

Leibniz Universität Hannover  
Institut für Meteorologie und Klimatologie

**Bachelorarbeit**  
im Studiengang Meteorologie

**„Analyse regionaler Klimaszenarien für  
Niedersachsen“**

Vorgelegt von:  
**Manuela Sauer**

Diese Arbeit wurde betreut von Prof. Dr. Günter Groß

Hannover, 15. September 2009

# Kurzfassung

Die seit Mitte des 20. Jahrhunderts deutlich zu verzeichnende Zunahme der globalen Lufttemperatur ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die anthropogen bedingte Freisetzung von Treibhausgasen zurückzuführen. Dieser Trend wird sich weiter verstärken. Die daraus resultierenden Auswirkungen wirken sich unterschiedlich stark auf regionaler Ebene aus und erfordern individuelle Anpassungsstrategien. Die Klimafolgenforschung auf kleinskaliger Ebene gewinnt somit zunehmend an Bedeutung. Hilfsmittel werden durch regionale Klimamodelle gestellt. In Deutschland dienen dazu unter anderem CLM und WETTREG.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die mögliche Entwicklung des Klimas in der Region Hannover zu geben. Datengrundlage der durchgeführten Analysen der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung bilden die Berechnungen der regionalen Modelle CLM und WETTREG. Dabei wird ein spezielles Augenmerk auf Kenntage gelegt, da diese sinnvolle Indikatoren bei Schwellenwertüberschreitungen sind und als Eckwerte des sich ändernden Klimas gelten. Darüber hinaus wird die mögliche Entwicklung extremer Ereignisse, wie Hitzeperioden, Starkniederschläge und Sturmereignisse untersucht.

Als Ergebnis der durchgeführten Analyse für den Raum Hannover lässt sich für den Zeitraum 2071 bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 ein Temperaturanstieg der Jahresmittelwerte um  $2.4^{\circ}\text{C}$  bis  $3.3^{\circ}\text{C}$  erwarten. Die saisonale Differenzierung zeigt einen besonders starken Anstieg der Wintertemperaturen um über  $3.7^{\circ}\text{C}$  im Dezember. Im Frühjahr ist der geringste Temperaturanstieg zu verzeichnen.

Die Jahressumme des Niederschlages durchläuft keine signifikante Entwicklung. Saisonale Unterschiede sind jedoch deutlich ausgeprägt. Während in den Sommermonaten ein Rückgang um rund 20% zu erwarten ist, gilt eine deutlich stärkere Zunahme der Winterniederschläge im Raum Hannover als wahrscheinlich.

Die Analyse der Kenntage zeigt eine deutliche Verschiebung. Die Häufigkeit von Eis- und Frosttagen reduziert sich. Heiße Tage, Tropennächte sowie anhaltende Hitzeperioden nehmen in ihrer jährlichen Anzahl, laut Auswertung, um mehr als das Doppelte zu. Hitzestress in Teilen der Bevölkerung wird vermehrt auftreten. Extremniederschläge sind ebenso häufiger zu erwarten. Aussagen zu der Entwicklung der Windverhältnisse, sind auf Grund großer Diskrepanzen beider Regionalmodelle, nicht mit hoher Validität zu treffen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Forschung . . . . .	2
1.2 Regionalisierungsverfahren . . . . .	3
1.3 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	4
<b>2 Material und Methoden</b>	<b>6</b>
2.1 Darstellung der Methoden . . . . .	6
2.1.1 CLM . . . . .	7
2.1.2 WETTREG . . . . .	9
<b>3 Vergleichende Analyse der Daten</b>	<b>12</b>
3.1 Klimaentwicklung in Niedersachsen . . . . .	13
3.1.1 Temperatur . . . . .	13
3.1.2 Niederschlag . . . . .	19
3.1.3 Kenntage . . . . .	25
3.2 Extremereignisse . . . . .	31
3.2.1 Hitzewellen . . . . .	31
3.2.2 Starkniederschläge . . . . .	34
3.2.3 Sturmereignisse . . . . .	39
<b>4 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>44</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>46</b>
<b>A Die Emissionsszenarien des IPCC</b>	<b>I</b>
<b>B Vergleich der Reanalysen mit Beobachtungen</b>	<b>V</b>
<b>C Weiterführende Auswertungen</b>	<b>XIII</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Jahresmitteltemperatur im Modellvergleich im Rahmen des Projektes ZWEK.	2
1.2	Downscaling vom globalen Klimamodell zum regionalen Klimamodell. . . .	4
2.1	Oberflächenhöhe Europas im Vergleich. . . . .	7
2.2	Koordinatendarstellung der zwei Datenströme in CLM. . . . .	8
2.3	Prinzip der Bildung von Zirkulationsmustern durch statistisches Downscaling mit WETTREG. . . . .	10
3.1	Trend der Jahresmitteltemperaturen im 21. Jahrhundert simuliert mit CLM.	14
3.2	Entwicklung der mittleren Minimum-, Mittel- und Maximumtemperaturen.	15
3.3	Änderung von mittlerer Minimum-, Mittel- und Maximumtemperatur in Hannover im Vergleich zwischen CLM und WETTREG in Bezug auf die Referenzperiode. . . . .	16
3.4	Darstellung der mittleren jährlichen, jahreszeitlichen und monatlichen Temperaturentwicklung für die Mittel- und Langfrist. . . . .	17
3.5	Entwicklung der Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen. . . .	18
3.6	Entwicklung der jährlichen Niederschlagssumme im 21. Jahrhundert simuliert mit CLM. . . . .	21
3.7	Entwicklung der Jahresniederschlagssumme in den Betrachtungsperioden. .	21
3.8	Darstellung der mittleren monatlichen, jahreszeitlichen und jährlichen Niederschlagsänderung im Vergleich zur Referenzperiode für die Mittel- sowie die Langfrist simuliert mit CLM und WETTREG. . . . .	22
3.9	Prozentuale Veränderung der Niederschlagsverteilung. . . . .	23
3.10	Entwicklung der Niederschlagstage und der Tage mit signifikantem und intensivem Niederschlag. . . . .	25
3.11	Entwicklung der Kenntage im 21. Jahrhundert simuliert mit CLM. . . . .	26
3.12	Häufigkeit einzelner Kenntage in den Betrachtungsperioden. . . . .	27
3.13	Häufigkeitsänderung einzelner Kenntage im Vergleich zwischen CLM und WETTREG in Bezug zur Referenzperiode. . . . .	29
3.14	Entwicklung der Häufigkeit von Heiztagen und damit verbundener Gradtagszahl. . . . .	30
3.15	Entwicklung der Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden mit $T_x \geq 30^\circ\text{C}$ und $T_x \geq 35^\circ\text{C}$ . . . . .	32
3.16	Entwicklung der Häufigkeit und Andauer von trockenen Hitzeperioden mit $T_x \geq 25^\circ\text{C}$ . . . . .	34

3.17	Entwicklung der Häufigkeit von nassen Tagen in Hannover. . . . .	35
3.18	Entwicklung der jahreszeitlichen Verteilung von nassen Tagen in Hannover. . . . .	36
3.19	Entwicklung absoluter Tagesniederschlagsmaxima einzelner Tage in Hannover. . . . .	37
3.20	Entwicklung der Häufigkeit von Starkregen- und heftigen Starkregenereignissen in Hannover simuliert mit CLM. . . . .	38
3.21	Entwicklung der Häufigkeitsverteilung der mittleren Windstärke in Hannover. . . . .	40
3.22	Veränderung der mittleren monatlichen Windstärke im 21. Jahrhundert in Hannover. . . . .	41
3.23	Entwicklung der Häufigkeit von mittleren Windstärken ab 6 Bft in Hannover. . . . .	42
A.1	Qualitative Beschreibung der Entwicklung unterschiedlicher Sachverhalte innerhalb der SRES Emissionsszenarien. . . . .	I
A.2	Multimodell der Erdoberflächenerwärmung. . . . .	III
A.3	Vergleich der tatsächlichen CO <sub>2</sub> -Emissionen mit den Szenarien des IPCC von 2000. . . . .	IV
B.1	Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen im Referenzzeitraum aus DWD-Daten sowie Reanalysen von CLM und WETTREG. . . . .	V
B.2	Mit CLM und WETTREG reanalyzierte Niederschlagsverteilungen im Referenzzeitraum und ausgewertete DWD-Messdaten im Vergleich. . . . .	VI
B.3	Mit CLM und WETTREG reanalyzierte monatliche Niederschlagssummen im Vergleich zu Messdaten der Referenzperiode. . . . .	VII
B.4	Reanalyzierte Häufigkeit der Kenntage im Vergleich zu ausgewerteten DWD-Messdaten der Referenzperiode. . . . .	VIII
B.5	Mit CLM und WETTREG reproduzierte Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden in der Referenzperiode im Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD. . . . .	VIII
B.6	Mit CLM und WETTREG reproduzierte Häufigkeit und Andauer von trockenen Hitzeperioden im Vergleich zu ausgewerteten DWD-Daten der Referenzperiode. . . . .	IX
B.7	Reproduzierte jahreszeitliche Verteilung nasser Tage im Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD in der Referenzperiode. . . . .	X
B.8	Mit CLM und WETTREG reanalyzierte Häufigkeitsverteilung der Windstärken im Vergleich zu ausgewerteten DWD-Daten der Referenzperiode. . . . .	X
B.9	Reproduzierte monatliche Verteilung der mittleren Windstärke in der Referenzperiode im Vergleich zu ausgewerteten Daten des DWD. . . . .	XI
B.10	Mit CLM und WETTREG reproduzierte Häufigkeit von Sturmtagen in der Referenzperiode im Vergleich zu ausgewerteten Daten des DWD. . . . .	XII
C.1	Entwicklung der Minimum-, Mittel- und Maximumtemperaturen sowie der absoluten Extreme. . . . .	XIII
C.2	Mit CLM und WETTREG simulierte Entwicklung der Niederschlagsverteilung. . . . .	XIV
C.3	Mit CLM simulierte Entwicklung der Kenntage in kurz-, mittel- und langfristiger Betrachtung einzelner, auffälliger Dekaden. . . . .	XIV

---

C.4	Mit CLM simulierte Entwicklung der Kenntage in den einzelnen Jahreszeiten im 21. Jahrhundert. . . . .	XVI
C.5	Mit CLM simulierte Anzahl der Kenntage in den einzelnen Jahreszeiten der 30-jährigen Betrachtungsperioden. . . . .	XVI

# Tabellenverzeichnis

1.1	Die wärmsten Jahre seit Beginn der Klimaaufzeichnungen. . . . .	5
2.1	Wetterelemente in den bereitgestellten Klimastationszeitreihen. . . . .	9
2.2	Vergleich der Modellparameter sowie der wesentlichen Vor- und Nachteile von CLM und WETTREG. . . . .	11
3.1	Temperaturtrend in Hannover. . . . .	18
3.2	Definition der Kenntage. . . . .	26
3.3	Kenntage in Hannover. . . . .	29
3.4	Maximale 5-Tage-Niederschlagssummen in Hannover. . . . .	37
3.5	Maximale einstündige Niederschlagssummen in Hannover. . . . .	39
3.6	Jahresmittel der Tageswindstärke in Hannover. . . . .	41
3.7	Maximale mittlere Tageswindstärke in Hannover. . . . .	42
A.1	Die vier SRES-Szenariofamilien mit prognostizierter globaler Temperaturerhöhung bis 2100. . . . .	III
B.1	Reanalysen der Temperatur in der Referenzperiode im Vergleich zu Messdaten des DWD. . . . .	VI
C.1	Absolute Tagesniederschlagsmaxima in Hannover. . . . .	XVII



# Abkürzungsverzeichnis

Bft	Beaufort
BMBF	<b>B</b> undes <b>m</b> inisterium für <b>B</b> ildung und <b>F</b> orschung
BTU	<b>B</b> randenburgische <b>T</b> echnische <b>U</b> niversität
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
CDO	<b>C</b> limate <b>D</b> ata <b>O</b> perators
CEC	<b>C</b> limate & <b>E</b> nvironment <b>C</b> onsulting Potsdam GmbH
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d. h.	das heißt
DIN	<b>D</b> eutsches <b>I</b> nstitut für <b>N</b> ormung
DJF	<b>D</b> ezember, <b>J</b> anuar, <b>F</b> ebruar
DKRZ	<b>D</b> eutsches <b>K</b> limarechenzentrum
Dtl.	Deutschland
DWD	<b>D</b> eutscher <b>W</b> etter <b>d</b> ienst
ECHAM	<b>E</b> uropean <b>C</b> enter <b>H</b> amburg Model
ERA40	<b>E</b> uropean Centre for Medium-Range Weather Forecasts <b>R</b> e- <b>A</b> nalysis
evtl.	eventuell
GCM	<b>G</b> lobal <b>C</b> limate <b>M</b> odel
GTZ	<b>G</b> radtagszahl
HT	<b>H</b> eiztage
IPCC	<b>I</b> ntergovernmental <b>P</b> anel on <b>C</b> limate <b>C</b> hange
JJA	<b>J</b> uni, <b>J</b> uli, <b>A</b> ugust
KLIWA	<b>K</b> limaveränderung und Konsequenzen für die <b>W</b> asserwirtschaft
LM	<b>L</b> okal <b>m</b> odell
MAM	<b>M</b> ärz, <b>A</b> pril, <b>M</b> ai
MPI	<b>M</b> ax- <b>P</b> lanck- <b>I</b> nstitut
NASA	<b>N</b> ational <b>A</b> eronautics and <b>S</b> pace <b>A</b> dministration
RCM	<b>R</b> egional <b>C</b> limate <b>M</b> odel
REMO	<b>R</b> egionales <b>K</b> lim <b>m</b> odell
SON	<b>S</b> eptember, <b>O</b> ktober, <b>N</b> ovember
SRES	<b>S</b> pecial <b>R</b> eport on <b>E</b> mission <b>S</b> cenarios
STAR	<b>S</b> tatistisch-basiertes <b>R</b> egionalmodell
$\overline{T_m}$	Mitteltemperatur
$T_n$	Minimumtemperatur
$\overline{T_n}$	mittlere Minimumtemperatur
$T_x$	Maximumtemperatur

---

$\overline{T_x}$	mittlere Maximumtemperatur
UBA	<b>U</b> mwelt <b>b</b> undesamt
ü. NN	über Normalnull
VDI	<b>V</b> erein <b>D</b> eutscher <b>I</b> ngenieur <b>e</b>
WETTREG	<b>W</b> etterlagen-basierte <b>R</b> egionalisierungsmethode
WMO	<b>W</b> orld <b>M</b> eteorological <b>O</b> rganisation
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
ZWEK	<b>Z</b> usammenstellung von <b>W</b> irkmodell- <b>E</b> ingangssätzen für die <b>K</b> lima- folgenabschätzung

# Kapitel 1

## Einleitung

Das Klima unterliegt langfristig natürlichen Schwankungen, die bezogen auf unterschiedliche Zeitskalen der Erdgeschichte verschieden stark ausgeprägt sind. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist eine deutliche Zunahme der globalen Luft- und Ozeantemperaturen zu beobachten, die sich allein durch natürliche Klimaschwankungen nicht erklären lassen. Laut IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) sind diese mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die anthropogen bedingte, verstärkte Freisetzung von Treibhausgasen zurückzuführen. Die dadurch hervorgerufenen Klimaänderungen äußern sich in einem globalen Temperaturanstieg und damit verbundenem großflächigem Abschmelzen von Schnee- und Eismassen sowie einem globalen Anstieg des Meeresspiegels (IPCC 2007a). Dieser Trend wird sich in den nächsten Jahren, Jahrzehnten und Jahrhunderten weiterhin fortsetzen. Die Auswirkungen für den Menschen sind vielschichtig und betreffen ihre verschiedenen Lebensbereiche, wie z. B. Ernährung, Gesundheit und Landnutzung. Diese Folgen erreichen globale Ausmaße, wirken sich jedoch auf regionaler Ebene unterschiedlich stark aus. Insbesondere in der Politik und Wirtschaft existiert eine stetige Zunahme der Anerkennung dieser Klimaänderungen mit großem Interesse an Aussagen der Klimaentwicklung in kleinräumigen Gebieten, um Maßnahmen einleiten zu können. Dabei werden heute nicht nur Maßnahmen zum Klimaschutz, sondern zunehmend auch zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt. Staatliche Subventionen für regenerative Energieerzeugung sind beispielsweise daran zu bemessen, ob sich die jeweilige Energieart auch langfristig bestätigen und als rentabel erweisen wird. Ein geeignetes Instrument dafür bilden regionale Klimamodelle, mit dessen Hilfe Klimaänderungen auf gerade dieser Ebene betrachtet werden können.

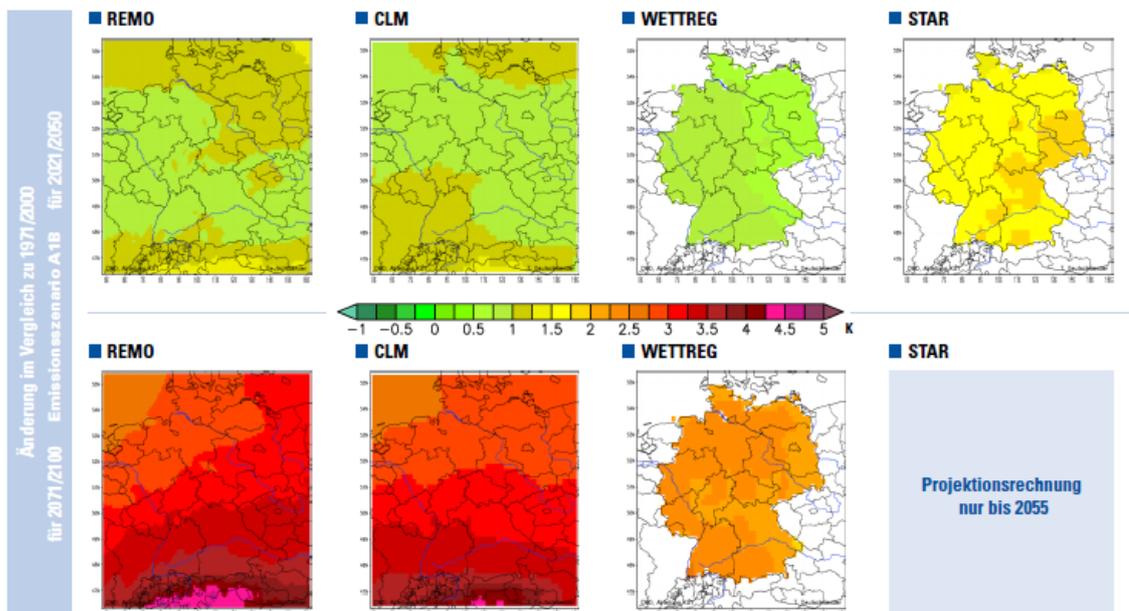
Bei der Analyse regionaler Klimaänderungen sind jedoch neben der Entwicklung der Jahresmittelwerte von Temperatur und Niederschlag insbesondere die Extremwerte von Interesse. Sie zeigen die mögliche Spannbreite des sich verändernden Klimas auf. Zusätzlich gibt die Entwicklung bestimmter Kenntage, wie z. B. Eis- und Frosttage sowie Sommer- und heiße Tage anhand definierter Schwellenwerte Aufschluss darüber, in welchem Ausmaß sich die Temperaturen verändern könnten.

