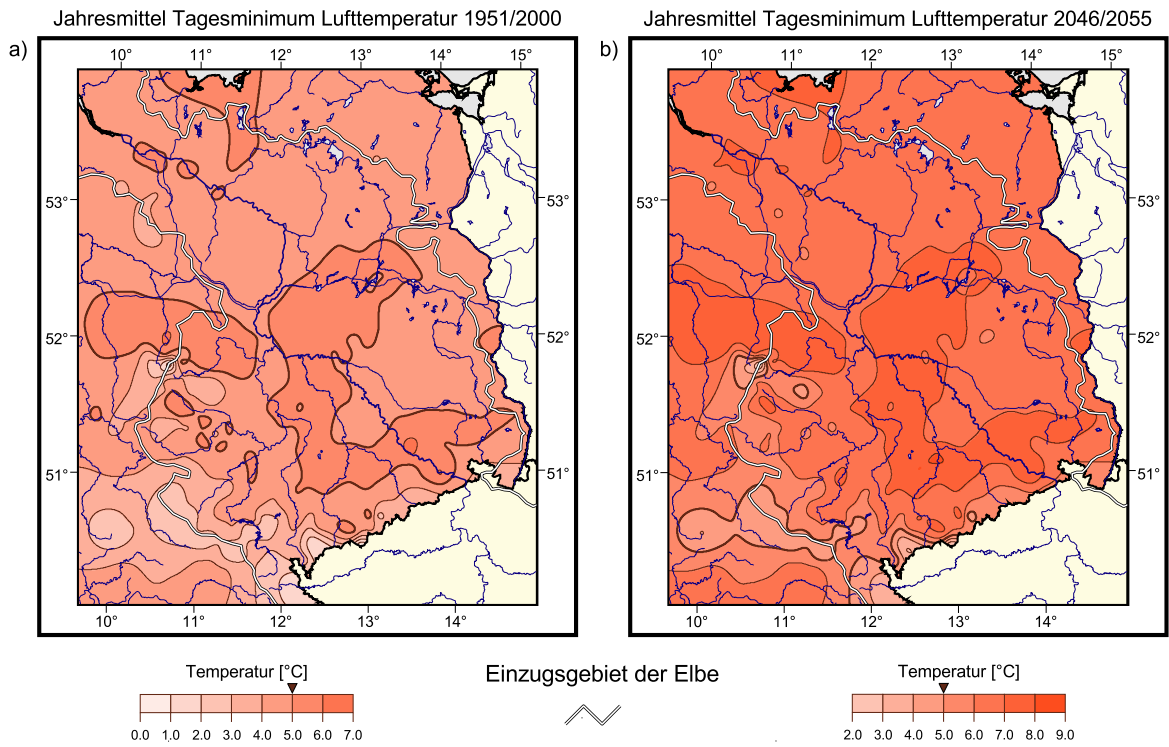


Abb. 9: Räumliche Verteilung des Jahresmittels des Tagesminimums der Lufttemperatur  
a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055.

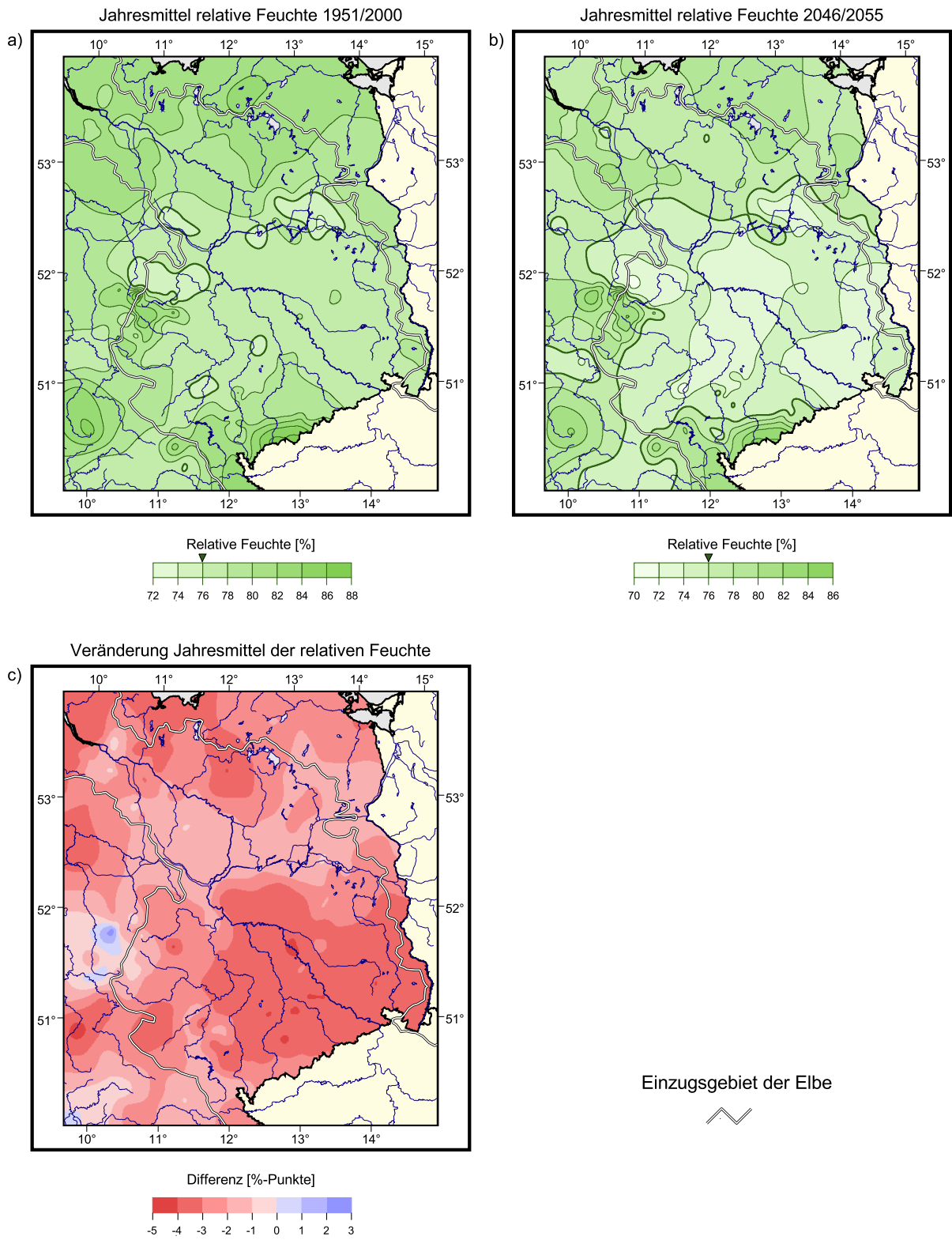


Abb. 10: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der relativen Luftfeuchte  
 a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055,  
 c) Differenz transientes – Basisszenarium.

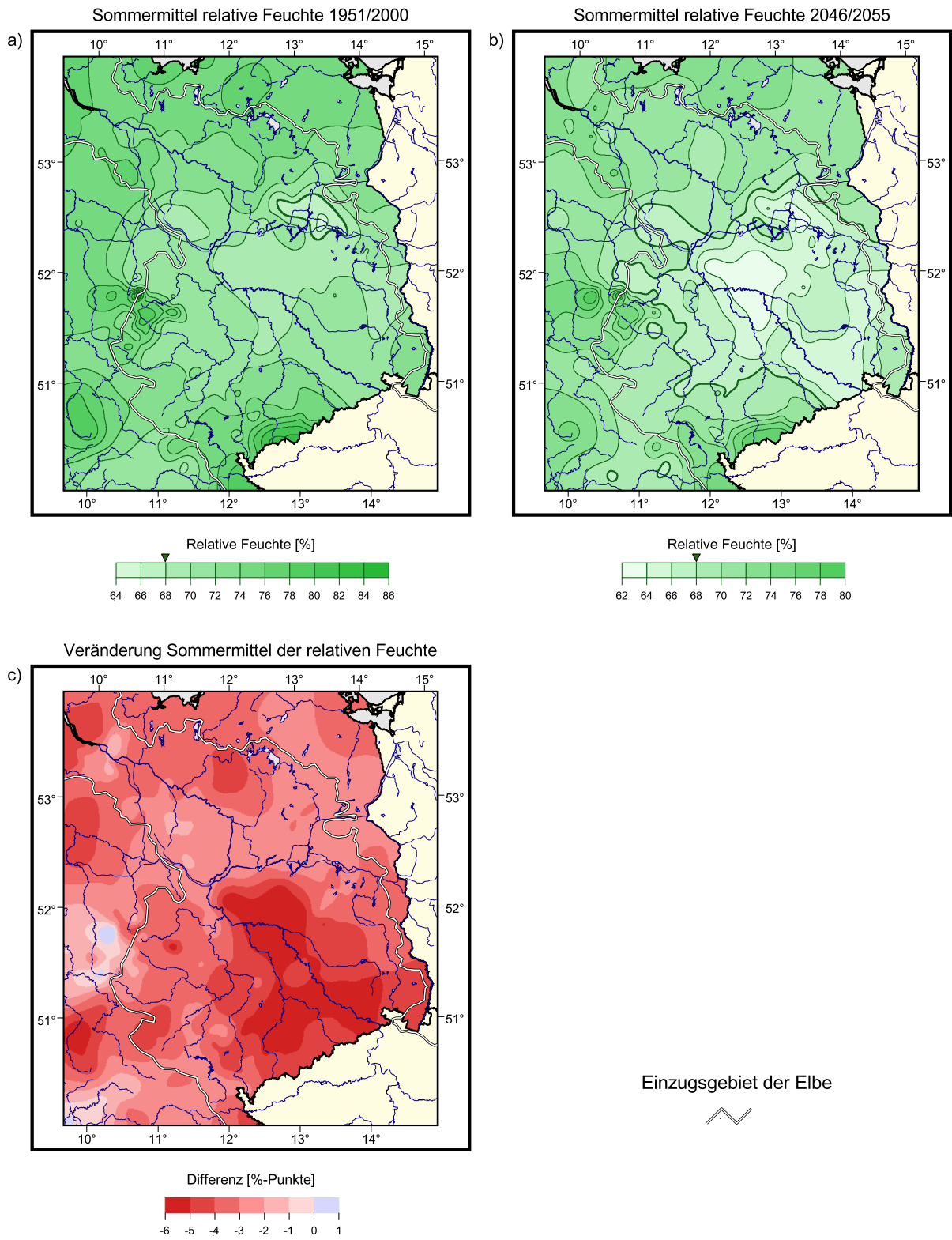


Abb. 11: Räumliche Verteilung des Sommermittels der relativen Luftfeuchte  
 a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055,  
 c) Differenz transientes – Basisszenarium.

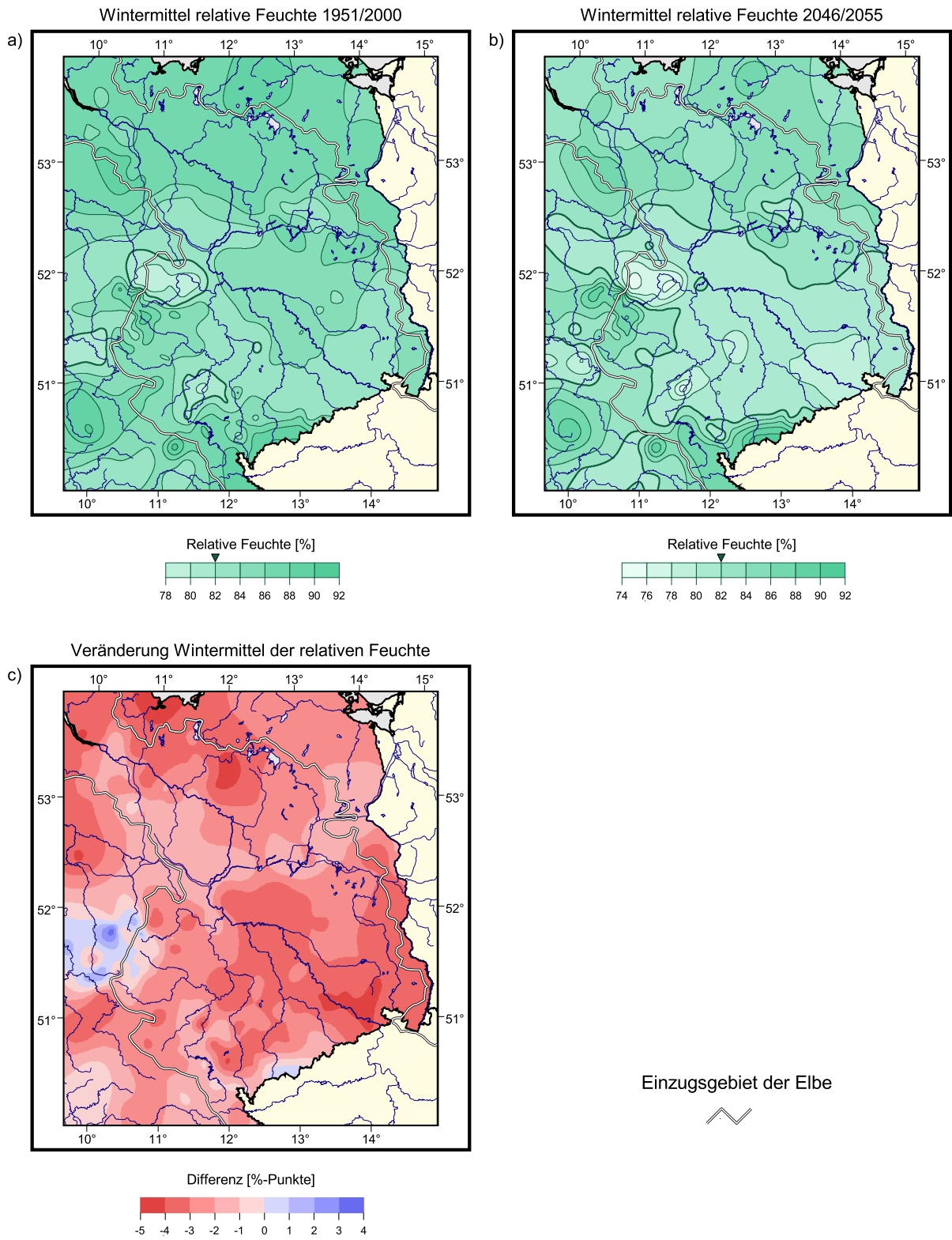


Abb. 12: Räumliche Verteilung des Wintermittels der relativen Luftfeuchte  
 a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055,  
 c) Differenz transientes – Basisszenarium.



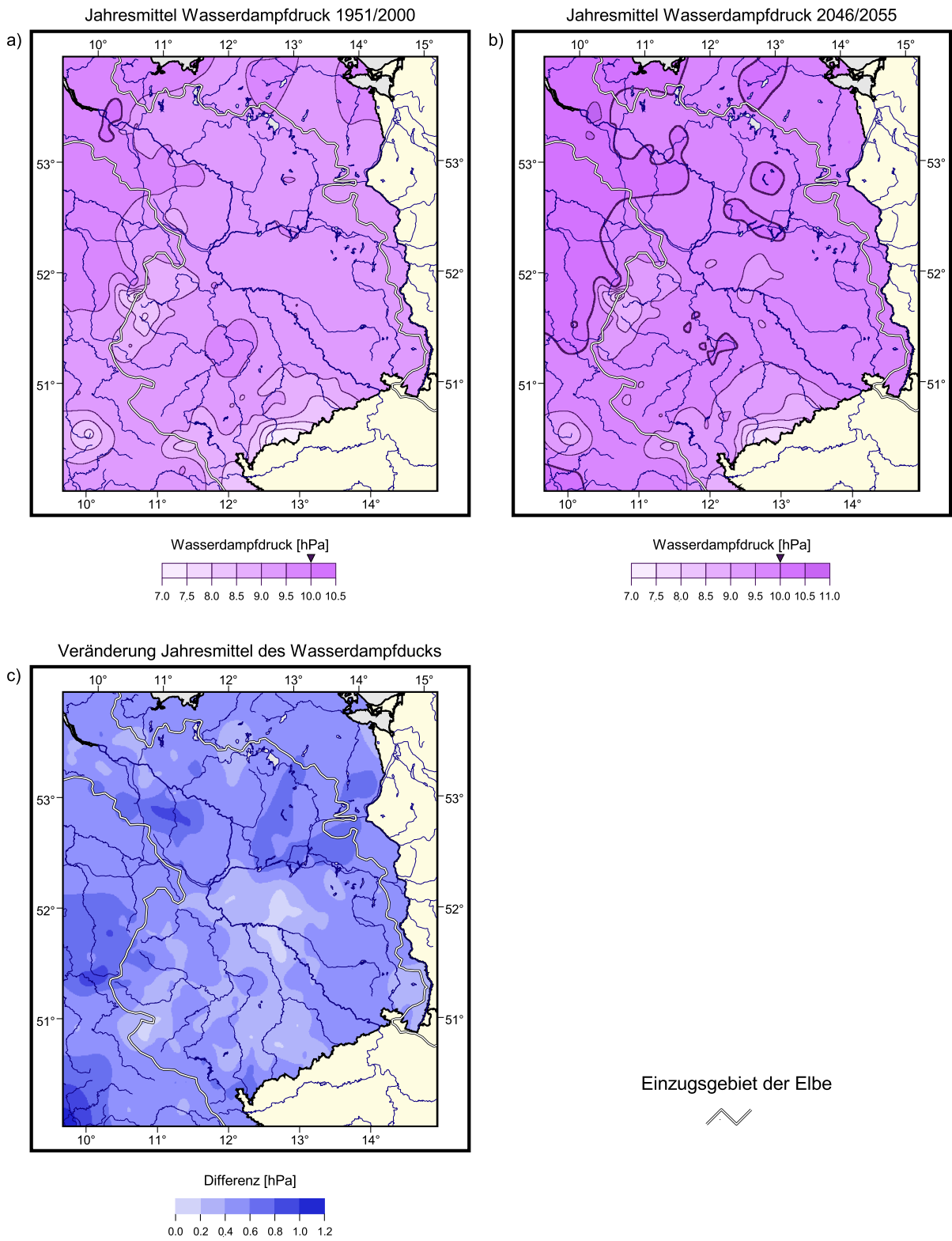


Abb. 13: Räumliche Verteilung des Jahresmittels des Wasserdampfdrucks  
 a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055,  
 c) Differenz transientes – Basisszenarium.

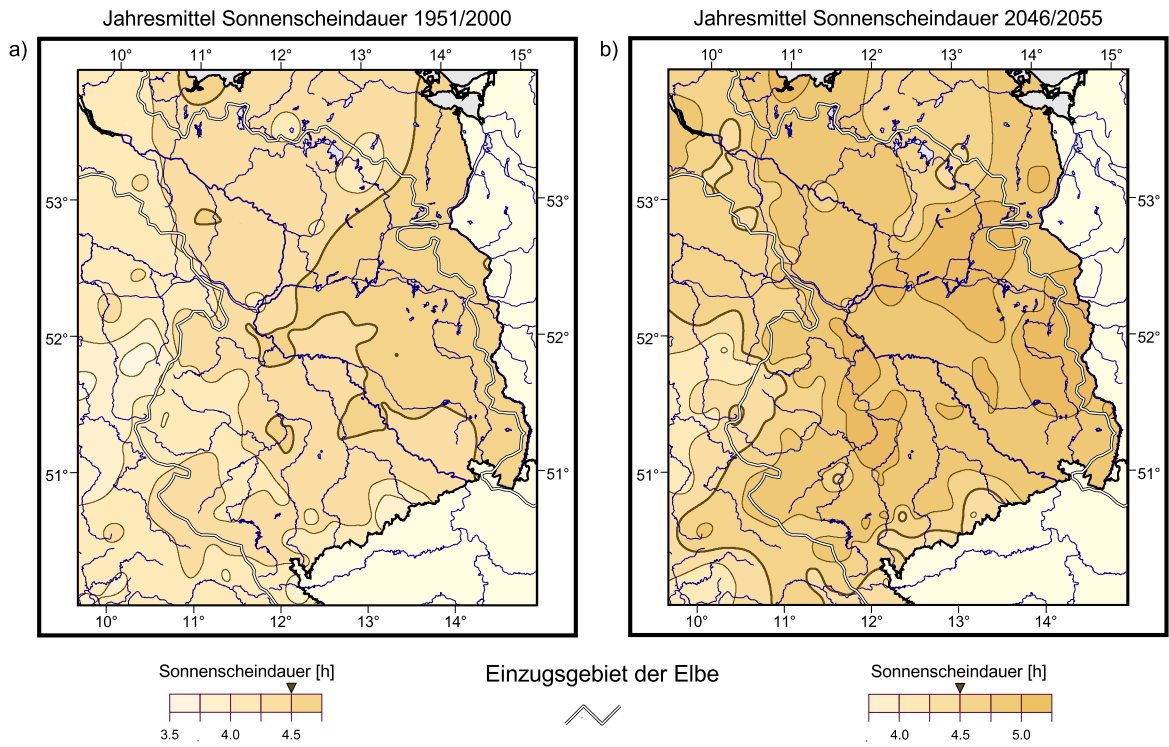


Abb. 14: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der Sonnenscheindauer  
a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055.

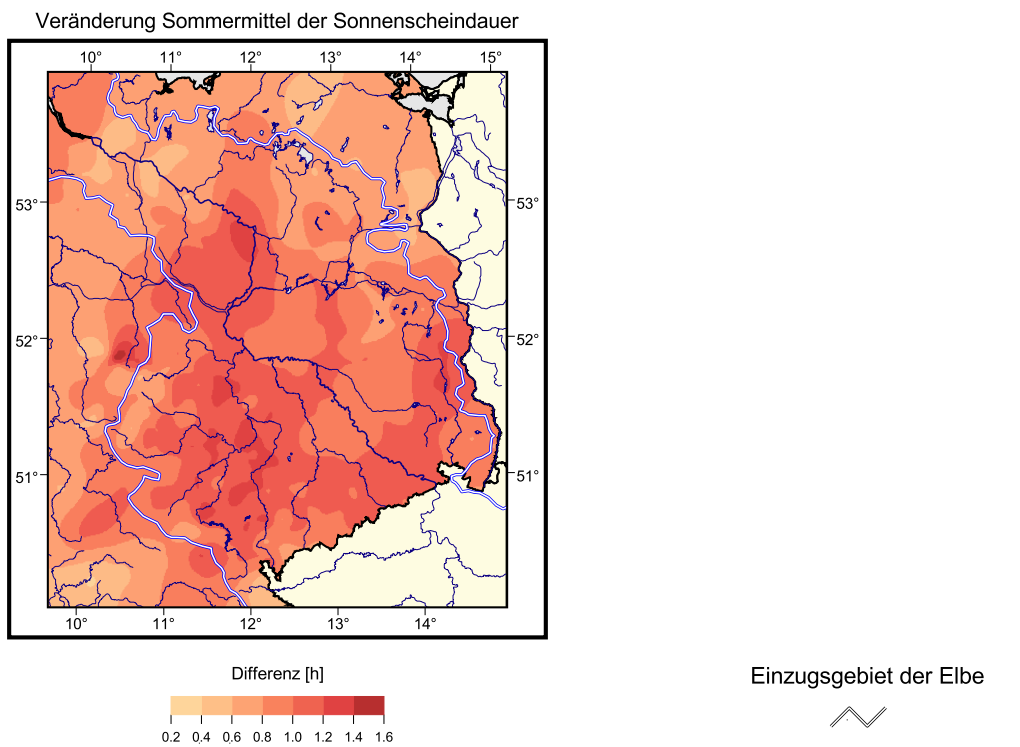


Abb. 15: Räumliche Verteilung der Differenzen des Sommermittels der Sonnenscheindauer  
Transientes Szenarium 2046/55 – Basisszenarium 1951/2000.

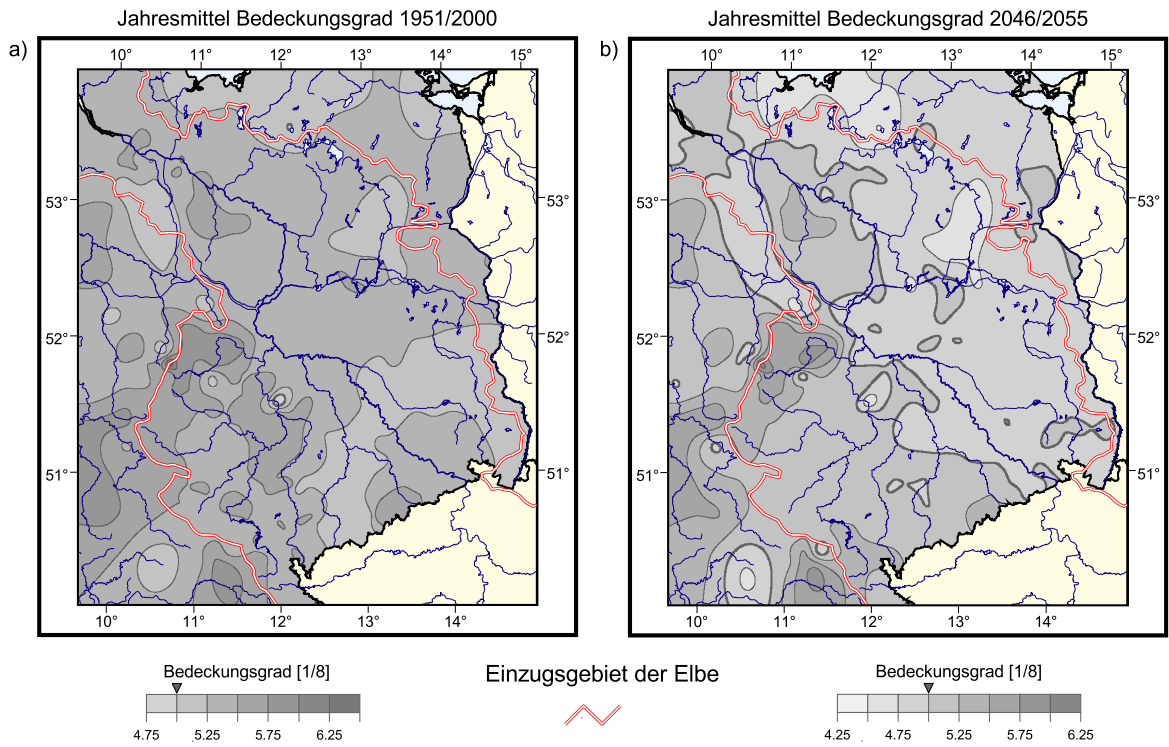


Abb. 16: Räumliche Verteilung des Jahresmittels des Bedeckungsgrades  
a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055.

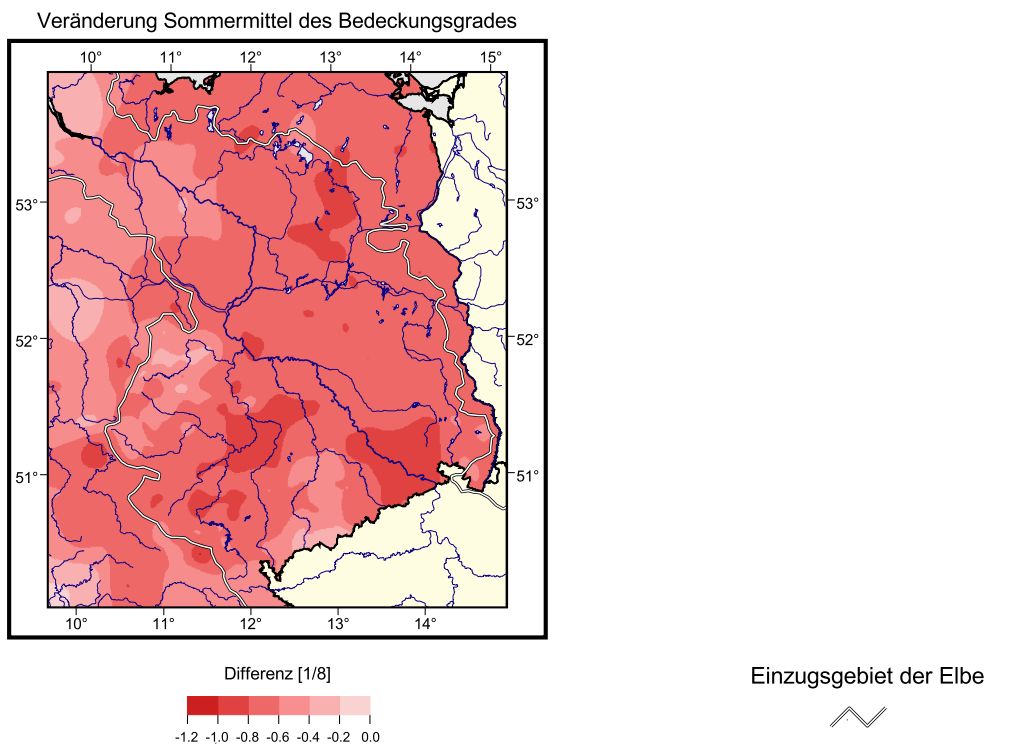
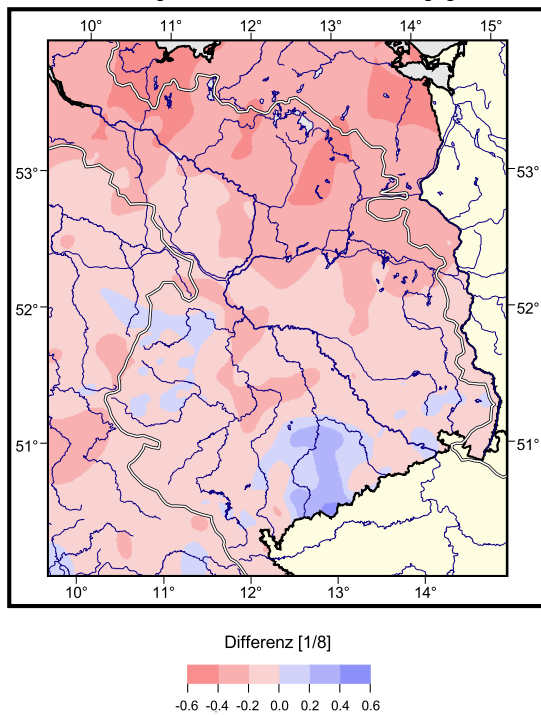


Abb. 17: Räumliche Verteilung der Differenzen des Sommermittels des Bedeckungsgrades  
Transientes Szenarium 2046/55 – Basisszenarium 1951/2000.

Veränderung Wintermittel des Bedeckungsgrades

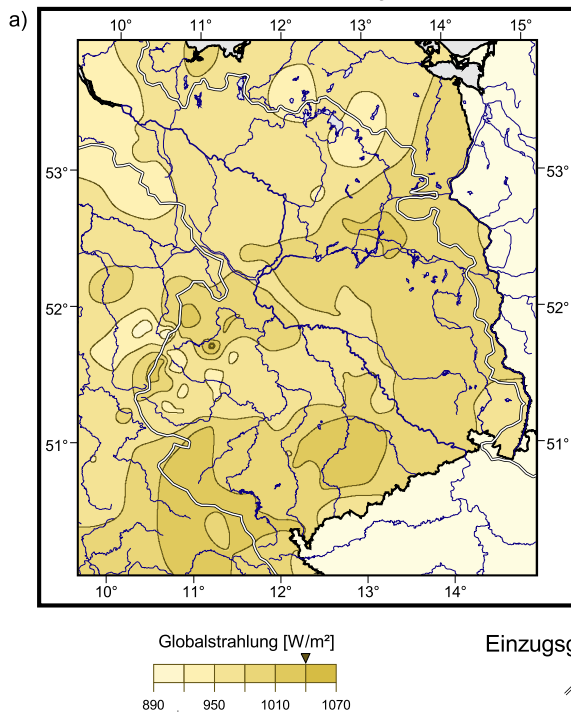


Einzugsgebiet der Elbe



Abb. 18: Räumliche Verteilung der Differenzen des Wintermittels des Bedeckungsgrades Transientes Szenarium 2046/55 – Basisszenarium 1951/2000.

Jahresmittel Globalstrahlung 1951/2000



Jahresmittel Globalstrahlung 2046/2055

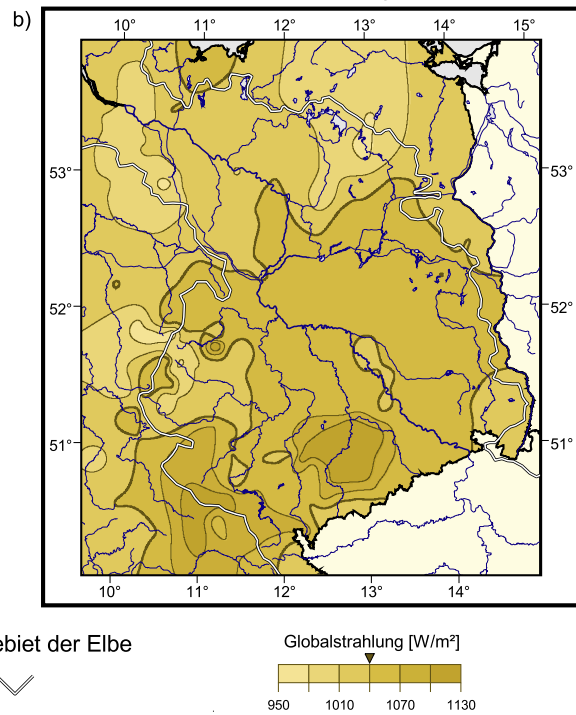
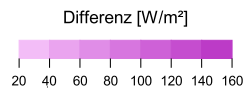
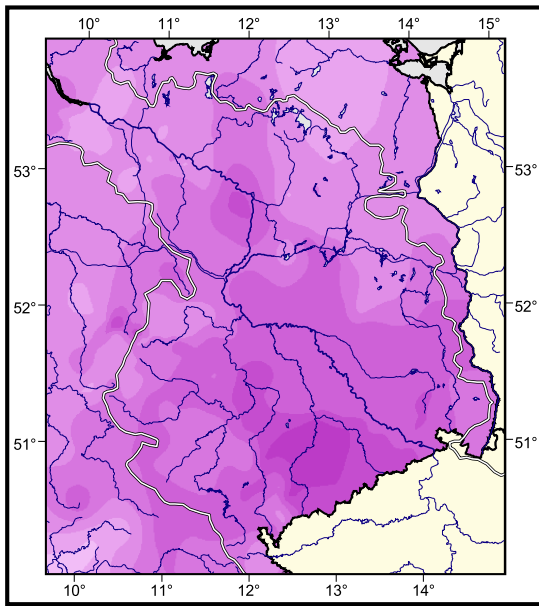


Abb. 19: Räumliche Verteilung des Jahresmittels der Globalstrahlung  
a) Basisszenarium 1951/2000, b) Transientes Szenarium 2046/2055.

Veränderung Sommermittel der Globalstrahlung

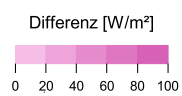
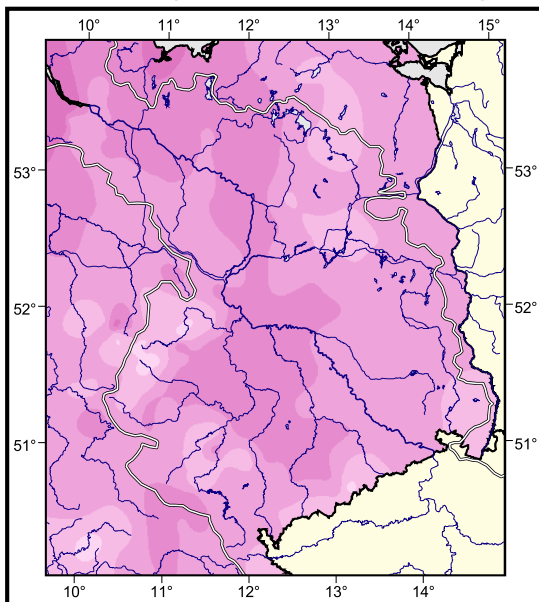


Einzugsgebiet der Elbe



Abb. 20: Räumliche Verteilung der Differenzen des Sommermittels der Globalstrahlung  
Transientes Szenarium 2046/55 – Basisszenarium 1951/2000.

Veränderung Wintermittel der Globalstrahlung

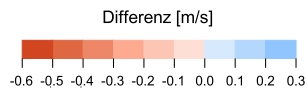
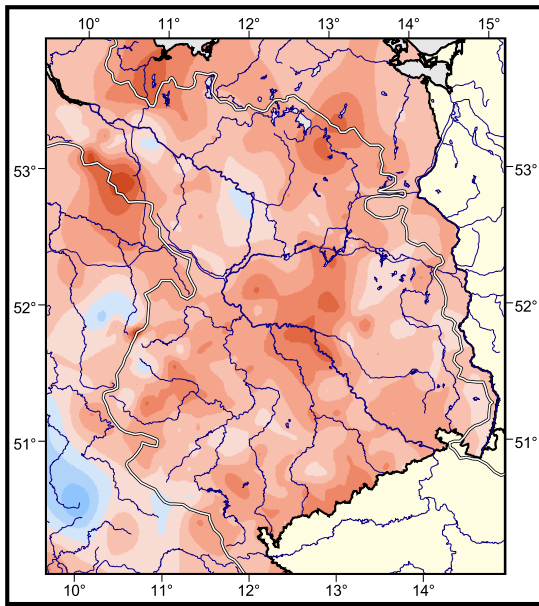


Einzugsgebiet der Elbe



Abb. 21: Räumliche Verteilung der Differenzen des Wintermittels der Globalstrahlung  
Transientes Szenarium 2046/55 – Basisszenarium 1951/2000.