## 1.1 Stand der Forschung

In Deutschland gibt es diverse Forschungsvorhaben und Projekte, die sich der regionalen Klimaentwicklung widmen.

Seit Anfang 2007 verfolgt der Deutsche Wetterdienst das Projekt ZWEK (Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangssatzen für die Klimafolgenabschätzung). Dabei soll ein Verfahren zur langfristigen Vorhersage der Klimaentwicklung und ihrer Auswirkung auf der regionalen bis lokalen Skala entwickelt werden, welches auf den aktuellen Resultaten von vier regionalen Klimamodellen basiert. Bei den hierbei genutzten Klimamodellen, die das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland abbilden, handelt es sich um die Projektionen der zwei numerischen Modelle CLM und REMO sowie der statistischen Modelle WETTREG und STAR. Während der Antrieb der drei Erstgenannten einheitlich der globalen Klimasimulationen des ECHAM5-Modells entstammt, liefert dieses Globalmodell lediglich Trendvorgaben für das Modell STAR. Dieses Modell erstellt im Unterschied zu den anderen regionalen Modellen derzeit nur Projektionen bis zum Jahr 2055 (SGA 2007).

### Modellvergleich: Jahresmitteltemperatur



**Abbildung 1.1:** Jahresmitteltemperatur im Modellvergleich im Rahmen des Projektes ZWEK des Deutschen Wetterdienstes. Ergebnisse der ersten Projektphase, die die zu erwartenden Änderungssignale für die Projektionszeiträume 2021-2050 und 2071-2100 darstellen. Als Referenzperiode dient der jeweilige modellspezifische Kontrollzeitraum 1971-2000 (DEUTSCHLÄNDER 2008).

Zusätzlich erfolgen Untersuchungen auf der Ebene einzelner Bundesländer. Ziel dabei ist es jeweils, möglichst gesicherte Aussagen über die zukünftigen Auswirkungen der Klimaänderungen auf regionaler Ebene treffen zu können (KLIWA 2006). Wasserhaushalt, Land- und Forstwirtschaft stehen dabei besonders im Fokus der Untersuchungen. Je nach Projekt, Bundesland und ausführender Institution werden unterschiedliche Modelle genutzt. Diverse Projekte beschäftigen sich auf ähnliche Art und Weise mit der Klimaentwicklung in Brandenburg, Hessen, Sachsen und Thüringen. Zum Teil wurden bereits beachtenswerte Ergebnisse mit wirtschaftlicher Relevanz geliefert (ENKE 2003). Das Projekt

„Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) untersucht die zukünftigen Auswirkungen des sich ändernden Klimas in Süddeutschland. Bayern und Baden-Württemberg stehen dabei im Mittelpunkt (KLIWA 2006).

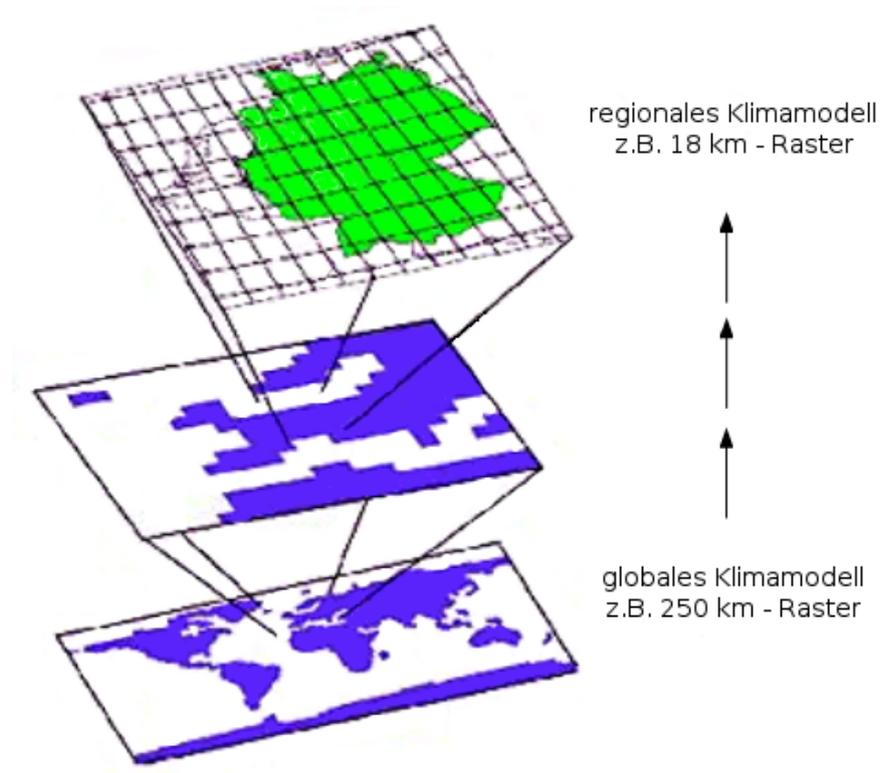
Für Niedersachsen werden solche Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Klima-FolgenManagement — Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen“ durchgeführt, welches durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und Teil des klimazwei-Förderschwerpunktes ist. Ziel dieses Projektes ist es, Strategien zur Anpassung an den Klimawandel zu erarbeiten. Basierend auf den Ergebnissen der Climate Limited-area Modelling Community (CLM-Community) wurden dort ausgewählte lokalklimatische Parameter für das Gebiet der Metropolregion bis zum Jahr 2100 auf einem Raster von einem Quadratkilometer Auflösung modelliert. Anhand dieser gesammelten Daten werden dann Flächen identifiziert, für die, aufgrund besonders starker Beeinflussung durch den Klimawandel, Handlungsoptionen und -prioritäten bestehen (BARDT *et al.* 2009). Diese Bachelorarbeit dient als Ergänzung dieses Forschungsprojektes und untersucht zusätzlich, zunächst exemplarisch für Hannover, die Entwicklung von Kenntagen und Extremereignissen.

## 1.2 Regionalisierungsverfahren

Die Modellierung der Klimaentwicklung der Erde wird in großem Maßstab durch globale Zirkulationsmodelle (GCM — Global Climate Model) erreicht. Diese berücksichtigen, basierend auf numerischen Grundlagen, Prozesse in der Atmosphäre, den Ozeanen, von Eis, Schnee und der Vegetation. Zusätzlich sind Rahmenbedingungen nötig, die die zukünftige Entwicklung der Gesellschaft und deren Einfluss auf die Umwelt beschreiben (LFU BAYERN 2009). Sie sind unverzichtbare wissenschaftliche Grundlage der Diskussion über Maßnahmen, die den Klimawandel in seinen Auswirkungen reduzieren könnten (WELFENS 2008). Solche möglichen Entwicklungen bis zum Jahr 2100 wurden vom Intergovernmental Panel on Climate Change als sozioökonomisch und technologisch begründete Emissionsszenarien definiert (LFU BAYERN 2009). Die insgesamt 40 Szenarien wurden in 4 Hauptgruppen, den sogenannten SRES-Szenariofamilien (Second Report on Emission Scenarios) A1, A2, B1 und B2, zusammengefasst. Sie zeigen mögliche Entwicklungskorridore der Konzentration an Treibhausgasen und Aerosolpartikeln in der Atmosphäre auf und differenzieren zwischen wirtschaftlicher und demographischer Entwicklung sowie dem Grad der Globalisierung (BMVBS 2007). Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Szenarien ist im Anhang A zu finden.

Aufgrund des enormen Rechenaufwandes, bedingt durch die langen Berechnungszeiträume in zeitlich hoher Auflösung und die Komplexität der Parameter, liegt die horizontale Auflösung der globalen Modelle bestenfalls bei etwa 150 \* 150 km. Auf dieser Maßstabsebene sind Aussagen zu regionalen Klimaänderungen nicht möglich (UBA 2007). Um dennoch Aussagen auf regionaler Ebene treffen zu können, werden die globalen Klimamodelle in einem zweiten Schritt weiter regionalisiert. Dafür stehen grundsätzlich zwei Herangehensweisen zur Verfügung, das dynamische sowie das statistische Verfahren (MATULLA *et al.* 2003). Die Ergebnisse der globalen Klimamodelle werden dabei mit einem sogenann-

ten „Downscaling“ herunterskaliert. Diese Realisierung erfolgt in der Regel schrittweise in Gitterstufen.



**Abbildung 1.2:** Downscaling vom globalen Klimamodell zum regionalen Klimamodell. Die Realisierung erfolgt in der Regel in einzelnen Schritten. Zur Durchführung stehen dabei verschiedene Verfahren zur Verfügung (KLIWA 2006).

Da die regionalen Modelle (RCM — Regional Climate Model) ihre Randbedingungen aus den globalen Modellen übernehmen, werden sie in die großräumigen Berechnungen eingebettet. Dies wird auch als „Nesting“ bezeichnet (JACOB *et al.* 2008).

### 1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Die Klimafolgenforschung gewinnt in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Der Trend geht dabei weg von bundesweiten Auswertungen und hin zu Untersuchungen auf der Ebene einzelner Bundesländer und Regionen. Die globalen Temperaturmessungen der NASA (National Aeronautics and Space Administration) zeigen, dass bisher alle Jahre des neuen Jahrhunderts unter den 10 wärmsten Jahren seit Beginn der Klimaaufzeichnungen im Jahr 1880 zu finden sind (NASA 2009). Auch die Auswertungen der Mitteltemperaturen für die Station „Hannover-Langenhagen“, die seit 1936 aufgezeichnet werden, bestätigen diesen Trend zunehmender Temperaturen (Vgl. Tabelle 1.1). Ähnliches gilt für die scheinbar zunehmende Häufigkeit und wachsende Ausprägung von Extremereignissen, die in den vergangenen Jahren vermehrt auftraten. Dazu zählen z. B. der Hitzesommer 2003 (SCHÖNWIESE 2006) und Stürme wie „Kyrill“ (2007) oder „Emma“ (2008), die in großen Teilen Deutschlands starke Schäden anrichteten (WETTERONLINE 2008). Auswertungen des IPCC weisen ebenfalls auf Entwicklungen dieser Art hin. Aufgrund dieser Tendenz ist

Rangfolge	Global		Hannover	
	Jahr	°C	Jahr	°C
1	2005	14.62	2000	10.78
2	1998	14.56	2007	10.63
3	2007	14.56	1999	10.63
4	2002	14.55	2006	10.52
5	2003	14.54	1990	10.44
6	2006	14.54	1989	10.43
7	2001	14.48	2008	10.32
8	2004	14.48	1994	10.22
9	2008	14.44	1992	10.20
10	1997	14.39	2002	10.11

**Tabelle 1.1:** Die wärmsten Jahre seit Beginn der Klimaaufzeichnungen. Die mittleren Spalten gehen dabei auf den globalen Durchschnitt ein (NASA 2009). Die Genauigkeit der Angabe auf zwei Stellen nach dem Komma ist aufgrund von unzähligen Faktoren, wie z. B. unterschiedlicher Höhenlagen des Untersuchungsgebietes fraglich, wurde aber dennoch so übernommen. Die rechten Spalten zeigen die Rangfolge der wärmsten Jahre in der Region Hannover anhand von Messwerten des DWD an der Station „Hannover-Langenhagen“. In der Auswertung sind Tagesmitteltemperaturen der Jahre 1936 bis 2008 berücksichtigt.

es von besonderem Interesse diese und weitere Entwicklungen sowie ihre Auswirkungen regional für den Raum Hannover näher zu beleuchten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Simulationen zweier regionaler Klimamodelle mit unterschiedlichem Regionalisierungsansatz für verschiedene Kenntage sowie für Extremereignisse wie Starkregen und Stürme vergleichend darzustellen und zu interpretieren. Die Analyse erfolgt anhand des dynamischen, nicht-hydrostatischen Modells CLM und des statistischen Modells WETTREG exemplarisch für den Raum Hannover.

Im folgenden Kapitel werden die beiden Regionalisierungsverfahren CLM und WETTREG erläutert. Im Anschluss daran werden in Kapitel 3 zunächst Temperatur und Niederschlag und daraufhin die einzelnen Kenntage sowie Extremereignisse vergleichend mit CLM und WETTREG analysiert. In Kapitel 4 erfolgt eine abschließende Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse sowie Anregungen zu möglichen weiterführenden Untersuchungen.

# Kapitel 2

## Material und Methoden

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in einer umfassenden Analyse der Daten und Ergebnisse, die mit den Regionalisierungsmodellen CLM und WETTREG gerechnet werden. Diese Simulationen dienen als Darstellung bestehender Trends sowie der Abbildung der zukünftigen regionalen Entwicklung einzelner Klimaparameter. Es ist dabei zu beachten, dass diese Simulationen — anders als Prognosen — nicht die Fähigkeit der Vorhersage aufweisen, sondern nur eine mögliche Entwicklung aufzeigen (WELFENS 2008). Nach der Betrachtung der einzelnen Auswertungen werden in einem zweiten Schritt die Ergebnisse von CLM und WETTREG miteinander verglichen, wobei auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten eingegangen wird. Im Folgenden wird sich auf die Modellläufe des Szenarios A1B beschränkt, welches im Vergleich der Emissionsszenarien einen mittleren Temperaturanstieg zur Folge hat (siehe Abbildung A.2 im Anhang). Annahmen, die diesem Szenario zugrunde liegen, sind rasches Wirtschaftswachstum, eine zunächst zunehmende, ab Mitte des 21. Jahrhunderts aber rückläufige Weltbevölkerung und eine rasante Entwicklung neuer und effizienter Technologien, die in Folge dessen ausgewogen genutzt werden.

### 2.1 Darstellung der Methoden

Die vergleichende Analyse der Klimaentwicklung wird in Kapitel 3 anhand der Daten von CLM und WETTREG durchgeführt, welche auf unterschiedlichen Methoden der Regionalisierung basieren. Zur Überprüfung der Modellgüte dienen Beobachtungsdaten, wie z. B. die Referenzperiode 1961 bis 1990. In der sogenannten Validierung wird dann geprüft, inwieweit das Modell in der Lage ist, diese Beobachtungsdaten unter den gegebenen Randbedingungen darzustellen (LFU BAYERN 2009). Es werden also Simulationen für die Periode 1961 bis 1990 mit dem Modell erstellt und mit den Messdaten verglichen. Dies gilt als eine der Grundvoraussetzungen dafür, dass das Modell für Szenariorechnungen eingesetzt werden darf (SPEKAT *et al.* 2007). Eine solche „Güteüberprüfung“ für den Raum Hannover soll in kleinem Ausmaß anhand der hier betrachteten Größen auch in dieser Arbeit dargestellt werden. Die zugehörigen Abbildungen finden sich dazu im Anhang B. Das Untersuchungsgebiet umfasst die Region Hannover ( $9.5^\circ - 9.7^\circ$  nördlicher Breite und  $52.3^\circ - 52.7^\circ$  östlicher Länge). Zunächst soll aber die differenzierte Funktionsweise der

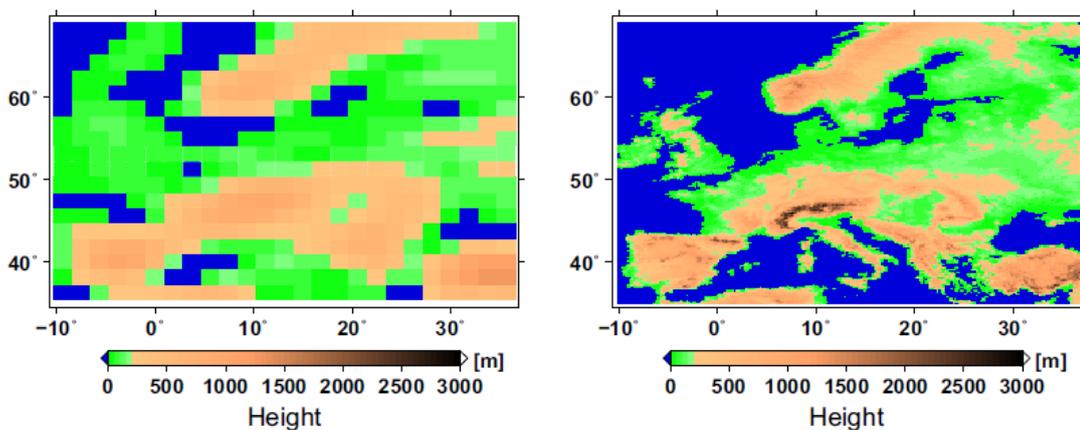
zwei Regionalisierungsverfahren in Grundzügen erläutert werden, um Kenntnisse über die wesentlichen Unterschiede der Modelle zu erlangen. In den Auswertungen auftretende Abweichungen können so in Ansätzen erklärt werden.

Der Vollständigkeit halber sei hier nochmals erwähnt, dass in Deutschland weitere regionale Klimamodelle wie z. B. das statistisch-basierte Regionalmodell STAR und das dynamische Regionalmodell REMO Anwendung finden.

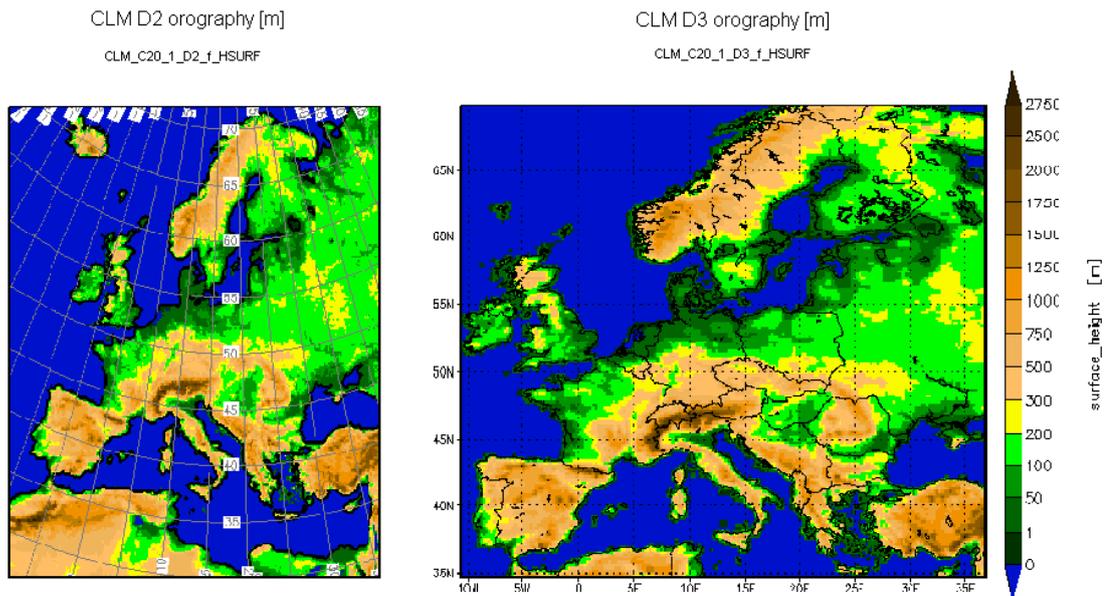
### 2.1.1 CLM

Das CLM (**C**limate **L**imited-area **M**odel) wurde vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung in Anlehnung an das seit 1999 vom DWD für die tägliche Wettervorhersage genutzte Lokalmmodell (LM) entwickelt. Die erste Klimaversion des LM (CLM) wurde 2002 abgeschlossen (ROCKEL *et al.* 2008). Die weitere Entwicklung dieses Modells wird von der CLM-Community, einem Netzwerk internationaler Institutionen und Wissenschaftler, durchgeführt, von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus koordiniert und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die technische Durchführung der Modellsimulationen erfolgt durch die Gruppe „Modelle & Daten“ am Max-Planck-Institut (MPI) für Meteorologie auf Rechnern des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg (CLM-COMMUNITY o. J.).