Veränderung Sommermittel der Windgeschwindigkeit

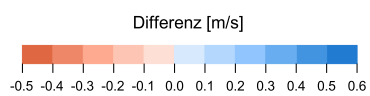
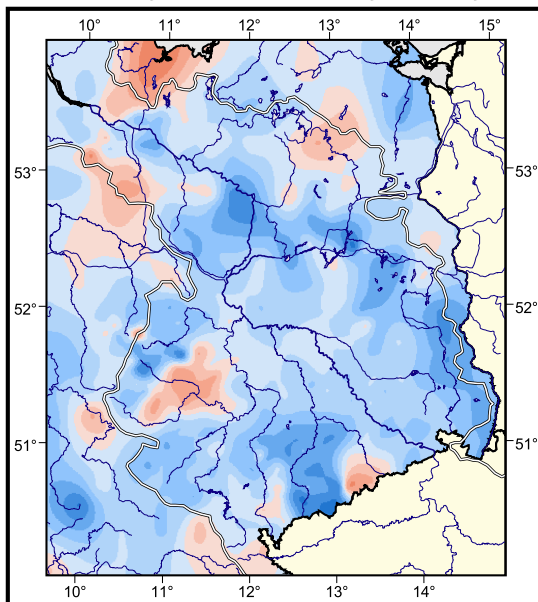


Einzugsgebiet der Elbe



Abb. 22: Räumliche Verteilung der Differenzen des Sommermittels der Windgeschwindigkeit Transientes Szenarium 2046/55 – Basisszenarium 1951/2000.

Veränderung Wintermittel der Windgeschwindigkeit



Einzugsgebiet der Elbe



Abb. 23: Räumliche Verteilung der Differenzen des Wintermittels der Windgeschwindigkeit Transientes Szenarium 2046/55 – Basisszenarium 1951/2000.

## 8 Literatur

- Gerstengarbe, F.-W., Löser, B., (1985): "Untersuchungen zur Homogenität von Datenreihen". F/E-Bericht des Meteor. Dienstes der DDR, Potsdam
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., (1997): "A method to estimate the statistical confidence of cluster separation". *Theor. Appl. Climatol.*, 57, p. 103-110
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., Fraedrich, K. (1999): "Applying non-hierarchical cluster analysis algorithms to climate classification: some problems and their solution". *Theor. Appl. Climatol.*, 64, 3-4, p.143-150
- IPCC (2001): "Climate change 2000, Summary for policy makers". Cambridge University Press, Cambridge UK
- Lorenz, E.N., (1963): "Deterministic nonperiodic flow". *J. Atm. Sciences*, 20 (130), p. 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, Hamburg
- Weber, E., (1980): "Grundriß der biologischen Statistik", VEB Gustav Fischer Verlag, Jena
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., (1997): "Proposal for the development of climate scenarios". *Climate Research*, 8, 3, 171-182
- 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, Hamburg

## **9 Anlagen**



## **9.1 Gutachten**

"Langfristige Nutzung des Wasserdargebots im Westfläming"

Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., Dresden, 2002

Kapitel 2.4 Klima, Erarbeitet durch Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W.,  
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

## 2.4 Klima

### 2.4.1 Epignostische Klimaentwicklung

Zur Beschreibung der Klimaentwicklung im *Westfläming* für den Zeitraum 1951-2000 standen 2 meteorologische Hauptstationen sowie 11 Niederschlagsstationen zur Verfügung. Sie sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Stationsname	Breite (°N)	Länge (°E)	Höhe über NN (m)
Magdeburg	52.12	11.58	79
Wittenberg	51.89	12.65	105
Bernburg/S.	51.82	11.72	84
Brumby	51.90	11.72	70
Danna-Eckmannsdorf	52.00	12.90	113
Ladeburg	52.08	11.93	88
Lindau	52.03	12.10	75
Loburg	52.12	12.08	76
Mehringen	51.73	11.52	110
Oranienbaum	51.80	12.42	63
Radis	51.75	12.52	97
Wolmirsleben	51.95	11.50	70
Zahna	51.92	12.78	94

Tabelle 1 Stationsliste

Folgende meteorologische Größen wurden auf Tageswertbasis eingesetzt:

Temperatur °C (Minimum, Mittel, Maximum)

Niederschlag mm

Relative Luftfeuchte %

Luftdruck hPa

Dampfdruck hPa

Sonnenscheindauer h

Bedeckungsgrad 1/8

Globalstrahlung J/cm<sup>2</sup>

Windgeschwindigkeit m/s

Dabei handelt es sich bei den Daten der Niederschlagsstationen um interpolierte Werte (außer Niederschlag).

Anhand der für das Untersuchungsgebiet repräsentativen Station Magdeburg soll die Klimaentwicklung des Untersuchungszeitraums kurz erläutert werden. Sämtliche Daten für alle Untersuchungsstationen sind in Form von Klimatabellen auf einer Diskette beigefügt. Die zeitliche Entwicklung wurde anhand eines linearen Trends abgeschätzt. Die statistische Sicherheit der Trends wurde mit Hilfe des Spearmanschen Rangtests berechnet.

#### *Temperatur*

In Abbildung 1 ist die zeitliche Entwicklung der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur dargestellt. Man erkennt in allen drei Parametern einen deutlichen positiven Trend der mit 99% statistisch gesichert ist (Maximum: + 1.3 K, Mittel: + 1.0 K, Minimum: + 1.1 K). Die unterschiedliche Trendentwicklung in den einzelnen Monaten ist den

beigefügten Klimatabellen zu entnehmen. Es kann aber festgestellt werden, dass die Trends im Winter stärker ausgeprägt sind als in den Sommermonaten.

### *Niederschlag*

Die Jahressummen des Niederschlags nehmen zwischen 1951 und 2000 um 81.6 mm ab (Abb. 2). Dieser Trend ist mit 90% gesichert. Dabei wird dieser Trend im wesentlichen durch den Rückgang des Niederschlags im Sommer verursacht (Abb. 3). Im Winter ist kein Trend vorhanden. Diese Entwicklung ist an allen untersuchten Stationen zu beobachten, wobei der Winterniederschlag in einigen Fällen sogar leicht zunimmt (s.a. Klimatabellen). Die mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen ist in Abbildung 4 a dargestellt. Man erkennt, dass im Lee des Harzes der Niederschlag am geringsten ist und nach Osten hin zunimmt. Bemerkenswert ist der fast im gesamten Untersuchungsgebiet (bis auf Wolmirsleben und Brumby) zu beobachtende deutlich negative Trend im Niederschlagsverhalten, der sich auch über das Gebiet hinaus fortsetzt (Abb. 4 b).

### *Luftdruck*

Ein mit 99% gesicherter positiver Trend von 1.5 hPa ist beim Luftdruck zu beobachten, wobei ab Mitte der 80er Jahre ein deutlicher Rückgang der extrem niedrigen Jahreswerte auffällt (Abb. 5).

### *Sonnenscheindauer*

Die Sonnenscheindauer weist eine schwache Zunahme von 0.2 h auf, die allerdings nur mit 80% gesichert ist (Abb. 6).

### *Bedeckungsgrad*

Parallel zur Zunahme der Sonnenscheindauer nimmt der Bedeckungsgrad ab. Die Abnahme von 0.2 Achtel ist mit 90% statistisch gesichert (Abb. 7).

### *Relative Luftfeuchte, Dampfdruck, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit*

Die vier Größen weisen keinen statistisch gesicherten Trend auf (Abb. 8-11).

### *Anmerkung:*

In Tabelle 2 a sind die mittleren Jahreswerte für alle meteorologischen Größen und Stationen angegeben. Tabelle 2 b zeigt, dass das beschriebene Trendverhalten der einzelnen meteorologischen Größen der Hauptstation Magdeburg als repräsentativ für die Untersuchungsregion angesehen werden kann. Es gibt allerdings an den anderen Stationen für einzelne Größen ein zu Magdeburg abweichendes Trendverhalten.

Stationsname	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonn	Bewo	Gstr	Wind
Magdeburg	13.4	8.9	4.8	495.8	76.2	1004	9.5	4.5	5.4	996	2.4
Wittenberg	13.3	8.9	5.0	538.9	76.9	1000	9.3	4.5	5.4	980	2.4
Bernburg/S.	13.6	9.9	4.9	465.8	76.4	1003	9.4	4.5	5.4	992	2.2
Brumby	13.5	9.0	4.9	450.5	76.2	1005	9.5	4.5	5.4	997	2.4
Danna- Eckm.	13.2	8.8	4.9	525.0	76.9	1000	9.3	4.5	5.4	980	2.4
Ladeburg	13.4	9.0	5.1	508.0	76.9	1003	9.3	4.5	5.4	980	2.4
Lindau	13.4	9.1	5.2	526.1	76.9	1004	9.3	4.5	5.3	979	2.4
Loburg	13.5	9.1	5.2	530.4	76.9	1004	9.3	4.5	5.4	980	2.4
Mehringen	13.5	9.1	5.2	481.8	77.5	1002	9.4	4.2	5.5	962	3.1
Oranienbaum	13.6	9.2	5.3	561.6	76.9	1006	9.3	4.5	5.4	980	2.4
Radis	13.3	8.9	5.1	553.5	76.9	1002	9.3	4.5	5.4	980	2.4
Wolmirsleben	13.6	9.6	5.7	474.4	75.1	1008	8.9	4.4	5.8	1010	2.7
Zahna	13.4	9.0	5.1	546.2	76.9	1002	9.3	4.5	5.4	980	2.4

Tabelle 2 a Mittelwerte der meteorologischen Größen (Jahreswerte) zwischen 1951 und 2000

Stationsname	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonn	Bewo	Gstr	Wind
Magdeburg	1.3	1.0	1.1	-81.6	0.1	1.5	0.0	0.2	-0.2	12.0	-0.1
Wittenberg	1.3	1.1	1.1	-67.4	-4.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	16.4	-0.3
Bernburg/S.	1.1	1.0	1.2	-19.9	-0.9	1.4	0.1	0.2	-0.2	16.8	-0.1
Brumby	1.3	1.0	1.1	22.6	-0.1	1.5	0.0	0.2	-0.2	13.0	-0.1
Danna- Eckm.	1.3	1.1	1.1	-40.6	-4.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	16.4	-0.3
Ladeburg	1.3	1.1	1.1	-68.3	-4.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	16.9	-0.3
Lindau	1.3	1.1	1.1	-6.3	-4.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	17.8	-0.3
Loburg	1.3	1.1	1.1	-100.3	-4.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	16.6	-0.3
Mehringen	0.9	0.8	0.8	-40.2	-3.4	0.4	0.0	0.1	-0.2	21.7	-0.1
Oranienbaum	1.3	1.1	1.1	-18.9	-4.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	16.7	-0.3
Radis	1.3	1.1	1.1	-26.9	-4.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	16.6	-0.3
Wolmirsleben	1.0	1.0	1.2	0.1	-2.9	1.6	-0.1	0.0	0.2	-24.3	0.1
Zahna	1.3	1.1	1.1	-52.9	-4.4	1.7	0.0	0.0	-0.2	16.4	-0.3

Statis. Sicherheit	99%	95%	90%	80%	nicht gesichert
--------------------	-----	-----	-----	-----	-----------------

Tabelle 2 b Trends der meteorologischen Größen (Jahreswerte) zwischen 1951 und 2000 sowie die statistische Sicherheit der Trends

## 2.4.2 Klimaszenarien

### 2.4.2.1 Stand der Forschung

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 Szenarientwicklung. 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. Im folgenden wird ein statistisches Modell zur Entwicklung von Klimaszenarien vorgestellt, dessen Grundlage sowohl Klimamodellaussagen als auch Beobachtungsdaten sind.

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, 2001), 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 Szenarientwicklung werden zur Zeit diskutiert:

Im Rahmen der ersten Methode wird versucht, ein regionales Klimamodell zu entwickeln, das in ein globales eingebettet ist und von diesem mit den notwendigen Randwerten versorgt wird (z.B. Machehauer 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 eine Weiterverwendung der Ergebnisse in der Regel nicht möglich macht.

Die zweite Methode verwendet Klimamodellergebnisse, die über statistische Verfahren in kleinskalige 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 Szenarienburgung auf ein Minimum reduziert werden, wobei die bereits angeführte Konsistenz erhalten bleibt. Von Nachteil ist der nicht mehr vorhandene physikalische Zusammenhang zwischen den Klimamodellergebnissen und denen des Szenariums.

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

#### **2.4.2.2 Das Szenarienmodell**

##### *a) Grundprinzip*

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 werden die anderen beobachteten meteorologischen Größen konsistent diesen Änderungen angepasst. Dabei wird darauf geachtet, dass deren statistische Grundeigenschaften und Zusammenhänge im wesentlichen erhalten bleiben.

#### *b) Beschreibung des beobachteten Klimas*

##### - Statistisch konstante Kenngrößen

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. Bei den Kenngrößen 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 darauf hingewiesen 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).

##### - 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, das Temperaturverhalten der Vortage (Erhaltungsneigung) 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, 1997, 1999). 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 Abschnitt d) erläutert.

### *c) Erstellung des simulierten Klimas*

- Bearbeitung der Bezugsgröße

Die Erstellung der simulierten Reihe der Bezugsgröße 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 Rangbestimmung. Die Rangbestimmung 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 Rangbestimmung.
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 seines Ranges 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.

### *d) Verknüpfung von beobachtetem und simuliertem Klima*

Mit Abarbeitung des 6. Schrittes aus Abschnitt c) ist **eine** 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. Abschnitt b)) mit Hilfe des Abstandes von Mahalanobis

(Weber, 1980) 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 Erhaltungseigenschaft 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. Man erhält 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.

#### e) *Erzeugung einer ausreichend großen Stichprobe von Szenarien*

Wie unter d) bereits erwähnt, wurde mit dem Algorithmus bisher nur eine Realisierung berechnet. Um eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Sicherheit des Eintretens der simulierten Klimaänderungen zu treffen, müssen entsprechend viele Realisierungen erzeugt werden. Dies wird erreicht, indem man mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation eine in der zeitlichen Abfolge zufällig erzeugter Realisierungen berechnet. Das heißt, dass die unter c) angegebenen Arbeitsschritte 2-7 sowie der Arbeitsschritt d) für jede Realisierung neu berechnet werden. In Abbildung 12 ist die Grundstruktur des Modellaufbaus dargestellt. Eine Anwendung des Szenarienmodells für das Land Brandenburg ist bei Lasch et al. (1999) zu finden.

## **2.4.3 Szenarienergebnisse**

### **2.4.3.1 Einleitung**

Die Szenarienberechnungen beruhen auf einem vorgegebenen Temperaturtrend von 1.4 K für den Zeitraum 2001-2055. Dieser Trend wurde aus dem Klimamodelllauf ECHAM4-OPYC3 des MPI für Meteorologie Hamburg bestimmt. Um eine



ausreichend große die Stichprobe zu bekommen, wurden 100 Simulationsläufe sowohl für den Beobachtungszeitraum als auch den Simulationszeitraum durchgeführt. Aus der Verteilung der daraus gewonnenen Niederschlagstrends (s. Tabelle 3 a und b) wurden drei Simulationen, die als Zukunftsszenarien verwendet werden können, zur Interpretation ausgewählt.

Klasse Nr.	Klassengrenze	Prozentualer Anteil
1	< - 47.4 mm	2
2	< - 32.8 mm	5
3	< - 18.2 mm	10
4	< - 3.6 mm	15
5	< 11.0 mm	12
6	< 25.6 mm	18
7	< 40.2 mm	16
8	< 51.1 mm	10
9	< 65.7 mm	6
10	>= 65.7 mm	6

Tabelle 3 a Verteilung der Niederschlagstrends für die Station Magdeburg auf der Basis der simulierten Daten für den Zeitraum 2001-2055

Klasse Nr.	Klassengrenze	Prozentualer Anteil
1	< - 69.4 mm	2
2	< - 62.0 mm	5
3	< - 47.4 mm	10
4	< - 39.8mm	15
5	< 32.5 mm	12
6	< -17.9 mm	18
7	< -6.9 mm	16
8	< 3.6 mm	10
9	< 18.2 mm	6
10	>= 18.2 mm	6

Tabelle 3 b Verteilung der Niederschlagstrends für die Station Magdeburg auf der Basis der simulierten Daten für den Beobachtungszeitraum 1951-2000

### 2.4.3.2 Szenarium 1

Szenarium 1 ist der Klasse 1 der Tabelle 3 a zuzuordnen und repräsentiert damit in der Verteilung der Szenarienläufe bezüglich der Niederschlagstrends den unteren Extremwertbereich der Verteilung (Niederschlagsabnahme). Die mittleren Jahreswerte aller meteorologischen Größen und Stationen sind in Tabelle 4 a angegeben, die Trends in Tabelle 4 b.

#### *Temperatur*

Der Verlauf für Maximum, Mittel und Minimum entspricht den Vorgaben (Abb. 13).

#### *Niederschlag*

Die Jahressummen des Niederschlags nehmen zwischen 2001 und 2055 um 59.8 mm ab (Abb. 14), wobei der Trendanteil in der zweiten Simulationshälfte

deutlich stärker ist als in der ersten. Dieser Trend ist mit 90% gesichert. Dabei wird dieser Trend im wesentlichen durch den Rückgang des Niederschlags im Sommer verursacht (Abb. 15). Im Winter ist nur ein schwacher Trend vorhanden. Diese Entwicklung ist an allen untersuchten Stationen zu beobachten (s.a. Klimatabellen). Die mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen, deren Trends sowie die Niederschlagsdifferenz zwischen 2046/55 und 1951/2000 sind in Abbildung 16 a, b und c dargestellt. Im Szenarium bleibt die räumliche Struktur der Niederschlagsverteilung erhalten (Abb. 16 a), was in der Trendverteilung nicht zu beobachten ist, die keine charakteristische Struktur aufweist (Abb. 16 b). Abbildung 16 c macht deutlich, dass gegen Ende des Szenarienzeitraums die größte Differenz zum aktuellen mittleren Zustand beobachtet wird. Dies gilt sowohl für das gesamte Untersuchungsgebiet als auch dessen Umgebung, wobei der Südwesten die schwächsten Trends aufweist, das Gebiet östlich der Untersuchungsregion dagegen die größten.

#### *Luftdruck*

Der Luftdruck zeigt an allen Stationen einen positiven Trend, der statistisch gesichert ist (Abb. 17, Tab. 4 b).

#### *Sonnenscheindauer*

Die Sonnenscheindauer nimmt im Mittel an fast allen Stationen um 0.5 Stunden pro Tag zu, eine Tendenz, die mit 99% statistisch gesichert ist (Abb. 18, Tab. 4 b).

#### *Bewölkung*

Die Zunahme der Sonnenscheindauer geht einher mit einer in allen Fällen statistisch gesicherten Abnahme des Bedeckungsgrades (Abb. 19, Tab. 4 b).

#### *Relative Luftfeuchte*

Die relative Luftfeuchte weist an den Stationen nur einen geringen negativen Trend auf, der auch nur in wenigen Fällen gesichert ist (Abb. 20, Tab. 4 b).

#### *Dampfdruck*

Die zu beobachtende moderate Zunahme des Dampfdrucks ist in allen Fällen statistisch gesichert (Abb. 21, Tab. 4 b).

#### *Globalstrahlung*

An allen Stationen nimmt die Globalstrahlung im Berechnungszeitraum deutlich zu. Dieser Trend ist in allen Fällen mit 95% statistisch gesichert (Abb. 22, Tab. 4 b).

#### *Windgeschwindigkeit*

Bei der Windgeschwindigkeit ist keine Veränderung zu beobachten (Abb. 23, Tab. 4 b).

Stationsname	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonn	Bewo	Gstr	Wind
Magdeburg	14.8	10.2	6.0	416.2	75.8	1005	9.6	4.8	5.1	1030	2.3
Wittenberg	14.7	10.2	6.3	478.0	74.1	1002	9.4	4.7	5.1	1019	2.2
Bernburg/S.	14.9	10.3	6.2	405.1	75.5	1004	9.6	4.8	5.2	1027	2.1
Brumby	14.9	10.3	6.1	417.2	75.8	1006	9.7	4.8	5.1	1031	2.3
Danna- Eckm.	14.6	10.1	6.2	448.2	74.1	1001	9.4	4.7	5.1	1019	2.2
Ladeburg	14.8	10.3	6.4	442.2	74.1	1004	9.4	4.7	5.1	1018	2.2
Lindau	14.9	10.4	6.5	480.1	74.0	1006	9.4	4.7	5.1	1018	2.3
Loburg	14.9	10.4	6.5	454.6	74.1	1006	9.4	4.7	5.1	1018	2.2
Mehringen	14.7	10.3	6.3	417.6	75.5	1003	9.6	4.6	5.3	1002	3.0
Oranienbaum	15.0	10.5	6.6	506.8	74.1	1007	9.4	4.7	5.1	1019	2.2
Radis	14.7	10.2	6.4	491.1	74.1	1003	9.4	4.7	5.1	1018	2.2
Wolmirsleben	14.8	10.9	7.0	436.7	73.1	1010	9.1	4.6	5.8	1023	2.7
Zahna	14.8	10.3	6.4	494.9	74.1	1003	9.4	4.7	5.1	1019	2.2

Tabelle 4 a Mittelwerte der meteorologischen Größen (Jahreswerte) zwischen 2001 und 2055, Szenarium 1

Stationsname	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonn	Bewo	Gstr	Wind
Magdeburg	1.4	1.4	1.3	-59.8	-0.8	0.8	0.3	0.5	-0.4	51.5	0.0
Wittenberg	1.5	1.5	1.4	-57.1	-1.2	0.9	0.3	0.5	-0.3	54.8	0.0
Bernburg/S.	1.5	1.5	1.3	-82.1	-0.7	0.8	0.4	0.5	-0.3	51.0	0.0
Brumby	1.4	1.4	1.3	-81.3	-0.7	0.8	0.3	0.5	-0.3	51.4	-0.1
Danna- Eckm.	1.5	1.5	1.4	-88.7	-1.2	0.9	0.3	0.5	-0.3	54.8	0.0
Ladeburg	1.5	1.5	1.3	-54.7	-1.1	0.9	0.3	0.5	-0.3	54.6	0.0
Lindau	1.5	1.5	1.3	-95.1	-1.1	0.9	0.3	0.5	-0.3	54.5	0.0
Loburg	1.5	1.5	1.4	-39.6	-1.2	0.9	0.3	0.5	-0.3	54.7	0.0
Mehringen	1.5	1.6	1.3	-71.0	-0.5	0.7	0.3	0.5	-0.3	53.4	0.0
Oranienbaum	1.5	1.5	1.5	-91.7	-1.2	0.9	0.3	0.5	-0.3	54.7	0.0
Radis	1.5	1.5	1.3	-93.0	-1.2	0.9	0.3	0.5	-0.3	54.7	0.0
Wolmirsleben	1.4	1.5	1.5	-65.0	-0.8	1.0	0.4	0.4	-0.2	47.0	0.0
Zahna	1.5	1.5	1.4	-56.5	-1.2	0.9	0.3	0.5	-0.3	54.8	0.0

Statis. Sicherheit	99%	95%	90%	80%	nicht gesichert
--------------------	-----	-----	-----	-----	-----------------

Tabelle 4 b Trends der meteorologischen Größen (Jahreswerte) zwischen 2001 und 2055 sowie die statistische Sicherheit der Trends, Szenarium 1

### 2.4.3.3 Szenarium 2

Szenarium 2 ist der Klasse 5 der Tabelle 3 zuzuordnen und repräsentiert damit in der Verteilung der Szenarienläufe bezüglich der Niederschlagstrends den mittleren Bereich der Verteilung (räumlich unterschiedliche Niederschlagsentwicklung). Die mittleren Jahreswerte aller meteorologischen Größen und Stationen sind in Tabelle 5 a angegeben, die Trends in Tabelle 5 b.

#### Temperatur

Der Verlauf für Maximum, Mittel und Minimum entspricht den Vorgaben, wobei sich allerdings die Anordnung der Jahre von Szenarium 1 unterscheidet (Abb. 24).

### *Niederschlag*

Die Niederschlagsentwicklung weist je nach Station schwach positive als auch negative Trends auf (Abb. 25, Tab. 5 b). Magdeburg weist als Bezugsstation im Sommer und Winter keine Trends auf (Abb. 26). Dies gilt im wesentlichen auch für alle anderen Stationen. Die mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen, deren Trends sowie die Niederschlagsdifferenz zwischen 2046/55 und 1951/2000 sind in Abbildung 27 a, b und c dargestellt. Bei der räumlichen Verteilung bleibt die "West-Ost-Struktur" erhalten und wird im wesentlichen nur durch die schwach positiven bzw. negativen Trends im Vergleich zum Basisszenarium etwas modifiziert (Abb. 27 a). Die Trends selber gehen von leicht positiv im Westen zu leicht negativ im Osten über und sind nicht gesichert (Abb. 27 b). Ähnlich verhalten sich die Differenzen der Jahressummen des Niederschlags (Abb. 27 c). Dies gilt sowohl für das Untersuchungsgebiet als auch dessen Umgebung.

### *Luftdruck*

Der Luftdruck zeigt an allen Stationen einen positiven Trend, der statistisch gesichert ist (Abb. 28, Tab. 5 b).

### *Sonnenscheindauer*

Die Sonnenscheindauer nimmt im Mittel an fast allen Stationen um 0.1 Stunden pro Tag zu, eine Tendenz, die nicht zu sichern ist (Abb. 29, Tab. 5 b).

### *Bewölkung*

Die schwache Zunahme der Sonnenscheindauer geht einher mit einer schwachen Abnahme des Bedeckungsgrades (Abb. 30, Tab. 5 b).

### *Relative Luftfeuchte*

Die relative Luftfeuchte nimmt an 10 Stationen leicht ab, an drei Stationen leicht zu. (Abb. 31, Tab. 5 b).

### *Dampfdruck*

Die zu beobachtende Zunahme des Dampfdrucks ist in allen Fällen mit 99% statistisch gesichert (Abb. 32, Tab. 5 b).

### *Globalstrahlung*

An 12 von 13 Stationen nimmt die Globalstrahlung im Berechnungszeitraum schwach zu. Dieser Trend ist in nur 2 Fällen mit 80% statistisch gesichert (Abb. 33, Tab. 5 b).

### *Windgeschwindigkeit*

Bei der Windgeschwindigkeit ist eine leichte Abnahme zu beobachten, die in einigen Fällen auch statistisch gesichert ist (Abb. 34, Tab. 5 b).

Stationsname	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonn	Bewo	Gstr	Wind
Magdeburg	14.7	10.2	6.0	462.0	76.4	1005	9.7	4.6	5.2	1008	2.3
Wittenberg	14.7	10.2	6.3	496.4	74.3	1002	9.5	4.6	5.2	999	2.2
Bernburg/S.	14.9	10.3	6.2	453.6	76.0	1004	9.7	4.6	5.3	1006	2.1
Brumby	14.8	10.2	6.1	476.1	76.4	1006	9.7	4.6	5.2	1009	2.4
Danna- Eckm.	14.6	10.1	6.2	479.7	74.3	1001	9.5	4.6	5.2	999	2.2
Ladeburg	14.8	10.3	6.4	474.3	74.2	1004	9.5	4.6	5.2	999	2.2
Lindau	14.8	10.4	6.5	522.7	74.2	1006	9.5	4.6	5.2	999	2.2
Loburg	14.9	10.4	6.5	484.7	74.2	1005	9.5	4.6	5.2	999	2.2
Mehringen	14.7	10.3	6.3	476.8	75.7	1003	9.7	4.4	5.4	982	2.9
Oranienbaum	15.0	10.5	6.6	544.9	74.2	1007	9.5	4.6	5.2	999	2.2
Radis	14.7	10.3	6.4	536.6	74.2	1003	9.5	4.6	5.2	999	2.2
Wolmirsleben	14.8	10.9	7.1	479.7	73.2	1010	9.1	4.4	5.9	995	2.6
Zahna	14.8	10.3	6.4	500.4	74.3	1003	9.5	4.6	5.2	999	2.2

Tabelle 5 a Mittelwerte der meteorologischen Größen (Jahreswerte) zwischen 2001 und 2055, Szenarium 2

Stationsname	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonn	Bewo	Gstr	Wind
Magdeburg	1.3	1.4	1.3	2.3	0.4	0.7	0.5	0.1	-0.2	8.7	-0.1
Wittenberg	1.3	1.5	1.4	-9.5	-0.8	0.8	0.4	0.1	-0.1	16.1	-0.1
Bernburg/S.	1.4	1.4	1.3	12.6	0.3	0.7	0.5	0.1	-0.1	8.9	-0.1
Brumby	1.4	1.4	1.3	33.2	0.4	0.7	0.5	0.1	-0.1	8.5	-0.1
Danna- Eckm.	1.3	1.5	1.4	-47.2	-0.8	0.8	0.4	0.1	-0.1	16.1	-0.1
Ladeburg	1.3	1.5	1.4	-19.8	-0.8	0.8	0.4	0.1	-0.1	16.1	-0.1
Lindau	1.3	1.5	1.4	-6.1	-0.9	0.8	0.4	0.1	-0.1	16.1	-0.1
Loburg	1.3	1.5	1.4	6.4	-0.8	0.8	0.4	0.1	-0.1	16.1	-0.1
Mehringen	1.4	1.5	1.2	28.1	-0.1	0.5	0.5	0.1	-0.1	13.0	-0.1
Oranienbaum	1.3	1.5	1.4	-3.7	-0.8	0.8	0.4	0.1	-0.1	16.1	-0.1
Radis	1.3	1.5	1.5	-24.3	-0.8	0.8	0.4	0.1	-0.1	16.1	-0.1
Wolmirsleben	1.4	1.4	1.4	15.0	-0.5	0.7	0.5	0.0	0.0	-9.5	-0.2
Zahna	1.3	1.5	1.4	-35.5	-0.8	0.8	0.4	0.1	-0.1	16.1	-0.1

Statis. Sicherheit	99%	95%	90%	80%	nicht gesichert
--------------------	-----	-----	-----	-----	-----------------

Tabelle 5 b Trends der meteorologischen Größen (Jahreswerte) zwischen 2001 und 2055 sowie die statistische Sicherheit der Trends, Szenarium 2

### 2.4.3.4 Szenarium 3

Szenarium 3 ist der Klasse 10 der Tabelle 3 zuzuordnen und repräsentiert damit in der Verteilung der Szenarienläufe bezüglich der Niederschlagstrends den oberen Extremwertbereich der Verteilung (Niederschlagszunahme). Die mittleren Jahreswerte aller meteorologischen Größen und Stationen sind in Tabelle 6 a angegeben, die Trends in Tabelle 6 b.

#### Temperatur

Der Verlauf für Maximum, Mittel und Minimum entspricht den Vorgaben, wobei sich allerdings die Anordnung der Jahre von Szenarium1 bzw. 2 unterscheidet (Abb. 35).

### *Niederschlag*

Die Jahressummen des Niederschlags nehmen für Magdeburg zwischen 2001 und 2055 um 89.7 mm zu (Abb. 36). Dieser Trend ist mit 95% gesichert, wobei die Anteile im Sommer und Winter in etwa gleich sind (Abb. 37). Diese Entwicklung ist an allen untersuchten Stationen zu beobachten (s.a. Klimatabellen). Die mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen, deren Trends sowie die Niederschlagsdifferenz zwischen 2046/55 und 1951/2000 für das Untersuchungsgebiet und die Umgebung sind in Abbildung 38 a, b und c dargestellt. Der West-Ost-Gradient in der Niederschlagsverteilung ist im Vergleich zum Basisszenarium leicht abgeschwächt (Abb. 38 a). Der Niederschlagstrend nimmt von West nach Ost deutlich ab und ist statistisch gesichert (Abb. 38 b). In etwa die gleiche Struktur ist auch bei den Differenzen zu beobachten (Abb. 38 c).

### *Luftdruck*

Der Luftdruck zeigt an keiner Station einen gesicherten (Abb. 39, Tab. 6 b).

### *Sonnenscheindauer*

Die Sonnenscheindauer nimmt im Mittel an allen Stationen um 0.1 Stunden pro Tag zu, eine Tendenz, die nicht statistisch gesichert ist (Abb. 40, Tab. 6 b).

### *Bewölkung*

Beim Bedeckungsgrad ist kein Trend vorhanden (Abb. 41, Tab. 6 b).

### *Relative Luftfeuchte*

Die relative Luftfeuchte weist an allen Stationen (außer Magdeburg) einen geringen negativen Trend auf, der nicht gesichert ist (Abb. 42, Tab. 6 b).

### *Dampfdruck*

Die zu beobachtende moderate Zunahme des Dampfdrucks ist bis auf einen Fall (Bernburg) statistisch gesichert (Abb. 43, Tab. 6 b).

### *Globalstrahlung*

An allen Stationen nimmt die Globalstrahlung im Berechnungszeitraum geringfügig zu. Dieser Trend ist zum Teil schwach statistisch gesichert (Abb. 44, Tab. 6 b).

### *Windgeschwindigkeit*

Bei der Windgeschwindigkeit ist keine Veränderung zu beobachten (Abb. 45, Tab. 6 b).

Stationsname	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonn	Bewo	Gstr	Wind
Magdeburg	14.7	10.2	6.0	497.7	76.2	1004	9.6	4.6	5.2	1011	2.4
Wittenberg	14.7	10.2	6.3	516.9	74.4	1001	9.3	4.5	5.2	998	2.3
Bernburg/S.	14.9	10.3	6.2	493.4	75.9	1004	9.6	4.6	5.3	1009	2.2
Brumby	14.8	10.2	6.1	498.4	76.0	1006	9.6	4.6	5.2	1012	2.4
Danna- Eckm.	14.6	10.1	6.2	527.3	74.4	1000	9.3	4.5	5.2	998	2.3
Ladeburg	14.8	10.3	6.4	508.7	74.4	1004	9.3	4.5	5.2	998	2.3
Lindau	14.8	10.4	6.5	553.7	74.4	1005	9.4	4.5	5.2	998	2.3
Loburg	14.9	10.4	6.5	507.7	74.4	1005	9.3	4.5	5.2	998	2.3
Mehringen	14.7	10.3	6.3	499.6	75.6	1003	9.5	4.4	5.4	983	3.0
Oranienbaum	15.0	10.5	6.6	571.4	74.4	1007	9.3	4.5	5.2	998	2.3
Radis	14.7	10.2	6.3	560.7	74.4	1002	9.3	4.5	5.2	998	2.3
Wolmirsleben	14.8	10.9	7.0	513.2	73.2	1009	9.0	4.5	5.8	1005	2.8
Zahna	14.8	10.3	6.4	534.4	74.4	1003	9.3	4.5	5.2	998	2.3

Tabelle 6 a Mittelwerte der meteorologischen Größen (Jahreswerte) zwischen 2001 und 2055, Szenarium 3

Stationsname	Tmax	Tmit	Tmin	Nied	Relf	Ludr	Dadr	Sonn	Bewo	Gstr	Wind
Magdeburg	1.5	1.5	1.4	89.7	0.0	0.1	0.3	0.1	-0.1	14.7	0.1
Wittenberg	1.4	1.5	1.3	46.0	-0.6	0.0	0.2	0.1	0.0	15.1	0.0
Bernburg/S.	1.4	1.4	1.4	90.9	-0.2	0.1	0.2	0.1	-0.1	16.4	0.1
Brumby	1.5	1.5	1.4	90.5	-0.2	0.1	0.3	0.1	-0.1	14.9	0.1
Danna- Eckm.	1.4	1.5	1.3	59.4	-0.6	0.0	0.2	0.1	0.0	15.1	0.0
Ladeburg	1.4	1.5	1.3	74.7	-0.6	0.1	0.2	0.1	0.0	15.2	0.0
Lindau	1.4	1.5	1.3	76.1	-0.6	0.0	0.2	0.1	0.0	15.4	0.0
Loburg	1.4	1.5	1.3	68.5	-0.5	0.1	0.2	0.1	0.0	15.2	0.0
Mehringen	1.4	1.4	1.3	90.2	-0.3	0.1	0.2	0.1	0.0	17.1	0.0
Oranienbaum	1.4	1.5	1.3	57.2	-0.5	0.0	0.2	0.1	0.0	15.2	0.0
Radis	1.4	1.5	1.3	52.9	-0.5	0.0	0.2	0.1	0.0	15.1	0.0
Wolmirsleben	1.4	1.5	1.3	98.3	-0.6	0.1	0.3	0.1	-0.1	13.7	0.0
Zahna	1.4	1.5	1.3	49.8	-0.6	0.0	0.2	0.1	0.0	15.1	0.0

Statis. Sicherheit	99%	95%	90%	80%	nicht gesichert
--------------------	-----	-----	-----	-----	-----------------

Tabelle 6 b Trends der meteorologischen Größen (Jahreswerte) zwischen 2001 und 2055 sowie die statistische Sicherheit der Trends, Szenarium 3

#### 2.4.4 Zusammenfassung

Das gewählte globale Szenarium von 1.4 K Temperaturanstieg bis 2055 stellt für die Region Mitteleuropa/Deutschland ein im Sinne der IPCC-Definition moderates Szenarium dar. Aus zur Zeit am PIK laufenden Untersuchungen lässt sich jetzt schon abschätzen, dass bei einer deutlicheren Temperaturzunahme mit einem weiteren Niederschlagsrückgang in der Untersuchungsregion zu rechnen ist. Das heißt, dass bei Verwendung der Simulationsergebnisse auf das Szenarium 1 zurückgegriffen werden sollte, um Planungsrisiken auf ein Minimum zu senken. Ein wesentliches zusätzliches Argument für diese Auswahl liegt in der Tatsache begründet, dass das statistische Modell bei der Simulation des Beobachtungszeitraums die tatsächlich abgelaufene Niederschlagsentwicklung ebenfalls als Extremereignis am unteren Rand der Verteilung (starke Niederschlagsabnahme) wiedergibt (s. Tab. 2 b sowie 3 a und b).

Der beobachtete Trend für Magdeburg beträgt -81.6 mm, der entsprechende simulierte Trend - 75.0 mm und die obere Grenze der nach unten offenen Klasse der Häufigkeitsverteilung < -69.4 mm.

#### **2.4.5 Literatur**

- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., (1997): "A method to estimate the statistical confidence of cluster separation". Theor. Appl. Climatol., 57, p. 103-110
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., Fraedrich, K. (1999): "Applying non-hierarchical cluster analysis algorithms to climate classification: some problems and their solution". Theor. Appl. Climatol., 64, 3-4, p.143-150
- IPCC (2001): "Climate change 2000, Summary for policy makers". Cambridge University Press, Cambridge UK
- Lasch, P., Lindner, M., Ebert, B., Flechsig, M., Gerstengarbe, F.-W., Suckow, F. and Werner, P.C. (1999): "Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal State of Brandenburg, Germany". Environmental Modeling and Assessment, 4, p. 273-286
- Lorenz, E.N., (1963): "Deterministic nonperiodic flow". J. Atm. Sciences, 20 (130), p. 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 conditons". Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 191, Hamburg
- Weber, E., (1980): "Grundriß der biologischen Statistik", VEB Gustav Fischer Verlag, Jena
- 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, Hamburg

#### **2.4.6 Bearbeiter**

Dr. habil. P.C. Werner, Dr. habil. F.-W. Gerstengarbe

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung  
Telegrafenberg  
PF 601203  
14412 Potsdam

Tel.: 0331 - 288 2587 / 2586

Fax.: 0331 - 288 2695

e-mail: [werner@pik-potsdam.de](mailto:werner@pik-potsdam.de), [gerstengarbe@pik-potsdam.de](mailto:gerstengarbe@pik-potsdam.de)



## **Anlage (Abbildungen)**

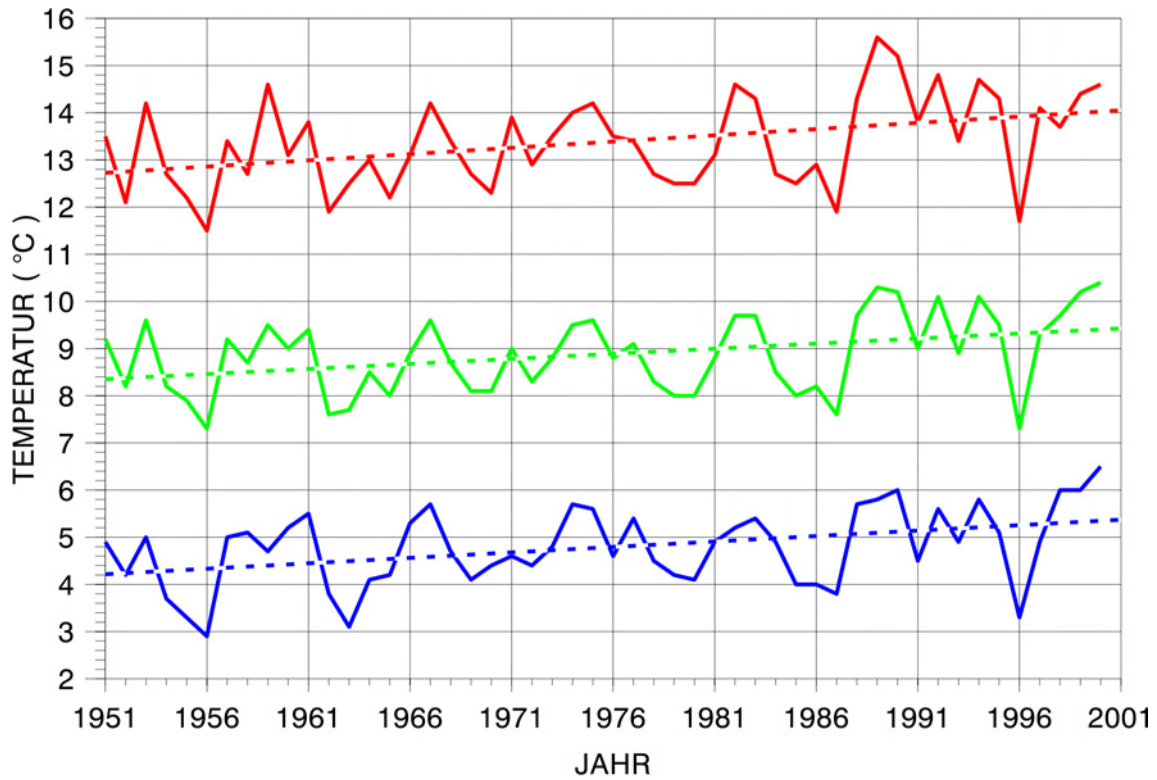


Abb. 1 Jahresmittel der Lufttemperatur Magdeburg 1951 - 2000  
(rot = Maximum; grün = Mittel; blau = Minimum)

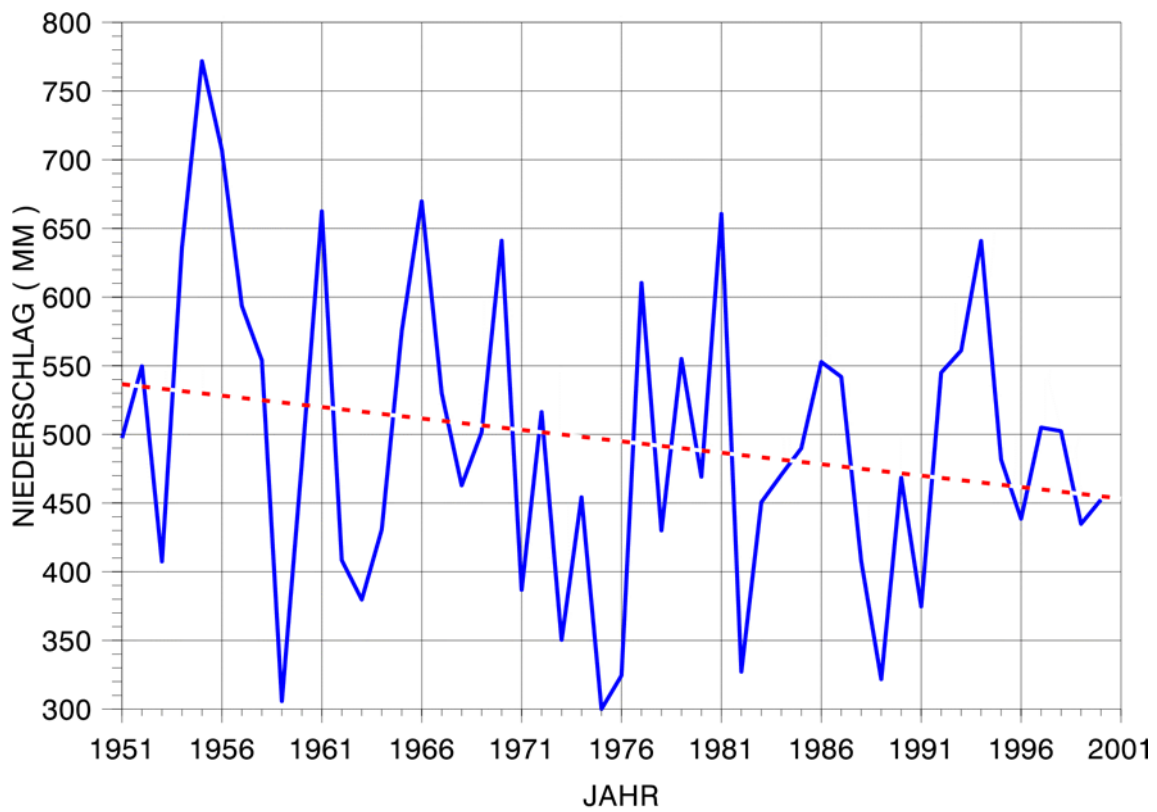


Abb. 2 Jahressumme des Niederschlags Magdeburg 1951 - 2000

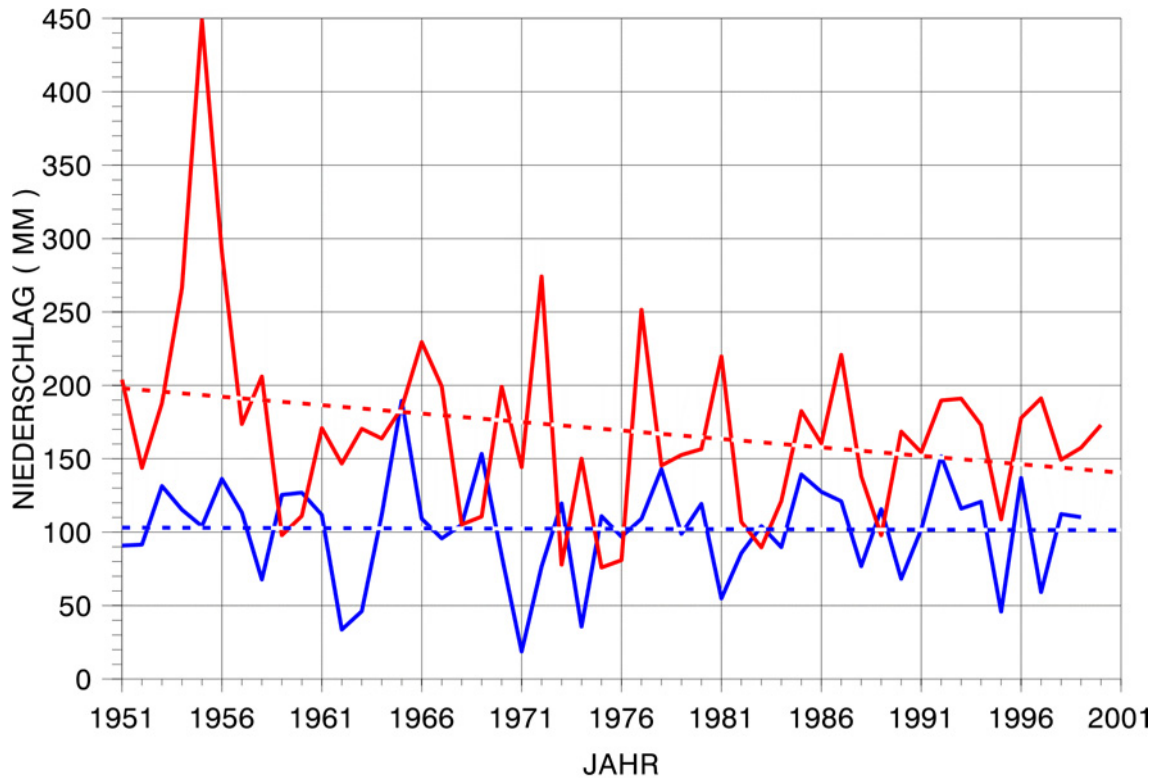
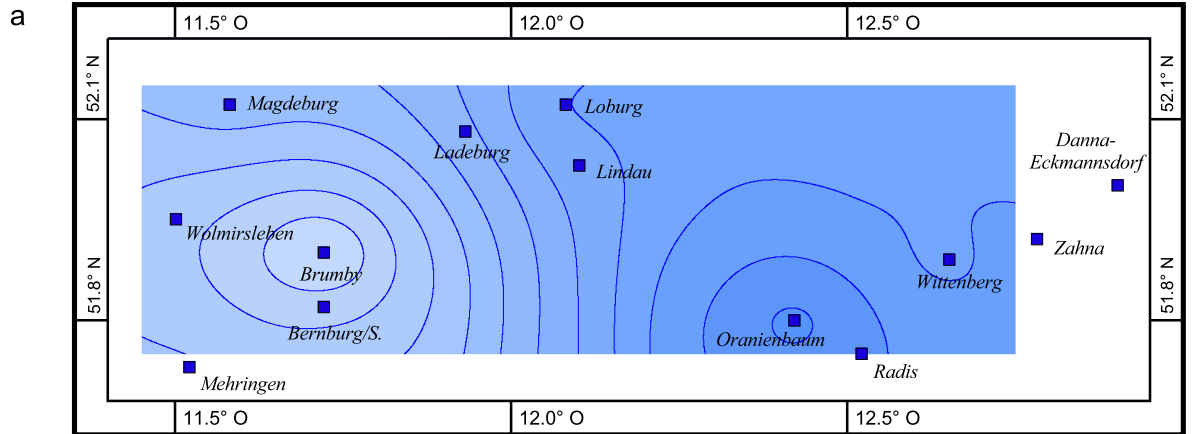
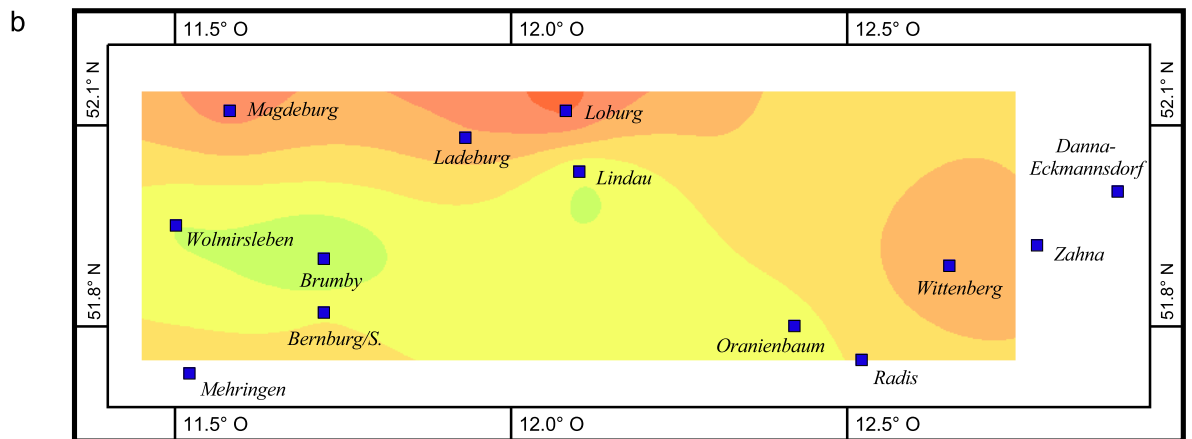
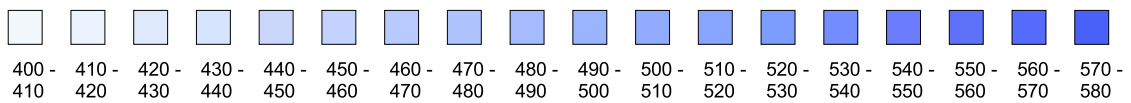


Abb. 3 Summen des Niederschlags Magdeburg 1951 - 2000  
(rot = Sommer; blau = Winter)



Mittlere Jahressumme [mm]



Änderung der mittleren Jahressumme [mm]

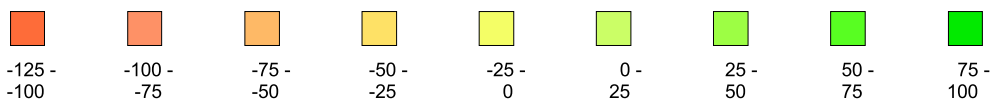


Abb. 4 a Mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen des Niederschlags, 1951 - 2000  
 b Mittlere räumliche Verteilung des Trends der Jahressummen des Niederschlags, 1951 - 2000

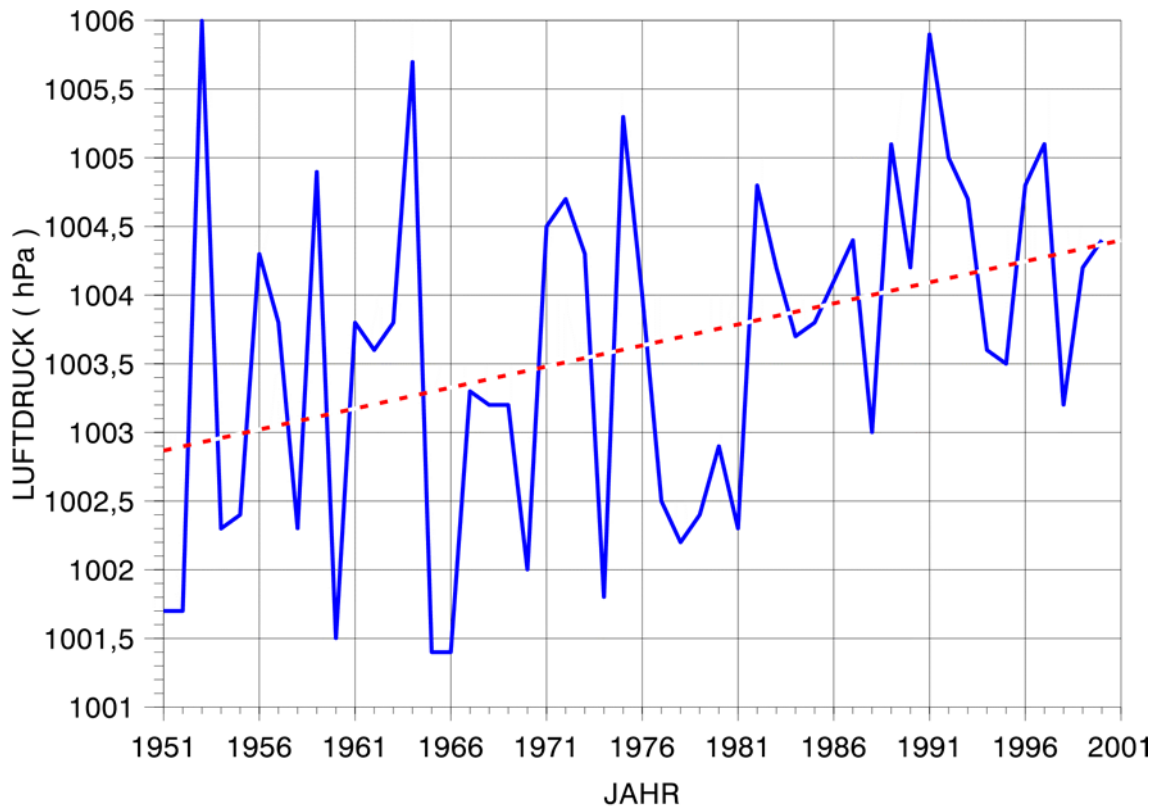


Abb. 5 Jahresmittel des Luftdrucks Magdeburg 1951 - 2000

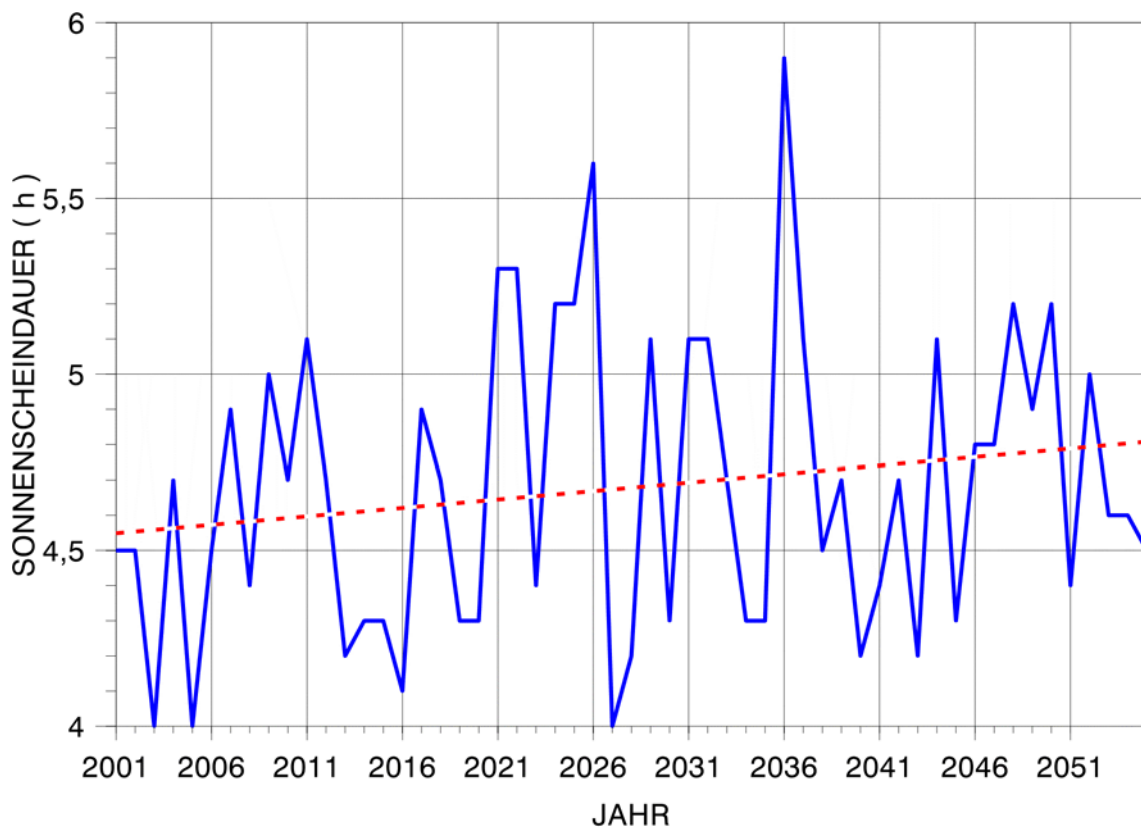


Abb. 6 Jahresmittel der Sonnenscheindauer Magdeburg, Szenarium 1 , 2001 - 2055

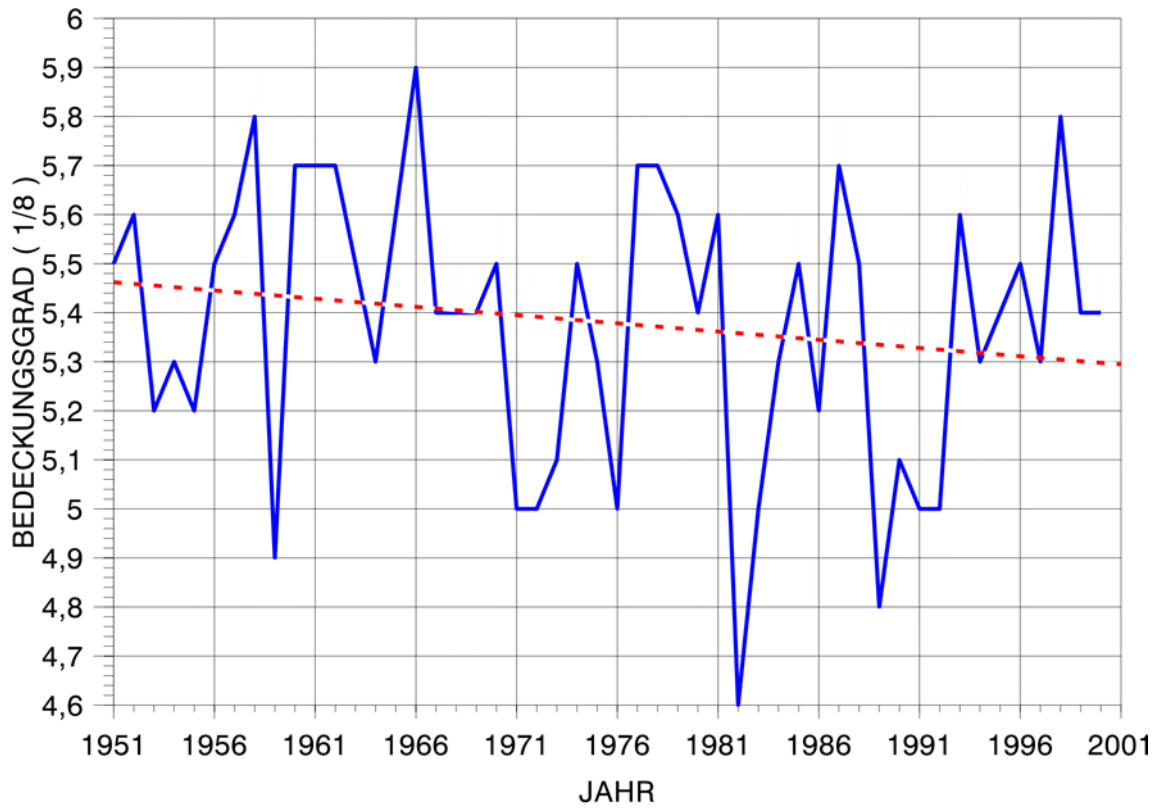


Abb. 7 Jahresmittel der Bewölkung Magdeburg 1951 - 2000

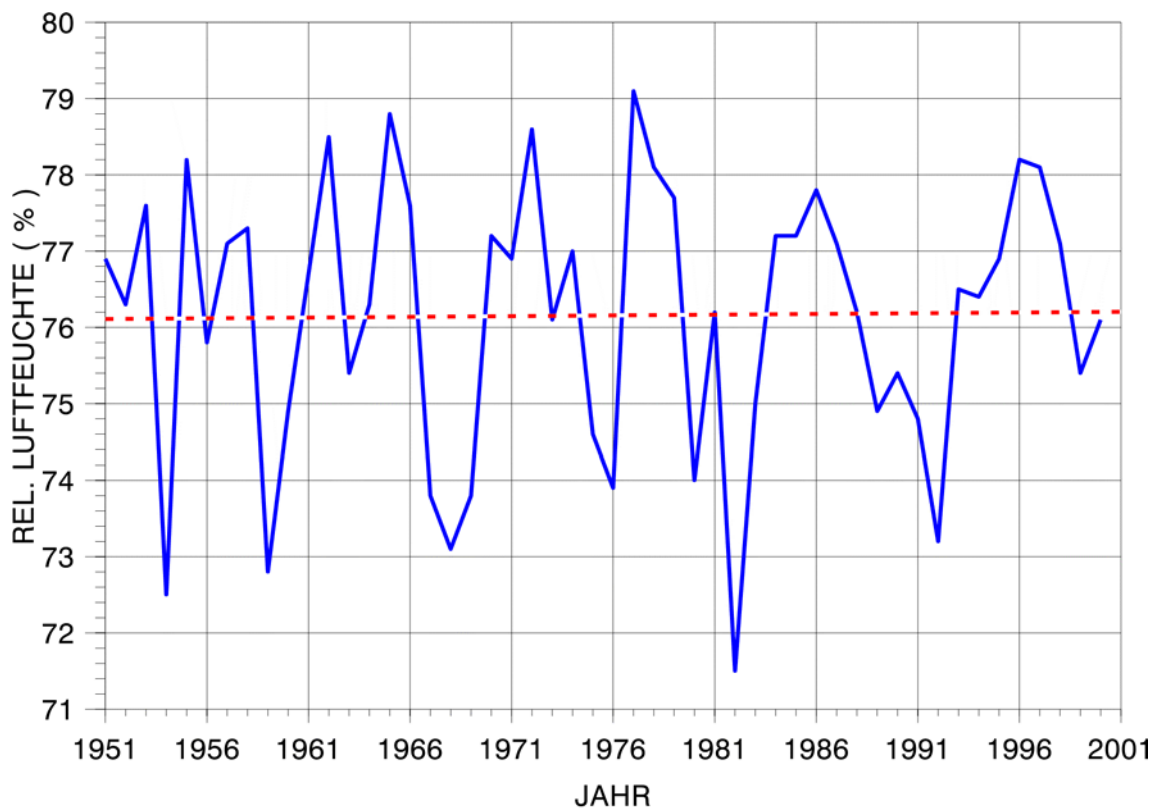


Abb. 8 Jahresmittel der relativen Luftfeuchte Magdeburg 1951 - 2000

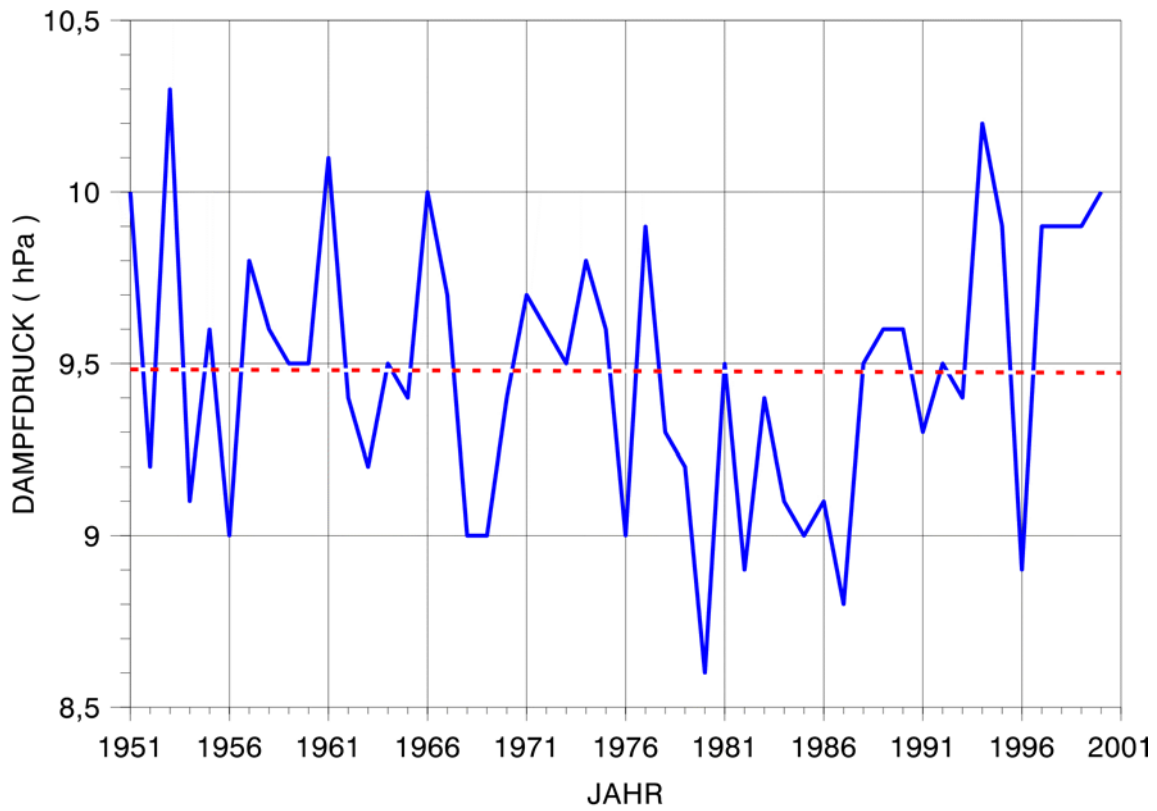


Abb. 9 Jahresmittel des Dampfdrucks Magdeburg 1951 - 2000

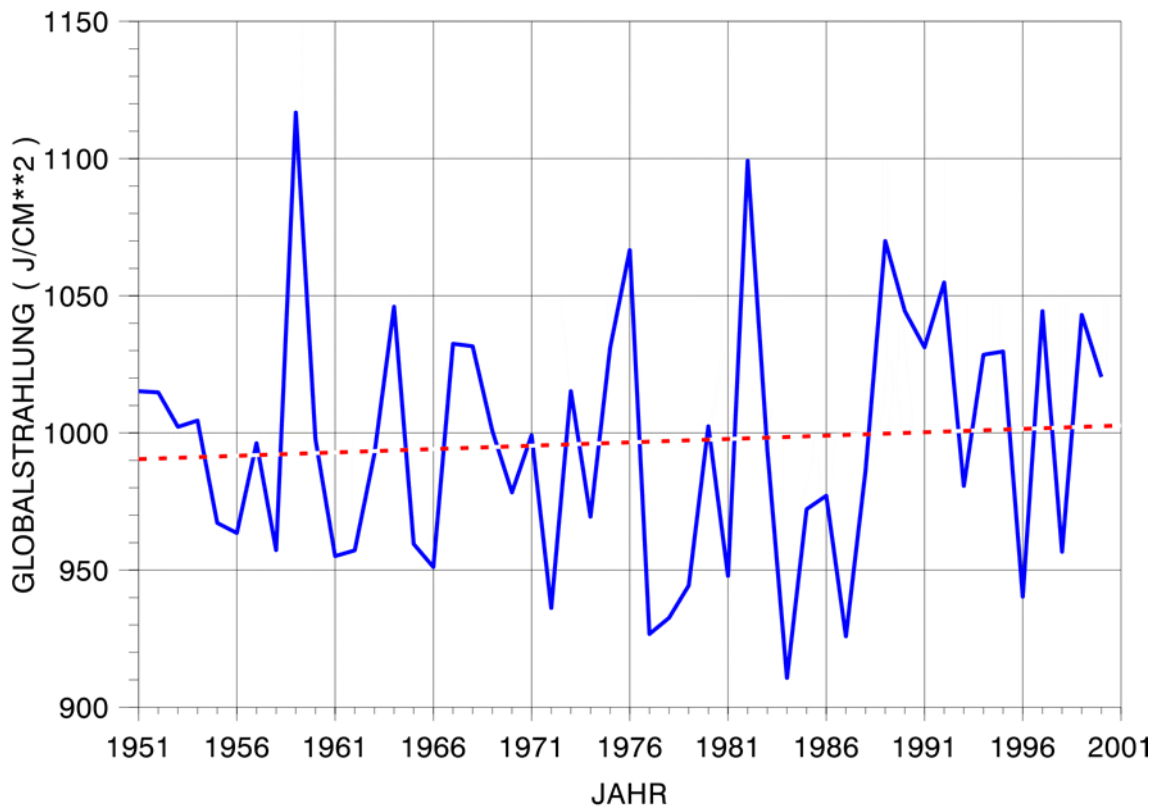


Abb. 10 Jahresmittel der Globalstrahlung Magdeburg 1951 - 2000

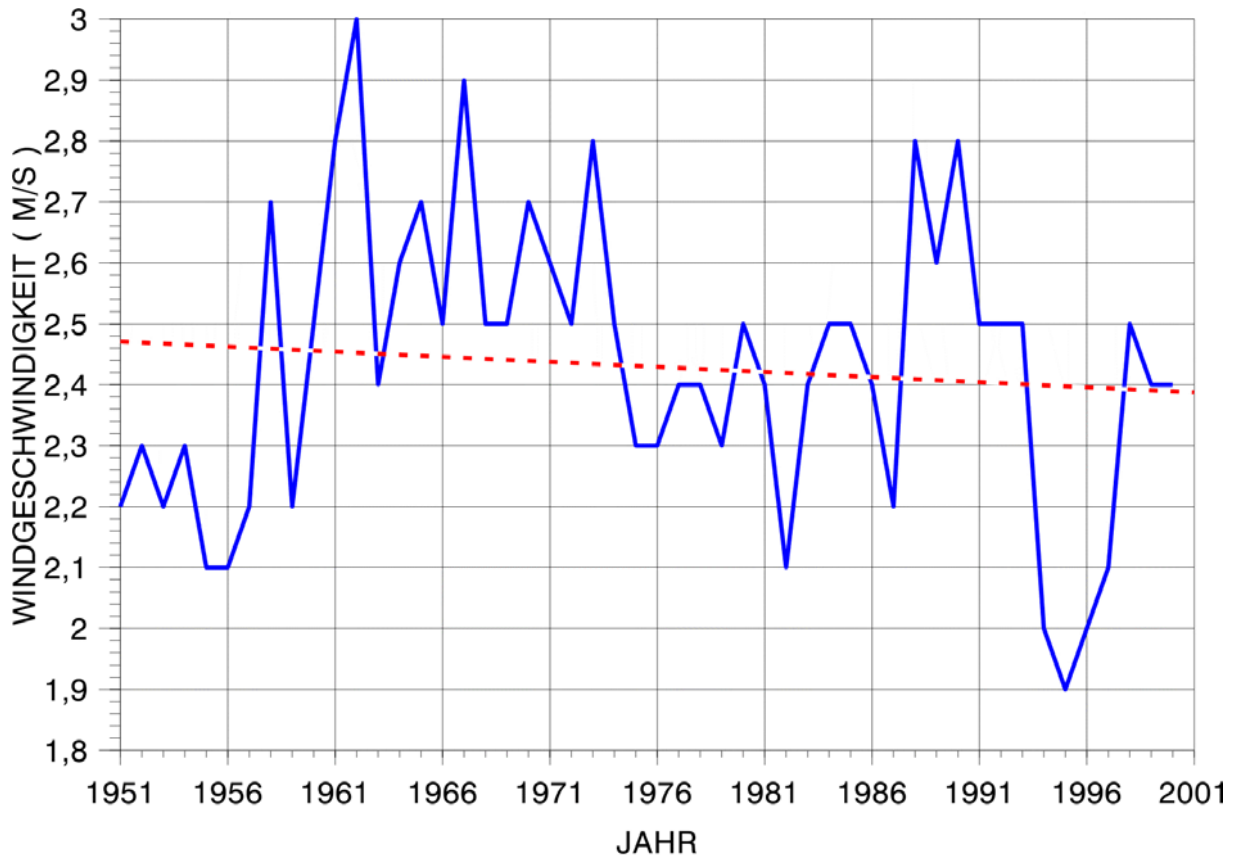


Abb. 11 Jahresmittel der Windgeschwindigkeit Magdeburg 1951 - 2000



# Schema des erweiterten regionalen Szenarienmodells

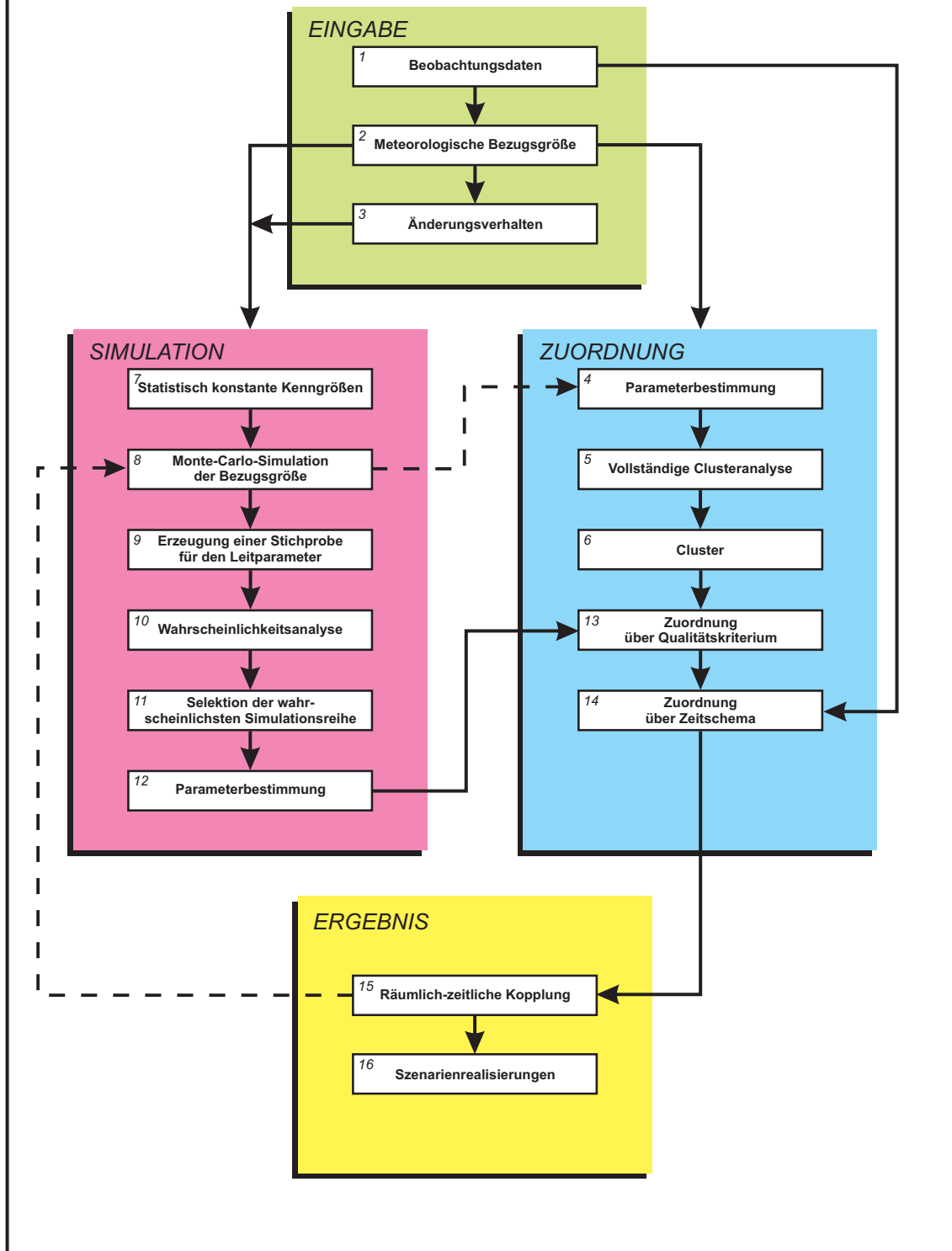


Abb. 12 Szenarienmodellschema

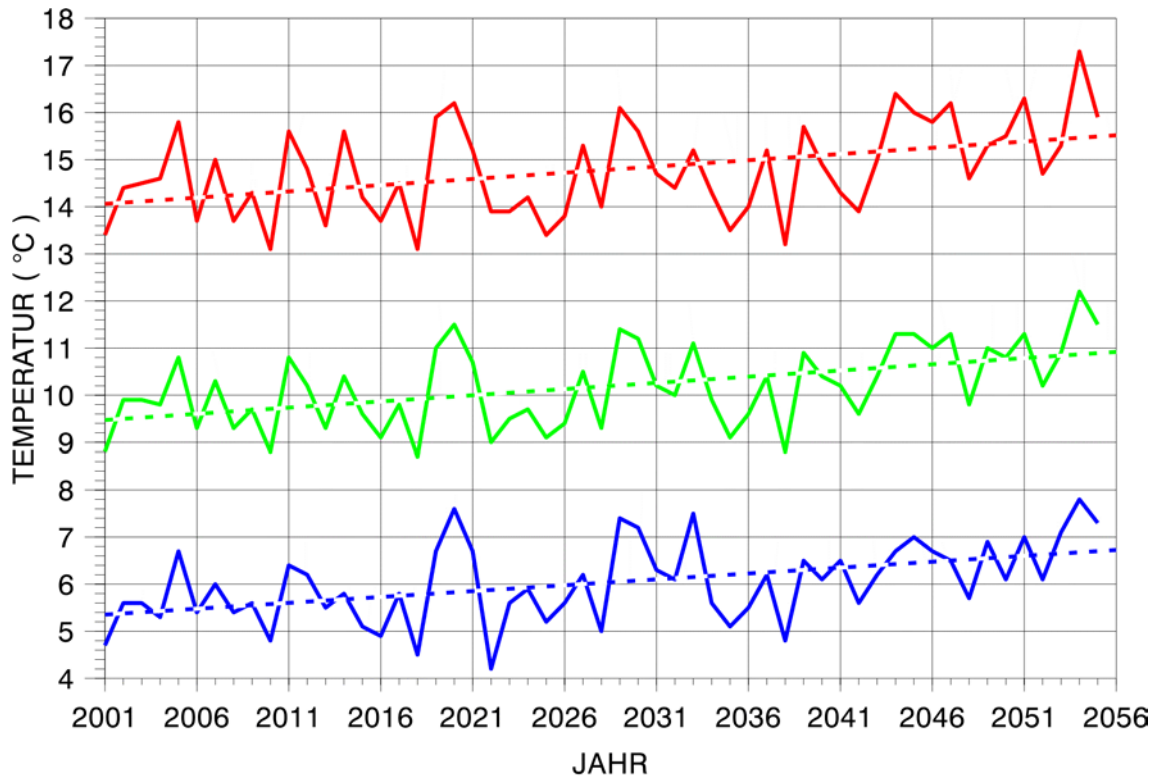


Abb. 13 Jahresmittel der Lufttemperatur Magdeburg, Szenarium 1, 2001 -2055  
(rot = Maximum; grün = Mittel; blau = Minimum)