Bei CLM handelt es sich um ein dynamisches Verfahren, das auf den gleichen Grundlagen wie globale Klimamodelle basiert, bei dem aber durch die sogenannte Nesting-Strategie (das Einbetten des regionalen in das globale Klimamodell) eine Fokussierung auf ein Teilgebiet der Erde vorgenommen wird (KLIWA 2006). In dem sich auf Europa beschränkenden Modellausschnitt werden Simulationen für den Zeitraum 1960 bis 2100 mit einer deutlich höheren räumlichen Auflösung von  $0.165^\circ$ , was etwa  $18 * 18$  km entspricht, gerechnet. Die für die Simulation nötigen Anfangs- und Randbedingungen an den Rändern des Modellgebietes werden durch das gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Modell ECHAM5/MPI-OM gestellt, welches eine horizontale Auflösung von  $150 * 150$  km aufweist (M & D 2008). Bei



**Abbildung 2.1:** Die Oberflächenhöhe Europas im Vergleich. Links: ECHAM5/MPIOM, bemessen aus dem Oberflächengeopotential. Rechts: CLM, Parameter HSURF für Datenstrom 3 (M & D 2008).



**Abbildung 2.2:** Koordinatendarstellungsarten der zwei Datenströme in CLM. Links: rotiertes Koordinatensystem. Rechts: entrotiertes Gitter, geographische Koordinaten (Vgl. SGA 2008).

der Betrachtung des Höhenparameters der Erdoberfläche in Abbildung 2.1 wird deutlich, dass z. B. die Topographie und die daran gekoppelten Veränderungen der Klimaparameter durch die höhere Auflösung genauer dargestellt werden können. Während die Alpen in der linken Abbildung (der Darstellung des Globalmodells) eine Höhe von nur rund 1000 m aufweisen, werden sie von dem regionalen Klimamodell (rechts) deutlich besser mit bis zu 3000 m Höhe simuliert. Damit wird ihre große Bedeutung sowohl im regionalen Klima als auch für den Wasserkreislauf realistischer wiedergegeben (KLIWA 2001).

Anders als in den globalen Klimamodellen, verfügt das CLM, wie auch das LM, als bisher einziges deutsches Klimamodell über eine nicht-hydrostatische Komponente (BMVBS 2007), d. h. diese Modelle beruhen nicht auf der statischen Grundgleichung, sondern berücksichtigen vertikale Beschleunigungen und können damit kleinräumige und konvektive Vorgänge simulieren (WERNER und GERSTENGARBE 2007).

Das verfügbare CLM-Ensemble besteht aus drei Realisierungen der jüngsten Vergangenheit (1961 - 2000) und jeweils zwei Realisierungen der Klimaprojektion für das 21. Jahrhundert, für das die SRES-Szenarien A1B und B1 zugrunde gelegt wurden (BTU COTTBUS 2008). Durch die verschiedenen Realisierungen soll die interne Variabilität des Klimasystems widerspiegelt werden. Grundsätzlich werden zwei Berechnungen durchgeführt. In Datenstrom 2 stehen Simulationen auf einem rotierten Koordinatensystem in der  $0.165^\circ$  Auflösung zur Verfügung, während in Datenstrom 3 aufbereitete Daten auf entrotiertem Gitter, d. h. auf geographischen Koordinaten, in  $0.2^\circ$  Auflösung bereitgestellt werden (SGA 2008). Dargestellt wird dies in Abbildung 2.2.

Als prognostische Variablen in diesem Modell werden neben den horizontalen Windkomponenten, der Temperatur, der Druckabweichung von einem hydrostatischen, konstanten Hintergrunddruck, der spezifischen Feuchte und dem Wolkenwassergehalt, optional weitere Parameter herausgegeben. Dazu zählen die turbulente kinetische Energie, Wolkeneis sowie der Regen-, Schnee- und Graupelgehalt der Atmosphäre. Hinzu kommen physikalische

Parametrisierungen subskaliger Prozesse für beispielsweise die Strahlung, Konvektion und turbulente Flüsse sowie den skaligen Niederschlag (WERNER und GERSTENGARBE 2007).

Aufgrund der sehr intensiven Nutzung der Informationen des zugrunde gelegten globalen Klimamodells als Randbedingungen, haben dessen großräumige Modellfehler einen starken Einfluss auf die nachfolgende dynamische regionale Klimamodellierung. „Änderungen oder Fehler in der synoptischen Klimatologie pflanzen sich fort und wirken sich direkt auf die Modellgüte der RCM aus. Die Realitätsnähe der regionalen Modelle ist damit entscheidend von der Güte der Globalmodelle abhängig“ (KLIWA 2006).

Zur Datenaufbereitung und -analyse bieten sich bei CLM die Climate Data Operators (CDO) an. Sie sind in der Lage, die im netCDF-Format (Dateiendung) vorliegenden Ergebnisse von CLM, einzulesen und beispielsweise geographische oder zeitliche Bereiche auszuschneiden (SCHULZWEIDA o. J.).

### 2.1.2 WETTREG

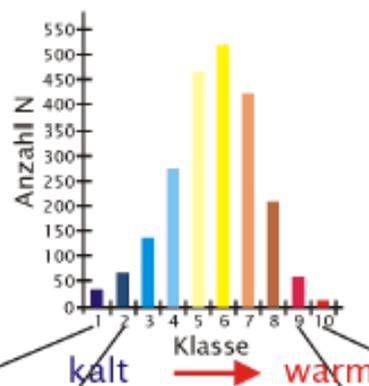
WETTREG (**W**etterlagen-basierte **R**egionalisierungsmethode) ist ein regionales Klimamodell der Firma Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC), welches im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt wurde (UBA 2007). Gemäß SPEKAT *et al.* (2007) ist WETTREG „ein statistisches Verfahren, das die Vorteile der dynamischen Modelle mit den Möglichkeiten eines statistischen Wettergenerators zur Erzeugung von Stationsreihen verbindet“. Die Datengrundlage bilden Messdaten der 282 Klima- und 1695 Niederschlagsstationen des DWD in Deutschland (SPEKAT *et al.* 2007). Dabei werden zehn Wetterelemente in den Klimastationsreihen verwendet (siehe Tabelle 2.1).

Wetterelement	Einheit
Maximum der Temperatur	°C
Tagesmittel der Temperatur	°C
Minimum der Temperatur	°C
Tagessumme des Niederschlages	mm
Tagesmittel der relativen Feuchte	%
Tagesmittel des Luftdruckes	hPa
Tagesmittel des Dampfdruckes	hPa
Tagessumme der Sonnenscheindauer	h
Tagesmittel des Bedeckungsgrades	octas
Tagesmittel der Windstärke	Bft

**Tabelle 2.1:** Wetterelemente in den bereitgestellten Klimastationszeitreihen bei WETTREG nach SPEKAT *et al.* (2007).

Für die Anwendung der WETTREG-Regionalisierungsmethode sind drei Datenkomponenten nötig. Zu Beginn wird durch das Re-Analysieren der Messdaten ein auf homogenen Daten beruhendes dreidimensionales Bild der Jetztzeit erstellt. Diese Rechnungen sind auf die ERA40-Reanalysen gestützt und werden für den Zeitraum 1961 bis 2000 durchgeführt. Im zweiten Verfahrensschritt erfolgt eine objektive Wetterlagenklassifikation normierter Feldtypen dieser Periode. Es werden 10 Klassen für das Temperaturregime (sehr extrem kalt bis extrem warm) und 8 Klassen innerhalb des Feuchteregimes (sehr trocken bis

## 1. Häufigkeitsverteilung aller Werte, z.B. Temperatur, Tagesbasis



## 2. Bildung von Composites aller Tage, die zu einer Klasse gehören



**Abbildung 2.3:** Prinzip der Bildung von Zirkulationsmustern durch statistisches Downscaling mit WETTREG. Für jede Station werden Häufigkeitsverteilungen der Klimaelemente erstellt, die dann in Klassen eingeteilt werden (SPEKAT *et al.* 2007).

sehr feucht) erstellt, in die die lokalen Auswirkungen (die Messdaten) eingeteilt werden (CEC-POTSDAM 2009). Im letzten Schritt werden die Klimadaten der Kontrollperiode, in diesem Fall 1961 bis 2000, reproduziert um Zusammenhänge zwischen großräumigen Wetterlagen und den regionalen Auswirkungen abzuleiten, wie es in Abbildung 2.3 vereinfacht dargestellt ist. Die Daten liegen also für den genannten Kontrolllauf vor und für das 21. Jahrhundert werden Rechnungen mit den SRES-Szenarien A1B, A2 und B1 durchgeführt. Die Randbedingungen liefert seit 2005 wie beim CLM das globale Zirkulationsmodell ECHAM5/MPI-OM T63L31 des MPI für Meteorologie in Hamburg (SPEKAT *et al.* 2007), dessen Ergebnisse in Form von Temperatur- und Niederschlagsverläufen auf Deutschland oder einzelne, regional höher aufgelöste Gebiete abgebildet werden (KLIWA 2006).

Dieses Verfahren erfolgt unter der Annahme, „dass zwischen der großräumigen Druck- und Temperaturverteilung über dem Nordatlantik und den Witterungsgrößen an ausgewählten Standorten statistische Beziehungen bestehen“ (KLIWA 2006). Es wird damit vorausgesetzt, dass zum einen globale Klimamodelle in der Lage sind, das Klima großräumig hinreichend genau zu beschreiben (SPEKAT *et al.* 2007) und dass zum anderen die am historischen Datenmaterial gewonnenen Informationen zwischen großräumigen Feldern und lokalen Wetterelementen auf diese globalen Modellsimulationen für das Zukunftsszenario angewendet werden dürfen. Im Vergleich zu CLM ist der Fehlereinfluss der Globalmodelle bei dieser Regionalisierungsmethode weniger relevant, da globale Informationen mit geringerer Intensität als bei dynamischen Verfahren genutzt werden (KLIWA 2006).

Die szenariobedingte Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Muster wird von WETTREG dekadenweise im Zeitraum von 2001 bis 2100 an jeder Messstation berechnet. Die Auflösung ist demnach abhängig von der Verteilung der Stationen. Das Ergebnis besteht aus 10 Simulationen à 7300 Tage, also 20 „Modelljahre“, pro Dekade, die das statistische Verhalten der Szenariodekade im Bereich der Modellvariabilität widerspiegeln (SPEKAT *et al.* 2007).

Die Darstellung der Ergebnisse mit WETTREG erfolgt durch das interaktive Diagnose- und Präsentationstool IDP2006. Es ermöglicht die Darstellung der Klimadaten in Form von geographischen Verteilungen in Kartenform und die Erzeugung diverser Linien-, Balken- und Ringdiagrammen für unterschiedliche Zeiträume, um qualitative und quantitative Aussagen treffen zu können (CEC-POTSDAM 2009). Neben der Abbildung von Temperatur, Niederschlag und Kenntagen, wird die Darstellung von Andauerperioden, Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten bestimmter Schwellenwerte ermöglicht. Zudem können Vergleiche mit dem Bezugszeitraum durchgeführt werden, wobei zu beachten ist, dass es sich bei den Klimadaten der Periode 1961 bis 2000 um Reanalysedaten des Kontrolllaufes handelt. Für Niedersachsen stehen bei WETTREG Daten aus insgesamt 24 Klima- und 168 Niederschlagsstationen zur Verfügung, die in die Fläche interpoliert werden (KREIENKAMP und SPEKAT 2006).

Die wesentlichen Informationen zu CLM und WETTREG sind nochmals in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Modell	CLM	WETTREG
Modelltyp	dynamisch	statistisch-dynamisch
Antrieb	ECHAM5	ECHAM5
Entwicklung	PIK, CLM-Community	CEC, Potsdam
Modellgebiet	Europa	Deutschland
Zeitraum	1960 - 2100	1961 - 2100
Emissionsszenarien	A1B, B1	A1B, B1, A2
Räumliche Auflösung	0.165° bzw. 0.2°	abhängig von Stationsdichte
Zeitliche Auflösung	Stundenwerte	Tageswerte
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebiete außerhalb des Simulationsgebietes berücksichtigt</li> <li>• Alle Atmosphärenschichten</li> <li>• Simulation bisher unbekannter Ereignisse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringe Ansprüche an Infrastruktur</li> <li>• Realitätsgebunden</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Aufwand an Rechenzeit</li> <li>• Starke Bindung an GCM</li> <li>• Basiert auf physikalischen Gleichungen, wenig Realitätsnähe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine neuen Extreme</li> <li>• Statistische Beziehungen in Zukunft evtl. nicht erhalten</li> <li>• Nicht alle globalen Verhältnisse gehen ein</li> </ul>

**Tabelle 2.2:** Vergleich der Modellparameter sowie der wesentlichen Vor- und Nachteile von CLM und WETTREG (Vor- und Nachteile in Anlehnung an LUG HESSEN 2009).

## Kapitel 3

# Vergleichende Analyse der Daten

Dieses Kapitel dient der Analyse der Klimaentwicklung und der Betrachtung extremer Wetterereignisse in der Region Hannover. Da es nach Aussagen von BERNSTEIN *et al.* (2008) sehr wahrscheinlich ( $> 90\%$ ) ist, dass extreme Ereignisse wie Hitzewellen und Starkniederschläge sowie wahrscheinlich ( $> 66\%$ ) auch Stürme in vielen Gebieten der Erde an Häufigkeit zunehmen, ist diese Betrachtung auf regionaler Ebene von großer Bedeutung. Besonders interessant ist dabei der Vergleich der zwei Regionalmodelle aufgrund ihres unterschiedlichen Regionalisierungsansatzes.

Die Untersuchung erfolgt für unterschiedliche Zeiträume. Nach einer kurzen Güteüberprüfung jedes Klimaparameters für den Kontrollzeitraum 1961 bis 1990, wird bei CLM zunächst die Entwicklung der Jahreswerte für das 21. Jahrhundert analysiert. Des Weiteren werden 30-jährige Mittelwerte der verschiedenen Parameter dargestellt und zur Referenzperiode in Beziehung gesetzt. Dabei wird auf Jahreswerte und saisonale Entwicklungen eingegangen. Diese werden anhand der meteorologischen Jahreszeiten

- Frühling: März, April, Mai (MAM)
- Sommer: Juni, Juli, August (JJA)
- Herbst: September, Oktober, November (SON)
- Winter: Dezember, Januar, Februar (DJF)

analysiert. Als Referenzperiode dient der Zeitraum 1961 bis 1990. Für die mittelfristige Entwicklung werden die Jahre 2021 bis 2050 dargestellt und langfristig wird die Periode 2071 bis 2100 betrachtet. Bei WETTREG ist aufgrund der Dekadenbildung keine Analyse einzelner Jahre möglich, wodurch sich im Vergleich mit CLM auf die drei definierten Perioden beschränkt wird.

Bei der Darstellung der Ergebnisse wurde versucht, diese klar zu strukturieren und die einzelnen Modelle durch eine unterschiedliche Farbgebung deutlich voneinander abzugrenzen. CLM-Ergebnisse werden im Folgenden wenn möglich ausschließlich in Blautönen, WETTREG-Berechnungen in Grüntönen dargestellt. Bei Vergleichen mit DWD-Daten der Klimastation „Hannover-Langenhagen“ ( $9.70^\circ$  östliche Länge,  $52.47^\circ$  nördliche Breite, 53 m ü. NN (MÜLLER-WESTERMEIER 1996)) werden diese Messdaten in rot abgebildet.

## 3.1 Klimaentwicklung in Niedersachsen

Aufgrund der bisher nicht näher untersuchten Klimaentwicklung in Niedersachsen mit einem Vergleich verschiedener Klimamodelle, soll dies in den folgenden Abschnitten der vorliegenden Arbeit durchgeführt werden. Dabei wird sich auf die Region Hannover beschränkt. Im Folgenden werden für die einzelnen Parameter zunächst die Ergebnisse mit CLM und WETTREG dargestellt. Diese werden dann vergleichend analysiert und hinsichtlich auftretender Abweichungen interpretiert.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass alle Auswertungen mithilfe von Daten der Modellläufe des SRES-Szenarios A1B erstellt wurden.

### 3.1.1 Temperatur

Der Temperaturtrend des 21. Jahrhunderts ist im Klimagespräch die wohl am häufigsten untersuchte Größe. In zahlreichen Studien über die Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen tauchen viele der kürzlich vergangenen Jahre unter den wärmsten Jahren seit Beginn der Klimaaufzeichnungen auf (siehe Tabelle 1.1 auf Seite 5). Im globalen Klimageschehen wird für das A1B-Szenario eine mittlere Temperaturerhöhung von  $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  projiziert (IPCC 2007b). In diesem Abschnitt soll dieser Trend nun auf regionaler Ebene im Raum Hannover untersucht werden.

#### Vergleich mit Messdaten der Referenzperiode

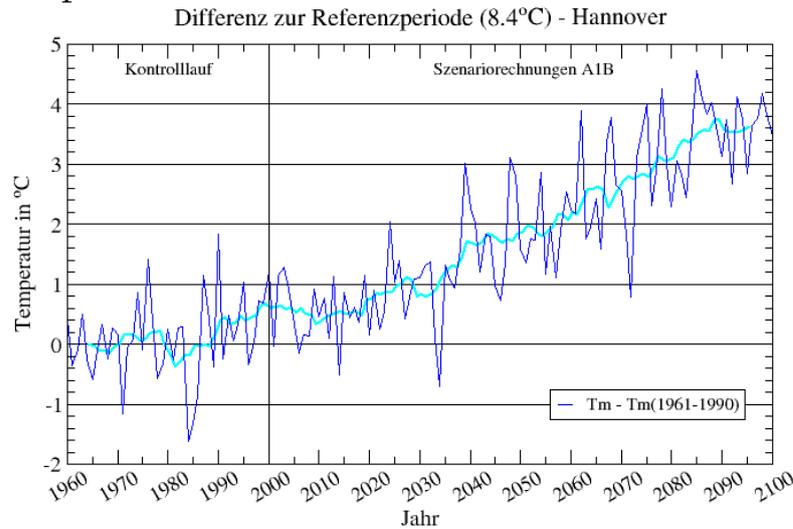
Abbildung B.1 auf Seite V im Anhang zeigt die mittlere Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen der Referenzperiode. Diese Abbildung dient der Feststellung der Fähigkeit der Modelle, die Vergangenheit zu reproduzieren. Dazu sind sowohl die Berechnungen von CLM (blau) und WETTREG (grün), wie auch die ausgewerteten Daten des DWD dargestellt. Besonders auffällig ist dabei die Bimodalität der Histogramme mit Maxima um  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sehr gut erkennbar ist zudem die Verwendung von Stationsmessreihen als Eingangsdaten für WETTREG, was sich in einer hohen Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität äußert. Im Vergleich dazu unterschätzt CLM die Häufigkeit von Tagen mit Mitteltemperaturen zwischen  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  deutlich. Abgesehen von sonst wenigen Überschätzungen reproduziert aber auch dieses Modell die gemessenen Daten zufriedenstellend.

Während sich aus den Messreihen der Station „Hannover-Langenhagen“ für die Periode 1961 bis 1990 eine mittlere Temperatur von  $8.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  ergibt, liegt der von CLM berechnete Wert bei  $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . WETTREG simuliert die Mitteltemperatur dieser Periode mit  $9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  etwas realitätsnäher.

#### Zukünftige Entwicklung

Der durch CLM berechnete Temperaturtrend, in Abbildung 3.1 dargestellt, zeigt die Entwicklung der Mitteltemperatur im Raum Hannover von 1960 bis 2100 im Vergleich zum mittleren, durch CLM errechneten Referenzwert der Periode 1961 bis 1990, der bei  $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

### Temperaturtrend des 21. Jahrhunderts simuliert mit CLM

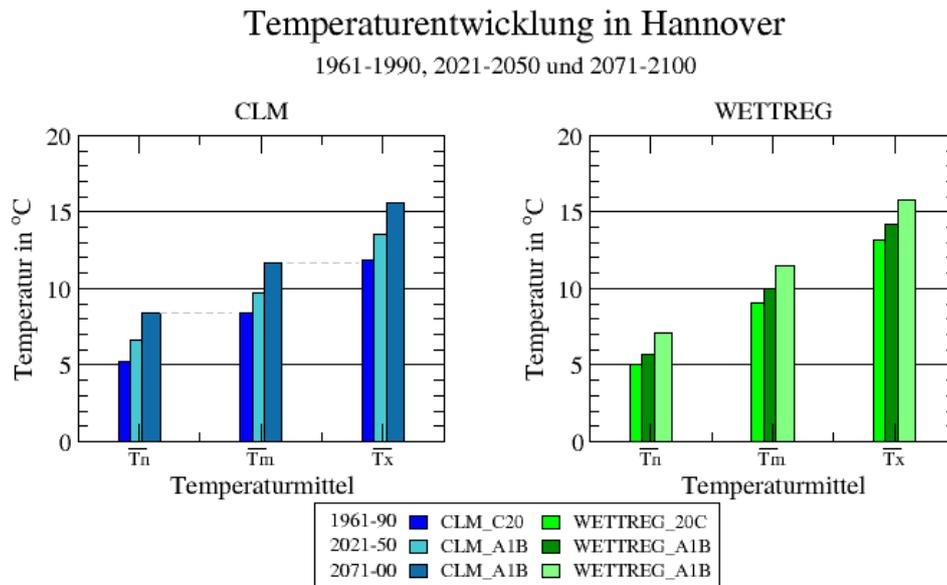


**Abbildung 3.1:** Temperaturänderungssignal der mittleren Werte in Hannover mit CLM simuliert. Für die Darstellung wurden im Zeitraum 1960-2000 die Ergebnisse des Kontrolllaufs verwendet. Ab 2001 dienen die Berechnungen des Szenariolaufs A1B als Datenmaterial. Es wurde jeweils die Differenz zum mittleren Wert (8.4 °C) der Referenzperiode 1961-1990 aufgetragen. Die hellblaue Kurve zeigt das 10-jährige gleitende Mittel der Entwicklung.

liegt. Das 10-jährige gleitende Mittel wird durch die hellblaue Kurve dargestellt. Die vertikale Linie markiert die Grenze zwischen Kontroll- und Szenariolauf. Ab 1990 ist in dieser Abbildung ein Trend zu höheren Mitteltemperaturen zu verzeichnen. In einem Jahrzehnt nimmt die Jahresmitteltemperatur dann stetig um insgesamt 0.5 °C zu. In den ersten 20 Jahren des neuen Jahrhunderts scheint dieser Trend zu stagnieren. Ab 2020 ist allerdings eine deutliche Temperaturzunahme zu beobachten, die bis 2100 einen Anstieg um 3.8 °C im Vergleich zur Referenzperiode verursacht. Dies würde im Vergleich zu globalen Verhältnissen einen stärkeren Temperaturanstieg in der Region Hannover bedeuten.

Die Analyse der 30-jährigen Perioden zeigt bei beiden Modellen eine deutliche Zunahme der Temperaturen. Diese Entwicklung ist in Abbildung 3.2 ersichtlich. Zusätzlich zur Mitteltemperatur ( $\overline{T_m}$ ) sind die mittleren Extreme (Minimumtemperatur ( $\overline{T_n}$ ) und Maximumtemperatur ( $\overline{T_x}$ )) aufgetragen. In der linken Abbildung sind die Ergebnisse von CLM dargestellt. Darin ist eine mittelfristige Zunahme der Mitteltemperatur von 8.4 °C um 1.3 °C und langfristig nochmals um 2 °C zu verzeichnen.  $\overline{T_n}$  steigt von 5.2 °C bis zum Ende des Jahrhunderts auf Werte um 8.4 °C. Sie nehmen demnach in einer Weise zu, dass die mittlere Jahresminimumtemperatur 2071 bis 2100 den Wert annimmt, der für die Referenzperiode 1961 bis 1990 als Mitteltemperatur simuliert wurde. Die Maximumtemperatur der Referenzperiode liegt nach Berechnungen von CLM bei 11.9 °C. Dies ist nahezu der Wert, der zum Ende des Jahrhunderts in Hannover als mögliche Mitteltemperatur simuliert wird. Die Maximumtemperatur liegt dann langfristig bei 15.6 °C. Es ist insgesamt eine Verschiebung der Werte zu beobachten.  $\overline{T_n}$  der Langfrist liegt im Bereich des Wertes von  $\overline{T_m}$  der Referenzperiode. Gleiches gilt für die langfristig zu erwartende Mitteltemperatur und  $\overline{T_x}$  der Referenzperiode.

Bei WETTREG (rechte Abbildung) beobachtet man insgesamt einen ähnlichen Trend.



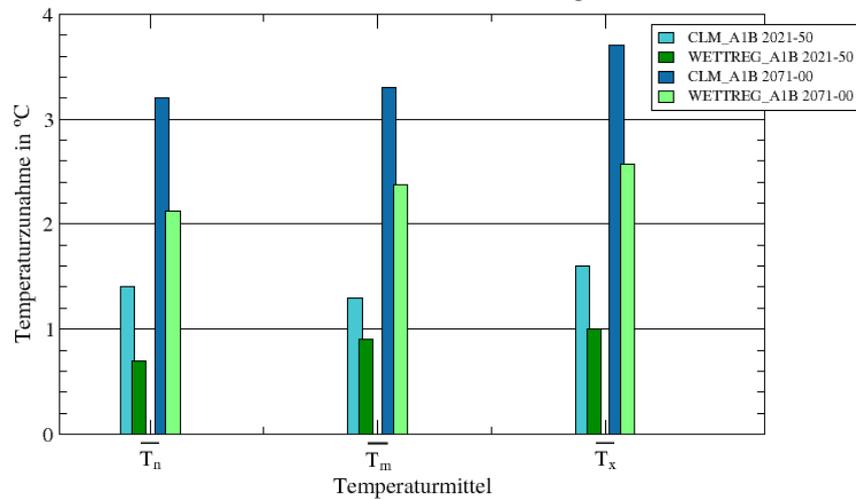
**Abbildung 3.2:** Entwicklung der mittleren Minimum- ( $\overline{T_n}$ ), Mittel- ( $\overline{T_m}$ ) und Maximumtemperaturen ( $\overline{T_x}$ ) in Hannover in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 simuliert mit CLM und WETTREG.

$\overline{T_m}$  wird hier bereits in der Referenzperiode mit 9.1 °C höher als bei CLM simuliert, steigt zunächst auf 10 °C und liegt zum Ende des Jahrhunderts bei 11.5 °C. Im Vergleich zu CLM liegt die Minimumtemperatur bei WETTREG mit 5.0 °C niedriger und steigt weniger stark an. Langfristig ist diesem Modell zufolge ein Anstieg der Minimumtemperatur um etwa 2 °C zu erwarten.  $\overline{T_x}$  in der Referenzperiode wird von WETTREG mit 13.2 °C deutlich höher simuliert als von CLM. Bis zum Jahr 2100 nimmt diese Temperatur gemäß diesem Modell jedoch weniger stark zu und liegt dann bei 15.8 °C. Bei diesem Regionalisierungsmodell ist eine Verschiebung der Werte nicht so stark ausgeprägt wie bei CLM.

Besonders interessant ist die Entwicklung von Extremwerten, auf die später noch genauer eingegangen werden soll. Dazu sei an dieser Stelle auf Abbildung C.1 im Anhang verwiesen, die zusätzlich zu dem in Abbildung 3.2 gezeigten Temperaturänderungssignal das Verhalten der absoluten Extreme aufzeigt. Bei CLM durchlaufen die absoluten Werte von  $T_n$  und  $T_x$  der jeweiligen Periode eine deutliche Entwicklung hin zu höheren Temperaturen. Während sich das absolute Minimum zu deutlich moderateren Temperaturen entwickelt, sind nach der CLM-Simulation deutlich höhere Maximumtemperaturen von mehr als 50 °C zu erwarten.

Bei der Analyse von WETTREG ist dagegen auffällig, dass bei den Extremen keine Tendenz zu verzeichnen ist und sie stattdessen auf dem bekannten Stand der Referenzperiode stagnieren. Ursache dafür ist möglicherweise das Verfahren des Regionalisierens, welches keine Simulation neuer Extreme zulässt. Bei WETTREG liegen bekannte Wetterlagen und bereits im 20. Jahrhundert eingetretene, gemessene Extreme als Eingangsdaten vor. Aus dem bekannten Spektrum der Häufigkeitsverteilung einzelner Eigenschaften jeder Wetterlage werden durch den Wettergenerator entsprechend der globalen Simulation Werte per Zufallsgenerator herausgegriffen (FORMAYER *et al.* 2004). Somit sind nur Ereignisse darstellbar, die in diesem Spektrum enthalten sind (LUG HESSEN 2009).

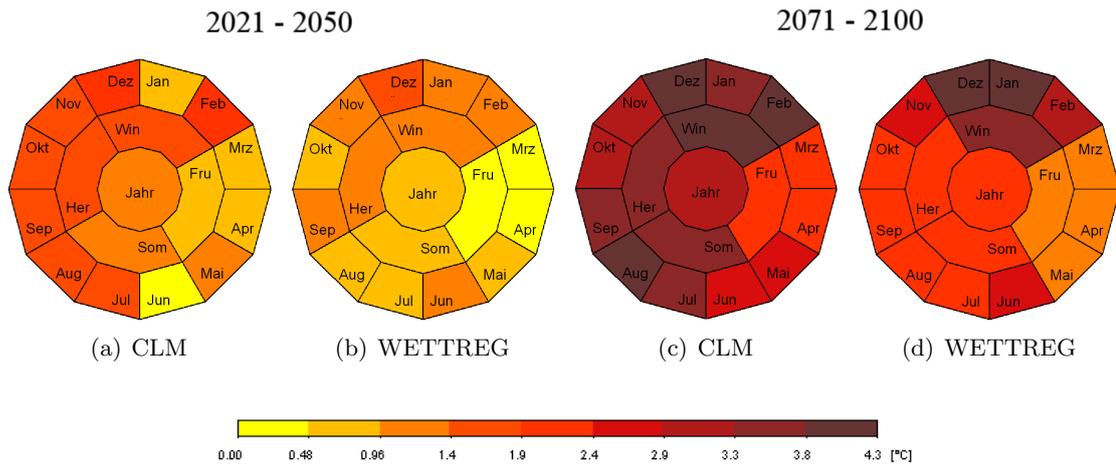
Temperaturänderung in Hannover simuliert mit CLM und WETTREG  
2021-2050 und 2071-2100 im Verhältnis zur Referenzperiode 1961-1990



**Abbildung 3.3:** Änderung von mittlerer Minimum- ( $\overline{T}_n$ ), Mittel- ( $\overline{T}_m$ ) und Maximumtemperatur ( $\overline{T}_x$ ) in Hannover im Vergleich zwischen CLM und WETTREG in Bezug auf die Referenzperiode. Als Referenz dienen die Daten des jeweiligen modellspezifischen Kontrolllaufs.

Bei der direkten Gegenüberstellung der Temperaturveränderungen bei CLM und WETTREG in Abbildung 3.3 ist signifikant, dass das Temperaturänderungssignal im Laufe des Jahrhunderts stärker wird. Man kann daher von einer beschleunigten Temperaturzunahme ausgehen. Auffällig ist außerdem die deutlich ausgeprägtere Tendenz bei CLM. Der Anstieg von Minimum- und Mitteltemperatur liegt im Bereich um  $3.2^\circ\text{C}$ . Die Maximumtemperatur steigt danach diesem Modell zufolge Jahrhundert um  $3.7^\circ\text{C}$ . CLM simuliert damit für Hannover eine Temperaturzunahme, die deutlich über den mittleren globalen Werten ( $\overline{T}_m$ :  $+2.8^\circ\text{C}$ ) liegt. WETTREG hingegen berechnet einen moderateren Anstieg zwischen  $2.1^\circ\text{C}$  bei den Minimumtemperaturen und  $2.6^\circ\text{C}$  bei den maximalen Temperaturen. Dieses Modell sieht die Temperaturentwicklung in Hannover weniger stark zunehmend als im globalen Mittel vom IPCC analysiert.

Die Analyse der jahreszeitlich und monatlich differenzierten Entwicklung der Mitteltemperatur erfolgt anhand der sogenannten Ringdiagramme in Abbildung 3.4. Ein solches Diagramm zeigt im mittleren Feld die Änderung des betrachteten Klimaparameters auf Jahresebene. Der innere Ring differenziert die Änderungen in den Jahreszeiten. Außen wird die jeweilige Änderung im Monatsvergleich zwischen zwei Zeiträumen dargestellt. Die Monate werden oben mit Januar beginnend im Uhrzeigersinn fortlaufend aufgetragen. Die linken zwei Diagramme zeigen die Temperaturänderung zwischen der Referenzperiode 1961 bis 1990 und dem Zeitraum 2021 bis 2050. Durch die unterschiedlichen Farben der Innenkreise wird nochmals die bereits zuvor beschriebene, verschieden stark ausgeprägte Temperaturentwicklung der zwei Modelle deutlich (CLM:  $+1.3^\circ\text{C}$ , WETTREG:  $+0.9^\circ\text{C}$ ). Die Jahreszeitenanalyse zeigt, dass sowohl bei CLM, als auch bei WETTREG die Temperaturzunahme im Herbst und Winter am stärksten und im Frühling am geringsten ausfällt. Abbildung (a) zeigt, dass mit CLM mittelfristig die stärkste Erwärmung im Februar und Dezember ( $+2.2^\circ\text{C}$  bzw.  $+2.0^\circ\text{C}$ ) sowie generell in der zweiten Jahreshälfte, zu erwarten



**Abbildung 3.4:** Darstellung der mittleren jährlichen, jahreszeitlichen und monatlichen Temperaturentwicklung für die Mittelfrist (a) simuliert mit CLM, (b) simuliert mit WETTREG sowie die langfristige Änderung (c) mit CLM und (d) mit WETTREG simuliert im Vergleich zur mittleren, modellspezifischen Temperatur der Referenzperiode.

ist. Die geringste Temperaturzunahme ist demnach im Juni ( $+0.02\text{ °C}$ ) wahrscheinlich. WETTREG hingegen simuliert die stärkste Erwärmung fast ausschließlich in den Herbst- und Wintermonaten, wobei sie im Dezember mit  $+1.5\text{ °C}$  am größten ist. Während im Juni bei CLM nur eine sehr geringe Temperaturerhöhung zu verzeichnen ist, gehört dieser Monat bei WETTREG zu einem der Monate mit einer relativ starken Änderung ( $+1.1\text{ °C}$ ) zu höheren Temperaturen. Monate mit nur sehr geringer Temperaturzunahme sind danach der März und April ( $+0.2\text{ °C}$  bzw.  $+0.4\text{ °C}$ ).

In langfristiger Sicht verstärkt sich dieser Trend, wie in den Diagrammen (c) und (d) beobachtet wird. Die relative Temperaturzunahme ist dort auf Jahres- und Jahreszeiten-ebene ähnlich verteilt wie in der Mittelfrist. Leichte Verschiebungen sind in den einzelnen Monaten zu erkennen, wobei aber grundsätzlich die Tendenz zur stärksten Temperaturzunahme in den Wintermonaten (CLM:  $+3.9\text{ °C}$ , WETTREG:  $+3.7\text{ °C}$ ), weniger starken Erwärmung im Sommer und Herbst und verhältnismäßig geringer Erwärmung in den Frühjahrsmonaten (CLM:  $+1.2\text{ °C}$ , WETTREG:  $+2.4\text{ °C}$ ) bestätigt wird. Die größte Temperaturzunahme ist der Berechnung mit CLM zufolge im Dezember mit  $4.3\text{ °C}$  zu verzeichnen. Im Modellvergleich ist auffällig, dass bei CLM ein wesentlich größeres Änderungsspektrum ausgeschöpft wird, als es bei der deutlich ausgeglicheneren Verteilung von WETTREG der Fall ist.