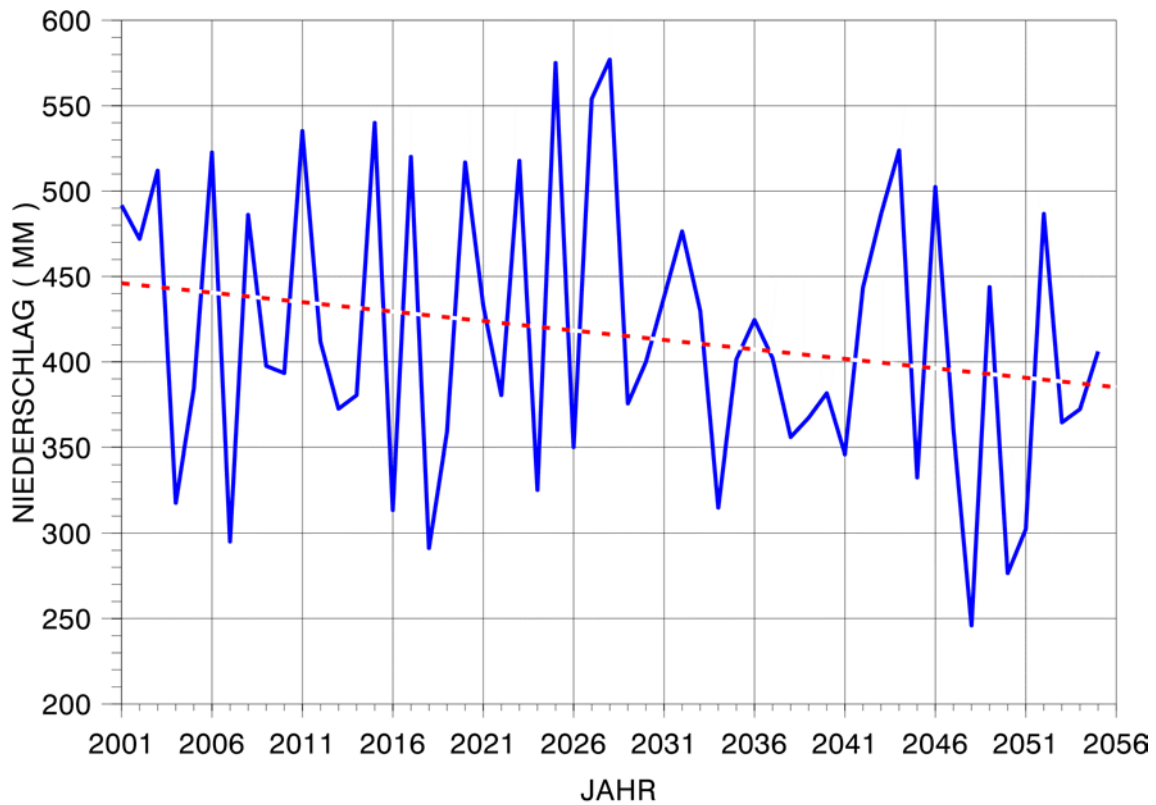


Abb. 14 Jahressumme des Niederschlags Magdeburg, Szenarium 1, 2001 - 2055

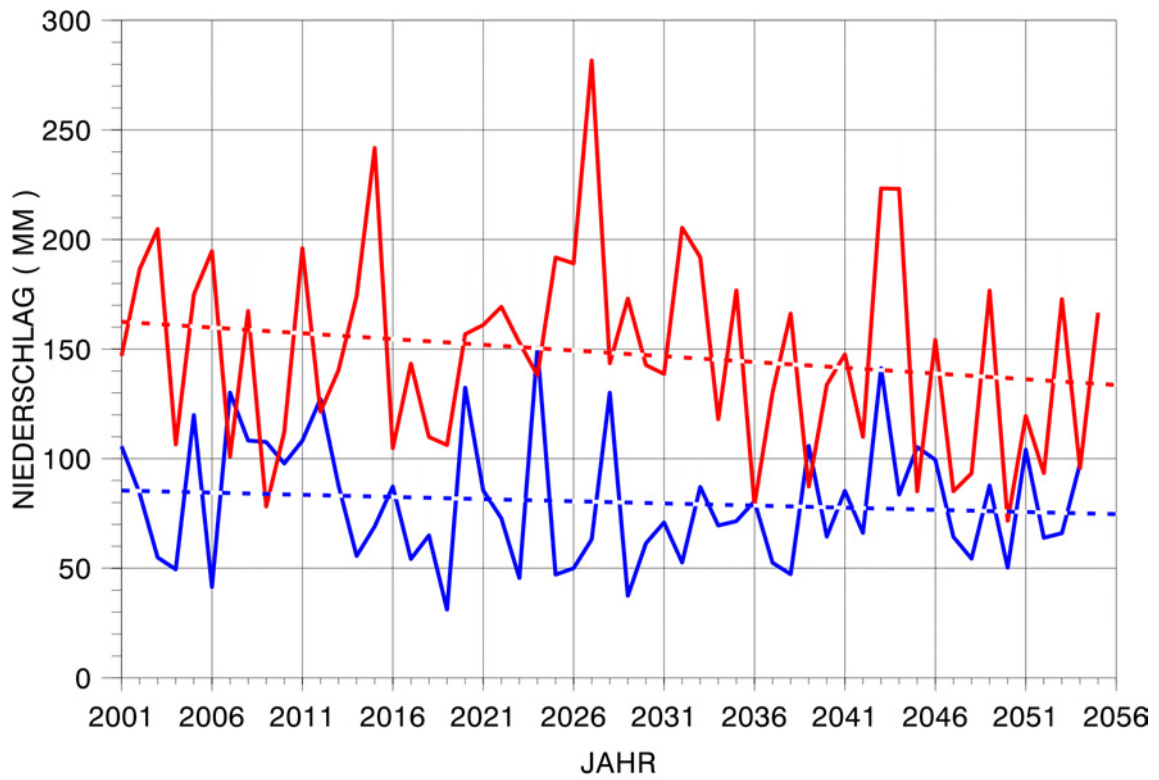
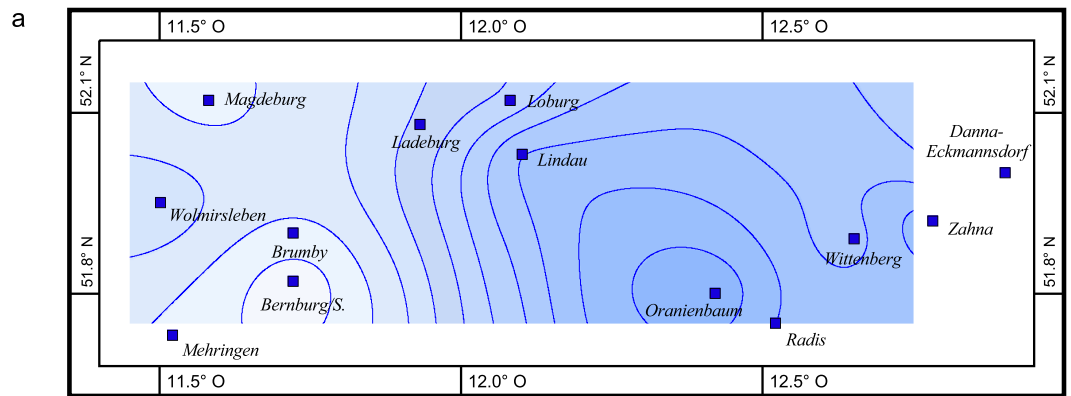
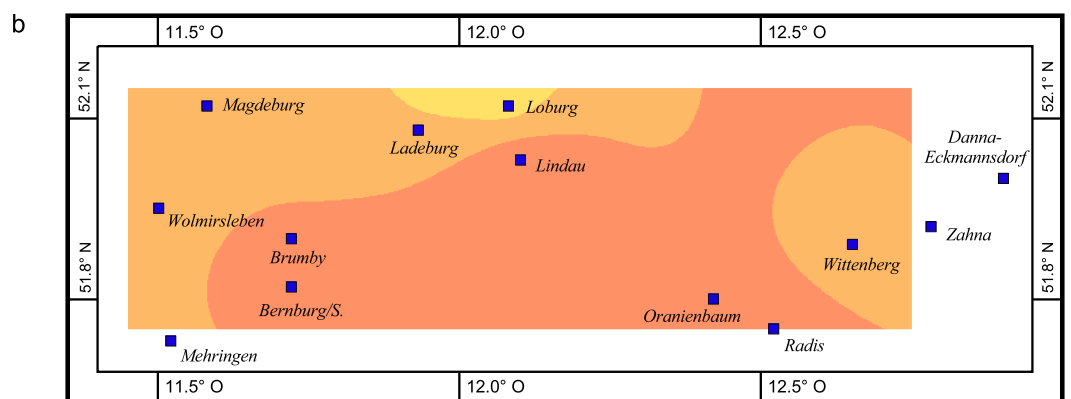
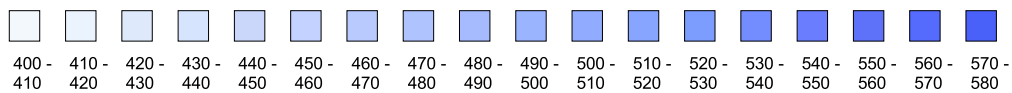


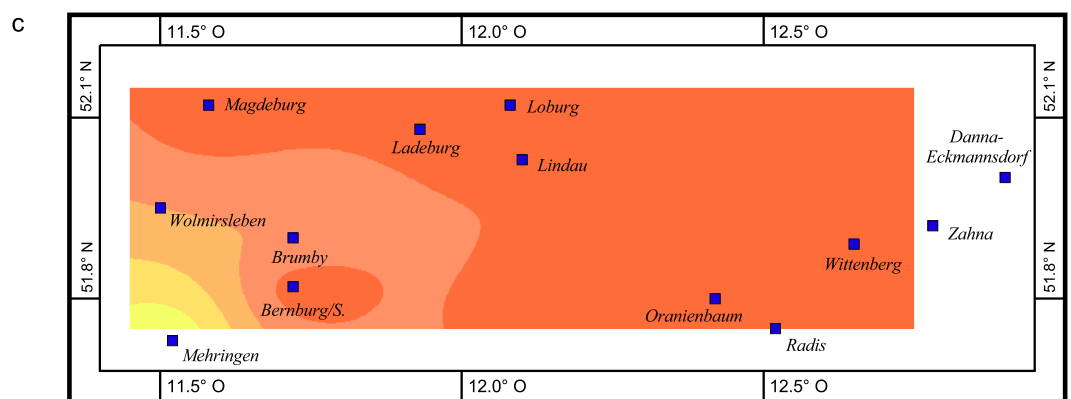
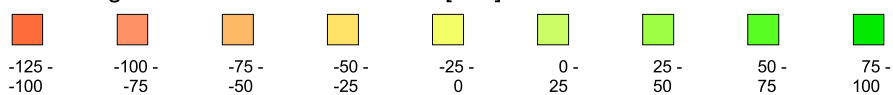
Abb. 15 Summen des Niederschlags Magdeburg, Szenarium 1, 2001 - 2055  
(rot = Sommer; blau = Winter)



Mittlere Jahressumme [mm]



Änderung der mittleren Jahressumme [mm]



Differenz der mittleren Niederschlagssummen [mm]

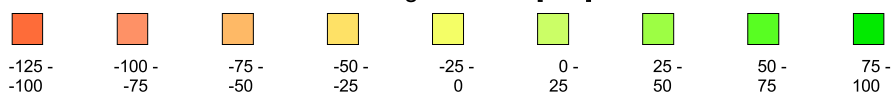


Abb. 16 a Mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen des Niederschlags, 2001 - 2055, Szenarium 1  
 b Mittlere räumliche Verteilung des Trends der Jahressummen des Niederschlags, 2001 - 2055, Szenarium 1  
 c Mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen der Niederschlagsdifferenz 2046/55 - 1951/2000, Szenarium 1

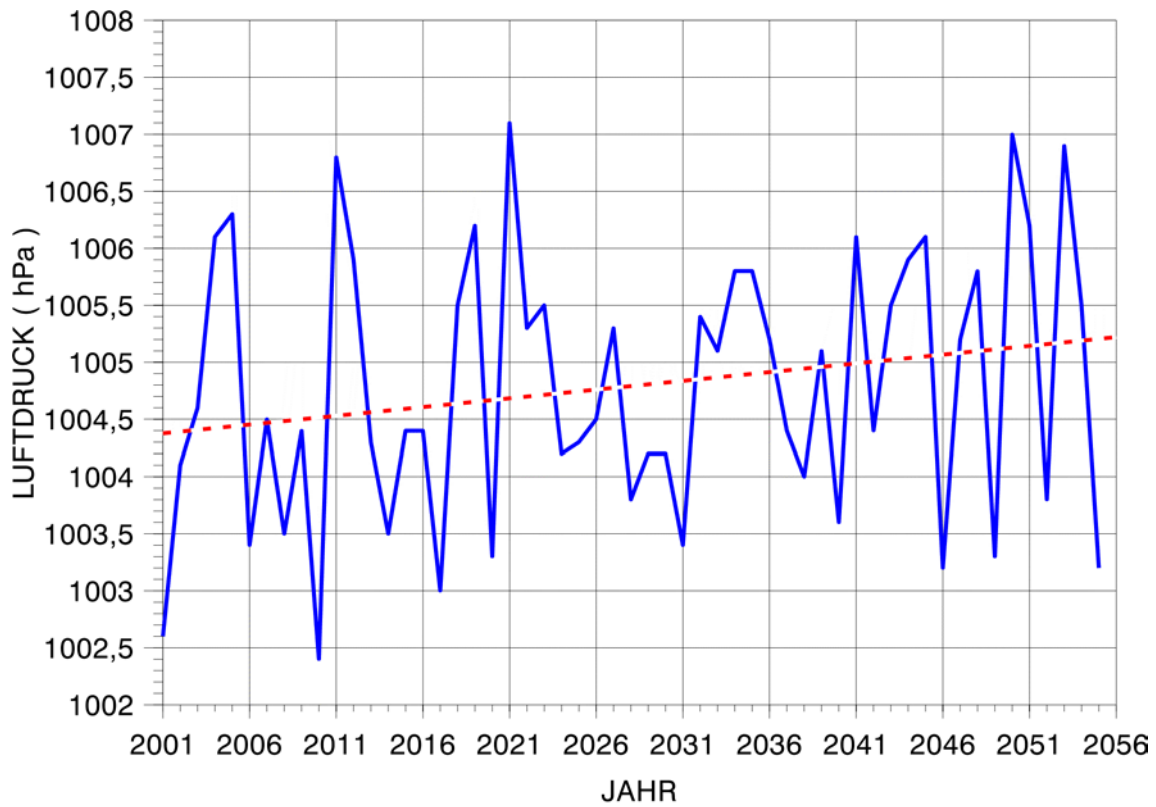


Abb. 17 Jahresmittel des Luftdrucks Magdeburg, Szenarium 1, 2001 - 2055

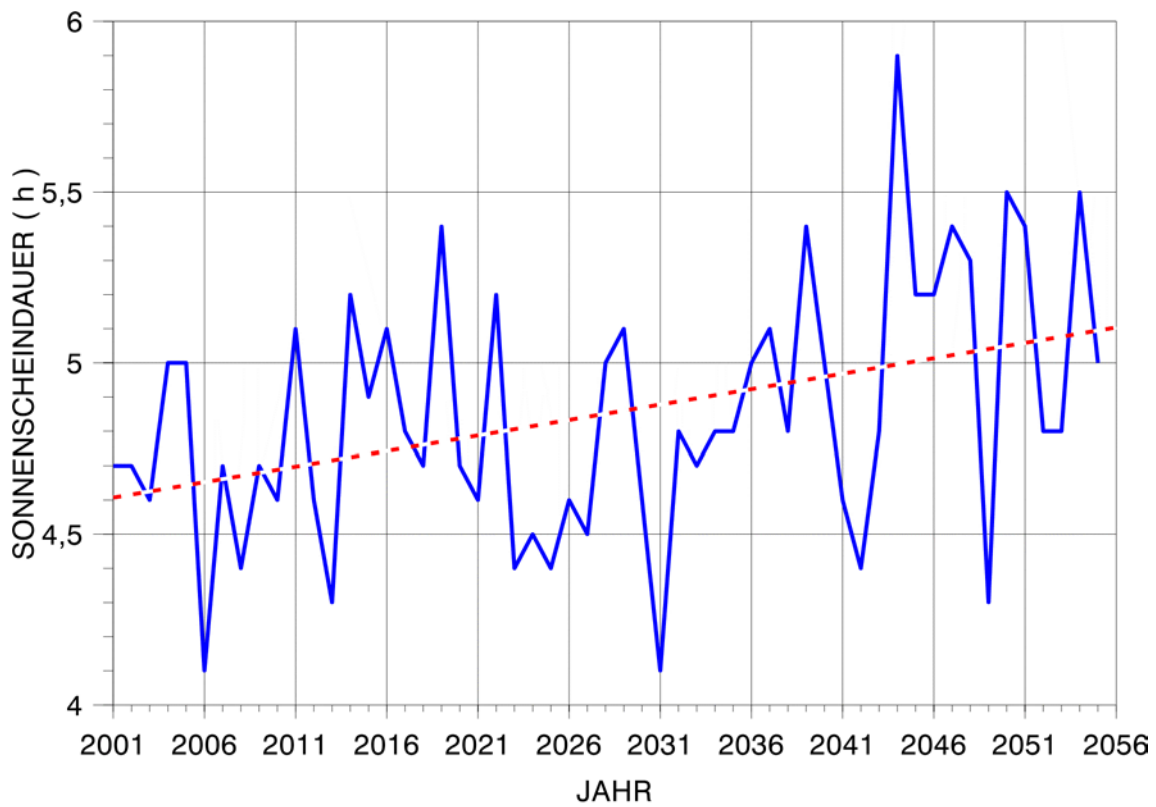


Abb. 18 Jahresmittel der Sonnenscheindauer Magdeburg, Szenarium 1, 2001 - 2055

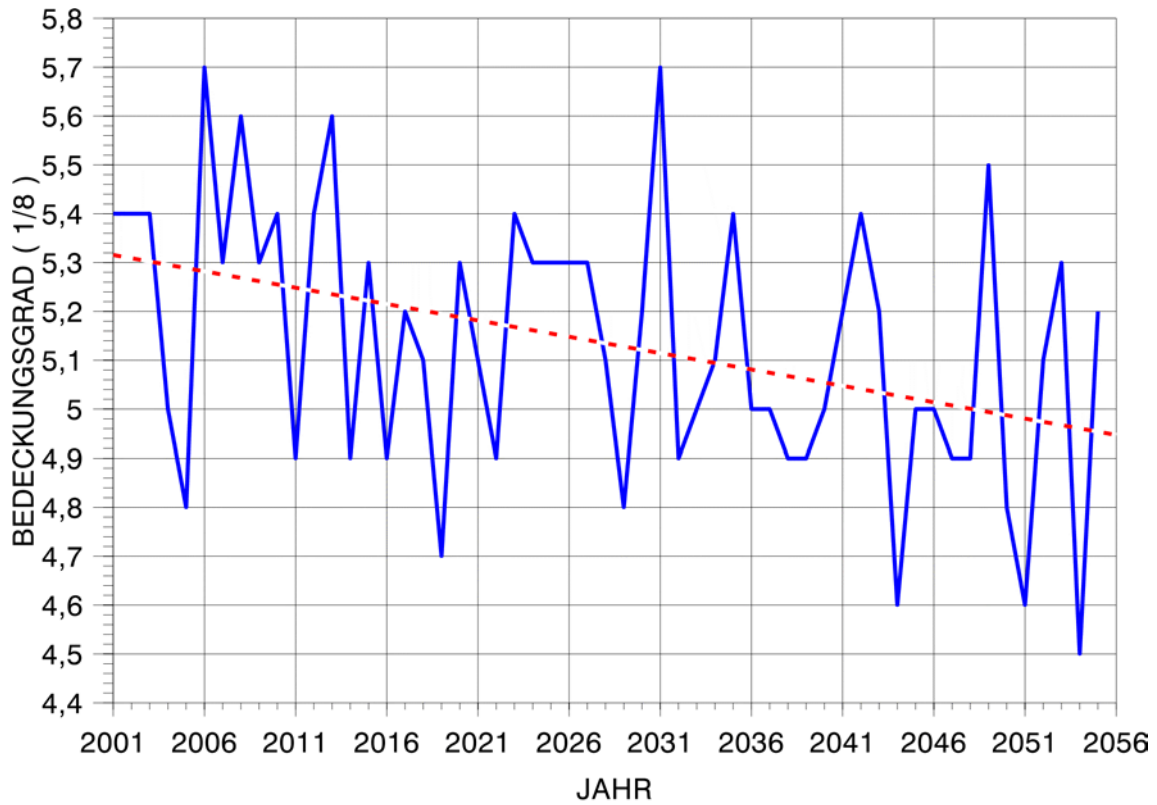


Abb. 19 Jahresmittel der Bewölkung Magdeburg, Szenarium 1, 2001 - 2055

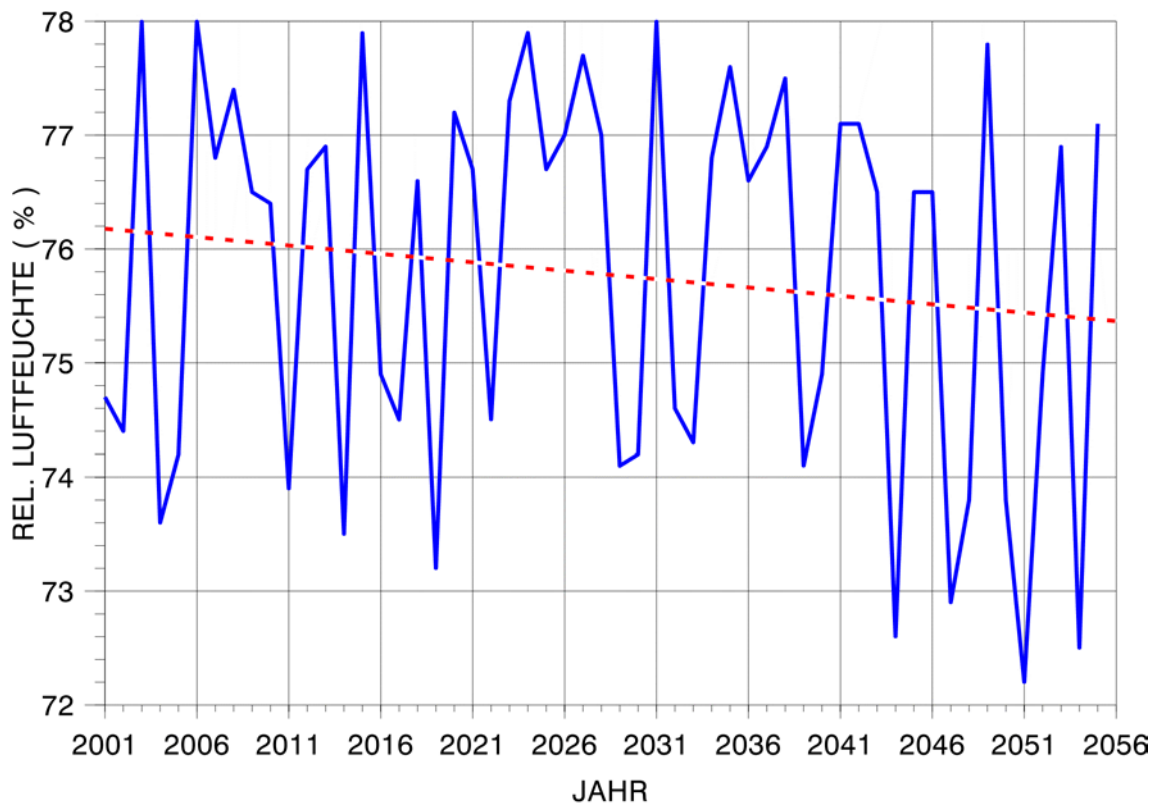


Abb. 20 Jahresmittel der relativen Luftfeuchte Magdeburg, Szenarium1 , 2001 - 2055

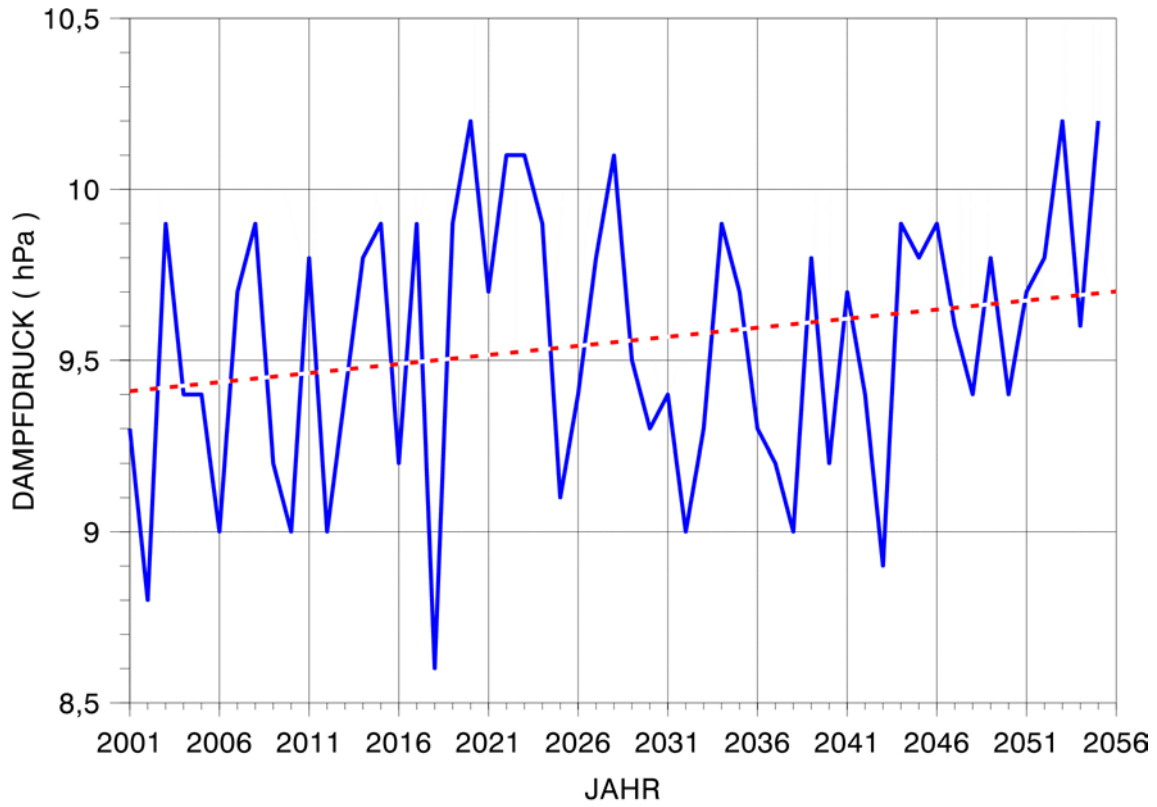


Abb. 21 Jahresmittel des Dampfdrucks Magdeburg, Szenarium 1, 2001 - 2055

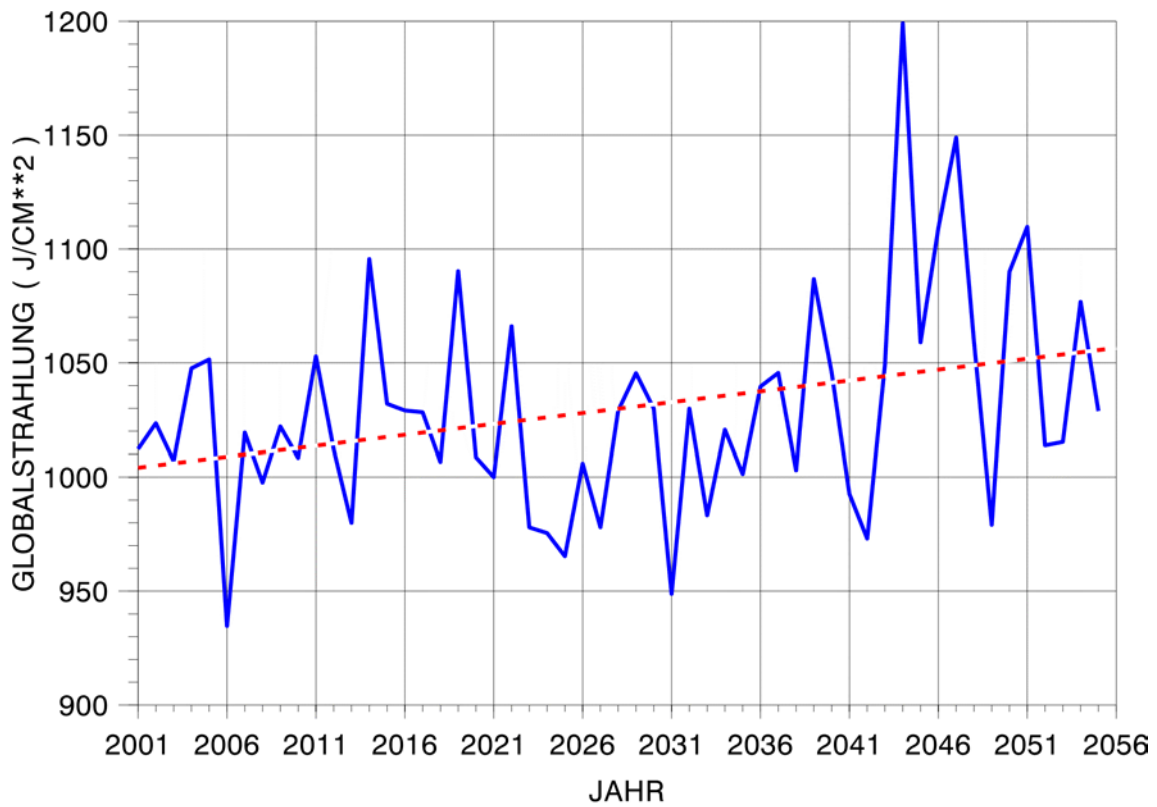


Abb. 22 Jahresmittel der Globalstrahlung Magdeburg, Szenarium 1, 2001 - 2055

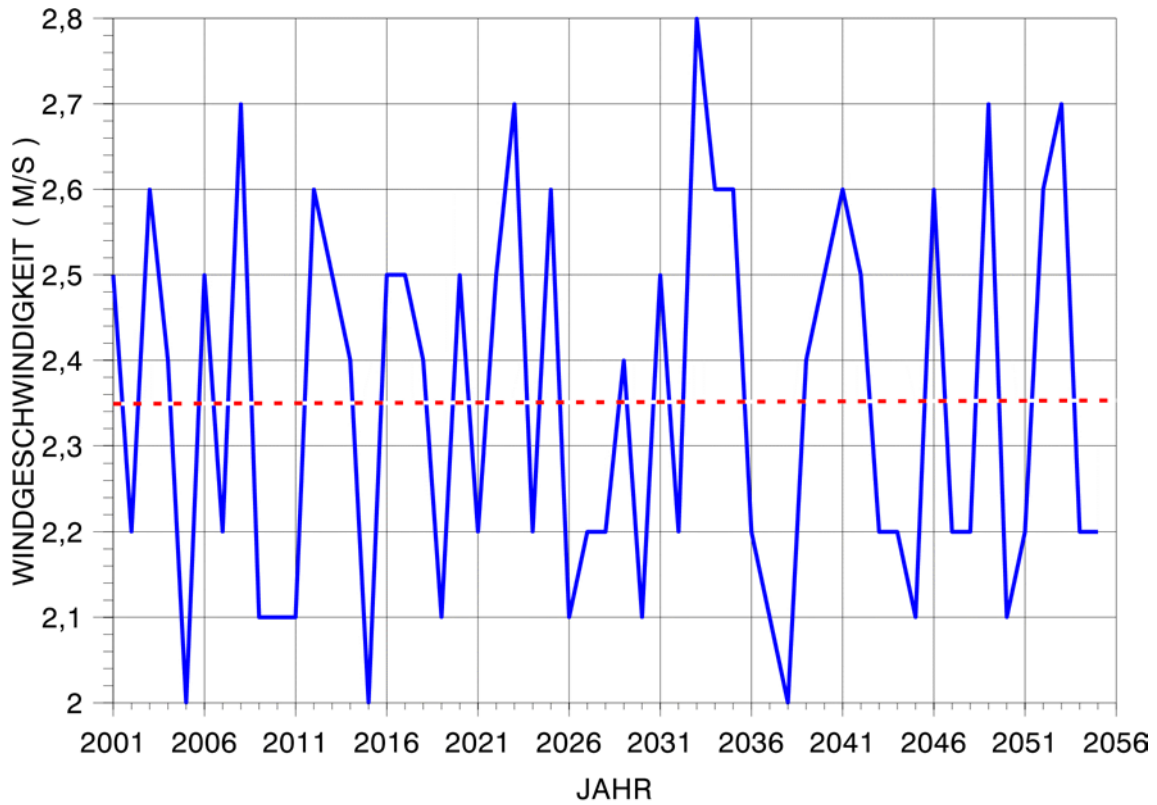


Abb. 23 Jahresmittel der Windgeschwindigkeit Magdeburg, Szenarium 1, 2001 - 2055

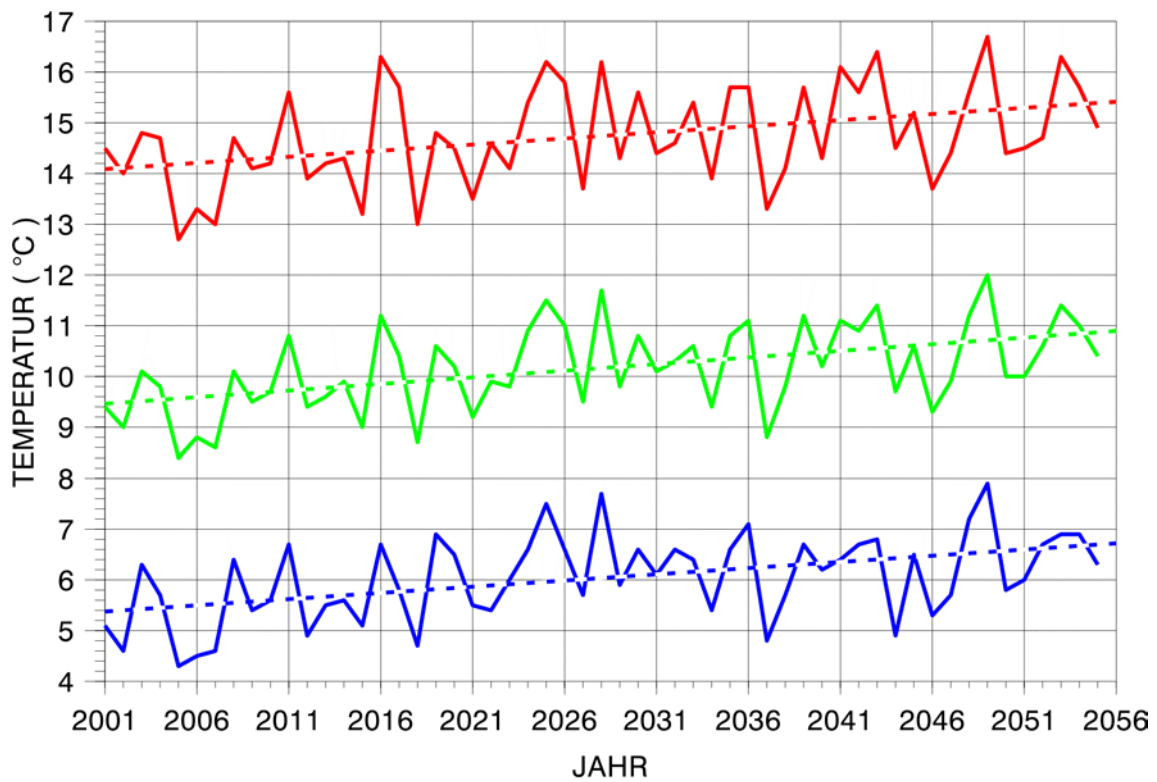


Abb. 24 Jahresmittel der Lufttemperatur Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055  
(rot = Maximum; grün = Mittel; blau = Minimum)