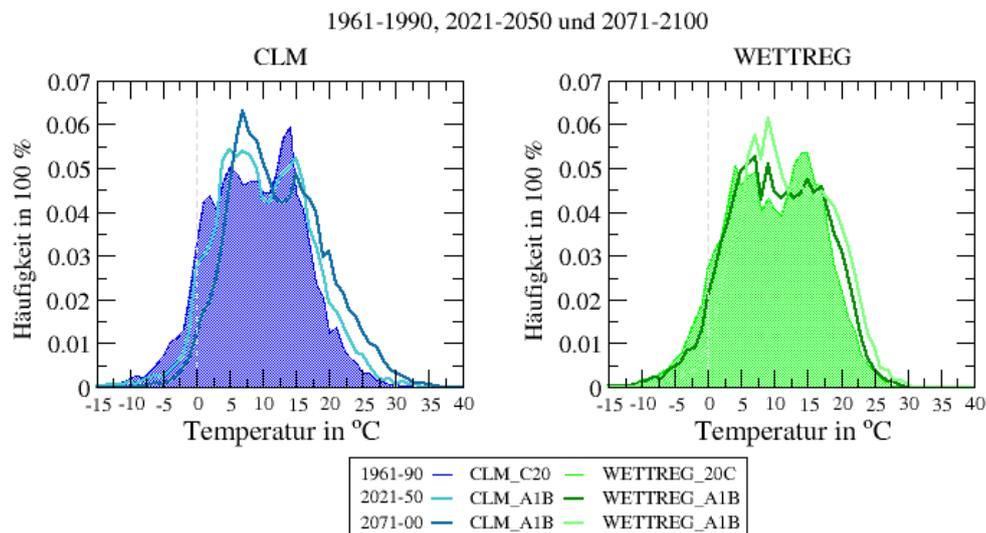
Zusammenfassend sind in Tabelle 3.1 die mittleren Jahreswerte der Temperatur und ihre absoluten Extreme sowie die jeweiligen Veränderungen im Verlauf des Jahrhunderts, wie sie durch CLM und WETTREG simuliert werden, dargestellt.

Um die Untersuchungen der Temperaturentwicklung abzuschließen, wird sich an dieser Stelle der Analyse der Häufigkeitsverteilungen der Mitteltemperaturen in Hannover gewidmet. Wie in Abbildung 3.5 zu beobachten ist, zeichnet sich auch in dieser Auswertung eine vergleichbare Entwicklung ab. Die linke Abbildung visualisiert die mit CLM berechnete Häufigkeitsverteilung. Die dunkelblaue Fläche zeigt darin die bimodale Verteilung der Mitteltemperatur in der Periode 1961 bis 1990. Die maximale Häufigkeit liegt dort mit

Modell	$T_n$ in °C	$\overline{T_n}$ in °C	$\overline{T_m}$ in °C	$\overline{T_x}$ in °C	$T_x$ in °C
<b>CLM</b>					
1961-1990 Kon.	<b>-18.3</b>	<b>5.2</b>	<b>8.4</b>	<b>11.9</b>	<b>43.8</b>
2021-2050 A1B	0.3	1.4	1.3	1.6	1.0
2071-2100 A1B	6.9	3.2	3.3	3.7	6.3
<b>WETTREG</b>					
1961-1990 Kon.	<b>-22.2</b>	<b>5.0</b>	<b>9.1</b>	<b>13.2</b>	<b>37.4</b>
2021-2050 A1B	-0.1	0.7	0.9	1.0	0.7
2071-2100 A1B	0.4	2.1	2.4	2.6	1.5

**Tabelle 3.1:** Mittlere Minimum- ( $\overline{T_n}$ ), Mittel- ( $\overline{T_m}$ ) und Maximumtemperaturen ( $\overline{T_x}$ ) sowie die absoluten Extreme in Hannover für den jeweiligen Kontrolllauf (1961-1990) und ihre mittelfristige sowie langfristige Veränderung für das Szenario A1B berechnet durch CLM und WETTREG.

### Entwicklung der Häufigkeitsverteilung der Mitteltemperatur in Hannover



**Abbildung 3.5:** Entwicklung der Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen in Hannover mit CLM und WETTREG simuliert. Eine Verschiebung der Verteilungen zwischen den 30-jährigen Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 ist in beiden Darstellungen zu verzeichnen.

etwa 22 Tagen pro Jahr um 14 °C, während sich das Nebenmaximum mit 18 Tagen pro Jahr bei Temperaturen um 5 °C befindet. Im Verlauf des Jahrhunderts kommt es dann zu einem Wechsel von absolutem und Nebenmaximum. So liegt das absolute Maximum der Häufigkeit in der Periode 2071 bis 2100 mit 23 Tagen im Jahr bei etwa 6 °C. Als Nebenmaximum ist dann das Auftreten von Mitteltemperaturen um 15 °C an ca. 17 Tagen pro Jahr zu verzeichnen. Auffällig ist zusätzlich die deutliche Verschiebung der Kurven hin zu höheren Temperaturen und neuen Extremen mit vereinzelt Tagesmitteltemperaturen von bis zu 40 °C, die mit diesem dynamischen Modell simuliert werden. Insgesamt treten Tagesmittel über 20 °C laut CLM am Ende des Jahrhunderts deutlich häufiger auf. Im Gegenzug sind Temperaturen unter 4 °C erheblich seltener als im Referenzzeitraum zu erwarten.

Im Vergleich dazu zeigt das rechte Diagramm in Abbildung 3.5 die Entwicklung der Tem-

peraturverteilung, wie sie mit WETTREG berechnet wurde. Augenfällig ist die in ihrem Wertebereich scheinbar gleichbleibende Häufigkeitsverteilung. Anders als bei CLM kommt es nicht zu einer Verschiebung hin zu neuen Extrema, sondern lediglich zu der Verschiebung innerhalb des bekannten Wertebereichs. So wird die Häufigkeit von Tagen mit weniger als  $5^{\circ}\text{C}$  reduziert, wohingegen die Anzahl der Tage mit mehr als  $18^{\circ}\text{C}$  steigt. Hinzu kommt, diesem Modell zufolge, eine Änderung der Ausprägung der Bimodalität im Verlauf des Jahrhunderts. Während die absolute Häufigkeit in der Referenzperiode mit knapp 20 Tagen pro Jahr bei einer Temperatur von etwa  $14^{\circ}\text{C}$  liegt, ist das Nebenmaximum mit nur knapp 2 Tagen weniger pro Jahr bei  $4^{\circ}\text{C}$  zu finden. Zwischen den zwei Maxima findet sich das relative Minimum mit nur rund 14 Tagen pro Jahr mit Mitteltemperaturen um  $11^{\circ}\text{C}$ . Bereits mittelfristig nimmt die Häufigkeit von Tagen mit Mitteltemperaturen um  $13^{\circ}\text{C}$  bis  $14^{\circ}\text{C}$  um etwa 3 Tage pro Jahr ab. Zum Ende des Jahrhunderts ist dann eine deutliche Zunahme von Tagen mit Temperaturen zwischen  $7^{\circ}\text{C}$  und  $9^{\circ}\text{C}$  zu verzeichnen. Mit 22-23 Tagen pro Jahr, liegt dort das Maximum der Häufigkeit. Ein zweites ausgeprägtes Maximum ist dann nicht mehr auszumachen.

Abschließend lässt sich für den Raum Hannover resümieren, dass die Temperaturentwicklung einen deutlichen Trend zu höheren Temperaturen aufweist. In der Stärke der Ausprägung sind sich die regionalen Klimamodelle CLM und WETTREG nicht einig. Dennoch gilt eine Temperaturzunahme in der Größenordnung derer im globalen Mittel zwischen  $2.4^{\circ}\text{C}$  und  $3.3^{\circ}\text{C}$  als wahrscheinlich. Über das Jahr differenziert ist eine maximale Erwärmung in den Wintermonaten, besonders im Dezember zu erwarten. Diese ist deutlich stärker ausgeprägt als die mittlere Temperaturzunahme gesamter Jahre in den Betrachtungsperioden. Die Temperaturverteilung verschiebt sich im Laufe dieses Jahrhunderts ebenfalls. Die relativ am häufigsten auftretende Temperatur verschiebt sich zu niedrigeren, die gesamte Verteilung dahingegen zu höheren Temperaturen.

### 3.1.2 Niederschlag

Der Niederschlag ist in seiner Verteilung bereits in der Detektion und Mengenbestimmung ein Parameter, der mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Die Messung der täglichen Niederschlagssumme weist unter anderem aufgrund der kleinen Referenzfläche sowie des Verdunstungs-, Spritzwasser- und Windeinflusses je nach Betrachtungszeitraum und Methode Messfehler von bis zu 40% und mehr auf (HOPPE 2006). In Folge dessen ist die Verteilung von Niederschlägen in der Klimamodellierung ein schwer abzuschätzender Parameter.

Kenntnisse über die Art der Entwicklung des Niederschlagsaufkommens sind dennoch sowohl großräumig für den Wasserhaushalt, besonders aber in der Region Hannover und der sich in nordwestlichen Richtungen anschließenden Landschaften Niedersachsens von besonderem Interesse. Große Landflächen dienen in diesem Gebiet dem Ackerbau. In den flächenmäßig dominierenden nährstoffarmen, sandigen Böden fließen vorhandene Wassermassen schnell in das Grundwasser ab (SEEDORF und MEYER 1992). Künstliche Bewässerung ist dem zufolge gefordert. Im Zuge der bevorstehenden Klimaänderungen, wird über das weitere Verfahren bezüglich der Bewässerungsanlagen diskutiert, wobei die Entwicklung des durch Niederschlag zur Verfügung stehenden Wassers dabei die Entscheidung

nicht nur beeinflusst, sondern letztendlich bestimmt. Frühzeitige Kenntnisse bezüglich dieser Entwicklung dienen als Unterstützung der politischen Entscheidungsträger.

Im Folgenden liegt der Fokus der Betrachtungen auf jährlichen Niederschlagssummen, der Anzahl und Verteilung von Niederschlagstagen, die nach Definition des DWD (2009b) durch Niederschlagsmengen größer als 0.01 mm an einem Tag gekennzeichnet sind sowie der Häufigkeit bestimmter Schwellenwertüberschreitungen. Dazu zählen signifikante ( $> 1$  mm) und intensive ( $> 10$  mm) Niederschläge (KEULER *et al.* o. J.) sowie nasse Tage mit einer täglichen Niederschlagssumme über 25 mm (JACOB *et al.* 2008). Letztere sind zentraler Bestandteil der Analyse der Extremereignisse in Abschnitt 3.2.2.

### Vergleich mit Messdaten der Referenzperiode

Abbildung B.2 im Anhang zeigt die Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsmengen in Hannover, wie sie durch CLM und WETTREG simuliert und an der Station „Hannover-Langenhagen“ gemessen wurden. Deutlich erkennbar ist, dass CLM (blaue Kurve) und WETTREG (grüne Kurve) für diesen Zeitraum erheblich weniger niederschlagsfreie Tage reanalysiert haben. Bei CLM liegt die Anzahl dieser Tage bei etwa einem Drittel derer die vom DWD detektiert wurden. Tage mit Niederschlagsmengen zwischen 0.0 und 0.5 mm wurden von diesem Modell jedoch mehr als doppelt so oft als eingetroffen angenommen. Die Verteilung in 0.5 mm Schritten zeigt bei beiden Modellen und den Messdaten einen ähnlichen Verlauf, wobei die CLM-Auswertungen leicht oberhalb und die WETTREG-Berechnungen etwas unterhalb der Häufigkeitsverteilung der Beobachtungen in der Kontrollperiode liegen.

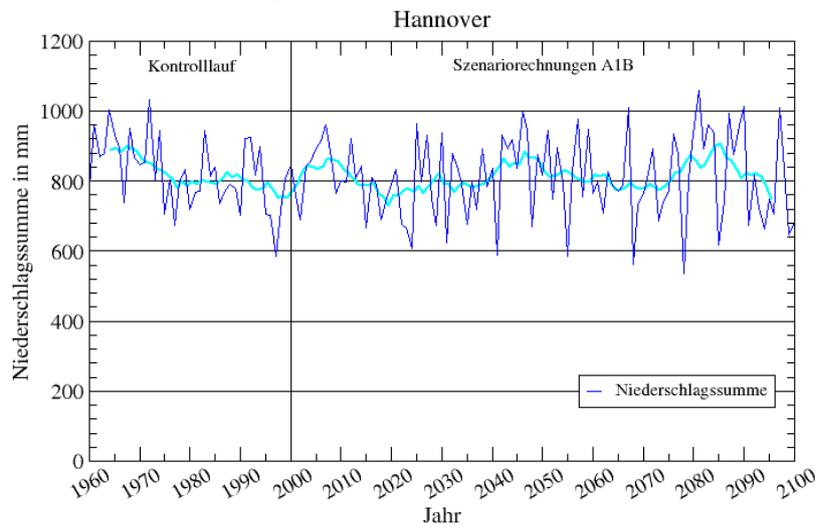
Die mittlere gemessene Niederschlagssumme eines Jahres liegt im Zeitraum 1961 bis 1990 bei 655.6 mm. Wie in Abbildung 3.7 noch gezeigt wird, reproduziert WETTREG diesen Parameter mit 629.4 mm recht gut. CLM liegt im Gegensatz dazu mit 834.0 mm deutlich über den Messwerten.

Die monatlichen Niederschlagssummen der Reanalysen sowie die Messdaten des DWD sind in Abbildung B.3 im Anhang dargestellt. Es zeigt sich ein deutlicher Jahresgang mit einem ausgeprägten Maximum in den Sommermonaten und einem zweiten Maximum im Winter. Die Übergangsmonate sind dennoch mit über 35 mm im langjährigen Mittel nicht trocken. Die relative Verteilung wird von beiden Klimamodellen wiedergegeben. CLM geht dabei, wie bereits anhand der Jahresniederschlagssumme festgestellt, von größeren Niederschlagsmengen aus. Die WETTREG-Berechnungen liegen in der Regel etwas unterhalb der Messungen, stellen aber die Minima im Februar und Oktober nicht so ausgeprägt dar.

### Zukünftige Entwicklung

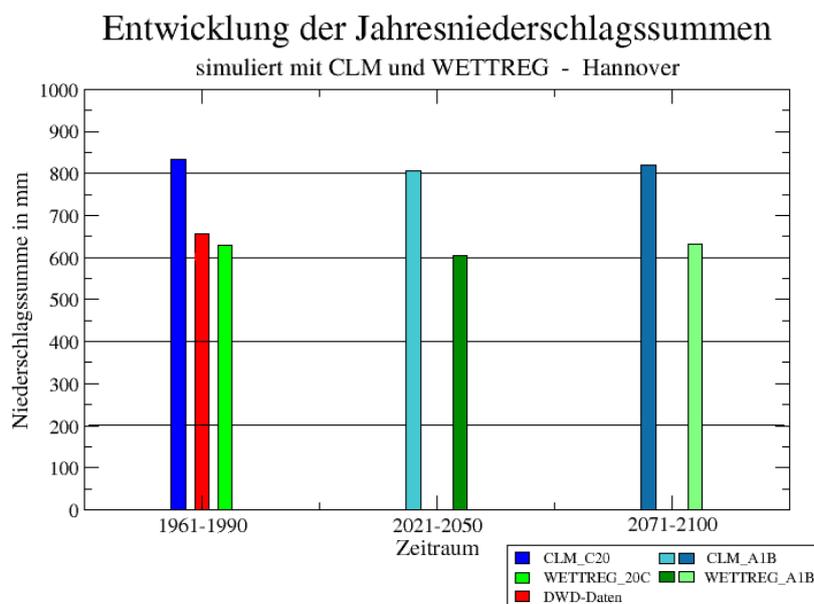
Die von CLM berechnete Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen ist aus Abbildung 3.6 ersichtlich. Dabei ist jedoch kein Trend einer signifikanten Änderung dieser Größe im Verlauf des 21. Jahrhunderts festzustellen. Stattdessen verläuft das 10-jährige gleitende Mittel der Summe der in einem Jahr gefallenen Niederschläge alternierend um 800 mm.

### Jährliche Niederschlagssumme im 21. Jahrhundert simuliert mit CLM

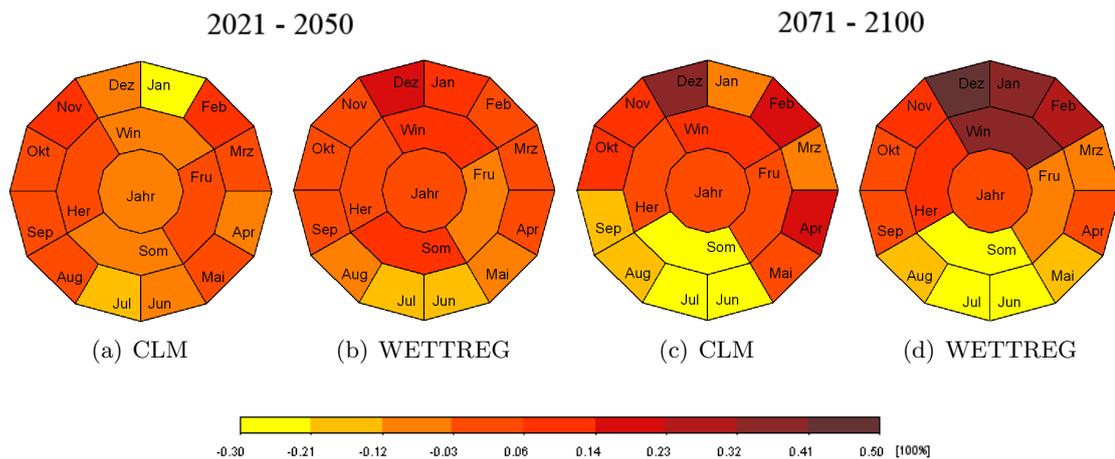


**Abbildung 3.6:** Entwicklung der jährlichen Niederschlagssumme in Hannover mit CLM simuliert. Für die Darstellung wurden im Zeitraum 1960 bis 2000 die Ergebnisse des Kontrolllaufs verwendet. Ab 2001 dienen die Berechnungen des Szenariolaufs A1B als Datenmaterial. Die hellblaue Kurve zeigt das 10-jährige gleitende Mittel der Entwicklung.

Auch die Analyse der 30-jährigen Perioden zeigt keine Auffälligkeiten in der Entwicklung der Jahresniederschlagssummen, wie aus Abbildung 3.7 ersichtlich ist. Einzig auszumachen ist erneut die Differenz von 200 mm zwischen CLM und WETTREG, die das 21. Jahrhundert über bestehen bleibt. WETTREG liegt aufgrund der Verwendung von Stationsdaten in der Referenzperiode mit 629.4 mm deutlich näher an den vom DWD an der



**Abbildung 3.7:** Mit CLM und WETTREG simulierte Entwicklung der Jahresniederschlagssumme in den Perioden 1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100. Zusätzlich ist der vom DWD gemessene Wert der Referenzperiode aufgetragen.



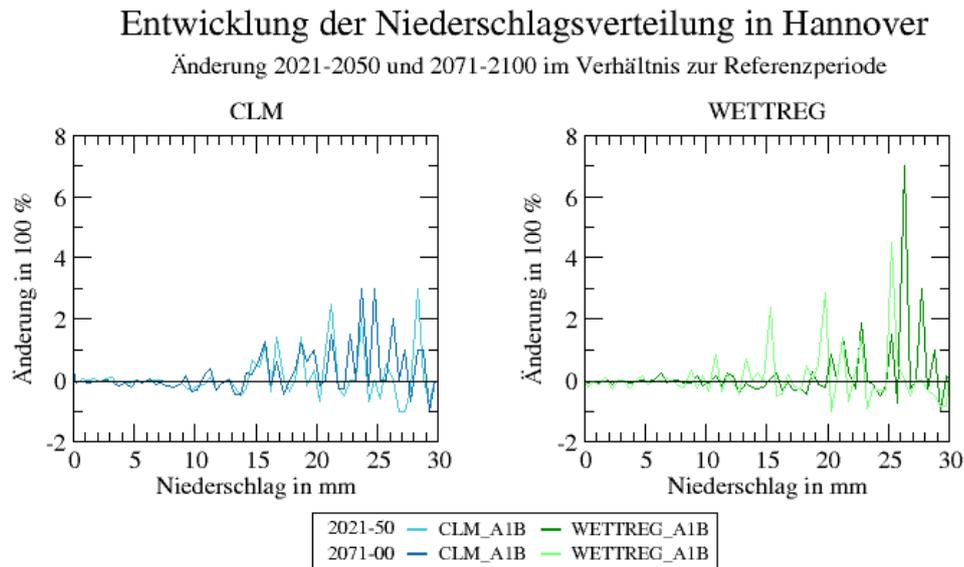
**Abbildung 3.8:** Darstellung der mittleren monatlichen, jahreszeitlichen und jährlichen Niederschlagsänderung im Vergleich zur mittleren, modellspezifischen Niederschlagssumme der Referenzperiode für die Mittelfrist (a) simuliert mit CLM, (b) simuliert mit WETTREG sowie die Langfrist (c) mit CLM und (d) mit WETTREG simuliert.

Station „Hannover-Langenhagen“ gemessenen 655.6 mm. Da beide Modelle keinen eindeutigen Trend aufzeigen, ist davon auszugehen, dass weiterhin jährliche Niederschlagssummen in der Größenordnung der Referenzperiode erreicht werden.

Anders ist die Entwicklung bei jahreszeitlich differenzierter Betrachtung. Die Ringdiagramme in Abbildung 3.8 verdeutlichen dies. Aufgetragen ist die relative Veränderung zwischen der Betrachtungsperiode 2021 bis 2050 bzw. 2071 bis 2100 zum Referenzzeitraum (1961 bis 1990). Der Wertebereich erstreckt sich von einer Niederschlagsabnahme um 30 % (gelb) bis zu einer Steigerung der Niederschlagssumme um 50 % (dunkelrot). Mittleres Orange zeigt eine verhältnismäßig schwache Änderung zwischen -3 % und +6 % an. Die zugehörige Verteilung der monatlichen Niederschlagsmengen der Beobachtungsperiode wird in Abbildung B.3 im Anhang dargestellt.

Abbildung (a) zeigt die mittelfristige Entwicklung durch CLM berechnet. Auf das Jahr gesehen kommt es bis dahin zu einer Abnahme der Niederschläge um 3 %. Während im Herbst eine leichte Zunahme um 5 % zu verzeichnen ist, kommt es in den restlichen Jahreszeiten zu Reduktionen zwischen 2 % und 8 %. Auf Monatebene ist die stärkste Veränderung im Januar (-26 %) festzustellen. Die maximale relative Zunahme der Niederschläge ist im November mit 13 % zu beobachten. WETTREG, in Abbildung (b) dargestellt, zeigt eine ähnliche, relativ ausgeglichene Entwicklung. Die jährliche Abnahme liegt bei nur 1 %. Auf jahreszeitlicher Ebene zeichnet sich hier aber bereits ein Trend ab, der sich auch langfristig in beiden Modellen bestätigen wird. Während es im Frühjahr und Sommer zu einer Abnahme um 5 % bzw. 10 % kommt, nimmt die Niederschlagssumme im Herbst um 2 % und im Winter um bis zu 11 % zu. Im Dezember beträgt die Zunahme maximal 17 %. Die größte Niederschlagsabnahme ist im Juni und Juli zu verzeichnen, wo sie 12 % bis 13 % beträgt.

In langfristiger Hinsicht verstärkt sich dieses bereits bei WETTREG erkennbare Signal zunehmend. In Abbildung (c) ist nun auch bei CLM ein eindeutiger Trend zu beobachten. Während sich bei den Jahresniederschlägen, wie in den vorigen Analysen beobachtet, kaum eine Veränderung ergibt, ist bei den Sommerniederschlägen ein Rückgang um über



**Abbildung 3.9:** Mit CLM und WETTREG simulierte prozentuale Veränderung der Niederschlagsverteilung in den Perioden 2021 - 2050 und 2071 - 2100 im Verhältnis zur modellspezifischen Werten der Referenzperiode 1961 - 1990.

20 %, bei den Winterniederschlägen eine Zunahme von knapp 15 %, in einzelnen Monaten sogar um 33 %, zu verzeichnen. WETTREG, in Abbildung (d) gezeigt, simuliert für die Langfrist einen noch stärker ausgeprägten Trend. Während der sommerliche Rückgang der Niederschlagsmenge auch diesem Modell zufolge etwa 22 % beträgt, sollen die Winterniederschläge sogar um 35 % zunehmen. Für Januar und Dezember sind Steigerungen um 37 % und sogar 44 % berechnet. Die maximale Abnahme liegt bei 27 % im Juni. Der Trend hin zu geringeren Sommer- und deutlich höheren Winterniederschlägen kann damit als wahrscheinlich angesehen werden. Aufgrund der starken Ausprägung in beiden Modellen ist zu erwarten, dass sich die Niederschlagsverteilung im täglichen Leben merkbar auswirken wird.

Die in Abbildung C.2 im Anhang dargestellte Niederschlagsverteilung weist kaum Veränderungen zwischen den Betrachtungsperioden auf. WETTREG (rechts) simuliert deutlich mehr niederschlagsfreie Tage als CLM (links). Während das gängige Spektrum (mehr als 0.2 Tage pro Jahr) an täglichen Niederschlagssummen bei beiden Modellen zwischen 0 mm und etwa 25 mm liegt, werden bei WETTREG Tagessummen bis maximal 53.5 mm in einzelnen Jahren der Betrachtungszeiträume erreicht. Die bei CLM höchste auftretende Tagessumme liegt einmalig bei 100 mm in der Langfrist. Ursache für diese Abweichungen zwischen den Modellen ist möglicherweise erneut der unterschiedliche Regionalisierungsansatz, wodurch insbesondere bei WETTREG eine Einschränkung des simulierbaren Wertebereichs vorgenommen wird.

Zur Verdeutlichung der simulierten Änderung beider Modelle dient Abbildung 3.9 in der diese prozentual dargestellt ist. Die Analyse zeigt eine Zunahme niederschlagsfreier Tage um über 20 Tage (35 %) bei CLM und 10 Tage (8 %) bei WETTREG im Verlauf des Jahrhunderts. Bei der Zahl der Tage mit Niederschlagssummen unter 15 mm ist dagegen jeweils überwiegend ein Rückgang zu verzeichnen. Es ist jedoch zu beobachten, dass beide Modelle gerade bei größeren Niederschlagsmengen eine deutliche Zunahme von bis zu

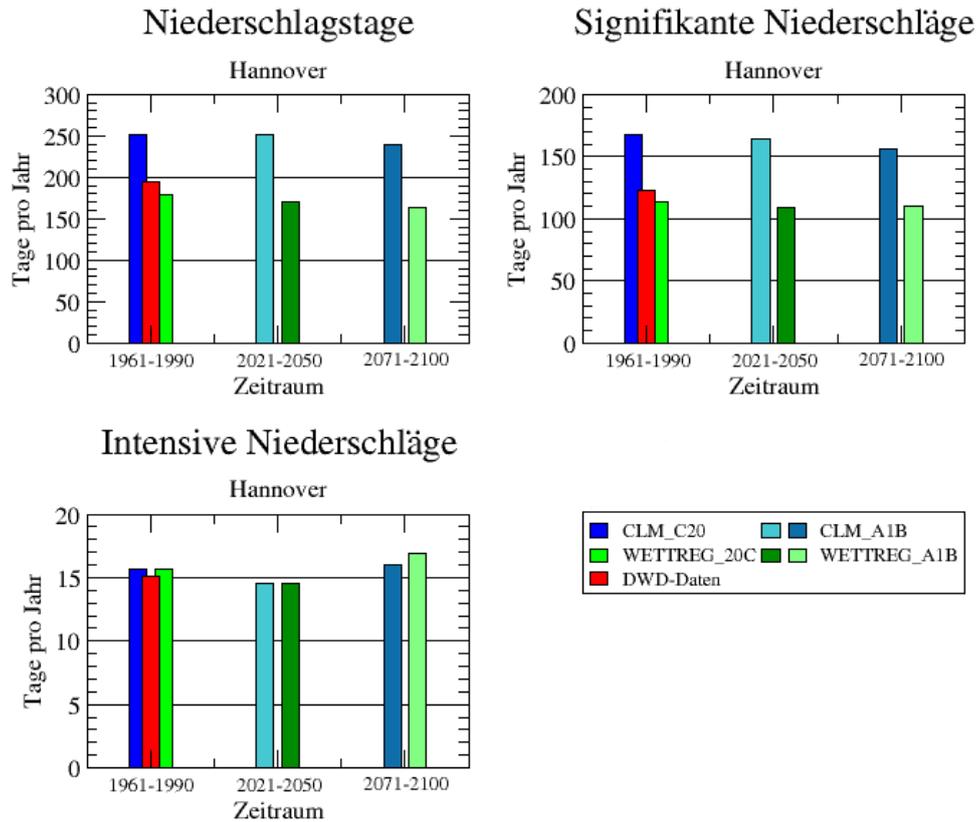
300 % bei CLM und sogar 700 % bei WETTREG simulieren. Der Schwankungsbereich liegt dabei allerdings bei maximal  $\pm 2.5$  Tagen, die sich aufgrund der in der Referenzperiode teilweise sehr seltenen Niederschlagsereignisse dieser Größenordnung prozentual sehr stark auswirken. Auf die Entwicklung von Niederschlagsmengen von mehr als 25 mm wird gesondert in Abschnitt 3.2, den Extremereignissen, eingegangen.

Die Betrachtung der Auswertung zur Entwicklung der Anzahl von Niederschlagstagen und Tagen mit signifikantem Niederschlag deutet bei beiden Modellen auf einen leichten Rückgang beider Parameter hin (siehe Abbildung 3.10 oben). In der linken Abbildung sind die Niederschlagstage (Niederschlagssumme  $\geq 0.01$  mm) dargestellt. WETTREG reproduziert die Referenzperiode im Raum Hannover mit rund 178 Niederschlagstagen pro Jahr deutlich besser als CLM mit 252 Tagen dieser Art. In diesem Zeitraum sind durchschnittlich 194 Tage mit Niederschlägen eingetreten. Mittelfristig ist bei CLM keine Änderung, bei WETTREG aber bereits ein Rückgang um 7 Tage zu beobachten. Bis zur Periode 2071 bis 2100 wird dann aber auch bei CLM ein Rückgang um 14 Tage auf noch knapp 240 Tage pro Jahr erkennbar. WETTREG projiziert langfristig noch 163 Niederschlagstage. Insgesamt ist also auch bei diesem Modell ein Rückgang um 15 Tage zu verzeichnen.

Die Häufigkeit signifikanter Niederschläge (Niederschlagssumme  $\geq 1$  mm) zeigt einen ähnlichen Trend und ist in der rechten Abbildung ersichtlich. Während in der Referenzperiode durchschnittlich 122 Tage pro Jahr mit signifikanten Niederschlagssummen aufgezeichnet wurden, ergeben sich in den Reanalysen 168 Tage bei CLM und 114 Tage bei WETTREG. Bei CLM kommt es zunächst zu einer Abnahme um 3 Tage, langfristig reduziert sich die Zahl der Referenzperiode um insgesamt 11 Tage pro Jahr. WETTREG hingegen simuliert die Veränderung lediglich bis zur Mittelfrist um 4 Tage weniger pro Jahr als in der Referenzperiode des 20. Jahrhunderts. Langfristig kommt es dann zu keiner Änderung mehr.

Des Weiteren wird nun die Analyse der Entwicklung von intensiven Niederschlägen durchgeführt. Diese ist unten in Abbildung 3.10 dargestellt. An der Station „Hannover-Langenhagen“ wurden im Zeitraum 1961 bis 1990 rund 15 solcher Ereignisse an Einzeltagen detektiert. Die Simulationen von CLM und WETTREG sind bei diesem Parameter sehr ähnlich. Beide simulieren für die Referenzperiode 15.7 Tage pro Jahr mit mehr als 10 mm Niederschlag. Mittelfristig ist dann nach Aussage beider Modelle ein leichter Rückgang um einen Tag zu erwarten. Langfristig wird dann jedoch von den zwei Regionalisierungsverfahren ein Trend zu häufigeren Niederschlagsereignissen dieser Größenordnung aufgezeigt, der mit 16 Tagen bei CLM und knapp 17 Tagen bei WETTREG ebenfalls nicht sonderlich stark ausgeprägt ist. Die Tendenz zu höheren Niederschlagssummen ist jedoch zu beachten und wird zu einem späteren Zeitpunkt nochmals näher untersucht.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass trotz der nahezu gleich bleibenden Jahresniederschlagssumme eine starke Variation der interannualen Niederschläge mit einer deutlichen Zunahme im Winter sowie einer beachtenswerten Abnahme im Sommer zu rechnen ist. Die Anzahl der Niederschlagstage zeichnet sich durch einen abnehmenden Trend aus, der bis zum Ende des 21. Jahrhunderts rund 14 Tage mehr ohne Niederschläge bedeuten kann. Ebenso kommt es zu einem leichten Rückgang der Tage mit Niederschlägen von mehr als 1 mm. Bei gleich bleibenden Jahressummen ist demzufolge eine Zunahme von



**Abbildung 3.10:** Mit CLM und WETTREG simulierte Entwicklung der Niederschlagstage und der Tage mit signifikantem und intensivem Niederschlag in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100. In der Referenzperiode wurden zusätzlich die Messwerte des DWD markiert.

starken Niederschlägen an einzelnen Tagen zu erwarten, wodurch besonderes Interesse an weiterführenden Untersuchungen in dieser Richtung besteht. Darauf sei an dieser Stelle auf Abschnitt 3.2.2 verwiesen.

### 3.1.3 Kenntage

Veränderungen des Klimas äußern sich nicht ausschließlich in Verschiebungen der mittleren Klimaparameter wie Temperatur und Niederschlag, sondern besonders deutlich auch in der Entwicklung daran abgeleiteter Größen (JACOB *et al.* 2008), wie es die meteorologischen Kenntage sind. Wie aus Tabelle 3.2 ersichtlich ist, handelt es sich dabei um Tage, an denen ein definierter Schwellenwert eines klimatischen Parameters erreicht oder über- bzw. unterschritten wird (DWD 2009a).

#### Vergleich mit Messdaten der Referenzperiode

Abbildung B.4 auf Seite VIII im Anhang zeigt die Häufigkeitsverteilung der durch CLM und WETTREG im Kontrolllauf berechneten Kenntage der Referenzperiode im Vergleich zu den vom DWD aufgezeichneten Daten. Die Betrachtung dieser Auswertung zeigt, dass CLM im Wesentlichen in der Lage ist, die Verteilung wiederzugeben. Lediglich die Frost-

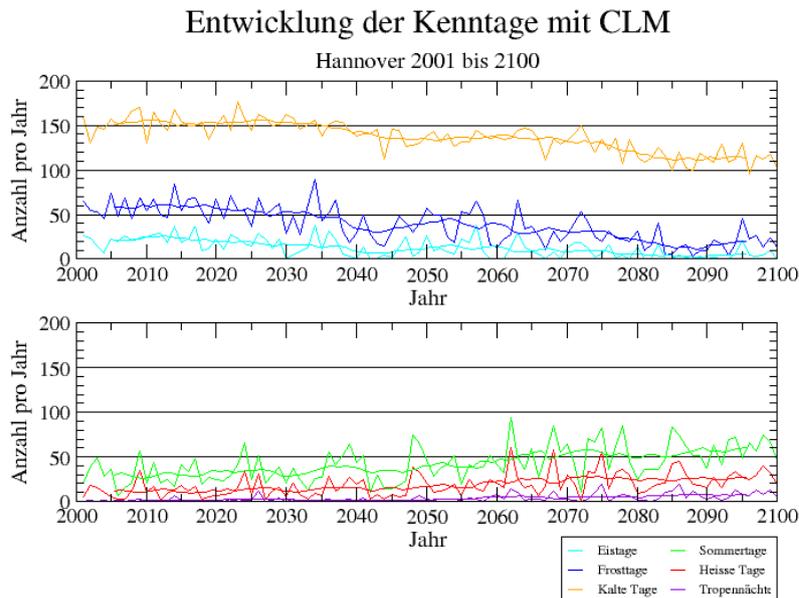
Name	Definition
Eistag	$T_x \leq 0^\circ C$
Frosttag	$T_n \leq 0^\circ C$
Kalter Tag	$T_x \leq 10^\circ C$
Sommertag	$T_x \geq 25^\circ C$
Heißer Tag	$T_x \geq 30^\circ C$
Tropennacht	$T_n \geq 20^\circ C$

**Tabelle 3.2:** Definition der meteorologischen Kenntage (Vgl. DWD 2009a).

tage werden um 16 % unterschätzt. Alle anderen Kenngrößen werden von CLM nur leicht überschätzt, mit Ausnahme der kalten Tage, bei denen ebenfalls eine positive Abweichung von 16 % vorliegt (19 Tage pro Jahr).

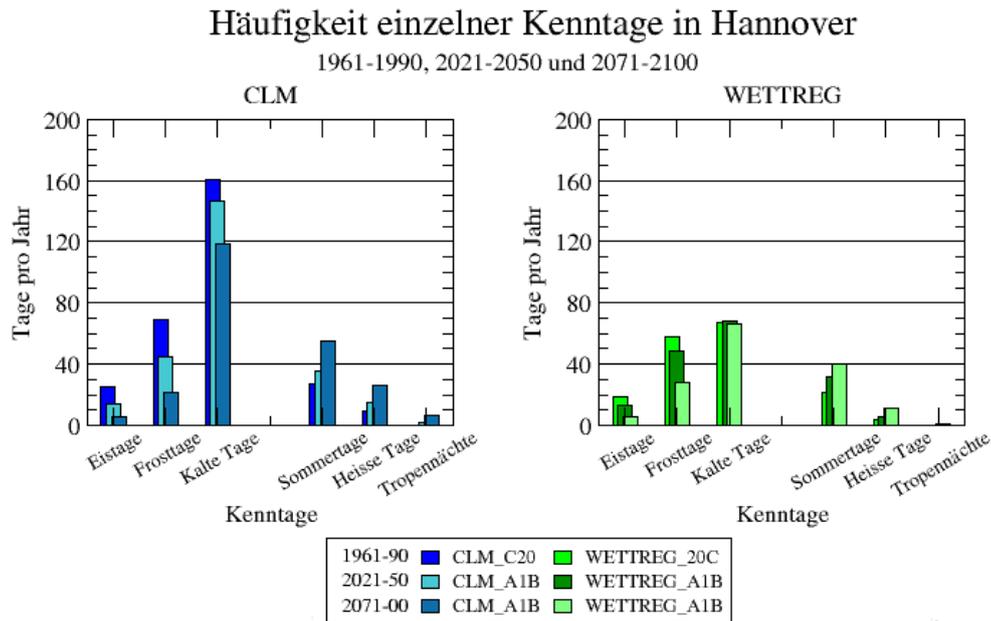
WETTREG hingegen neigt zu einer generellen Unterschätzung aller Kenntage, was besonders deutlich anhand der kalten Tage ersichtlich ist. Pro Jahr werden für die Periode 1961 bis 1990 rund 67 Tage mit maximalen Temperaturen unter  $10^\circ C$  durch WETTREG simuliert. Dies entspricht, bei 160 eingetretenen Tagen dieser Art, einer Abweichung von 58 % und deutet darauf hin, dass dieses Klimamodell weniger extreme Werte simuliert und stattdessen sehr gemäßigte Temperaturen annimmt.