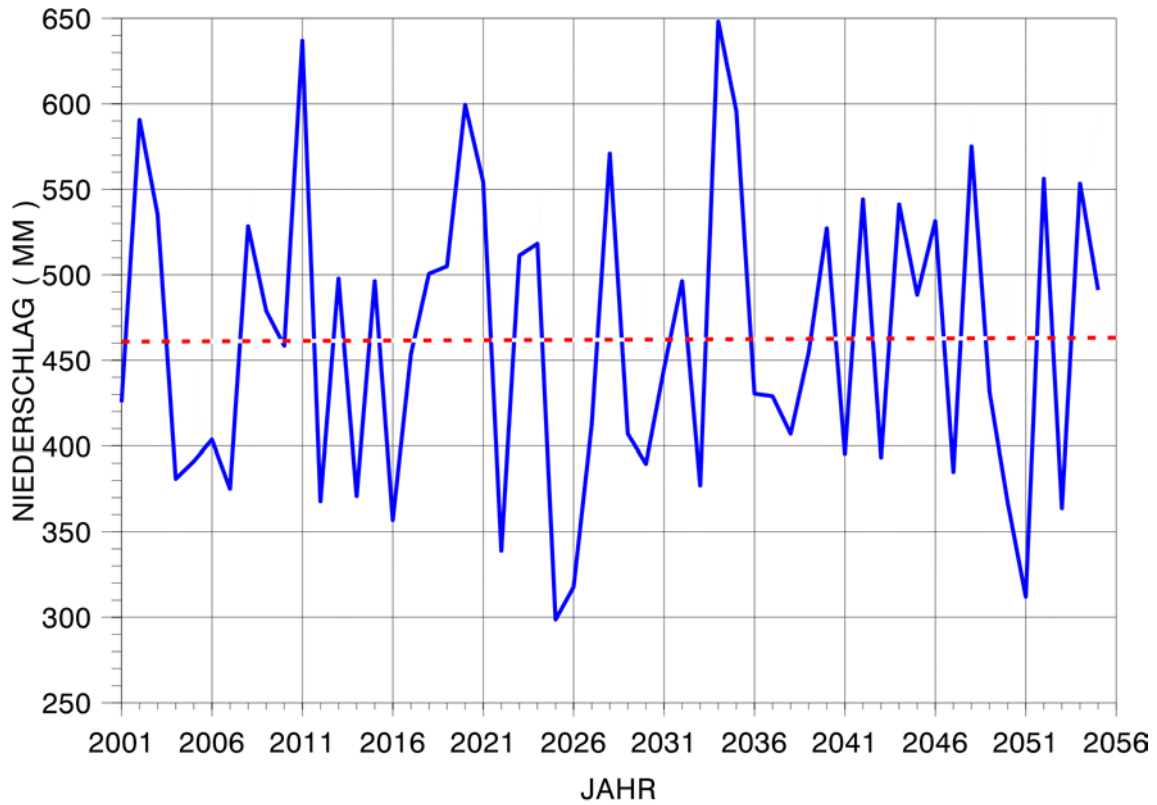


Abb. 25 Jahressumme des Niederschlags Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055

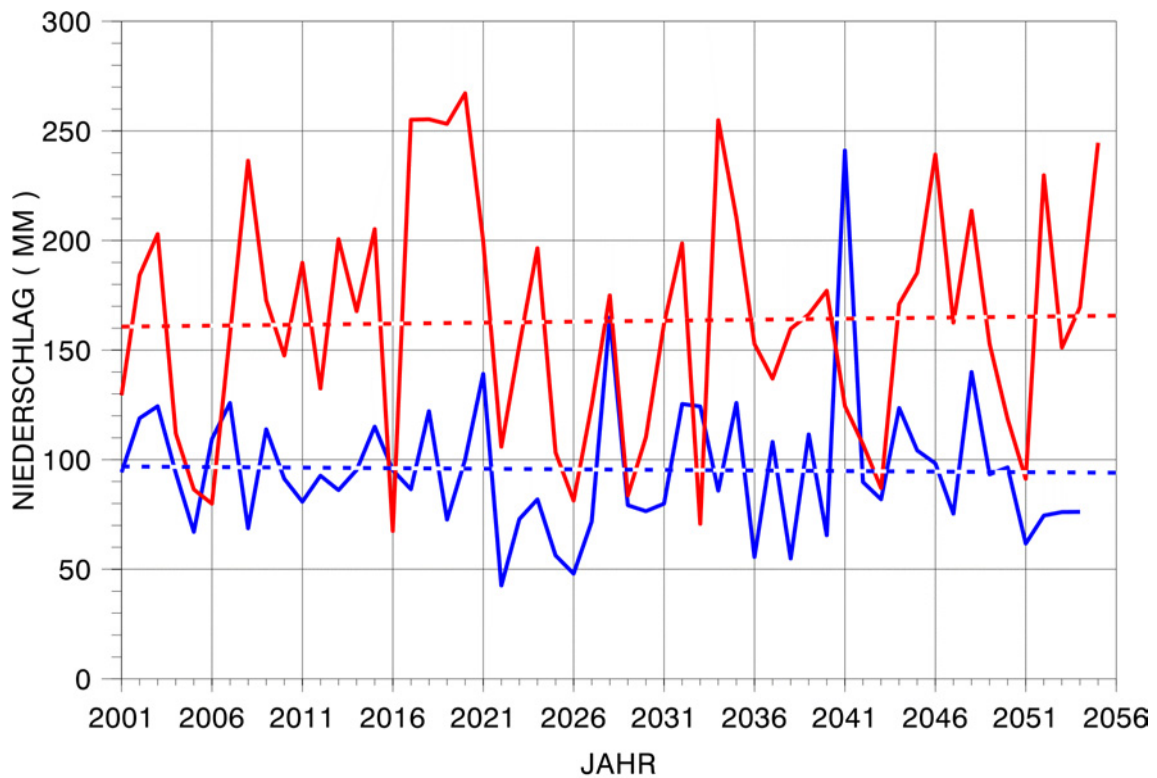
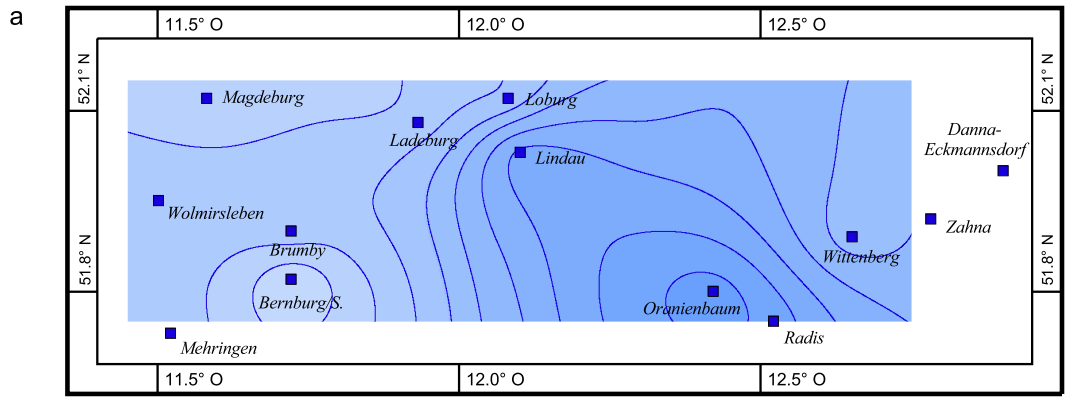
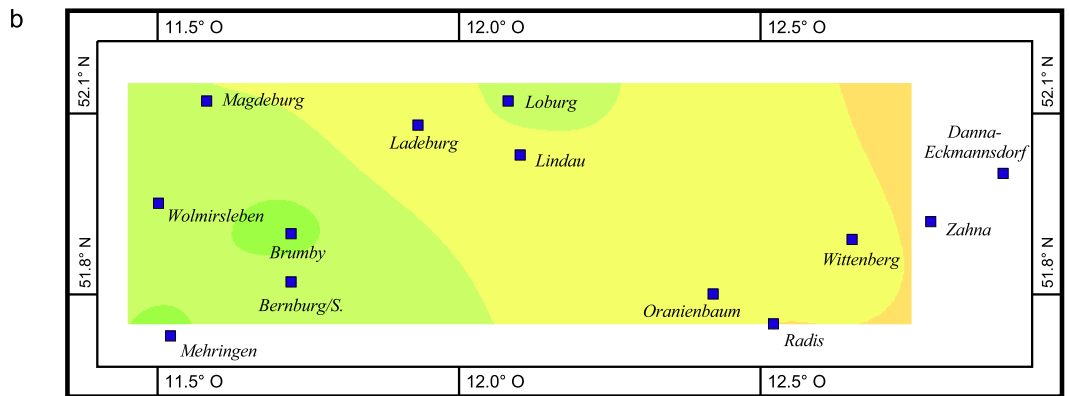
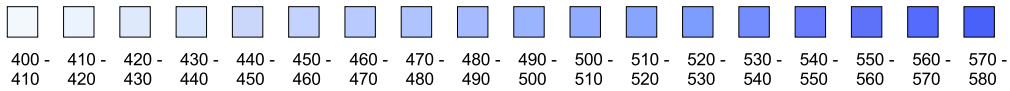


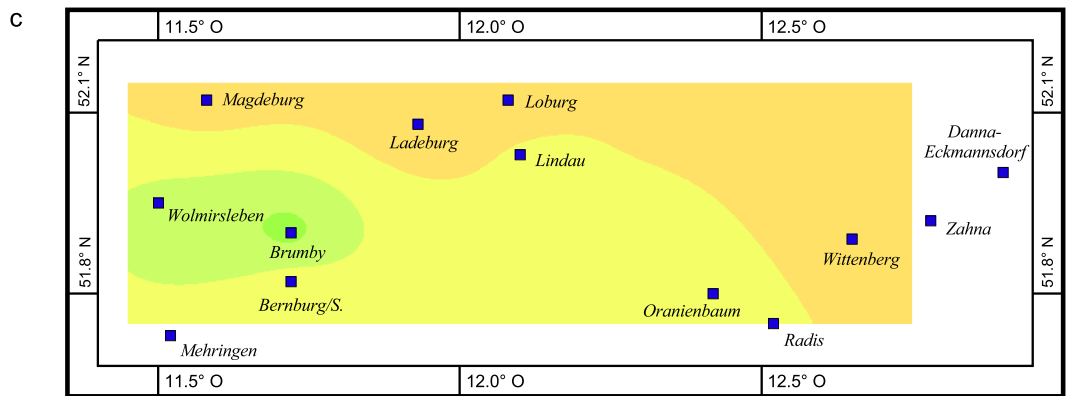
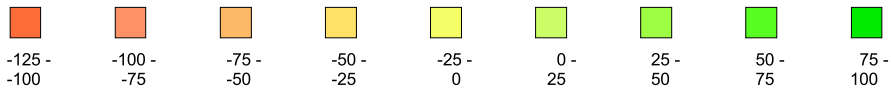
Abb. 26 Summen des Niederschlags Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055  
(rot = Sommer; blau = Winter)



Mittlere Jahressumme [mm]



Änderung der mittleren Jahressumme [mm]



Differenz der mittleren Niederschlagssummen [mm]

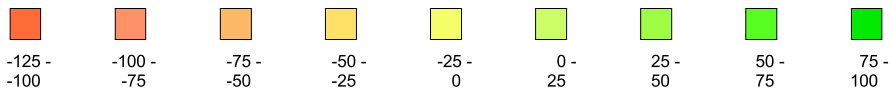


Abb. 27 a Mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen des Niederschlags, 2001 - 2055, Szenarium 2  
 b Mittlere räumliche Verteilung des Trends der Jahressummen des Niederschlags, 2001 - 2055, Szenarium 2  
 c Mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen der Niederschlagsdifferenz 2046/55 - 1951/2000, Szenarium 2

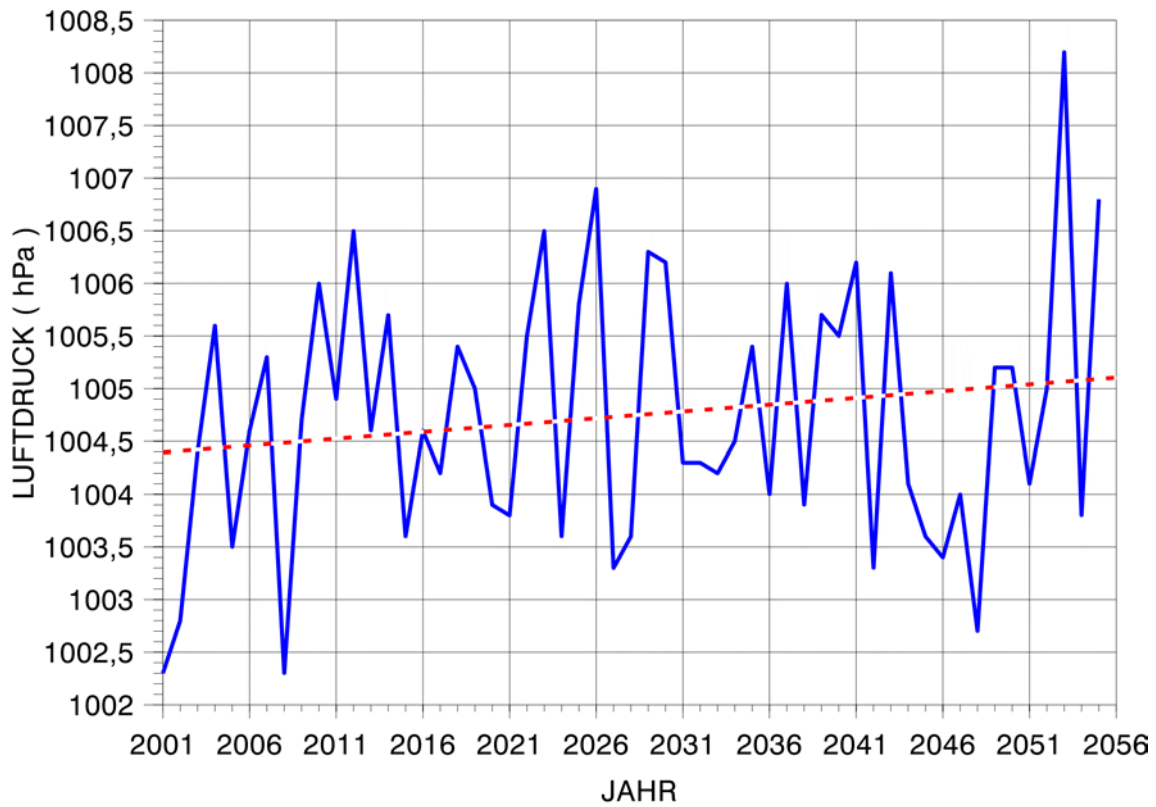


Abb. 28 Jahresmittel des Luftdrucks Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055

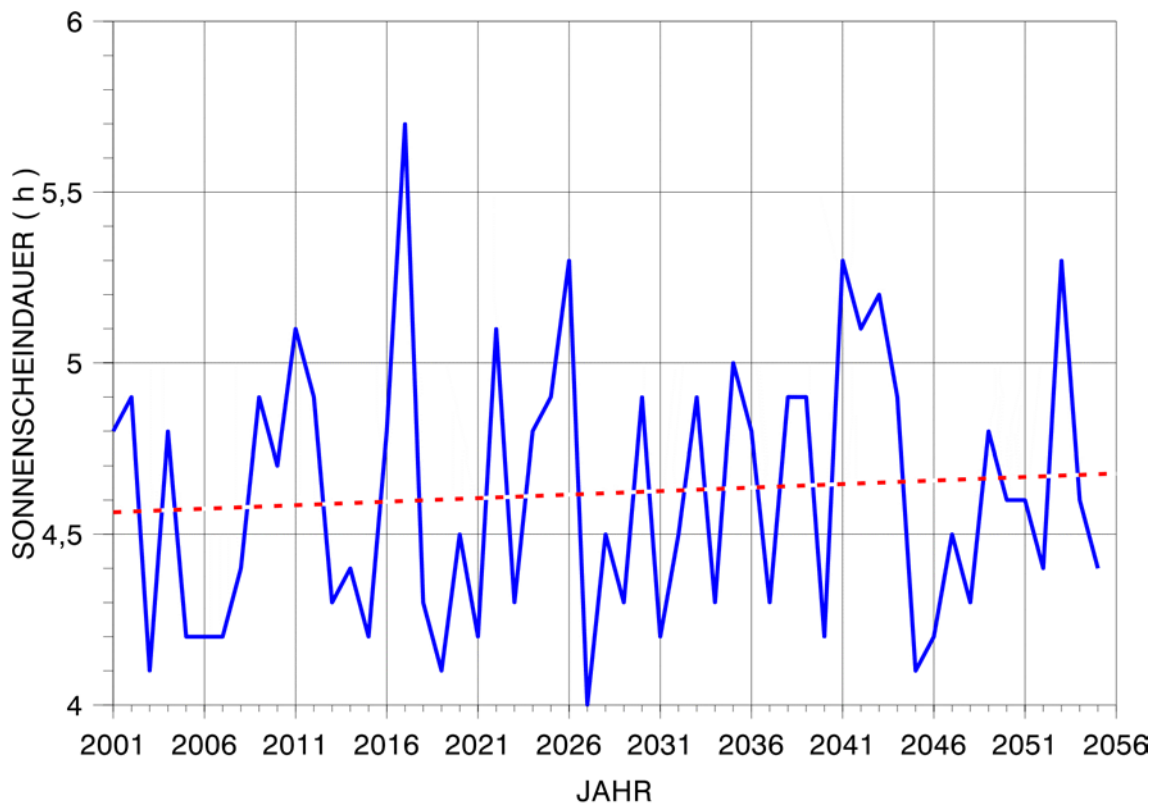


Abb. 29 Jahresmittel der Sonnenscheindauer Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055

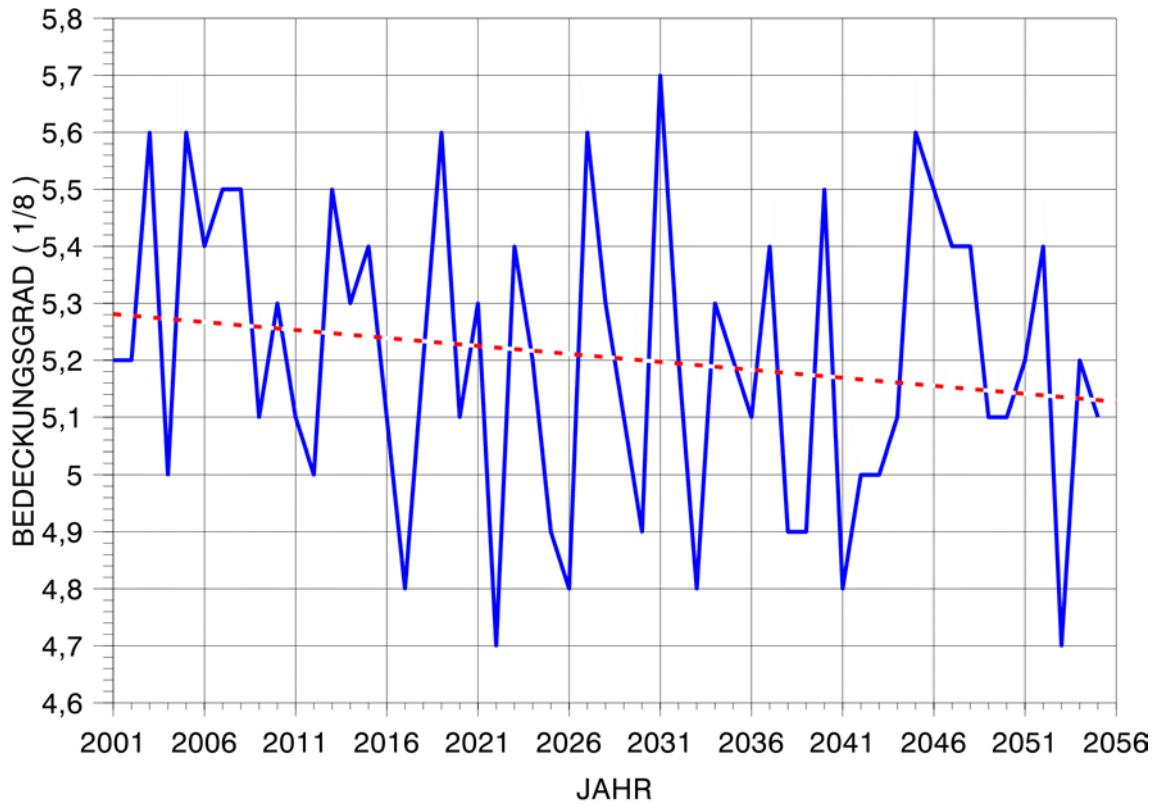


Abb. 30 Jahresmittel der Bewölkung Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055

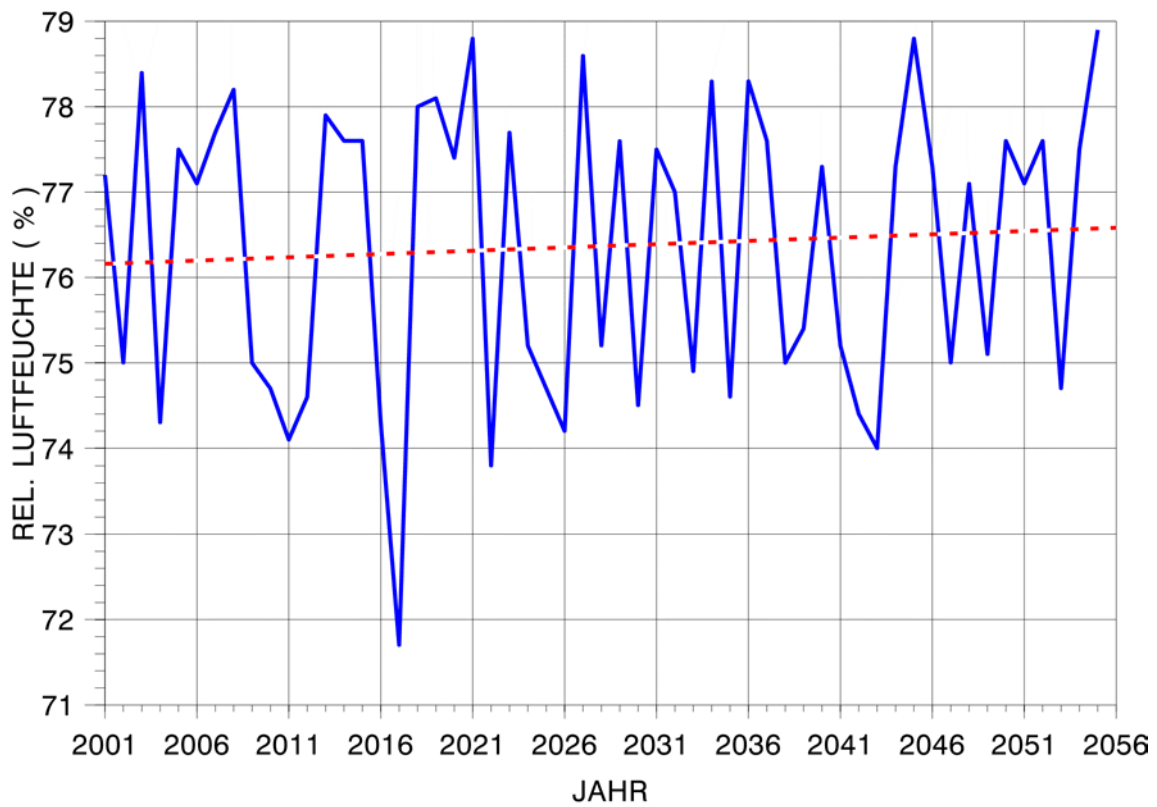


Abb. 31 Jahresmittel der relativen Luftfeuchte Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055

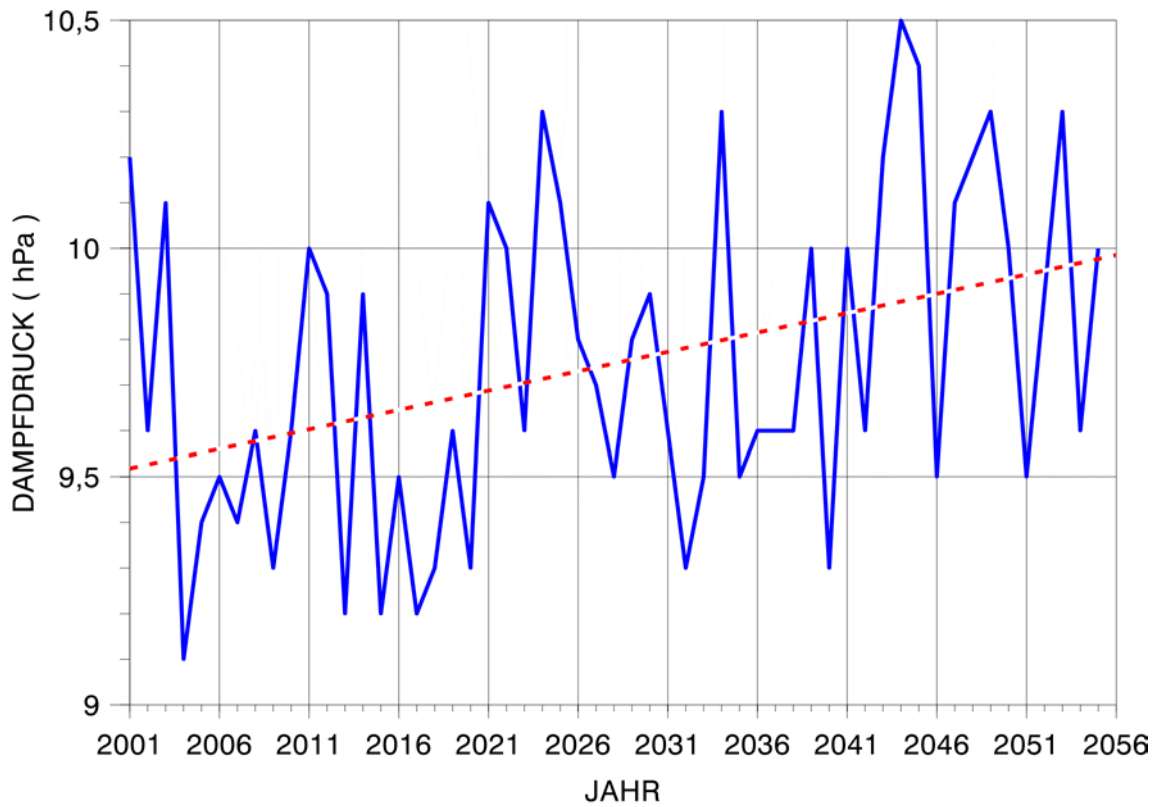


Abb. 32 Jahresmittel des Dampfdrucks Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055

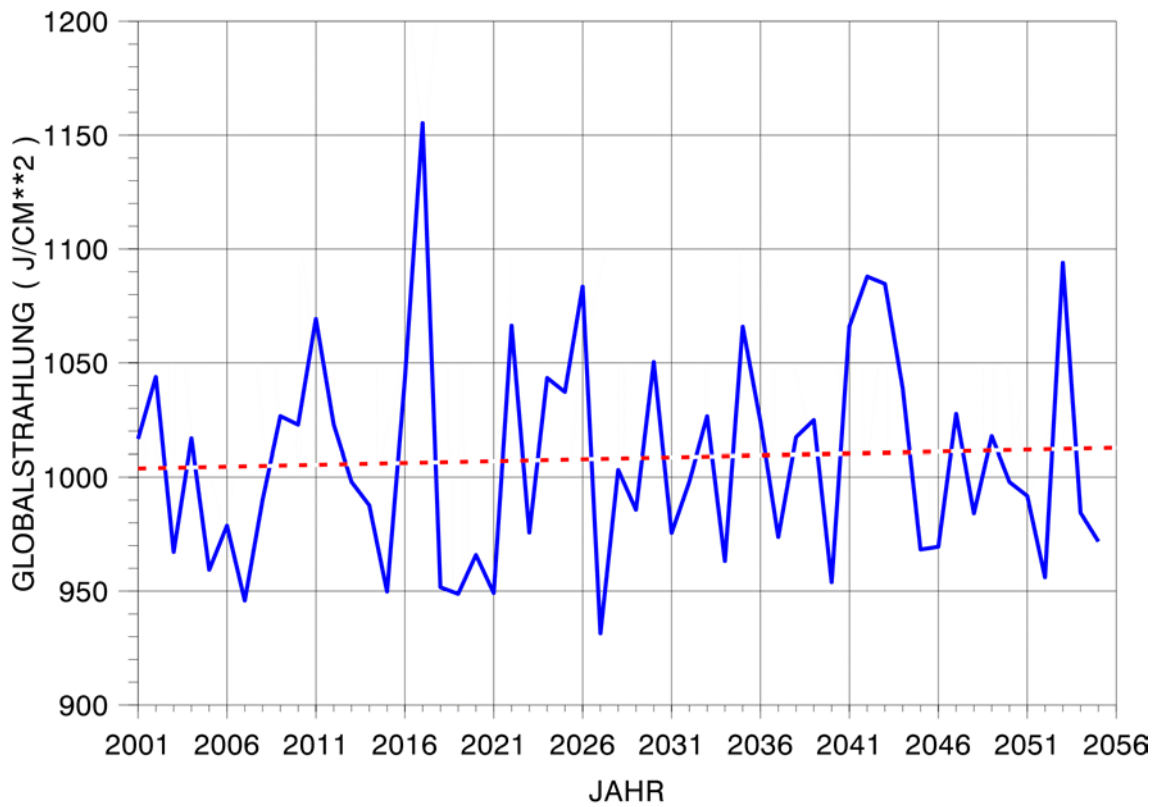


Abb. 33 Jahresmittel der Globalstrahlung Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055

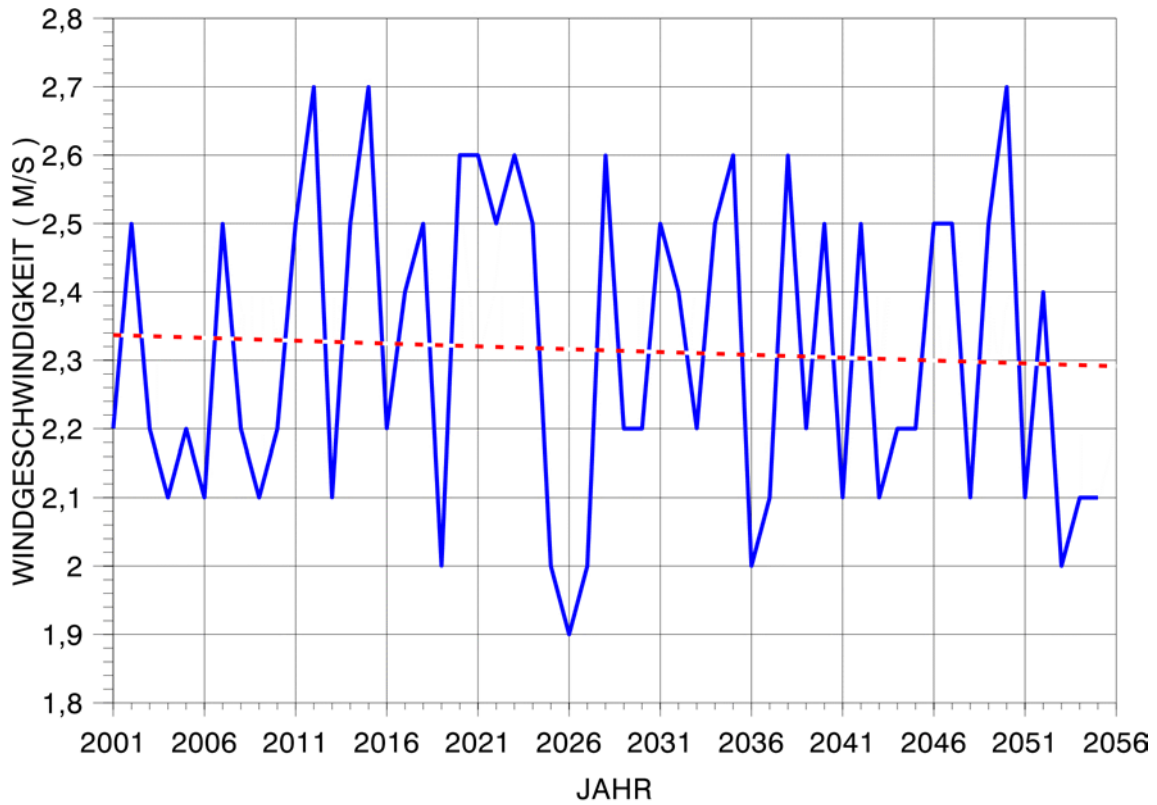


Abb. 34 Jahresmittel der Windgeschwindigkeit Magdeburg, Szenarium 2, 2001 - 2055

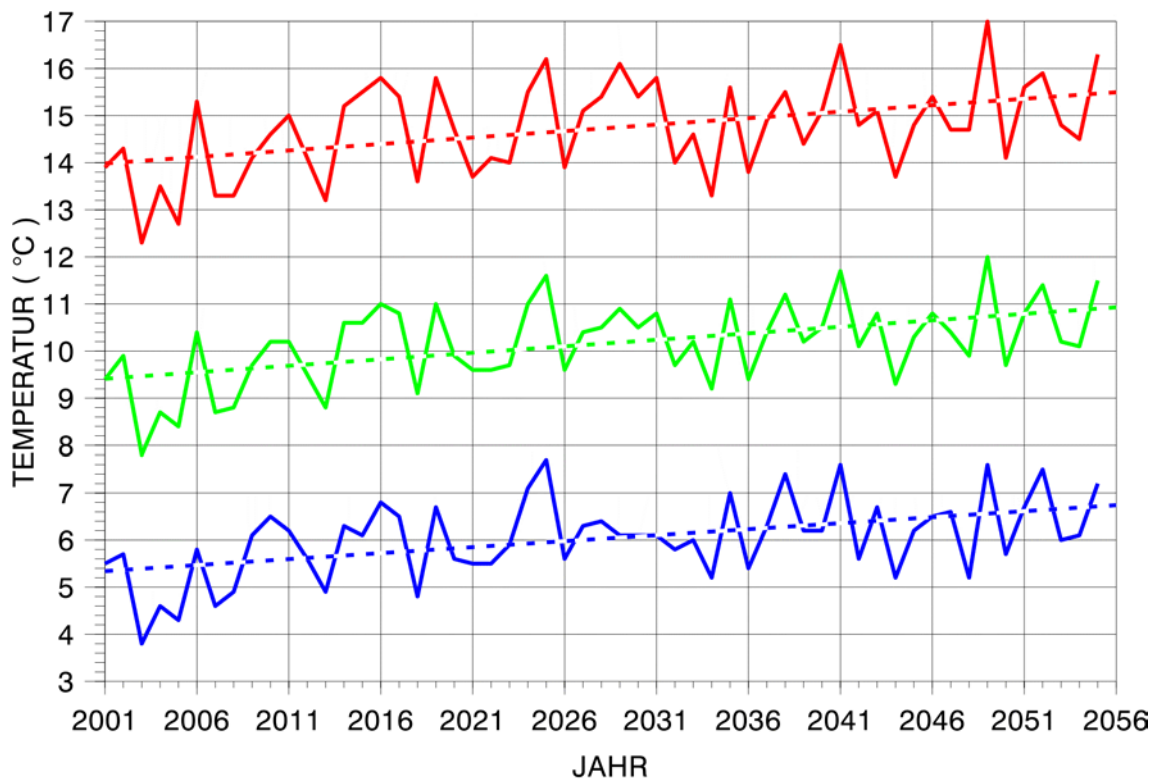


Abb. 35 Jahresmittel der Lufttemperatur Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055  
(rot = Maximum; grün = Mittel; blau = Minimum)