### Zukünftige Entwicklung



**Abbildung 3.11:** Mit CLM simulierte Entwicklung der Anzahl der Kenntage pro Jahr im Zeitraum von 2001 bis 2100. Sowohl die Jahreswerte, als auch 10-jährige gleitende Mittel sind hier dargestellt. Im oberen Diagramm ist der Verlauf der niedrig-temperierten Kenntage abgebildet, im unteren der der warmen Kenntage.

Wie sich bereits in der Analyse der Temperaturentwicklung abzeichnete, lässt sich neben der Zunahme von heißen Tagen und Tropennächten eine signifikante Abnahme von Eis- und Frosttagen erwarten. Bei der Analyse der Entwicklung der Kenntage mit CLM in Abbildung 3.11 fällt auf, dass diese bei den niedrig-temperierten Kenntagen (oben) scheinbar



**Abbildung 3.12:** Eintrittshäufigkeit einzelner Kenntage in den Betrachtungsperioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 mit CLM und WETTREG simuliert.

in drei Stufen verläuft. Diese Dreistufigkeit zeichnet sich insbesondere bei der Entwicklung der kalten Tage ab, die durch die orangefarbene Kurve dargestellt wird. Darin lassen sich drei Perioden erkennen, in denen die Anzahl der kalten Tage im 10-jährigen gleitenden Mittel ungefähr konstant bleibt: 2001 bis 2030 mit etwa 150 Tagen pro Jahr, 2045 bis 2070 mit 130 bis 140 Tagen pro Jahr und ab 2085 noch etwa 110 Tage pro Jahr. Bei den Eis- und Frosttagen sind diese Perioden weniger stark ausgeprägt und zeitlich etwas verschoben. Die mittlere Anzahl der Frosttage halbiert sich zwischen 2020 und 2043 auf etwa 30 Tage pro Jahr. Nach einem leichten Anstieg reduziert sich diese Zahl ab 2055 bis zum Ende des Jahrhunderts auf ungefähr 20 Tage pro Jahr. Die Zahl der Eistage mit Maximumtemperaturen von unter  $0^{\circ}\text{C}$  nimmt von etwa 20 Tagen pro Jahr im Laufe des Jahrhunderts auf unter zehn Tage pro Jahr ab.

Bei Betrachtung der warm-temperierten Kenntage (unten) fällt auf, dass diese bis Mitte des Jahrhunderts als nahezu konstant berechnet werden. Erst dann kommt es zu einer Zunahme dieser drei Kenngrößen. Die mittlere Zahl der Sommertage in der Region Hannover wird sich demnach ab 2050 von 30 auf 60 Sommertage pro Jahr verdoppeln. Ähnliches erwartet uns diesem Modell zufolge bei den heißen Tagen. Sie werden von 15 auf 28 Tage jährlich zunehmen. Während zu Beginn dieses Jahrhunderts nur einzelne Tropennächte simuliert werden, ist auch bei diesen Kenntagen bis 2100 eine Entwicklung auf bis über 10 Tage in einzelnen Jahren zu erwarten.

Ergänzend hierzu sei auf Abbildung C.3 auf Seite XIV im Anhang verwiesen, anhand derer die dreistufige Entwicklung der Kenntage nochmals genauer analysiert wird.

Die Eintrittshäufigkeit der einzelnen Kenntage in den drei 30-jährigen Betrachtungsperioden ist aus Abbildung 3.12 ersichtlich. Im linken Abschnitt sind die Simulationsergebnisse der dynamischen Regionalisierungsmethode CLM dargestellt. Die Entwicklung entspricht im Wesentlichen dem, was sich zuvor in der dekadeweisen Auswertung in Abbildung C.3

im Anhang gezeigt hat. Dabei liegen die niedrig-temperierten Tage in der jährlichen Summe in jeder Periode etwas oberhalb derer in der dekadischen Auswertung im Anhang. Die warm-temperierten, in diesem Jahrhundert in der Anzahl zunehmenden Tage, ergeben sich dafür in der 30-jährigen Betrachtung etwas weniger häufig, als in der 10-jährigen Darstellung in Abbildung C.3 im Anhang. Grund für diese Beobachtung ist der schon angesprochene stufige Verlauf der Entwicklung dieser Kenntage. In den Betrachtungsperioden, die in diesem Abschnitt zugrunde liegen, sind die Übergangsperioden enthalten. Sie relativieren somit die zu erwartende Anzahl an Kenntagen in den einzelnen Perioden.

Das Diagramm rechts in der Abbildung 3.12 zeigt die Häufigkeit der Temperaturenwertüber- und -unterschreitungen in diesen Perioden, wie sie durch WETTREG berechnet werden. Auffällig ist, dass dieses statistische Modell, wie schon im Vergleich mit Messdaten aufgefallen ist, erheblich weniger kalte Tage simuliert, als CLM. Bei dieser Kenngröße bleibt die Eintrittshäufigkeit im Verlauf des Jahrhunderts nahezu konstant um 66 Ereignisse pro Jahr. Die Häufigkeit der Eis- und Frosttage nimmt mit der Zeit ab. Während die Anzahl der Frosttage auf unter 50 % des Referenzniveaus abnimmt, reduziert sich die Zahl der Eistage sogar um über 70 % auf knapp 10 Tage pro Jahr. Bis Mitte des Jahrhunderts erfolgt dieser Rückgang um knapp 20 % (Frosttage) bzw. 30 % (Eistage). Anschließend sinken diese Zahlen um nochmals 35 % bzw. 40 % von den anfangs 119.2 Frost- und 35.1 Eistagen.

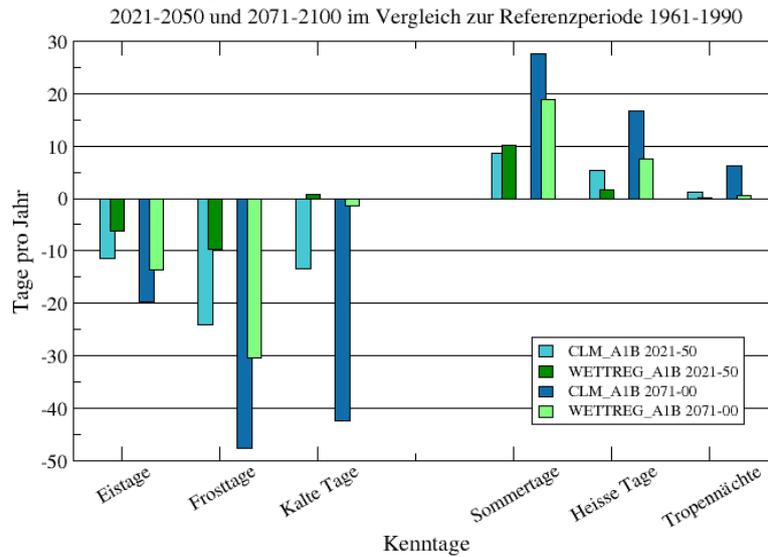
Die warm-temperierten Tage nehmen auch in diesen Modellberechnungen zu. Die stärkste Änderung findet sich hier bei den Sommertagen. Ihre Häufigkeit steigt von 21 Tagen pro Jahr stetig, bis sie sich zum Ende des Jahrhunderts verdoppelt hat. Heiße Tage entwickeln sich weniger gleichmäßig. Zunächst steigt ihre Häufigkeit von knapp 4 Tagen um 50 % bis 2050. Langfristig verdreifacht sich diese Zahl der heißen Tage auf 11.4 Tage pro Jahr. Die Anzahl der Tropennächte verdreifacht sich ebenfalls im Verlauf des Jahrhunderts, bleibt jedoch weiterhin unter einem Tag pro Jahr.

Die jahreszeitlich differenzierte Projektion der Kenntage in Abbildung C.5 auf Seite XVI im Anhang zeigt keine Auffälligkeiten, die nicht schon näher erläutert wurden. Wie zu erwarten war, nehmen die warmen Kenntage besonders stark im Sommer und weniger stark in den Übergangsmonaten zu. Die Anzahl der kalttemperierten Kenntage verringert sich besonders im Winter, wo sie am häufigsten auftreten. Aber auch die Reduktion im Herbst ist signifikant. Insgesamt ist dabei mittelfristig eine relativ gemäßigte Veränderung, langfristig aber eine drastische Entwicklung erkennbar und zu erwarten. An dieser Stelle wird auf weitere Ausführungen diesbezüglich verzichtet und auf die Abbildungen C.4 und C.5 im Anhang verwiesen.

Die direkte Gegenüberstellung beider Regionalisierungsverfahren im Hinblick auf die Kenntage wird in Abbildung 3.13 gezeigt. Die unterschiedliche, mit CLM und WETTREG berechnete Änderung, ausgehend vom jeweiligen Niveau des Kontrolllaufs, wird hier besonders deutlich. Aufgrund der schon sehr verschiedenen Referenzniveaus werden die jährlich zu erwartenden Kenntage nochmals tabellarisch zusammengefasst (siehe Tabelle 3.3).

In diesem Vergleich wird deutlich, dass die Änderungen vom statistischen Modell weniger stark simuliert werden. Insbesondere die Anzahl der heißen Tage und Tropennächte liegt weit unterhalb derer die CLM berechnet. Ursache dafür ist der Regionalisierungsansatz, welcher die Simulation neuer Extreme nicht zulässt.

Trend der Kenntage in Hannover simuliert mit CLM und WETTREG



**Abbildung 3.13:** Häufigkeitsänderung einzelner Kenntage im Vergleich der Simulationen von CLM und WETTREG. Die Auswertung wurde für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 als Differenz zu den Ergebnissen des modellspezifischen Kontrolllaufs (1961-1990) durchgeführt.

Tropennächte stellen genauso wie heiße Tage eine enorme Wärmebelastung für den Menschen dar. Steigende Häufigkeiten können dann zu höheren Zahlen von jährlichen Hitzetoten führen (BERNSTEIN, BOSCH und ET. AL. 2008). Entsprechende Maßnahmen zum Schutz gefährdeter Bevölkerungsgruppen sind deshalb zeitnah zu entwickeln.

Modell	<i>Eistage</i>	<i>Frosttage</i>	<i>Kalte Tage</i>	<i>Sommertage</i>	<i>Heiße Tage</i>	<i>Tropennächte</i>
<b>CLM</b>						
1961-1990 Kon.	<b>25.4</b>	<b>69.0</b>	<b>160.5</b>	<b>27.2</b>	<b>9.2</b>	<b>0.4</b>
2021-2050 A1B	-11.4	-24.0	-13.5	8.5	5.3	1.2
2071-2100 A1B	-19.6	-47.6	-42.4	27.7	16.6	6.2
<b>WETTREG</b>						
1961-1990 Kon.	<b>19.0</b>	<b>58.1</b>	<b>67.4</b>	<b>21.2</b>	<b>4.0</b>	<b>0.25</b>
2021-2050 A1B	-6.2	-9.7	0.7	10.1	1.7	0.2
2071-2100 A1B	-13.7	-30.5	-1.5	18.9	7.4	0.5

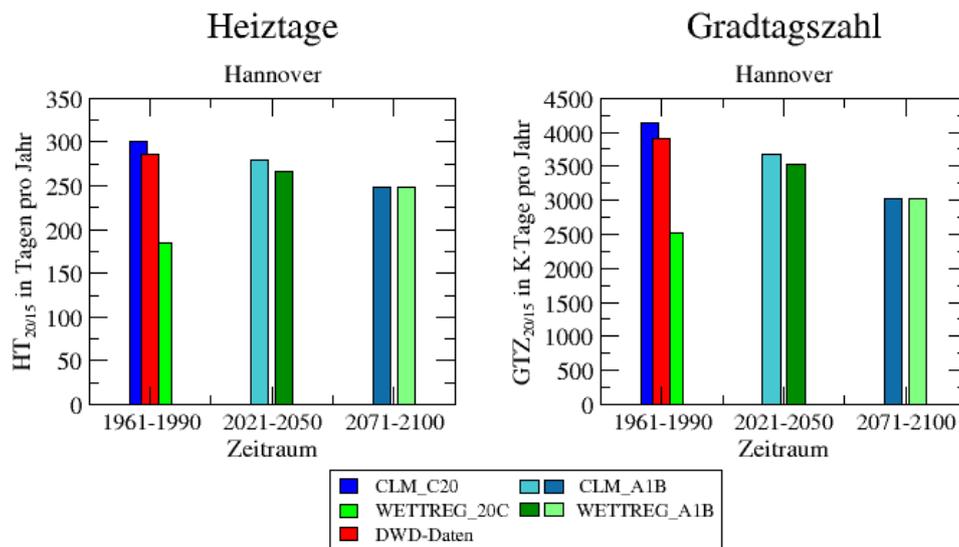
**Tabelle 3.3:** Anzahl der Kenntage in Hannover für den jeweiligen Kontrolllauf (1961-1990) und ihre mittelfristige sowie langfristige Veränderung für das Szenario A1B berechnet durch CLM und WETTREG.

## Heiztage

Heiztage (HT) sind Tage, an denen die mittlere Außentemperatur unterhalb einer Heizgrenze liegt. Die Gradtagszahl (GTZ), die an solchen Tagen gemessen wird, ähnlich wie Heizgradtage, ist ein Maß für den Wärmebedarf eines Hauses während der Heizperiode. Sie gestattet Rückschlüsse auf den wetterbedingten Heizenergieverbrauch (ZAMG o. J.). Nach der deutschen VDI Richtlinie 2067 / DIN 4108 T6 wird die Heizgrenze bei einer mittleren Außentemperatur  $\overline{\vartheta}_a$  von  $15^\circ\text{C}$  gesetzt. Die Innentemperatur  $\vartheta_{20}$  wird danach bei  $20^\circ\text{C}$  angenommen. Die Gradtagszahl  $GTZ_{20/15}$  errechnet sich dann als jährliche Summe aus der Differenz der Rauminnentemperatur und der jeweiligen Tagesmitteltemperatur, wenn diese unter der Heizgrenze liegt:

$$GTZ_{20/15} = \sum_{\overline{\vartheta}_a} 20^\circ\text{C} - \overline{\vartheta}_a, \quad \forall \overline{\vartheta}_a \leq 15^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

Die Einheit ist Kelvin · Tage / Jahr. Eine kleine GTZ deutet auf einen geringen Wärmebedarf hin, eine große GTZ dementsprechend auf einen erhöhten Wärme- und damit Energiebedarf. In erster Näherung gilt dabei: je kleiner die Tagesmitteltemperatur, desto höher die Gradtagszahl (JACOB *et al.* 2008).



**Abbildung 3.14:** Links: Entwicklung der Häufigkeit von Heiztagen pro Jahr in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100. Rechts: Darstellung der mittleren, jährlichen Gradtagszahl in selbigen Perioden. Die Simulationen wurden mit CLM (Blautöne) und WETTREG (Grüntöne) erstellt. Die roten Balken stellen die Heiztage bzw. Gradtagszahl der Referenzperiode aus DWD-Daten dar.

Die Entwicklung der benötigten Heizenergie ist für Politik und Energieerzeuger von besonderem Interesse. Im Zuge der Umstellung auf regenerative Energien trägt der zu erwartende Bedarf an Heizleistung entscheidend zur Ergebnisfindung bei. Die dafür erstellte Auswertung der zu erwartenden Heiztage und Gradtagszahlen (Abbildung 3.14) wie sie von CLM und WETTREG berechnet werden, gibt darüber Aufschluss. Die Kontrollläufe der zwei Regionalmodelle zeigen sowohl bei den Gradtagszahlen, wie auch bei den Heiz-

tagen große Abweichungen in der Reanalyse der Referenzperiode. WETTREG scheint in dieser Analyse nicht von der direkten Verwendung der Stationsdaten, die als Eingabedaten Verwendung finden, profitiert zu haben. Die Tatsache dieser deutlichen Unterschätzung bei WETTREG bestätigt und verifiziert die Analyse der kalten Tage, die zuvor stattgefunden hat. CLM hingegen reproduziert die betrachteten Parameter gut.

Der simulierte zukünftige Trend beider Modelle zeigt insgesamt abnehmende Tendenzen. Während CLM mit der Temperaturentwicklung korrelierend eine stetige Abnahme der Anzahl an Heiztagen sowie einen Rückgang der Gradtagszahl um etwa 1/4 innerhalb des 21. Jahrhunderts erwarten lässt, berechnet WETTREG den Trend einer deutlichen Zunahme beider Maßzahlen bis zur Periode 2021 bis 2050. Diese liegt jeweils bei rund 40%. Zum Ausgang des Jahrhunderts kommt es dann auch bei diesem Modell zu einem leichten Rückgang. Im Laufe des Jahrhunderts kommt es zu einer starken Annäherung der simulierten Werte von CLM und WETTREG. Aussagen dazu können daher als relativ sicher angenommen werden. Die relative Abnahme der GTZ in der Langfrist beträgt etwa 25% im Vergleich der aus CLM und Messungen des DWD erhaltenen Daten. Die Heiztage nehmen im selben Zeitraum um etwa 17% ab. Durch dieses ungleiche Verhältnis lässt sich darauf schließen, dass die mittlere Tagestemperatur der Heiztage steigen wird.