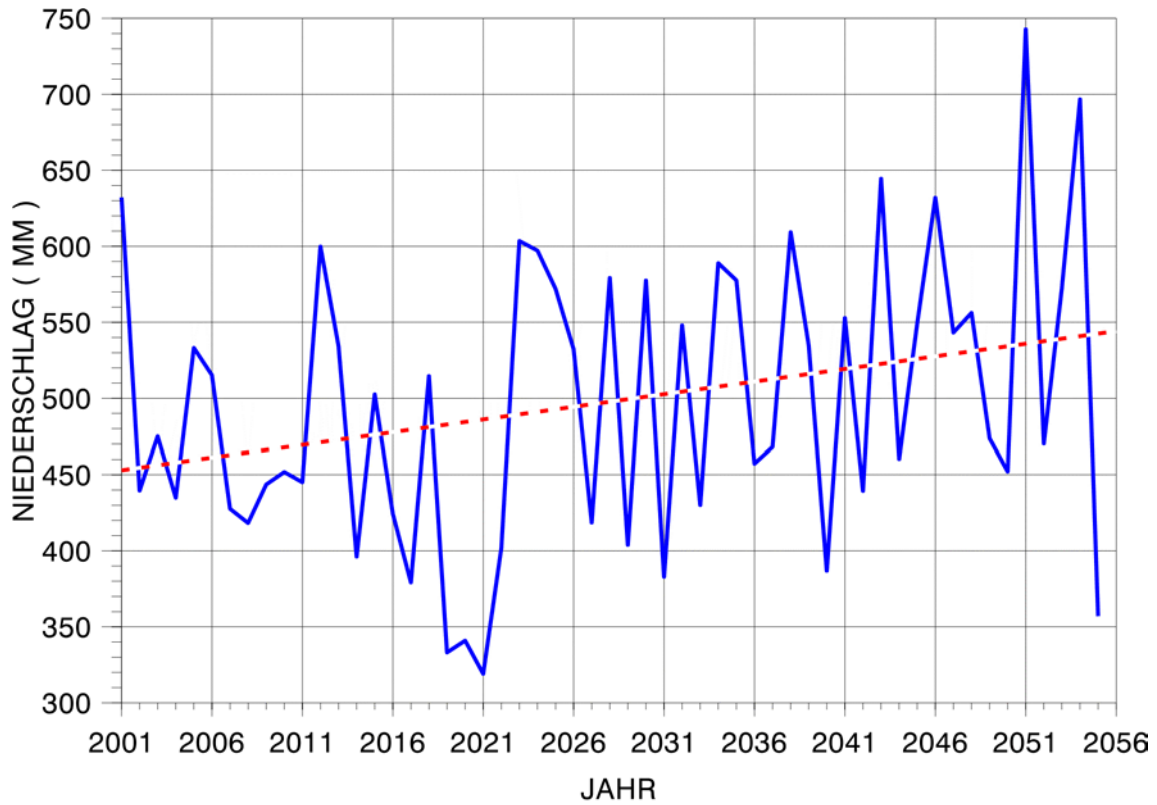


Abb. 36 Jahressumme des Niederschlags Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055

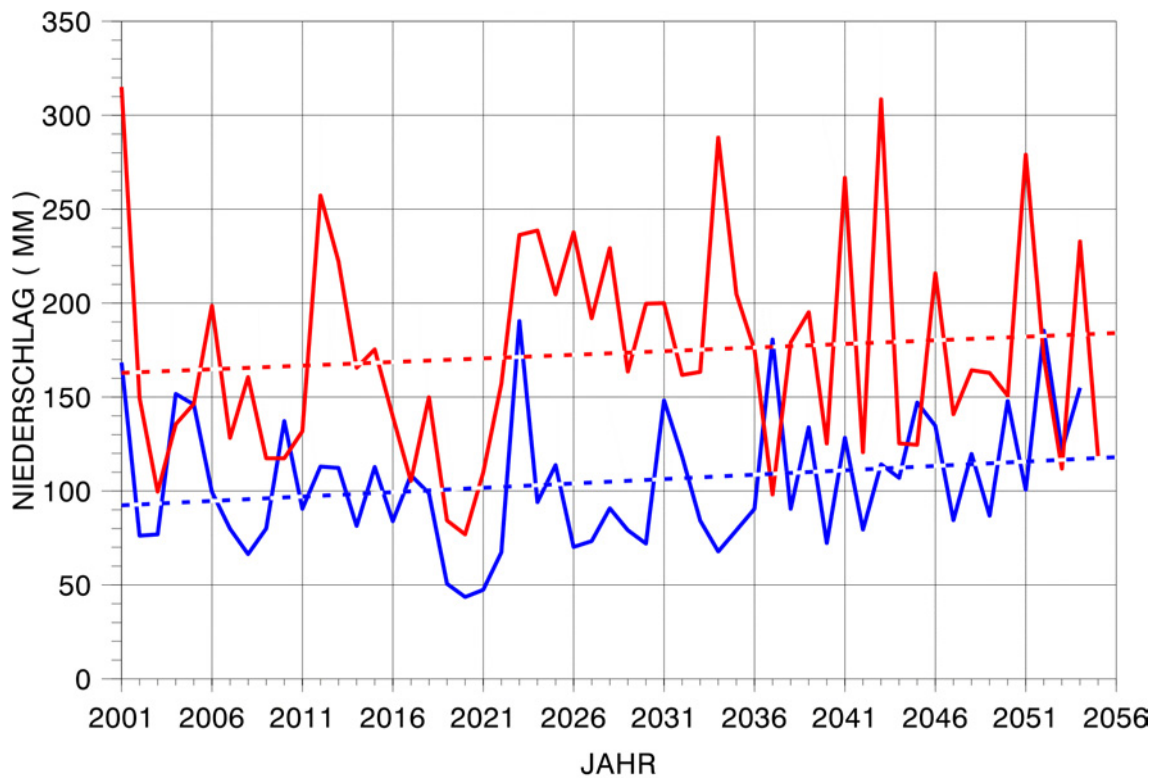
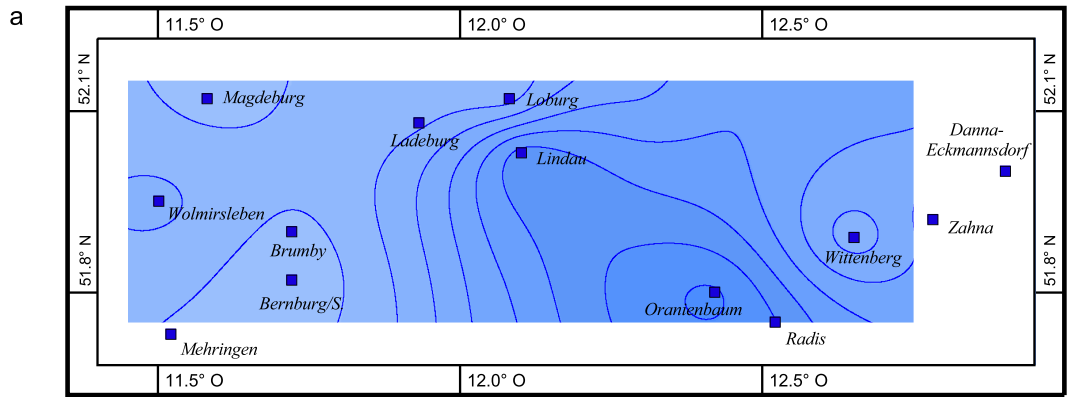
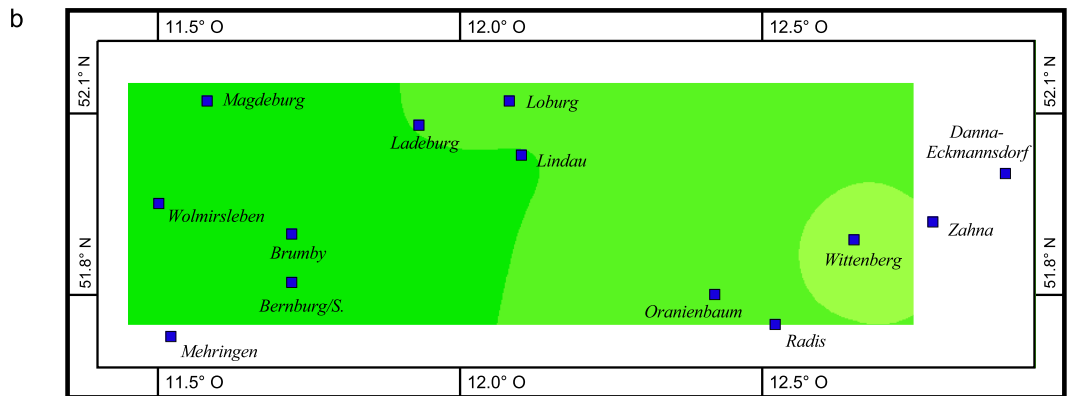
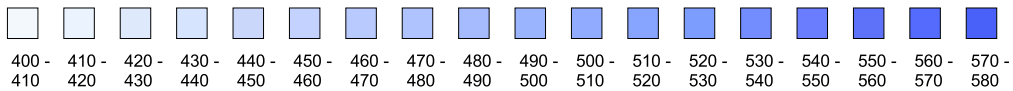


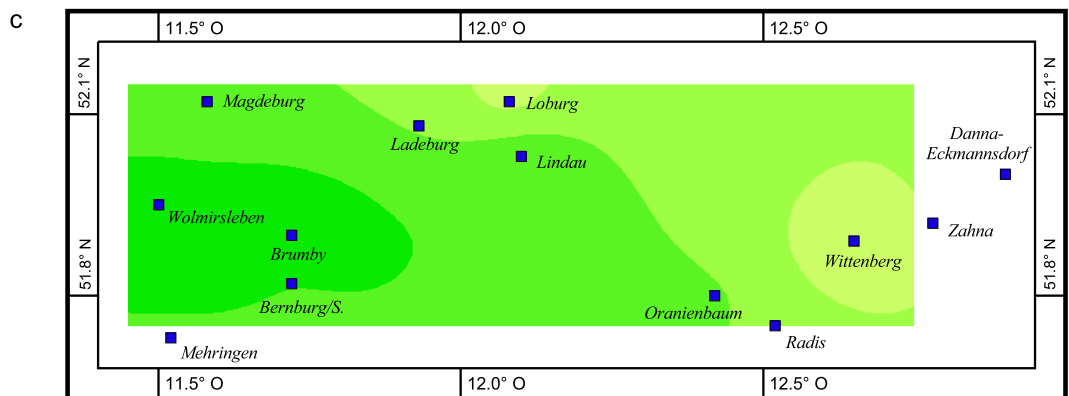
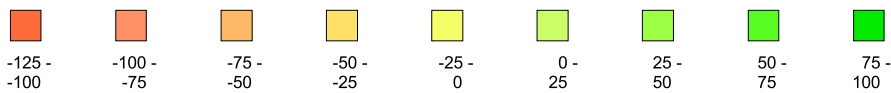
Abb. 37 Summen des Niederschlags Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055  
(rot = Sommer; blau = Winter)



Mittlere Jahressumme [mm]



Änderung der mittleren Jahressumme [mm]



Differenz der mittleren Niederschlagssummen [mm]

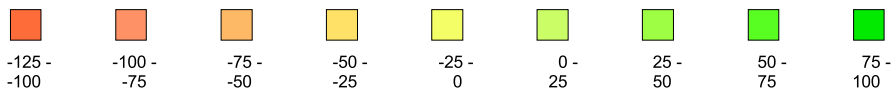


Abb. 38 a Mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen des Niederschlags, 2001 - 2055, Szenarium 3  
 b Mittlere räumliche Verteilung des Trends der Jahressummen des Niederschlags, 2001 - 2055, Szenarium 3  
 c Mittlere räumliche Verteilung der Jahressummen der Niederschlagsdifferenz 2046/55 - 1951/2000, Szenarium 3



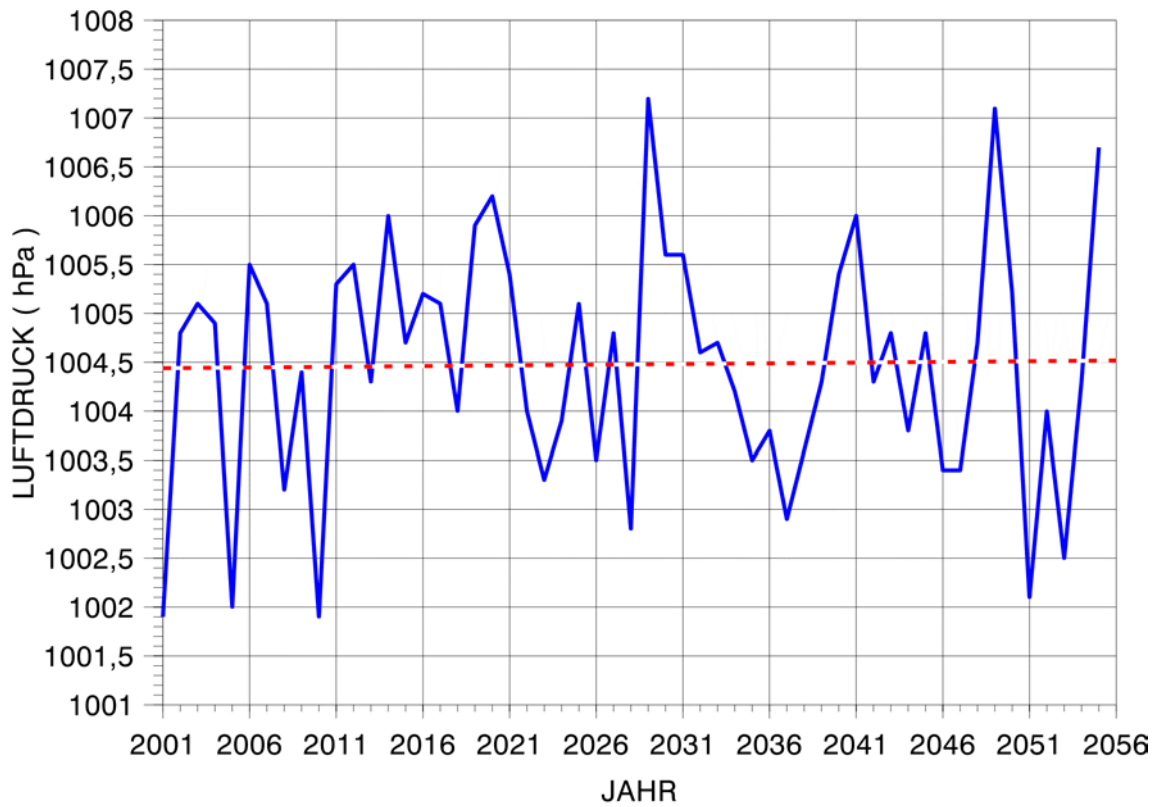


Abb. 39 Jahresmittel des Luftdrucks Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055

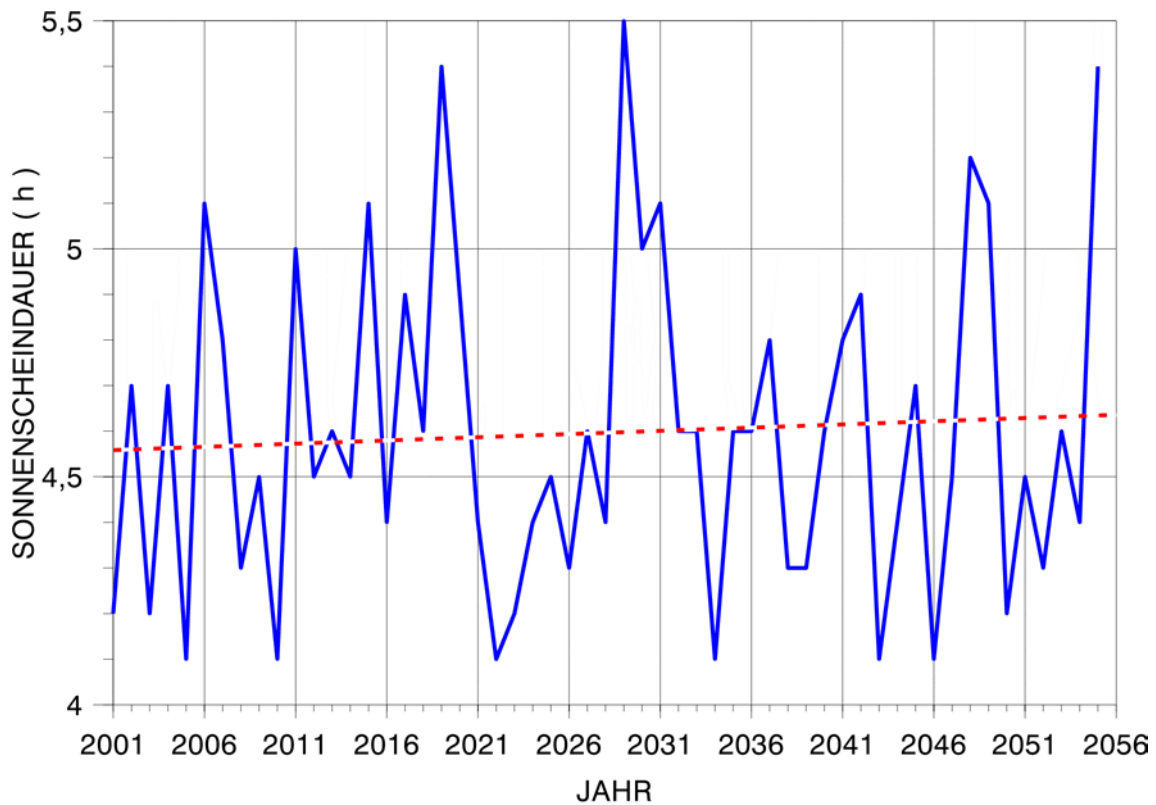


Abb. 40 Jahresmittel der Sonnenscheindauer Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055

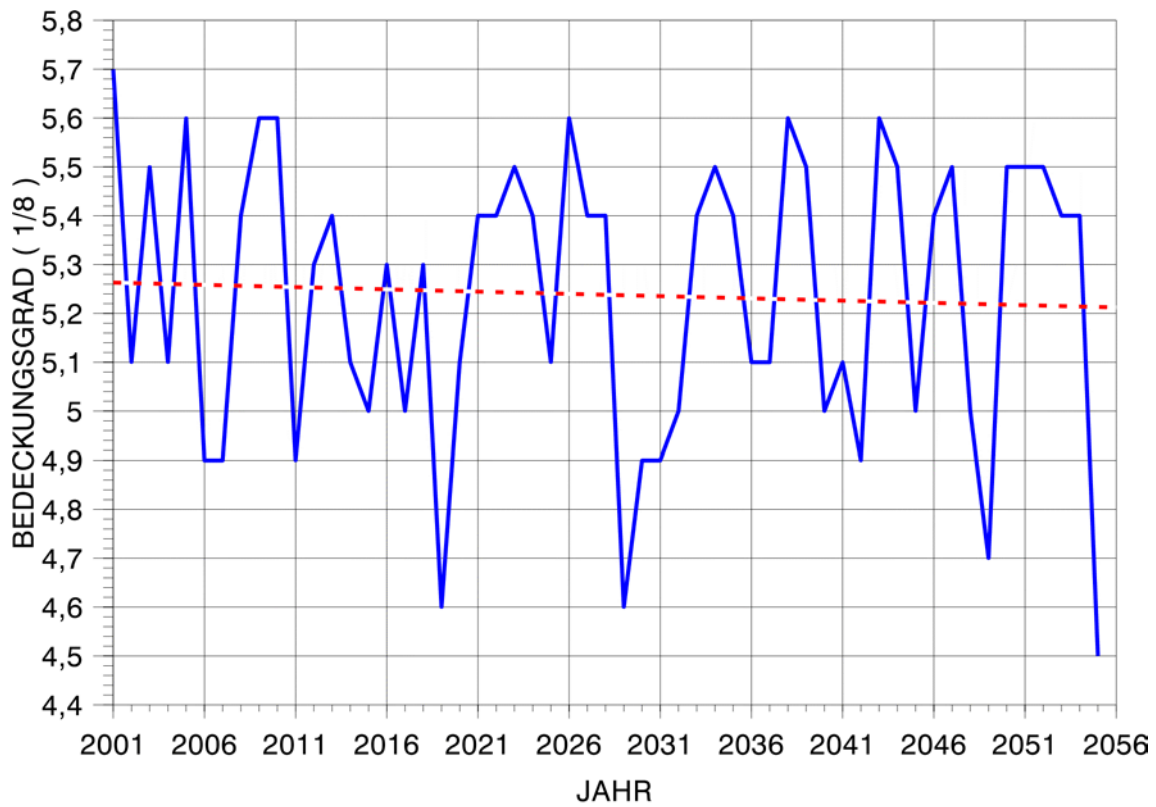


Abb. 41 Jahresmittel der Bewölkung Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055

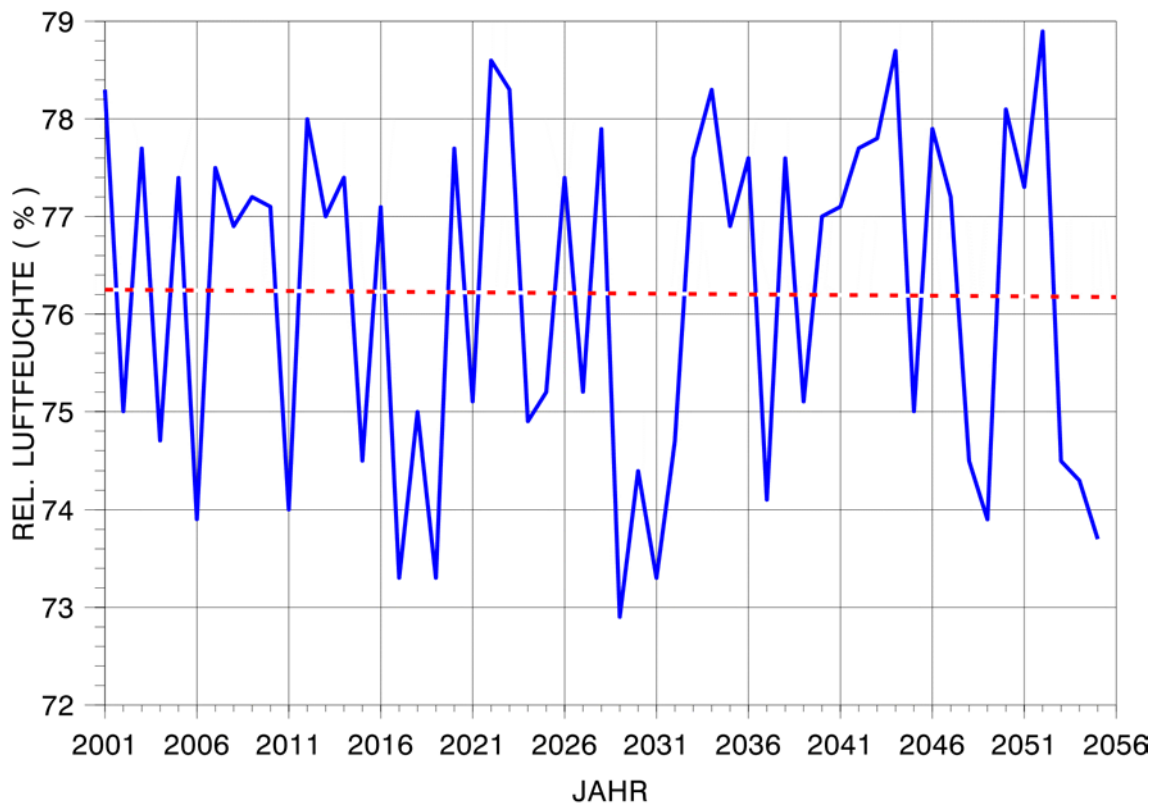


Abb. 42 Jahresmittel der relativen Luftfeuchte Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055

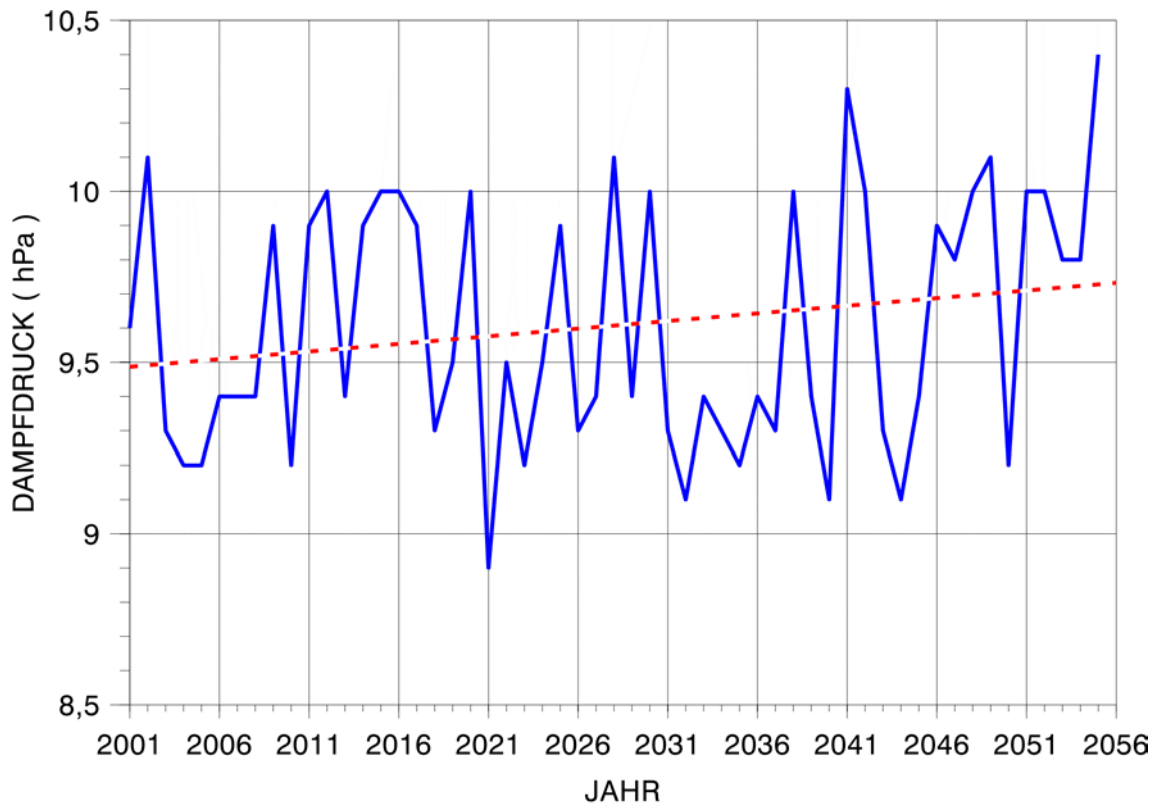


Abb. 43 Jahresmittel des Dampfdrucks Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055

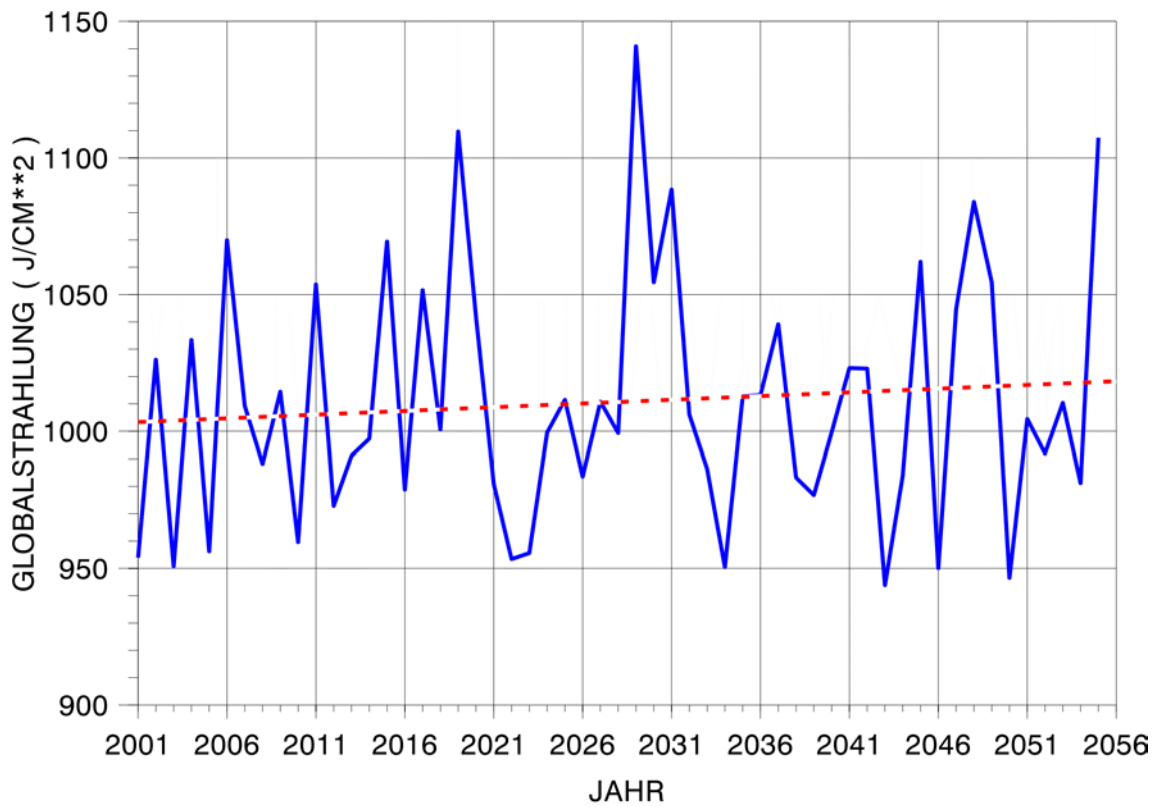


Abb. 44 Jahresmittel der Globalstrahlung Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055

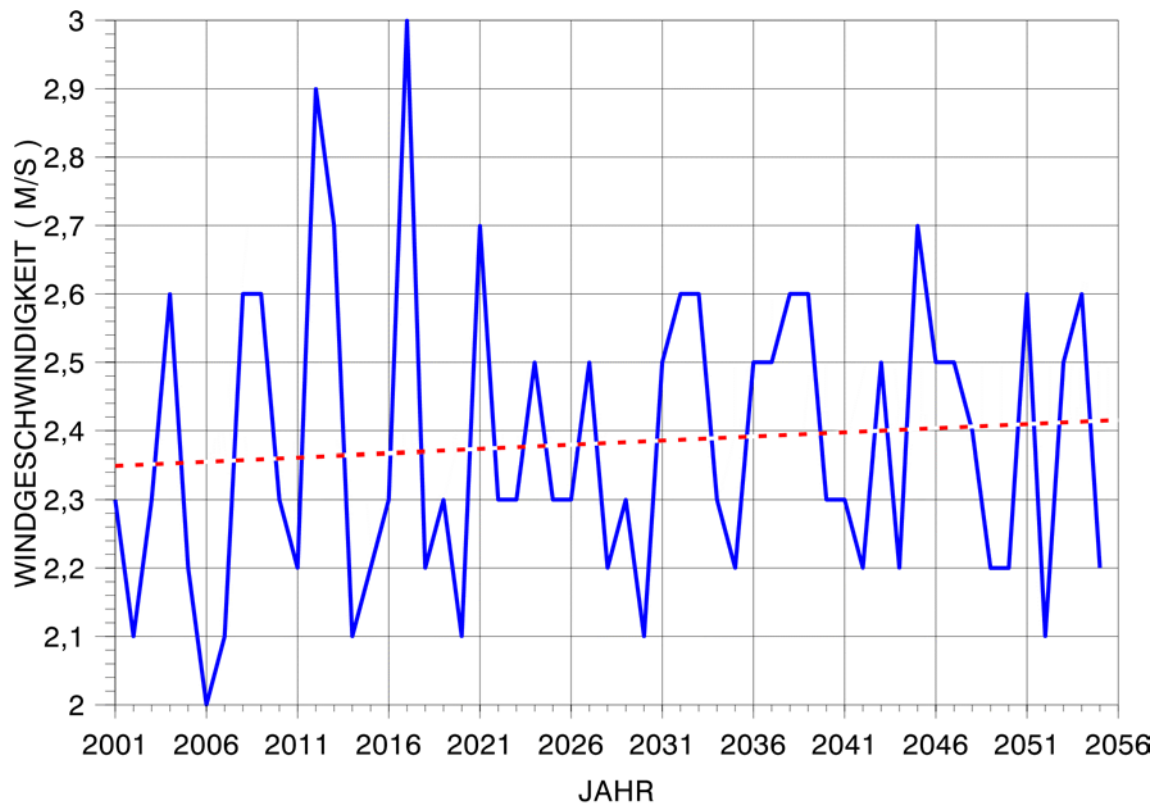


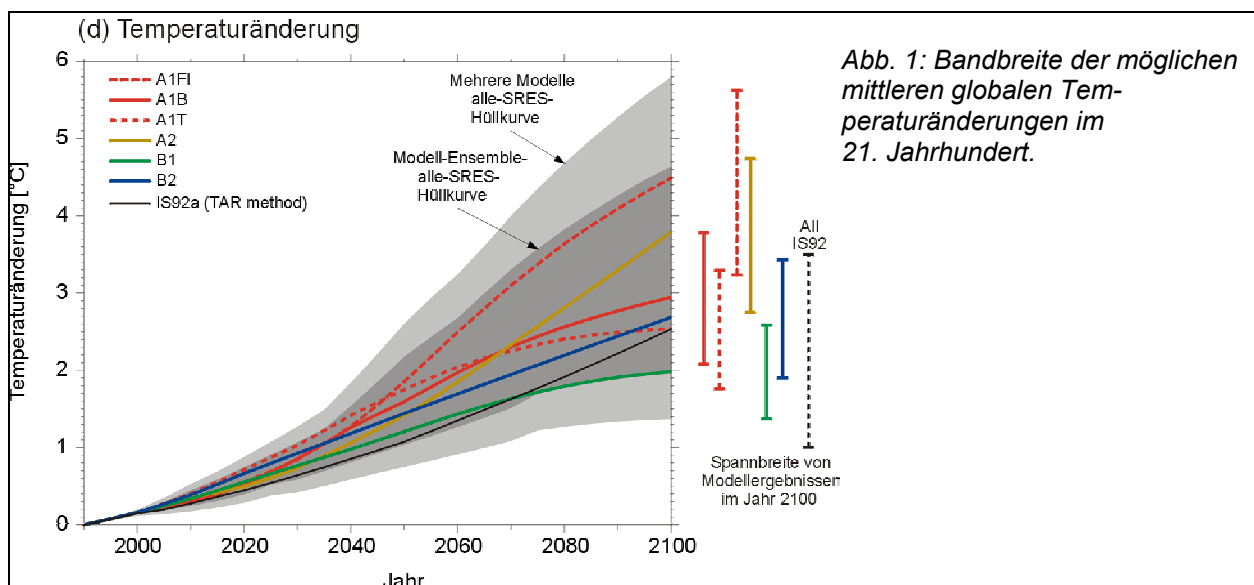
Abb. 45 Jahresmittel der Windgeschwindigkeit Magdeburg, Szenarium 3, 2001 - 2055

## **9.2 Studie**

"Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven", Kapitel 1 Klimatologie aus PIK Report 83, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam 2003

# 1 KLIMATOLOGIE

2001 veröffentlichte das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) seinen Third Assessment Report (*IPCC, 2001*). In ihm wird die zu erwartende Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert abgeschätzt. In Abbildung 1 ist die Bandbreite der zu erwartenden mittleren globalen Temperaturerhöhung dargestellt. Sie beruht zum einen auf der Verwendung unterschiedlicher Emissionsszenarien zum anderen auf der Unsicherheit der eingesetzten Klimamodelle. Zur Abschätzung der Klimaentwicklung im Land Brandenburg wurde als Basis das globale Szenarium A1B ausgewählt, weil es die mittlere Entwicklung gut widerspiegelt, da es nicht Ziel dieser Studie war, extreme Entwicklungen abzuschätzen, sondern eine Aussage zur wahrscheinlichsten zu liefern. Wie die Werte aus dem Szenarium A1B eingesetzt werden, wird im Kapitel 1.3.1 erläutert.



Die in der folgenden Studie zusammengestellten bzw. berechneten Daten zur Klimatologie und der zukünftigen Entwicklung des Klimas im Land Brandenburg beruhen in einigen Teilen auf den Ergebnissen eines durch das BMBF geförderten Projektes zur Erforschung der Hydrologie im Elbe-Einzugsgebiet (GLOWA-ELBE, Förderkennzeichen: 07 GWK 03/). In diesem Projekt wird das gesamte Elbe-Einzugsgebiet untersucht. Da Brandenburg in dieses Gebiet eingebettet ist, können so die klimatischen Entwicklungen der Umgebung des Landes mit in die Bewertung einbezogen werden.

## 1.1 Untersuchungsmethodik

### 1.1.1 *Stand der Forschung*

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 Szenarientwicklung. 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. Im Folgenden wird ein statistisches Modell zur Entwicklung von Klimaszenarien vorgestellt, dessen Grundlage sowohl Klimamodellaussagen als auch Beobachtungsdaten sind.

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, 2001*), 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 Szenarientwicklung werden zur Zeit diskutiert:

Im Rahmen der ersten Methode wird versucht, ein regionales Klimamodell zu entwickeln, das 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 eine Weiterverwendung der Ergebnisse in der Regel nicht möglich macht.

Die zweite Methode verwendet Klimamodellergebnisse, die über statistische Verfahren in kleinskalige 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 Szenarienburg auf ein Minimum reduziert werden, wobei die bereits angeführte

Konsistenz erhalten bleibt. Von Nachteil ist der nicht mehr vorhandene physikalische Zusammenhang zwischen den Klimamodellergebnissen und denen des Szenariums.

Da die beiden erstgenannten Vorgehensweisen zur Zeit noch keine oder nur eingeschränkt befriedigende Ergebnisse liefern wurde hier auf der Basis der letztgenannten Methode ein Modell entwickelt, das zu einer Resultatsverbesserung führt.

### **1.1.2 Das Szenarienmodell**

#### *a) Grundprinzip*

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 globalen 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 werden die anderen beobachteten meteorologischen Größen konsistent diesen Änderungen angepasst. Dabei wird darauf geachtet, dass deren statistische Grundeigenschaften und Zusammenhänge im wesentlichen erhalten bleiben.

#### *b) Beschreibung des beobachteten Klimas*

- Statistisch konstante Kenngrößen

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. Bei den Kenngrößen handelt es sich um den Mittelwert (in der Simulation zuzüglich der vorgegebenen Änderung), die Standardabweichung, die Erhaltungsneigung, den Jahresgang sowie die interannuelle Variabilität.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Charakteristika ist hier nicht notwendig, da diese als allgemein bekannt vorausgesetzt werden. Es muß aber darauf hingewiesen 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).

- 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, das Temperaturverhalten der Vortage (Erhaltungsneigung) 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, 1997; Gerstengarbe et al., 1999*). 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 Abschnitt d) erläutert.

### *c) Erstellung des simulierten Klimas*

- Bearbeitung der Bezugsgröße

Die Erstellung der simulierten Reihe der Bezugsgröße 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 Rangbestimmung. Die Rangbestimmung 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 Rangbestimmung.

#### **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 seines Ranges 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.

### *d) Verknüpfung von beobachtetem und simuliertem Klima*

Mit Abarbeitung des 6. Schrittes aus Abschnitt c) ist eine 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. Abschnitt b)) mit Hilfe des Abstandes von Mahalanobis (Weber, 1980) 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 davorliegende 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. Man erhält 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 mehrere Stationen 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.

### e) Erzeugung einer ausreichend großen Stichprobe von Szenarien

Wie unter d) bereits erwähnt, wurde mit dem Algorithmus bisher nur eine Realisierung berechnet. Um eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Sicherheit des Eintretens der simulierten Klimaänderungen zu treffen, müssen entsprechend viele Realisierungen erzeugt werden. Dies wird erreicht, indem man mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation eine Reihe in der zeitlichen Abfolge zufällig erzeugter Realisierungen berechnet. Das heißt, dass die unter c) angegebenen Arbeitsschritte 2-7 sowie der Arbeitsschritt d) für jede Realisierung neu berechnet werden. In Abbildung 2 ist die Grundstruktur des Modellaufbaus dargestellt.

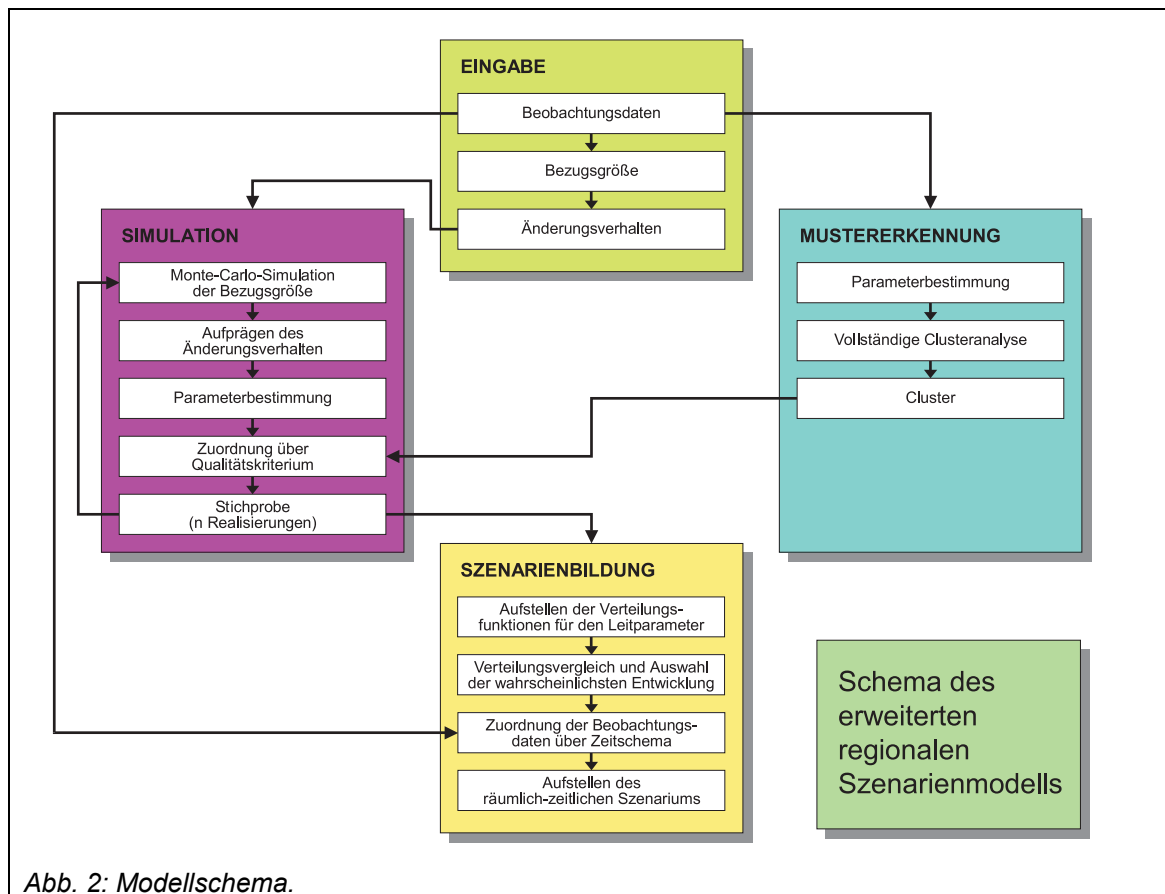


Abb. 2: Modellschema.

### f) Ergebnisse

Das Modell erzeugt Zeitreihen auf Tageswertbasis die räumlich und in den Beziehungen zwischen den einzelnen meteorologischen Größen konsistent sind. Sie sind somit einsetzbar in den Modellen der Klimafolgenforschung. Darüber hinaus lassen sich aus den Reihen klimatologische Charakteristika ableiten (Trends, Mittelwerte, Varianzen, Verteilungen etc.). Nicht erzeugt werden können (außer für die Bezugsgröße Temperatur) neue, noch nicht beobachtete Extreme von Tageswerten (z.B. Tagessumme des Niederschlags).

## 1.2 Die mittleren klimatischen Verhältnisse Brandenburgs 1951-2000

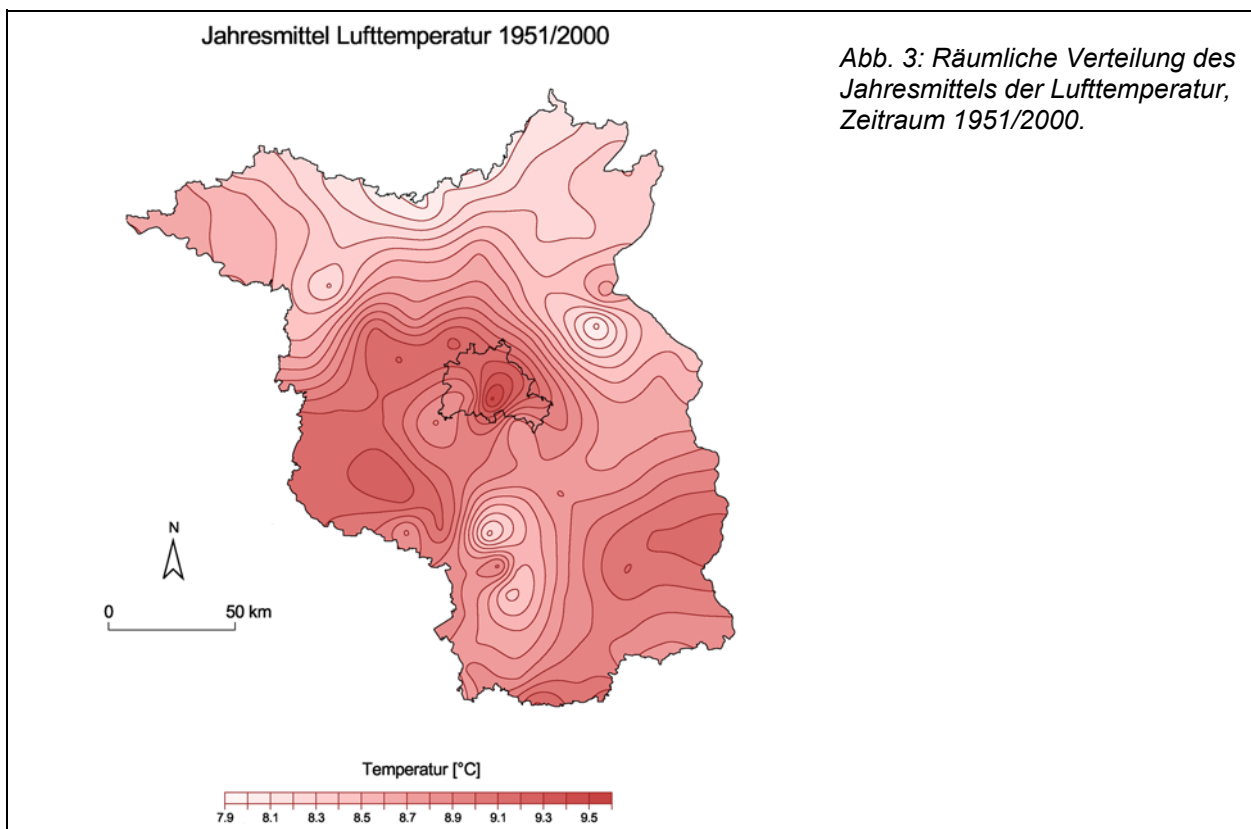
### 1.2.1 Lufttemperatur

Die räumliche Struktur der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur ist Abbildung 3 zu entnehmen. Man erkennt, dass je nach Region, die Werte zwischen 7.8 °C und 9.5 °C schwanken. Die wärmeren Regionen findet man im Berliner Raum und westlich bis südwestlich davon sowie im Südosten. Maximum und Minimum der Lufttemperatur sind räumlich ähnlich strukturiert. Sie reichen von 12.1 °C - 13.9 °C bzw. von 4.0 °C - 5.8 °C. Weitere Angaben zu Parametern der Lufttemperatur sind in Tabelle 1 gelistet. Die Angaben beziehen sich jeweils auf den grössten bzw. kleinsten im Land Brandenburg zwischen 1951 und 2000 beobachteten Wert.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Heisse Tage	0 - 5 <sup>1)</sup>	0 - 27	0 - 6	-	0 - 27
Sommertage	0 - 24	3 - 63	0 - 16	-	5 - 76
Frosttage	3 - 46	0 - 1	0 - 32	21 - 90	35 - 148
Eistage	0 - 13	-	0 - 13	1 - 75	0 - 74
Max. Temp.	33.8 <sup>2)</sup>	39.4	33.3	19.8	39.4
Min. Temp.	-22.5	-1.4	-23.3	-29.5	-29.5

Tab. 1: Temperaturcharakteristika für Brandenburg.

Heisse Tage:  $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ , Sommertage:  $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$     1) Tage pro Jahr,  
 Frosttage:  $T_{min} < 0 \text{ °C}$ , Eistage:  $T_{max} < 0 \text{ °C}$     2) °C

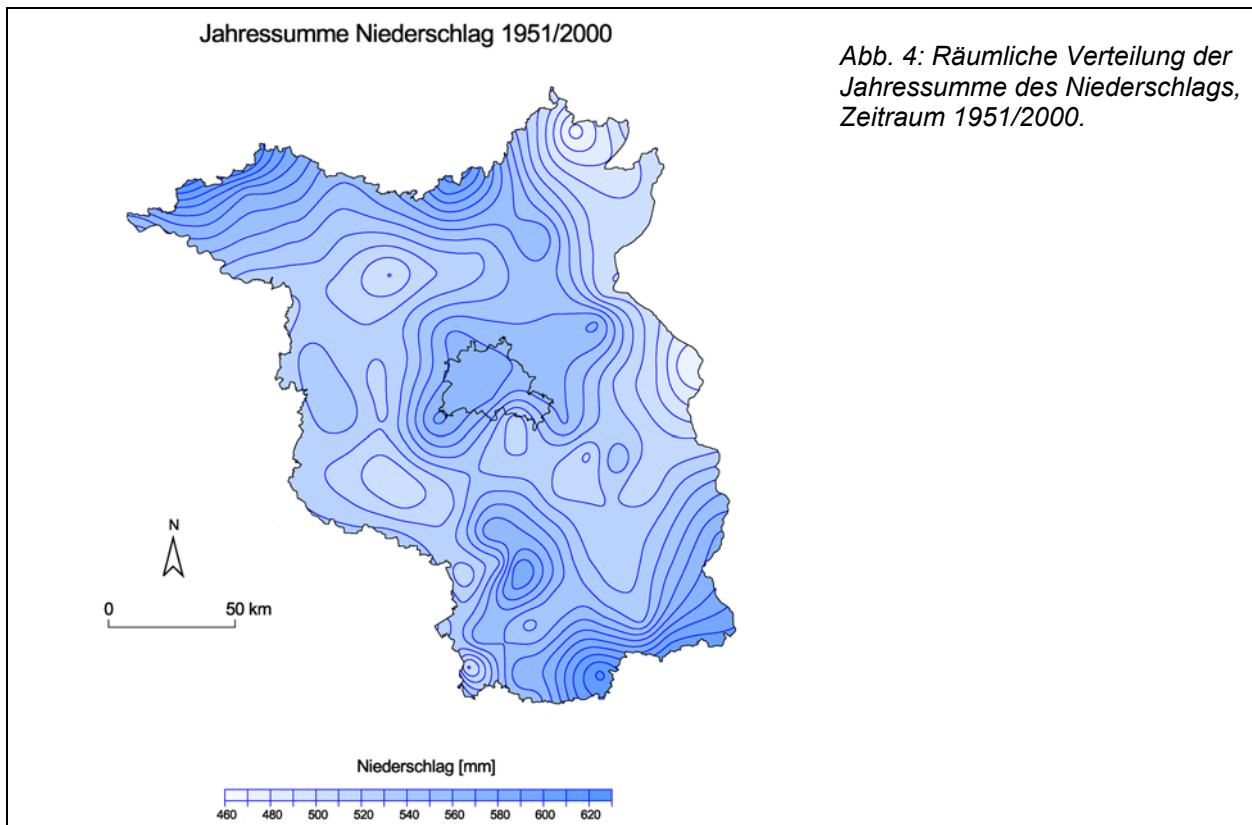


## 1.2.2 Niederschlag

Die räumliche Struktur der Jahressummen des Niederschlags ist Abbildung 4 zu entnehmen. Bezüglich des Niederschlagsdargebots ist Brandenburg im Vergleich zu anderen Teilen Deutschlands trocken. Das Gebietsmittel für das Land liegt deutlich unter 600 mm pro Jahr wobei der Nordosten mit weniger als 500 mm am trockensten ist. Tabelle 2 ergänzt die Angaben zum Niederschlagsverhalten.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Summe	38 - 313	35 - 464	37 - 310	34 - 277	298 - 860
N.-Tage.	16 - 72	13 - 77	16 - 80	19 - 83	88 - 293
Tagesmax.	109	172	70	38	172

*Tab. 2: Niederschlagscharakteristika für Brandenburg.  
Summe: mm; N.-Tage: Anzahl der Tage mit Niederschlag  $\geq 0$ . mm;  
Tagesmax.: Höchste Tagessumme des Niederschlags in mm*

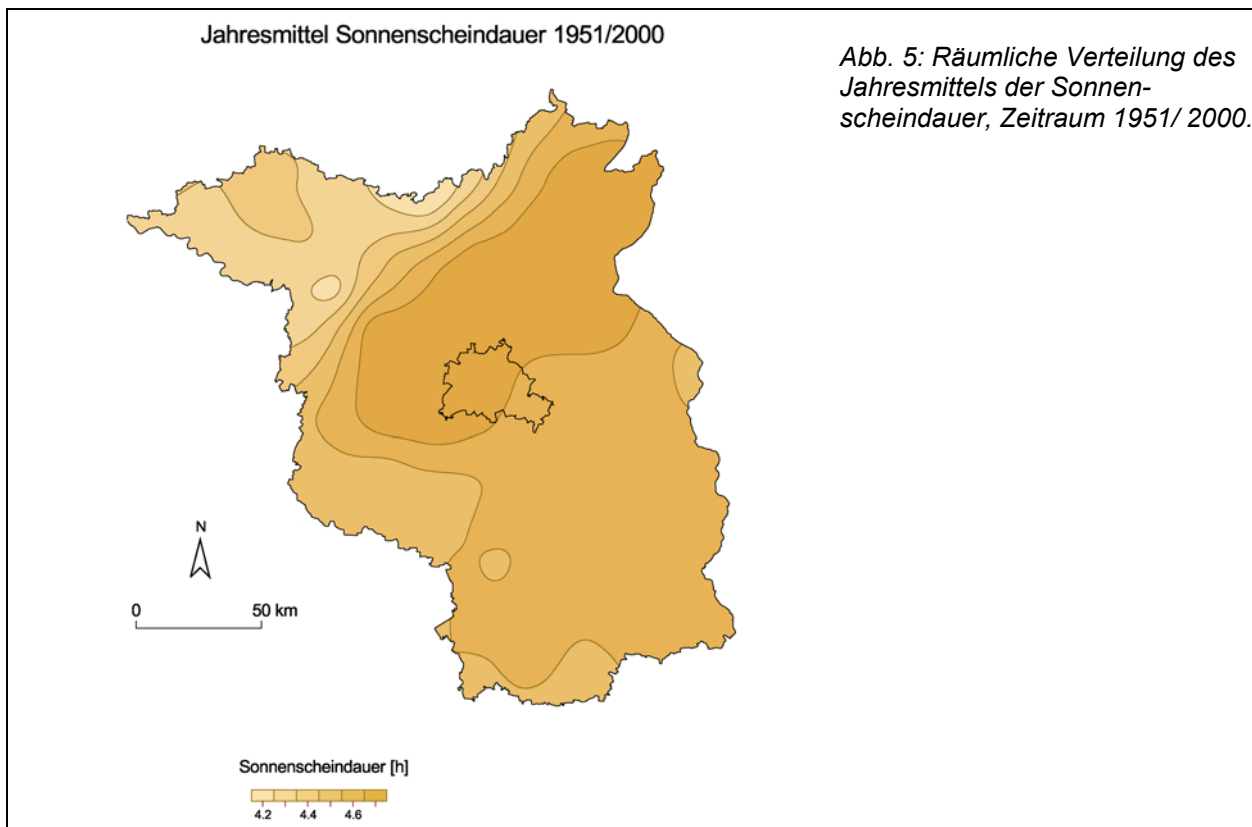


### 1.2.3 Sonnenscheindauer

Im Mittel scheint die Sonne in Brandenburg zwischen 4.2 und 4.7 Stunden pro Tag (Abbildung 5). Dabei sind die Werte räumlich wenig strukturiert. Der Nordwesten weist die geringste Sonnenscheindauer auf, der mittlere und nordöstliche Teil die höchste. Weitere Angaben sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Summe	314 - 749	457 - 867	177 - 555	65 - 267	1237 - 2121
Tage o. So	0 - 28	0 - 16	0 - 38	0 - 61	1 - 126

Tab. 3: Charakteristika der Sonnenscheindauer für Brandenburg.  
Summe: h; Tage o. So: Anzahl der Tage ohne Sonnenschein

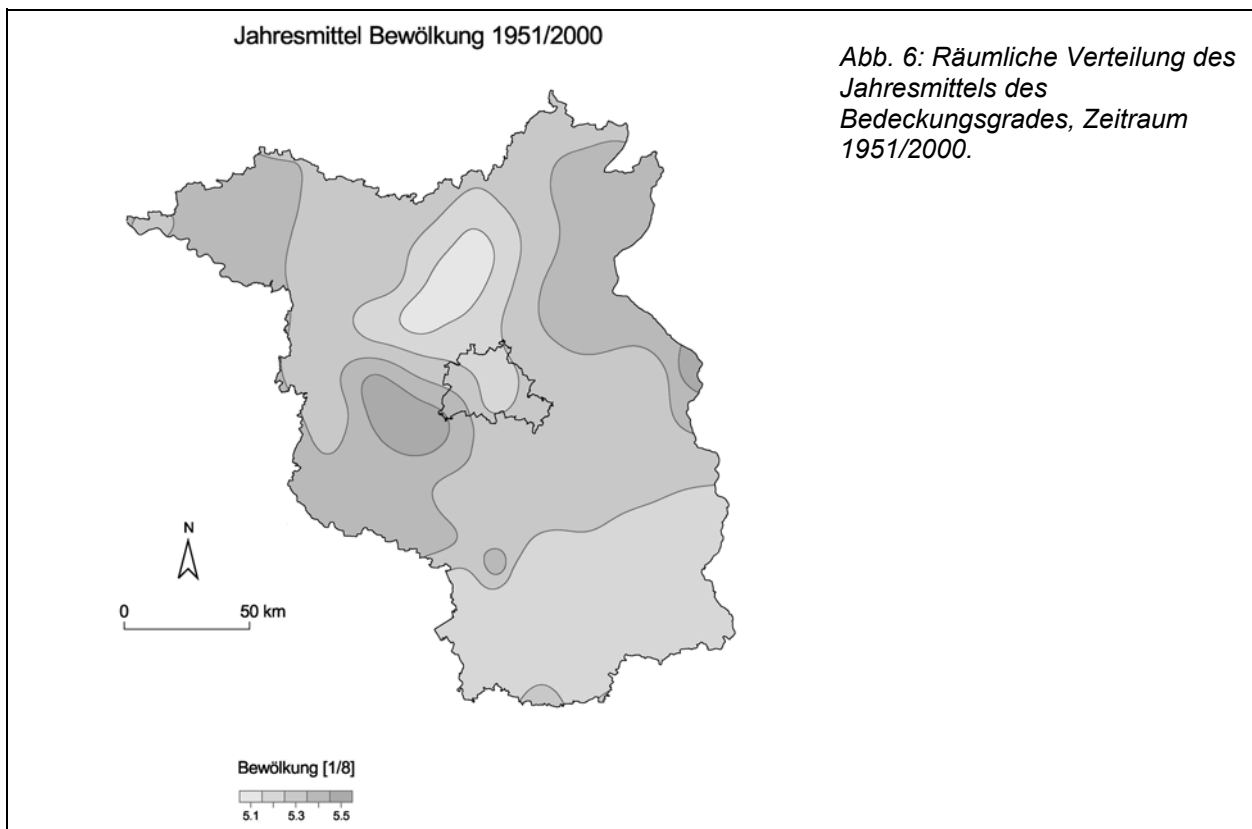


### 1.2.4 Bewölkung

Gebiete geringer mittlerer Bewölkung liegen nördlich von Berlin sowie im Süden Brandenburgs. Die höchsten Werte findet man im Nordwesten, Nordosten und südwestlich von Berlin. Insgesamt sind die regionalen Unterschiede aber nur gering (Abbildung 6).

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
heitere Tage	0 - 54	0 - 42	0 - 27	0 - 16	4 - 126
trübe Tage	4 - 50	2 - 44	8 - 52	16 - 67	44 - 176

Tab. 4: Charakteristika der Bewölkung für Brandenburg.  
Heitere Tage: Bedeckungsgrad  $\leq 1/8$ ; trübe Tage: Bedeckungsgrad  $\geq 7/8$



### 1.3 Berechnung des wahrscheinlichsten Zukunftsszenariums

#### 1.3.1 Einleitung

Die Szenarienberechnungen beruhen auf einem vorgegebenen Temperaturtrend von ca. 1.4 K für den Zeitraum 2001-2055. Dieser Trend wurde aus Ergebnisdaten des Klimamodelllaufs ECHAM4-OPYC3 des MPI für Meteorologie Hamburg bestimmt (DKRZ, 2001). Diesem Lauf liegt das A1B-CO<sub>2</sub>-Emissionsszenarium (IPCC, 2001) zugrunde, was eine relativ moderate Temperaturerhöhung zur Folge hat. Um eine ausreichend große Stichprobe zu bekommen, wurden 100 Simulationsläufe (Realisierungen) sowohl für den Beobachtungszeitraum als auch den Simulationszeitraum durchgeführt. Aus der Verteilung der daraus gewonnenen Niederschlagstrends (s. Tabelle 5a, b) wurde das **wahrscheinlichste Zukunftsszenarium** zur Interpretation wie folgt ausgewählt:

Klasse Nr.	Klassengrenze	Prozentualer Anteil
1	< -47.4 mm	2
2	< -32.8 mm	5
3	< -18.2 mm	10
4	< -3.6 mm	15
5	< 11.0 mm	12
6	< 25.6 mm	18
7	< 40.2 mm	16
8	< 51.1 mm	10
9	< 65.7 mm	6
10	>= 65.7 mm	6

Tab. 5a: Verteilung der Niederschlagstrends für die Station Magdeburg auf der Basis der simulierten Daten für den Zeitraum 2001-2055

Klasse Nr.	Klassengrenze	Prozentualer Anteil
1	< -69.4 mm	2
2	< -62.0 mm	5
3	< -47.4 mm	10
4	< -39.8 mm	15
5	< -32.5 mm	12
6	< -17.9 mm	18
7	< -6.9 mm	16
8	< 3.6 mm	10
9	< 18.2 mm	6
10	>= 18.2 mm	6

Tab. 5b: Verteilung der Niederschlagstrends für die Station Magdeburg auf der Basis der simulierten Daten für den Beobachtungszeitraum 1951-2000.



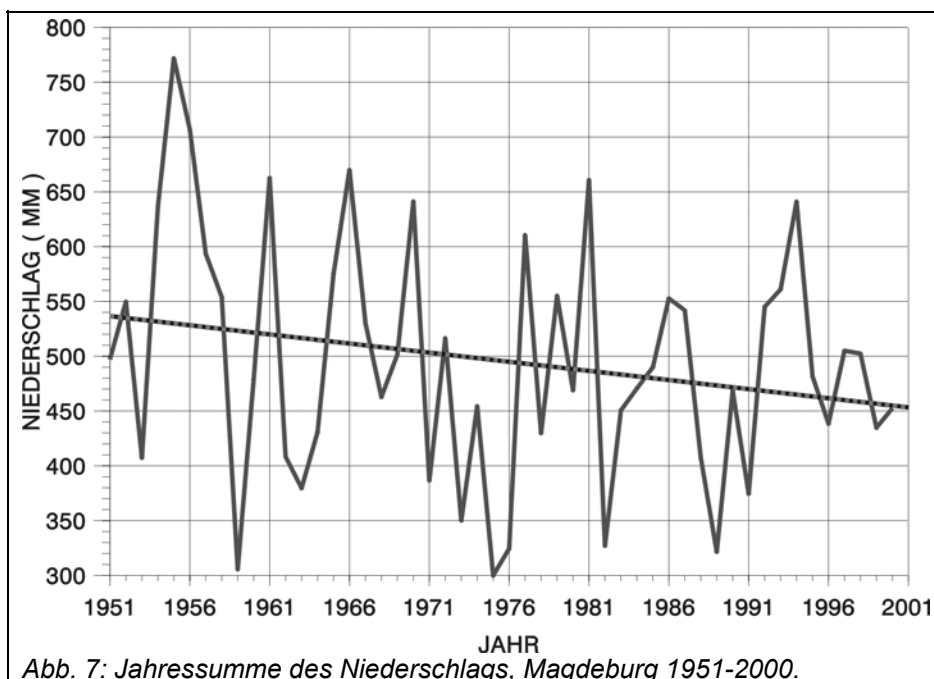
Da der Temperaturtrend vorgegeben wurde, ergeben sich nur für die anderen meteorologischen Größen Variationen in den Trends bezüglich der einzelnen Realisierungen.

Meteorologisch gesehen ist dabei der Niederschlag die wichtigste Größe und wurde deshalb als Bezug für die Bestimmung des wahrscheinlichsten Szenariums verwendet.

Der Zeitraum 2001-2055 (und kein längerer bis z.B. 2100) wurde aus zwei Gründen gewählt:

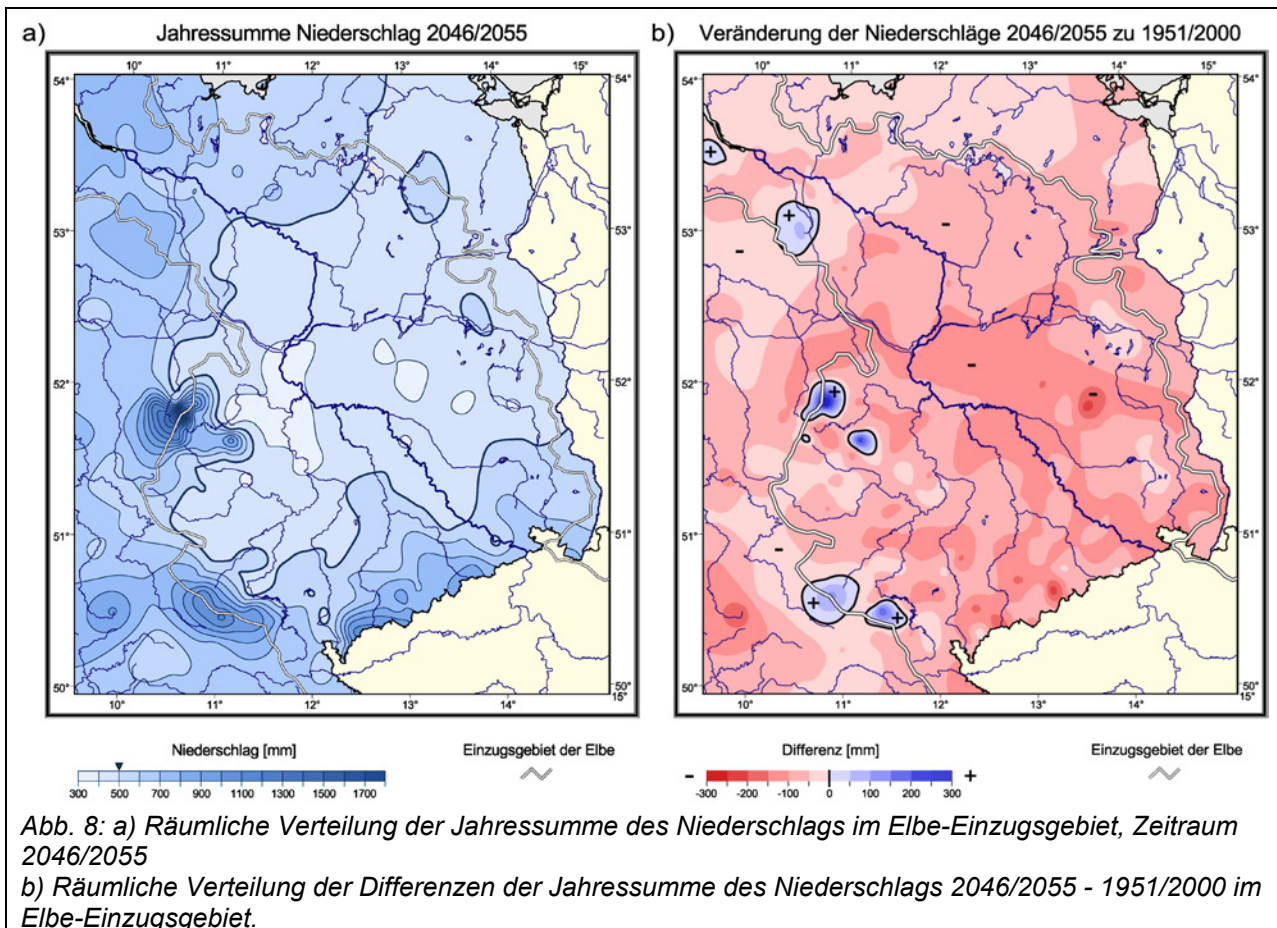
1. Für ein statistisches Szenarienmodell dürfen sich die zukünftigen Änderungen nicht zu weit von den Ausgangsbedingungen (Beobachtungen) entfernen, damit die Beziehungen zwischen den einzelnen meteorologischen Größen im statistischen Sinn noch als konstant betrachtet werden können.
2. Nach ca. 2050 laufen die globalen Klimaszenarien (s. Abbildung 1) sehr weit auseinander in Abhängigkeit von der angenommenen Entwicklung der Treibhausgasemissionen. Außerdem werden auch die Fehler der globalen Klimamodelle größer. Das bedeutet insgesamt, dass die Aussagen zur Klimaentwicklung in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts sehr unsicher sind.

Der Vergleich der Trendverteilungen der simulierten Werte für die Zukunft (Tabelle 5a) und der für den Beobachtungszeitraum (Tabelle 5b) sowie die Heranziehung des tatsächlich beobachteten Niederschlagstrends, erlaubt abzuschätzen, welche Realisierung für die Zeit 2001-2055 die wahrscheinlichste ist. Der beobachtete Trend an der Station Magdeburg (Abbildung 7), als einer typischen Station für das Elbe-Einzugsgebiet und somit auch für das Land Brandenburg, beträgt  $-81.6 \text{ mm}$ , der entsprechende simulierte Trend  $-75.0 \text{ mm}$  und die obere Grenze der nach unten offenen Klasse der Häufigkeitsverteilung  $< -69.4 \text{ mm}$ . Damit ergibt sich aus der "Simulationsweise" des Modells, dass die Realisierung mit einer starken Niederschlagsabnahme die wahrscheinlichste darstellt.



### 1.3.2 Kurze Beschreibung des wahrscheinlichsten Niederschlagszenariums für das Elbe-Einzugsgebiet

Eine erste Interpretation der Niederschlagsentwicklung im Szenarienzeitraum kann anhand der Abbildung 8a und Abbildung 8b vorgenommen werden. Man erkennt, dass sich das Gebiet mit einer jährlichen Niederschlagssumme  $< 500$  mm deutlich vergrößert. Dabei gibt es in diesem Bereich sogar Regionen, in denen die Niederschlagssumme unter  $400$  mm pro Jahr sinkt, wie zum Beispiel im Leebereich des Harzes. Zieht man zur weiteren Analyse die Differenzenkarte des Niederschlags 2046/55-1951/00 heran (Abbildung 8b) erkennt man, dass es Regionen mit einer Niederschlagsabnahme  $> 200$  mm gibt (z.B. im Gebiet um Luckau oder auch im Lee des Fichtelbergs). Andererseits ist eine Niederschlagszunahme bis zu  $300$  mm in den westlich gelegenen Gebirgsregionen (Harz und Thüringer Wald) zu beobachten. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass grosse Teile des Elbe-Einzugsgebietes bei der vorgegebenen Entwicklung mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem deutlichen Niederschlagsrückgang betroffen werden.



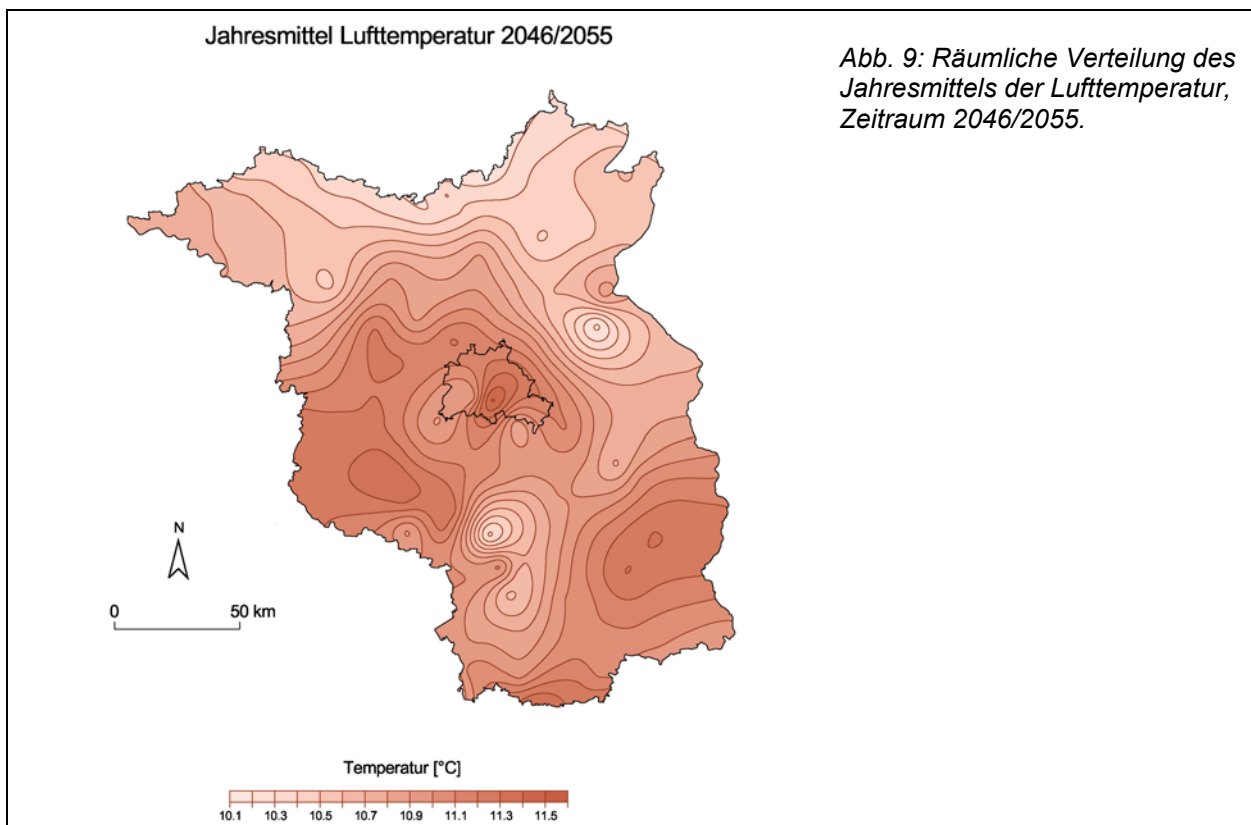
## 1.4 Die mittleren klimatischen Verhältnisse in Brandenburg für den Zeitraum 2046-2055

### 1.4.1 Lufttemperatur

Die räumliche Struktur der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Werte schwanken zwischen 10.1°C und 11.6°C. Die wärmeren Regionen findet man wiederum im Berliner Raum und west- bis südwestlich davon sowie im Südosten. Maximum und Minimum der Lufttemperatur sind räumlich ähnlich strukturiert. Sie reichen von 14.0 °C - 16.1 °C bzw. von 5.8 °C - 7.5 °C. Weitere Angaben zu Parametern der Lufttemperatur sind in Tabelle 6 gelistet. Die Angaben beziehen sich jeweils auf den grössten bzw. kleinsten im Land Brandenburg zwischen 2046 und 2055 beobachteten Wert.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Heisse Tage	0 - 4	0 - 31	0 - 6	-	0 - 38
Sommertage	1 - 18	19 - 70	0 - 21	-	22 - 89
Frosttage	0 - 31	-	0 - 17	10 - 65	28 - 101
Eistage	0 - 5	-	0 - 7	0 - 36	0 - 41
Max. Temp.	36.3	38.2	34.9	19.2	37.9
Min. Temp.	-12.6	1.0	-7.9	-20.3	-20.3

Tab. 6: Temperaturcharakteristika für Brandenburg.  
 Heisse Tage:  $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ , Sommertage:  $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$ ,  
 Frosttage:  $T_{min} < 0 \text{ °C}$ , Eistage:  $T_{max} < 0 \text{ °C}$

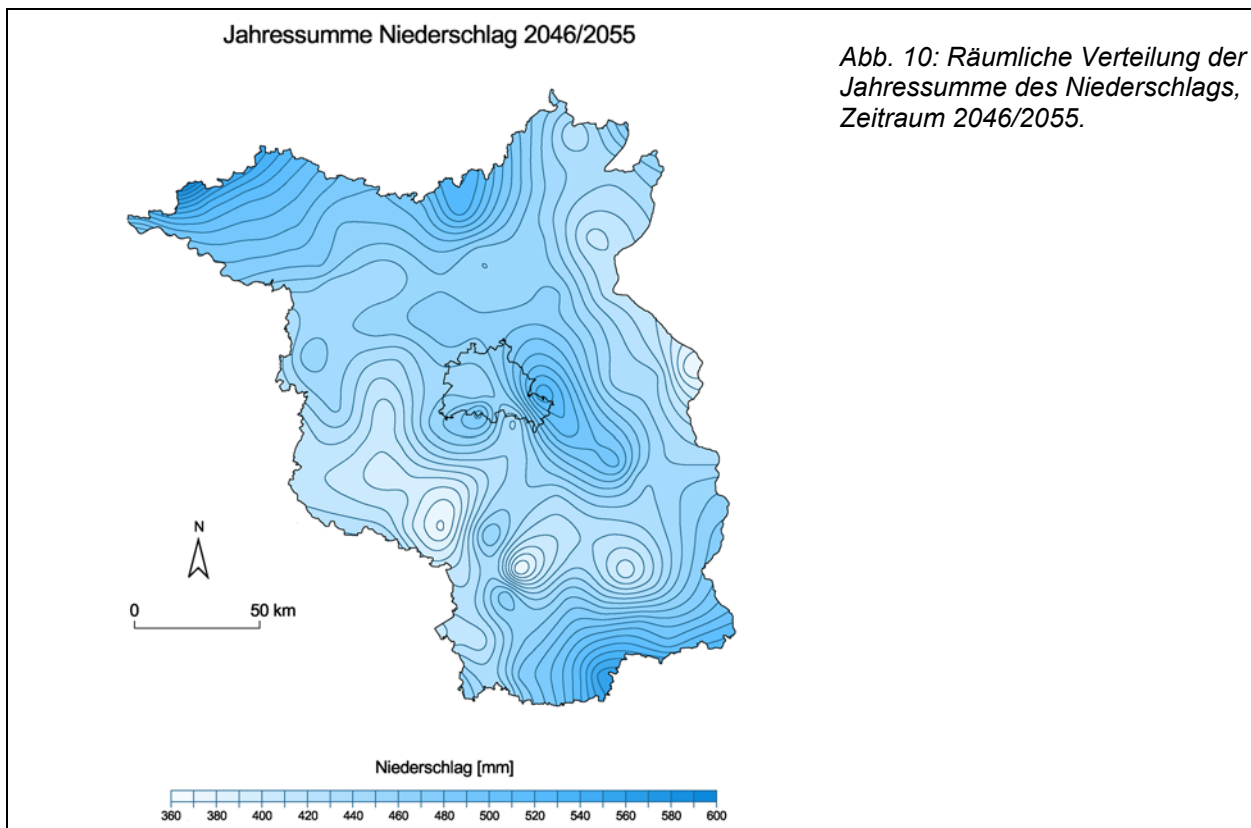


### 1.4.2 Niederschlag

Die Abbildung 10 zeigt die räumliche Struktur der Jahressummen des Niederschlags. Das Gebietsmittel für das Land liegt deutlich unter 450 mm pro Jahr wobei der Nordosten und besonders das Gebiet vom Fläming bis zur Niederlausitz mit weniger als 400 mm am trockensten ist. Tabelle 7 vervollständigt die Angaben zum Niederschlagsverhalten.

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Summe	45 - 226	39 - 296	24 - 241	37 - 203	274 - 712
N.-Tage.	21 - 59	12 - 51	15 - 63	19 - 74	95 - 227
Tagesmax.	68	148	82	33	148

Tab. 7: Niederschlagscharakteristika für Brandenburg.  
 Summe: mm; N.-Tage: Anzahl der Tage mit Niederschlag  $\geq 0.1$  mm;  
 Tagesmax.: Höchste Tagessumme des Niederschlags in mm

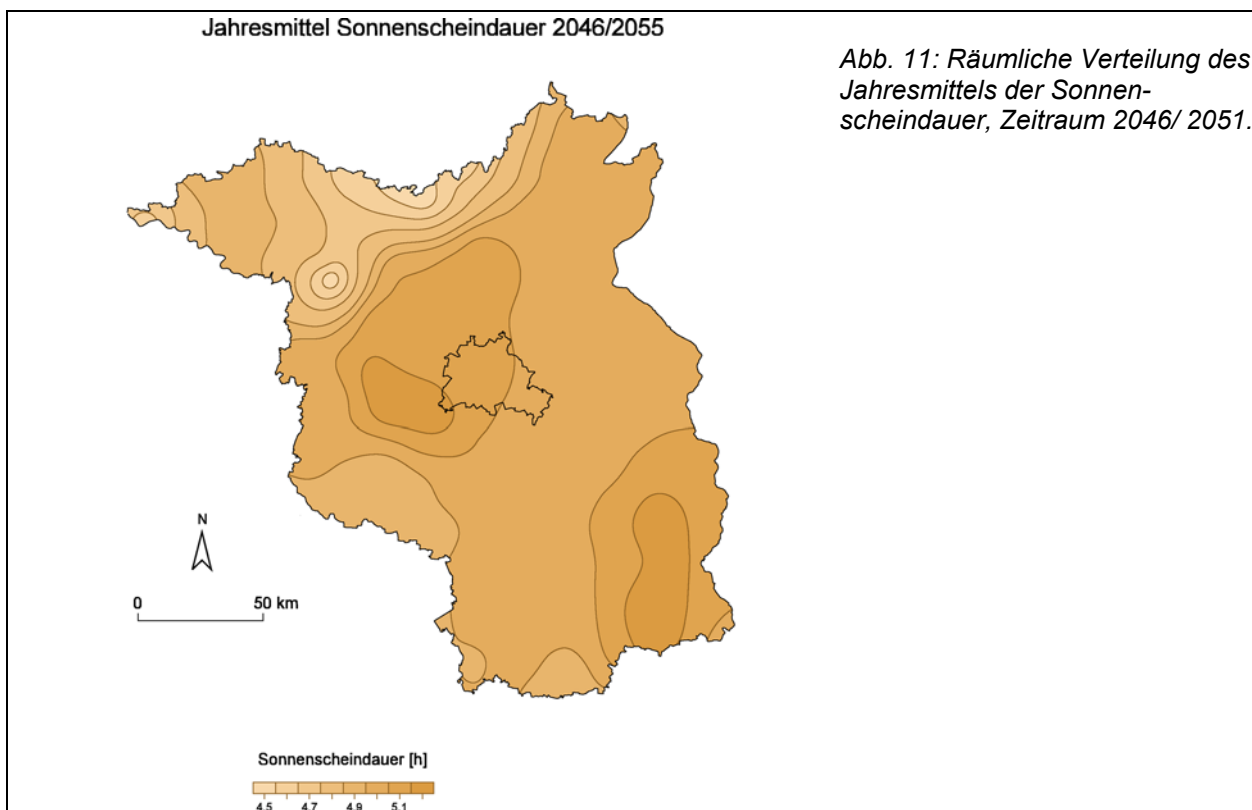


### 1.4.3 Sonnenscheindauer

Eine leichte Zunahme der Schwankungsbreite der Sonnenscheindauer (0.2 h) führt zu einer etwas strukturierteren regionalen Verteilung der mittleren Stundenwerte (Abbildung 11).

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Summe	442 - 614	498 - 919	248 - 491	75 - 248	1366 - 2108
Tage o. So	0 - 19	0 - 12	1 - 34	0 - 52	4 - 93

Tab. 8: Charakteristika der Sonnenscheindauer für Brandenburg.  
Summe: h; Tage o. So: Anzahl der Tage ohne Sonnenschein

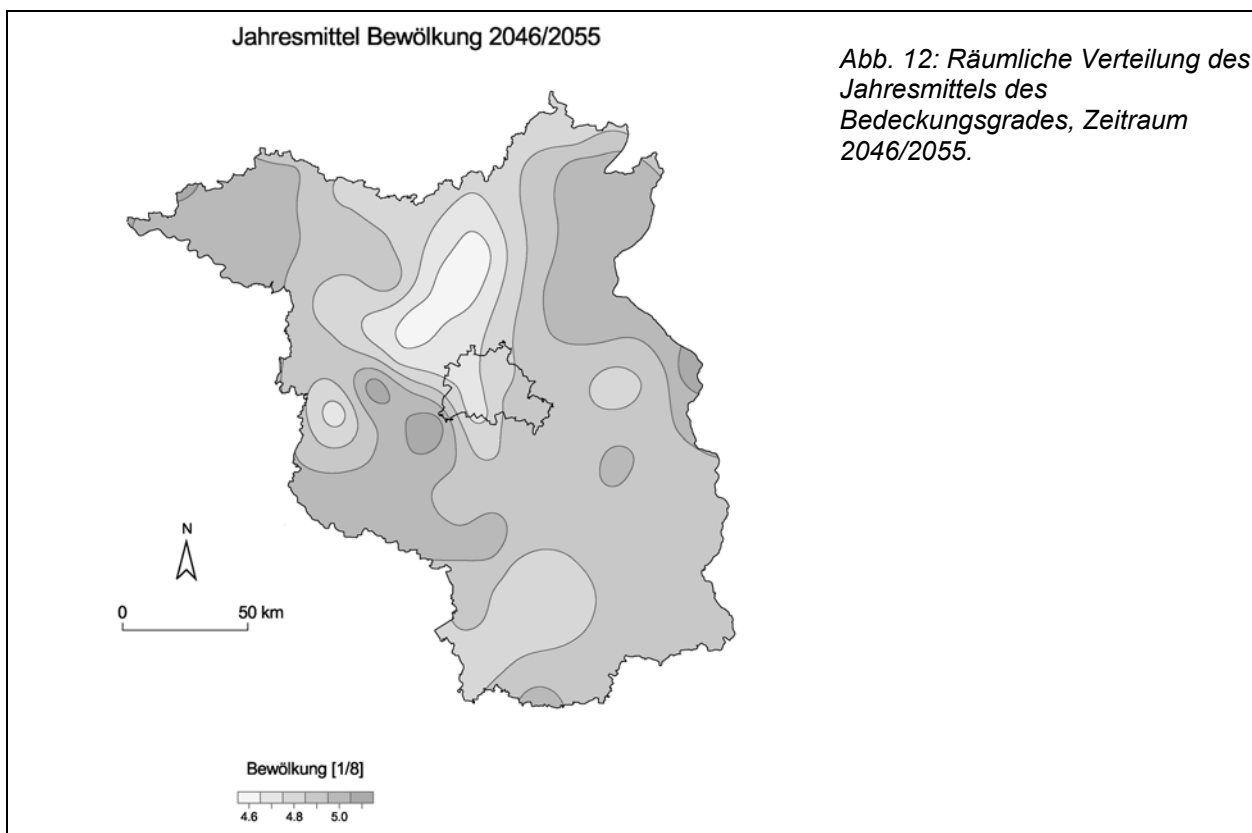


#### 1.4.4 Bewölkung

Die wesentliche Struktur der Bewölkungscharakteristik wird auch im Zeitraum 2046/2055 beibehalten (Abbildung 12).

Parameter	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
heitere Tage	2 - 16	1 - 24	2 - 20	0 - 16	7 - 67
trübe Tage	6 - 31	0 - 24	10 - 41	16 - 51	49 - 131

Tab. 9: Charakteristika der Bewölkung für Brandenburg.  
Heitere Tage: Bedeckungsgrad  $\leq 1/8$ ; trübe Tage: Bedeckungsgrad  $\geq 7/8$

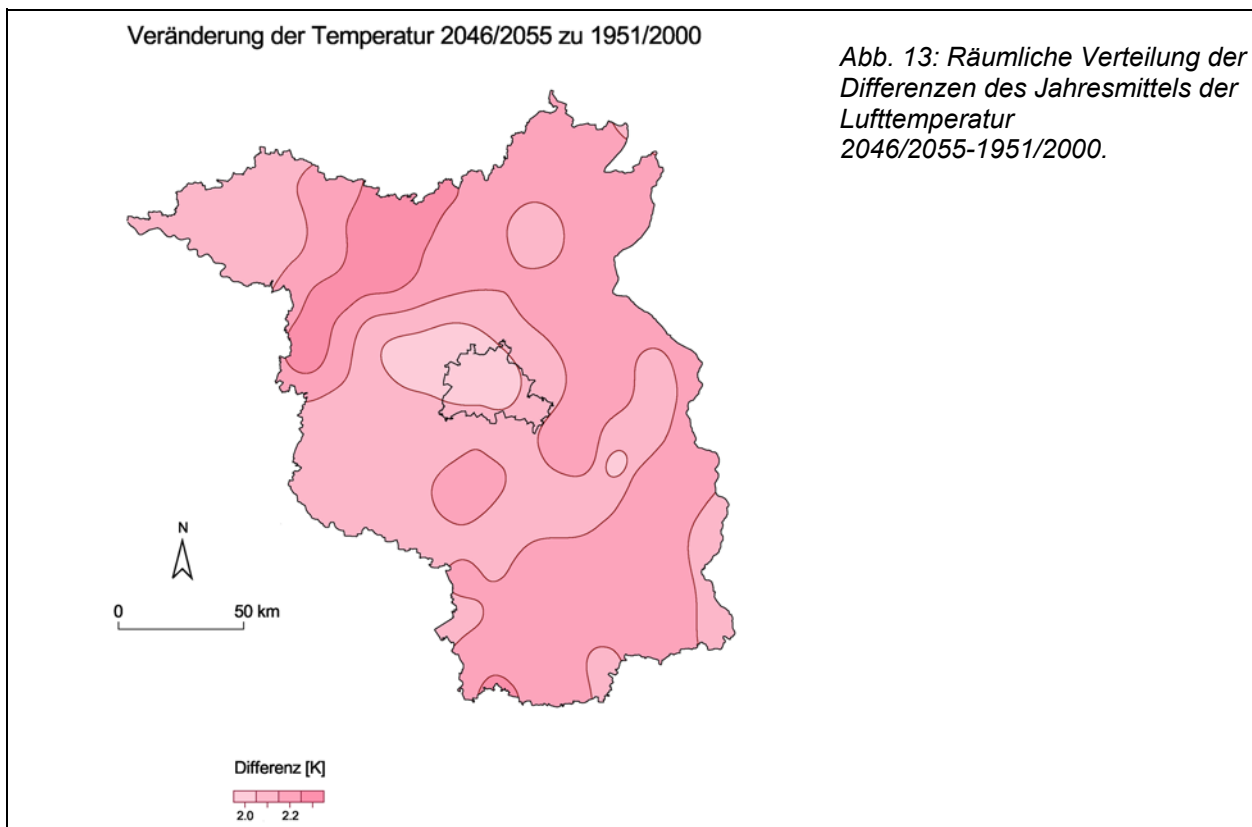


## 1.5 Vergleich der Klimaänderungen zwischen den Zeiträumen 2046/2055 und 1951/2000

### 1.5.1 Lufttemperatur

Die Abbildung 13 zeigt die Temperaturdifferenz zwischen den letzten 10 Jahren des Szenarienzeitraums und dem Mittelwert des Beobachtungszeitraums. Die Differenzen sind generell größer als 2 K und sind räumlich nur schwach strukturiert. Das bedeutet, dass die zeitlichen Änderungen stärker ausfallen als die Verschiebung der räumlichen Temperaturverteilung, die im wesentlichen erhalten bleibt mit ihren "Wärme-" und "Kältezentren".

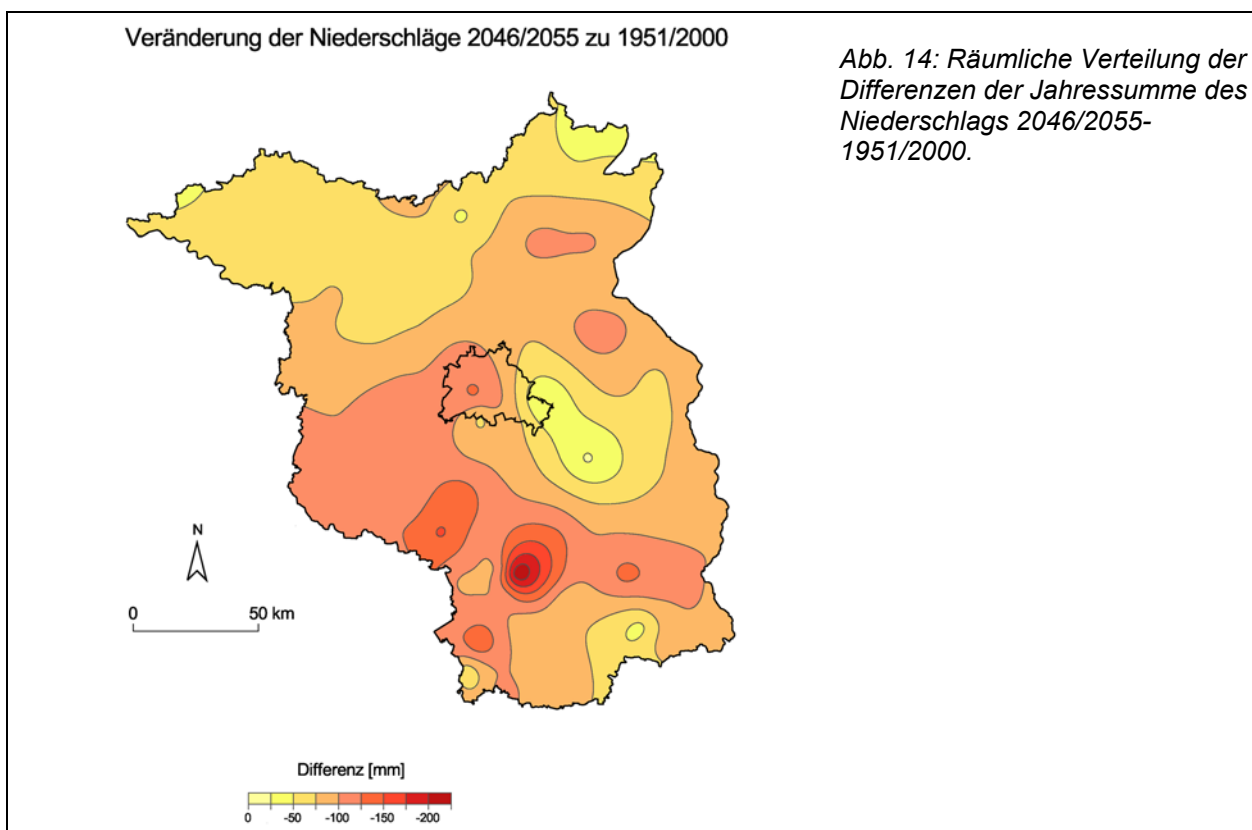
Im Gegensatz zu den nur schwach strukturierten räumlichen Temperaturdifferenzen unterscheiden sich die in der Tabelle 1 und Tabelle 6 angegebenen Temperaturcharakteristika deutlich voneinander. So liegt die Anzahl der heißen Tage und der Sommertage im Zeitraum 2046/55 deutlich höher als im Zeitraum 1951/2000. Invers dazu verhalten sich die Häufigkeiten von Frost- und Eistagen. Gleichzeitig weisen die höchsten Tagesmaxima nur im Frühjahr und Herbst einen Anstieg auf (im Sommer und Winter liegen sie unter den Beobachtungswerten) wohingegen die niedrigsten Minima in allen Jahreszeiten angehoben werden.



### 1.5.2 Niederschlag

Aus Abbildung 14 ist zu erkennen, dass es bis zum Ende des Szenarienzeitraums zu einer deutlichen Abnahme in den Jahressummen des Niederschlags für alle Regionen Brandenburgs kommt. Es ist eine starke räumliche Differenzierung der Abnahme zu verzeichnen. Sie reicht von -17.8 mm (südöstlich Berlins) bis zu -221.0 mm (Luckau).

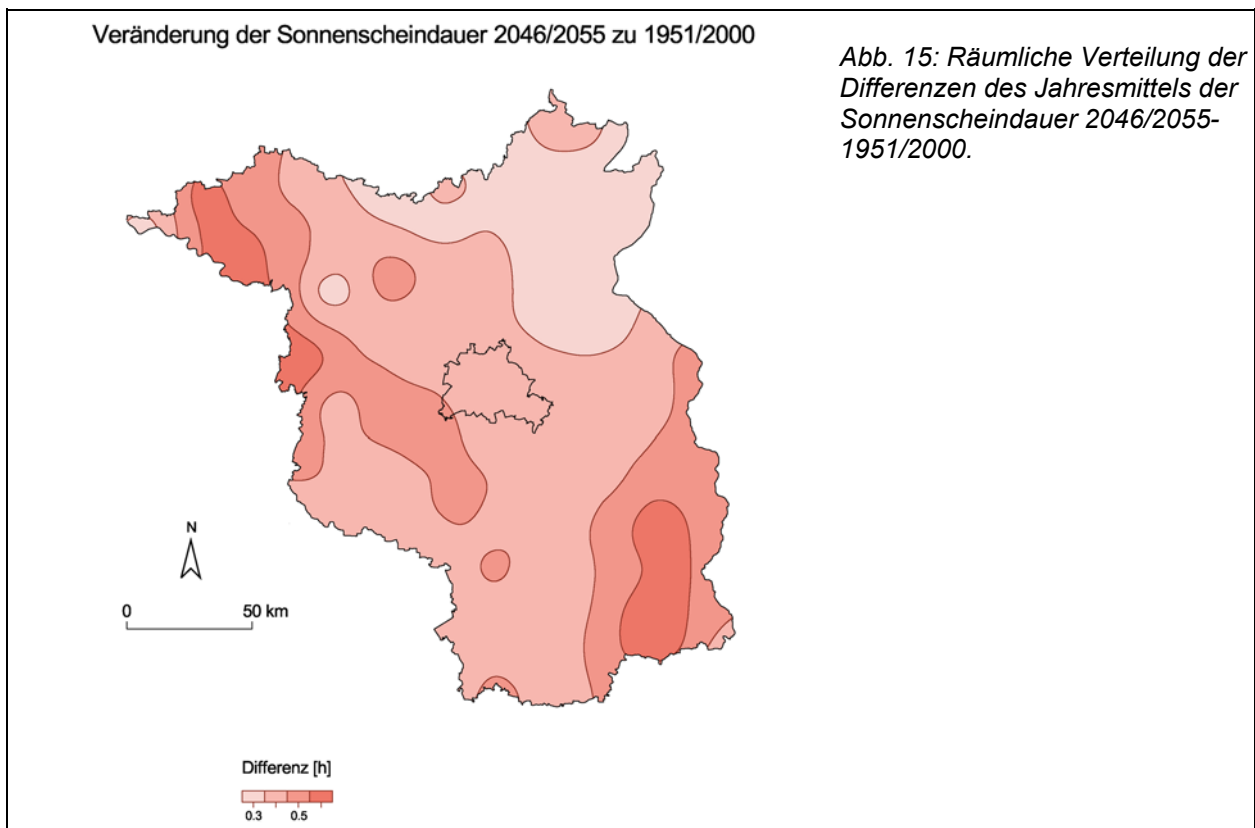
Im Vergleich der Tabelle 2 und Tabelle 7 für die beiden Zeiträume spiegelt sich der allgemeine Niederschlagsrückgang wider. Alle Parameter zeigen am Ende des Szenariumszeitraums kleinere Werte (ausser der höchsten Tagessumme im Herbst) als im Ist-Klima.





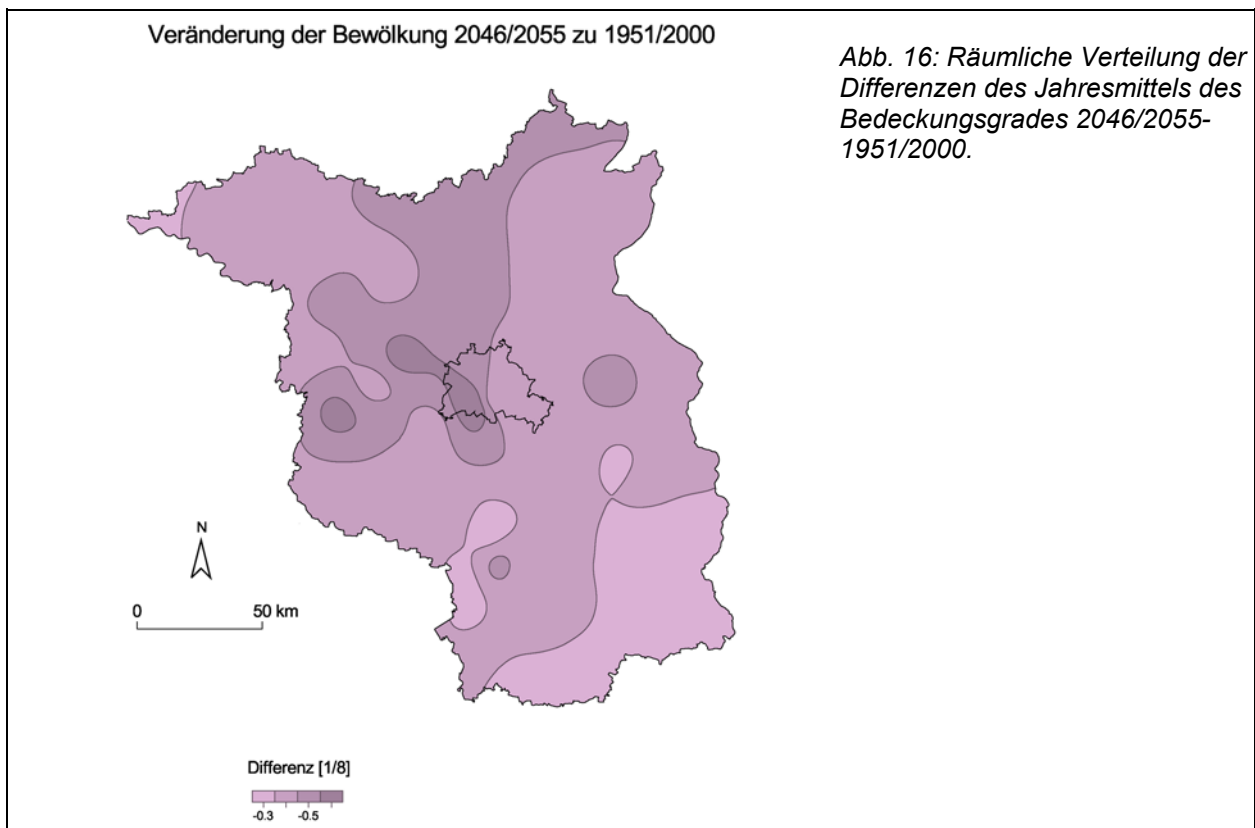
### 1.5.3 Sonnenscheindauer

Die Sonnenscheindauer nimmt im Szenarienzeitraum generell im gesamten Gebiet Brandenburgs zu (Abbildung 15). Der höchste Anstieg ist im Nordwesten und im Südosten mit mindestens 0.6 Stunden pro Tag zu verzeichnen. Aus der Tabelle 3 und der Tabelle 8 ist zu ersehen, dass die Minimalsumme der Sonnenscheindauer im Szenarienzeitraum für alle Jahreszeiten angestiegen ist, bei der Maximalsumme gilt dies nur für den Sommer. Gleichzeitig gehen die Tage ohne Sonnenschein deutlich zurück.



### 1.5.4 Bewölkung

Parallel zur Zunahme der Sonnenscheindauer nimmt die Bewölkung im gesamten Untersuchungsgebiet ab (Abbildung 16), wobei die stärkste Abnahme in einem Streifen, der westlich bis nördlich von Berlin liegt, zu beobachten ist. Ein Vergleich der Tabelle 4 und der Tabelle 9 zeigt, dass in allen Jahreszeiten sowohl die heiteren als auch die trüben Tage abnehmen. Das heisst, dass im Szenarienzeitraum die Schwankungsbreite der Bewölkung gegenüber dem Beobachtungszeitraum deutlich zurückgeht.



## 1.6 Bewertung der Klimaänderungen

Bei einer moderaten Vorgabe eines mittleren Temperaturanstiegs von 1.4 K für den Zeitraum 2001/2055 ergibt sich als markanteste Klimaänderung ein deutlicher Rückgang in den Jahressummen des Niederschlags. Der stärkste Rückgang ist dabei im Sommer zu beobachten. Damit verbunden ist eine Zunahme der Sonnenscheindauer bei gleichzeitigem Rückgang der Bewölkung und ihrer Schwankungsbreite.

Anmerkung: Nicht diskutiert wurden die im klimatologischen Sinn geringen Änderungen, die statistisch nicht signifikant sind, der meteorologischen Größen Luftdruck, Wasserdampfdruck, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit. Allerdings werden diese Größen in den folgenden Untersuchungen verwendet und tragen somit zu Änderungen in der Hydrologie, Land- und Forstwirtschaft des Landes Brandenburg bei.

Das Szenarium A1B geht in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts von einer deutlichen Emissionsminderung aus. Trotzdem wird sich der Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts fortsetzen. Das heisst, dass es hinsichtlich der Klimaentwicklung Brandenburgs keine Entwarnung geben wird, sich also die Randbedingungen, denen man sich anpassen muss, noch verschärfen werden.

Die Ergebnisse des Projektes GLOWA-Elbe (s. auch Kapitel 1) zeigen, dass sich im gesamten Elbe-Einzugsgebiet das Klima wie in Brandenburg entwickeln wird und daher z.B. keine Entlastung des Wasserdargebots (s. Kapitel 2.5 und Kapitel 2.6) durch eine höhere Wasserführung der Flüsse oder durch Überleitungen zu erwarten ist.

## 1.7 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse stellen die mittlere Klimaentwicklung Brandenburgs dar. Offen ist noch die Frage, wie sich in den nächsten 50 Jahren extreme Ereignisse hinsichtlich der Häufigkeit und Intensität ihres Auftretens entwickeln werden. Diese Frage ist von besonderem Interesse, da im Rahmen der zu erwartenden Klimaänderungen mit einer Zunahme extremer Ereignisse zu rechnen ist. Aus diesem Grund befasst sich der in Vorbereitung befindliche 4. Assessment Report des IPCC mit der Frage der globalen Entwicklung extremer Ereignisse.

Außerdem müssen dazu noch die regionalen dynamischen Klimamodelle auf einen Stand gebracht werden, der Aussagen zu Extremen in ihrem räumlichen und zeitlichen Auftreten ermöglicht. Aber heute kann man schon einschätzen, dass die Extreme wie Hochwasser, Dürren, Stürme u.a. auch zukünftig weiter zunehmen werden oder sich ihre Anzahl auf einem hohen Niveau stabilisiert. Global nahmen diese Erscheinungen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts um mehr als das Vierfache zu (*Münchener Rück, 2000*).

Aufgrund der nicht expliziten Untersuchung der Extreme konnten auch die von außen kommenden Einflüsse wie die Entstehung von Hochwässern in den Oberläufen von Elbe, Spree und Oder durch Starkregen nicht behandelt werden.

Als Beispiel für eine Untersuchung zu den Folgen von Extremen kann die bereits vor einiger Zeit am PIK erstellte Studie zur Waldbrandgefährdung im Land Brandenburg bis 2050 angeführt werden, deren Ergebnisse der Anlage 1 zu entnehmen sind.

## 1.8 Literatur

- DKRZ, (2001): <http://www.dkrz.de/>, unter: Klimadatenbank/Klimadatensätze am DKRZ.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., (1997): "A method to estimate the statistical confidence of cluster separation", *Theor. Appl. Climatol.*, **57**, p. 103-110.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., Fraedrich, K. (1999): "Applying non-hierarchical cluster analysis algorithms to climate classification: some problems and their solution", *Theor. Appl. Climatol.*, **64**, 3-4, p.143-150.
- IPCC (2001): "Climate change 2000, Summary for policy makers", Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Lorenz, E.N., (1963): "Deterministic nonperiodic flow", *J. Atm. Sciences*, **20** (130), p. 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 conditons", Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 191, Hamburg.
- Münchener Rück, (2000): "topics 2000, Naturkatastrophen - Stand der Dinge", Sonderheft Millennium, München.
- Weber, E., (1980): "Grundriß der biologischen Statistik", VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- 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, Hamburg.

*Brandenburg liegt im Bereich des gemässigten, kontinentalen Klimas mit einer durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur je nach Region zwischen 7.8 °C und 9.5 °C. Das Land gehört mit einer Jahresniederschlagssumme deutlich unter 600 mm (im Nordosten weniger als 500 mm) zu den trockensten Regionen Deutschlands. Dabei nahmen insbesondere in den letzten Jahrzehnten die Summen der Sommerniederschläge zur Zeit deutlich ab, die der Winterniederschläge leicht zu.*

*Innerhalb der nächsten 50 Jahre sind bei einem moderaten Temperaturanstieg von 1.4 K in Brandenburg folgende Klimaänderungen im Vergleich zur aktuellen Situation zu erwarten:*

- *Niederschlagsrückgang*

*Das Gebietsmittel der Jahressumme liegt um 2050 unter 450 mm, im Nordosten und Süden Brandenburgs unter 400 mm.*

*Die Abnahme ist räumlich stark differenziert und reicht von -17.8 mm (südöstlich von Berlin) bis zu -221.0 mm um Luckau.*

- *Zunahme der Sonnenscheindauer*

*Höchster Anstieg mit mindestens 0.6 h pro Tag im Nordwesten und Südosten.*

- *Abnahme der Bewölkung*

*Am deutlichsten dokumentiert durch einen Rückgang der Anzahl trüber Tage.*

### **9.3 veröffentlichte Artikel**

Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., Fraedrich, K., Oesterle, H. (2000) "Climate Change in the North Atlantic/European Sector", Intern. J. of Climatology, 20 (5), 463-471

Fraedrich, K., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (2001) "Climate shifts during the last century", Climatic Change, 50, 405-417

Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., Österle, H. (2002) "Klimatypänderungen in Deutschland im 20. Jahrhundert", Klimastatusbericht 2001, Deutscher Wetterdienst, Offenbach a.M., 185-194

Kücken, M., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (2002) "Cluster analysis results of regional climate model simulations in the PIDCAP period", Boreal Env. Research, 7, Helsinki, 219-223

Gerstengarbe, F.-W., Kücken, M., Werner, P.C. (2003) "A new validation scheme for the evaluation of multiparameter fields", eingereicht bei Tellus