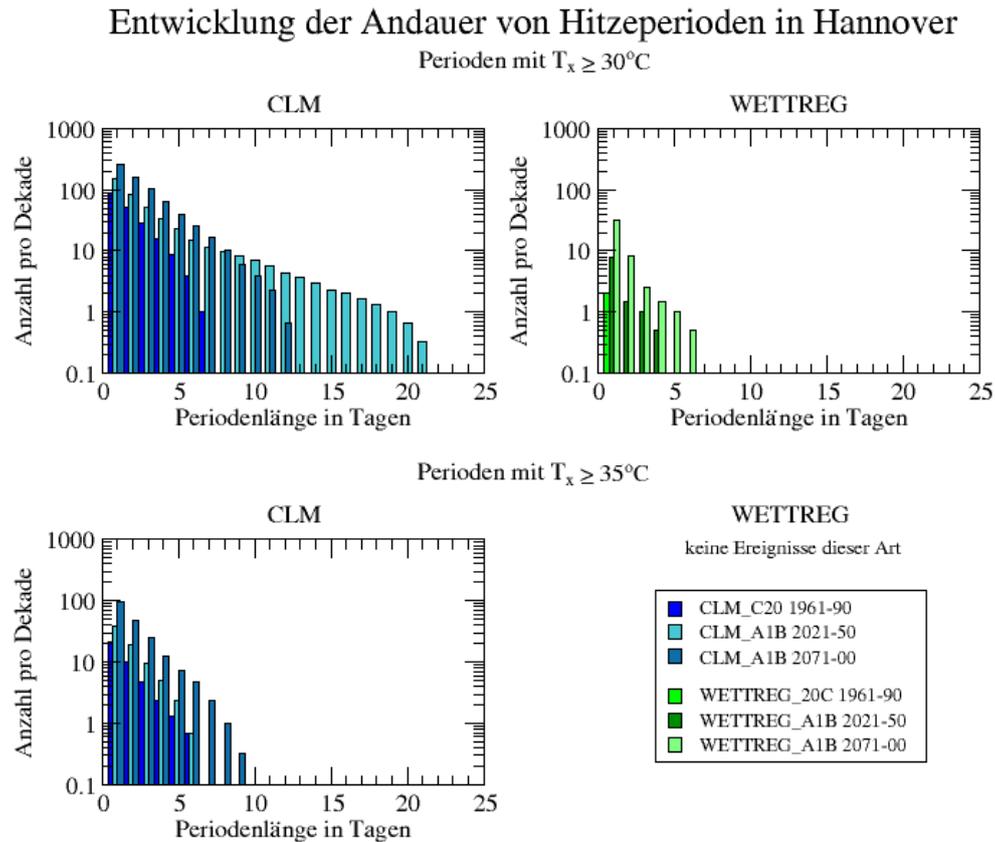
## 3.2 Extremereignisse

In diesem Abschnitt stehen extreme Wetterereignisse im Mittelpunkt der Untersuchung. Ziel dabei ist es, Erkenntnisse zu erlangen, ob und in welchem Ausmaß sich eine Zukunftsentwicklung der einzelnen Parameter in der Region Hannover abzeichnet. Ereignisse dieser Art können markante Anzeichen einer möglichen Klimaänderung sein und geben Hinweise bezüglich wahrscheinlicher Bandbreiten. In Folge dessen ist ihre Analyse für das Betrachtungsgebiet von großem Interesse.

### 3.2.1 Hitzewellen

Die Art der Änderung des Andauerverhaltens von Schwellenwertüberschreitungen ist von großer Bedeutung. Bei der Analyse der Kenntage zeichnete sich bereits eine deutliche Zunahme von heißen Tagen und Tropennächten ab. Aufgrund der starken Wärmebelastung und des zunehmenden Stressfaktors für den Menschen ist nicht nur die Entwicklung einzelner Tage, sondern vor allem das langfristige Verhalten aufeinanderfolgender, heißer Tage von besonderem Interesse. Notwendige Anpassungsmaßnahmen können dadurch gegebenenfalls frühzeitig entwickelt und umgesetzt werden.

Zunächst werden dabei die Projektionen von Hitzeperioden der zwei Regionalmodelle dargestellt und die vergleichende Analyse durchgeführt. Weiterhin wird dann versucht, den Zusammenhang und die Kopplung mit Niederschlägen in diesen Perioden abzubilden und das Augenmerk auf trocken - heiße Perioden zu legen, die sowohl den Menschen, als auch die Umwelt und Vegetation negativ beeinflussen.



**Abbildung 3.15:** Entwicklung der Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden mit  $T_x \geq 30^\circ\text{C}$  und  $T_x \geq 35^\circ\text{C}$ . Links: CLM. Rechts: WETTREG. Aufgetragen ist jeweils die Anzahl pro Dekade in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100.

### Hitzeperioden

Abbildung 3.15 stellt die Entwicklung der Andauerperioden von Maximumtemperaturen über  $30^\circ\text{C}$  (oben) bzw.  $35^\circ\text{C}$  (unten) dar. Die Analyse zeigt, dass deutliche Unterschiede zwischen den Modellen nicht nur in der Ausprägung des Änderungssignals, sondern bereits in der Reanalyse des Kontrollzeitraums 1961 bis 1990 bestehen. Verdeutlicht wird dies in Abbildung B.5 auf Seite VIII im Anhang, in der der Vergleich der Kontrollläufe mit Messdaten durchgeführt wird. Während CLM die Gesamthäufigkeit von Tagen mit maximalen Temperaturen über  $30^\circ\text{C}$  mehr als doppelt so hoch einschätzt, als eingetreten sind, wurden dennoch längere Hitzeperioden von bis zu 9 Tagen einmalig im Referenzzeitraum aufgezeichnet. Die Simulation liefert dahingegen eine maximale Andauer von 7 Tagen einmal pro Jahrzehnt. Bei WETTREG wurde bereits bei zuvor durchgeführten Analysen festgestellt, dass dieses Modell extreme Werte deutlich unterschätzt. Dies wird hier besonders deutlich. Pro Dekade werden von diesem Modell lediglich 2 Tage mit Temperaturen über  $30^\circ\text{C}$  berechnet. Maximumtemperaturen von über  $35^\circ\text{C}$  sind dem statistischen Modell zufolge nicht eingetreten (siehe rechte Graphik in Abbildung 3.15). Auch vom DWD wurde eine Schwellenwertüberschreitung dieser Größe nur an einem einzelnen Tag der gesamten Referenzperiode detektiert. Im Gegensatz dazu berechnet CLM Serien dieser Schwellenwertüberschreitung von bis zu 6 Tagen; Einzelereignisse mit Temperaturen über  $35^\circ\text{C}$  sogar an 11 Tagen pro Jahrzehnt.

So unterschiedlich die Simulationen der Referenzperiode sind, verläuft auch die weitere Entwicklung im 21. Jahrhundert. Im linken Teil der Abbildung 3.15 sind die Ergebnisse von CLM gezeigt. Dieses Modell projiziert mittelfristig eine drastische Zunahme in der Andauer von Hitzeperioden mit Maximumtemperaturen über  $30^{\circ}\text{C}$ . Pro Dekade im Zeitraum 2021 bis 2050 ist demnach ein Ereignis von bis zu 22 Tagen oberhalb dieser Temperaturmarke zu erwarten. Im Zeitraum 2071 bis 2100 geht der Trend zurück zu kürzeren Serien von bis zu 11 Tagen mit jedoch größerer Häufigkeit. WETTREG hingegen simuliert in geringem Ausmaß im Laufe des Jahrhunderts zunehmende Andauern und Häufigkeiten. Die maximale Andauer liegt dabei in der Langfrist bei 5 Tagen. Demnach ist eine deutliche Zunahme der Andauer und Häufigkeit zu erwarten. Ob es ein mittelfristiges Maximum geben wird, bleibt abzuwarten. Da aber bereits in der Referenzperiode längere Hitzeperioden zu verzeichnen waren, als von CLM simuliert wurden, ist es durchaus möglich, dass hohe Temperaturen in Serien von über 20 Tagen eintreten können.

Zunehmende Häufigkeiten sind bei Hitzeperioden mit Maximumtemperaturen über  $35^{\circ}\text{C}$  zu verzeichnen. Während CLM auch hier eine deutliche Zunahme der Häufigkeit und Andauer bis auf 9 Tage in Folge im Laufe des Jahrhunderts projiziert, werden von WETTREG nicht einmal Einzelereignisse dieser Art berechnet. Hier äußert sich erneut das Regionalisierungsverfahren, welches an bekannten Extremen festhält. Insgesamt lässt das CLM-Ergebnis auf eine Zunahme schließen. Jedoch ist ein Trend hin zu 9 Tagen in Folge mit jeweiligen Maximumtemperaturen von  $35^{\circ}\text{C}$  nicht verifiziert und die große Abweichung zwischen dem Kontrolllauf von CLM und Messungen lässt eventuell auf einen mittleren Wert von 4 bis 5 Tagen schließen.

### **Trocken - heiße Perioden**

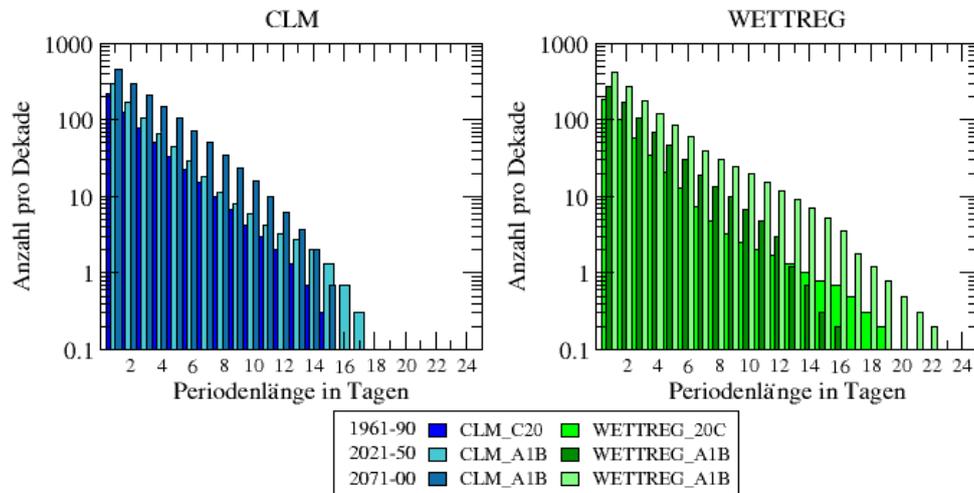
Basierend auf der zuvor durchgeführten Analyse der Hitzeperioden, wird die Betrachtung nun auf Perioden mit hohen Temperaturen und gleichzeitig ausbleibenden Niederschlägen, bzw. täglichen Niederschlagssummen unter 0.1 mm, ausgeweitet. Als Schwellenwert wird in dieser Auswertung eine Maximumtemperatur von  $25^{\circ}\text{C}$  angenommen. Im Mittelpunkt stehen also die Sommertage, da bereits bei diesen Temperaturen besonderer Bedarf an Wasser für Mensch und Umwelt besteht.

Die Reanalyse des Beobachtungszeitraums in Abbildung B.6 im Anhang zeigt eine relativ hohe Übereinstimmung in der Verteilung der Perioden zwischen den Modellen und Messdaten. Es fällt jedoch auf, dass CLM größere Häufigkeiten von Perioden von bis zu 10 Tagen simuliert. Die maximale Periodenlänge, liegt diesem Modell zufolge, im Referenzzeitraum bei 15 Tagen. Der Deutsche Wetterdienst detektierte einmalig maximal 16 Tage in diesem Zeitraum. WETTREG hingegen neigt zu einer leichten Unterschätzung der Häufigkeit bei Perioden von bis zu 14 Tagen. Längere Andauerzeiträume werden häufiger reproduziert. Besonders auffällig ist hier die maximale Dauer von 19 Tagen. Insgesamt ist die Reproduktion dennoch zufriedenstellend.

Die Analyse der Zukunftsprojektion in Abbildung 3.16 weist eine unterschiedliche Entwicklung, insbesondere der maximalen Andauer solcher trocken-heißen Perioden, auf. Während CLM (links) mittelfristig eine maximale Periodenlänge von 17 Tagen simuliert, liegt diese Größe zum Ende des Jahrhunderts erneut bei maximal 15 Tagen, die bereits

## Entwicklung der Andauer von trockenen Hitzeperioden in Hannover

Perioden mit  $T_x \geq 25^\circ\text{C}$  und Niederschlag  $\leq 0.1\text{ mm}$



**Abbildung 3.16:** Entwicklung der Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden in Form von Sommertagen ( $T_x \geq 25^\circ\text{C}$ ) und gleichzeitig ausbleibendem Niederschlag ( $\text{RR} \leq 0.1\text{ mm}$ ). Links: CLM. Rechts: WETTREG. Aufgetragen ist jeweils die Anzahl pro Dekade in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100.

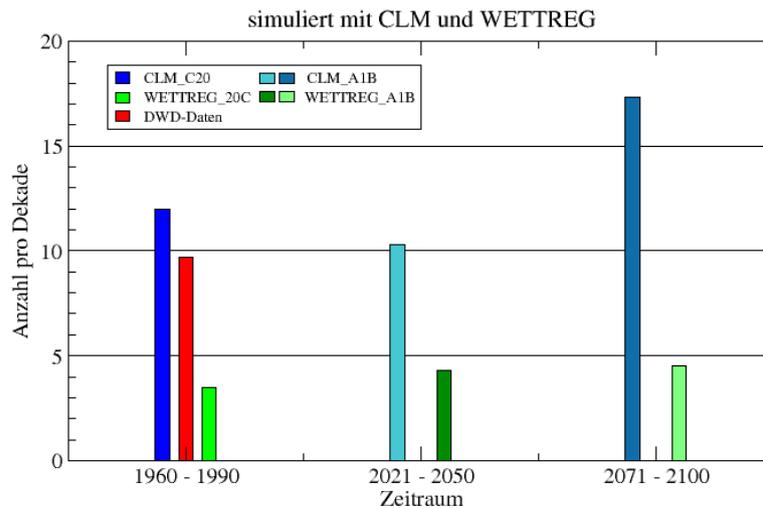
für die Referenzperiode berechnet wurden. WETTREG hingegen lässt bis zum Zeitraum 2021 bis 2050 einen Rückgang der maximalen Andauer solcher trocken - heißen Serien auf 15 Tage erwarten. Langfristig ist bei diesem Modell allerdings eine deutliche Zunahme auf bis zu 22 Tage zu verzeichnen. Beiden Modellen gemein ist die Simulation deutlich häufigerer Perioden dieser Art. CLM projiziert zum Ende des Jahrhunderts die Ereignisse jeder Andauer etwa dreimal so häufig wie es für die Referenzperiode der Fall war. Bei WETTREG kommt es langfristig teilweise sogar zu Häufigkeiten, die achtmal so groß sind, wie für den Beobachtungszeitraum simuliert. Eine deutliche Zunahme der Häufigkeit von trocken - heißen Perioden ist damit sehr wahrscheinlich. Die Entwicklung hin zu längeren Serien solcher Perioden ist möglich, kann anhand der hier durchgeführten Auswertungen jedoch nicht näher bestimmt werden.

### 3.2.2 Starkniederschläge

Starkniederschlagsereignisse bedürfen einer Definition. In der Literatur finden sich dazu verschiedene Begrifflichkeiten gleicher Schwellenwertüberschreitungen. So werden bei SPEKAT *et al.* (2007) Extremniederschläge durch Niederschlagssummen über 25 mm pro Tag gekennzeichnet. Tage mit derartigen Mengen an Niederschlag werden anderenorts auch als „nasse Tage“ bezeichnet (JACOB *et al.* 2008). Aufgrund der selten zu erwartenden Häufigkeit wird hier die Anzahl solcher Tage pro Dekade betrachtet.

Des Weiteren wird auf die Projektion absoluter Tagesniederschlagsmaxima fokussiert. Wie bereits in der Niederschlagsanalyse in Abschnitt 3.1.2 angedeutet, ist dabei besonders der Vergleich der Regionalisierungsansätze von Interesse. Eine weiterhin wichtige Untersuchung, wie sie beispielsweise auch innerhalb der Publikation von SPEKAT *et al.* (2007) zu finden ist, bezieht sich auf die höchste 5 - Tage - Niederschlagssumme. Analysen dieser mit

## Entwicklung der Häufigkeit von nassen Tagen in Hannover



**Abbildung 3.17:** Entwicklung der Häufigkeit von Extremniederschlägen ( $\geq 25$  mm), sogenannten nassen Tagen, in Hannover. Vergleich der modellspezifischen Kontrollläufe mit den Messdaten im Referenzzeitraum und Projektionen der Modelle für das 21. Jahrhundert. Aufgetragen ist jeweils die Anzahl pro Dekade in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100.

WETTREG simulierten Größe wurden dort beispielhaft für die Stationen „Berlin-Dahlem“ und „München“ durchgeführt. Die maximalen 5-Tagessummen lagen an den Beispielstationen jedoch nur wenig höher als die Tagesmaxima und geben somit keine eindeutigen Erkenntnisse über die zukünftige Entwicklung an (SPEKAT *et al.* 2007). Die Entwicklung eventueller Serien von Tagen mit relativ hohen Niederschlagssummen soll im Folgenden für die Region Hannover untersucht werden.

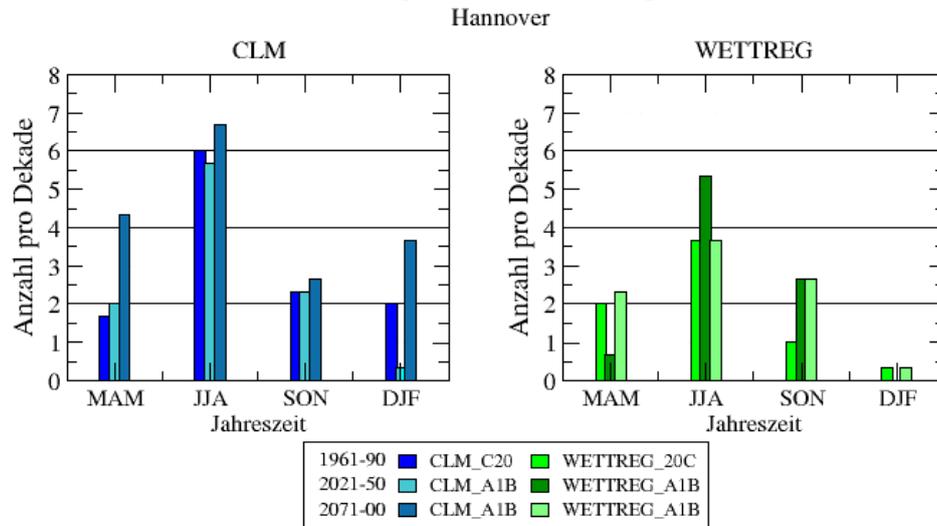
Bei CLM besteht zudem die Möglichkeit Niederschlagssummen in zeitlicher Auflösung einzelner Stunden zu analysieren. Auch diese Untersuchung findet in diesem Abschnitt statt.

### Nasse Tage

Nasse Tage sind, wie bereits erwähnt, durch Niederschlagsmengen  $\geq 25$  mm gekennzeichnet. Ihre, durch die Modelle simulierte Entwicklung zeigt einen deutlichen Trend auf. Veranschaulicht ist dies in Abbildung 3.17. Pro Dekade kam es im Beobachtungszeitraum 1961 bis 1990 durchschnittlich zu 9.67 Tagen dieser Art. CLM berechnet für den gleichen Zeitraum 12 Tage, WETTREG nur 3.5 Tage. Mittelfristig läuft die Tendenz auseinander. Während CLM bis dahin einen Rückgang auf 10.3 Tage pro Jahrzehnt simuliert, geht WETTREG von einer Zunahme um fast 24% aus. Langfristig werden CLM zufolge 17.3 nasse Tage pro Dekade zu erwarten sein. WETTREG simuliert pro Dekade dieser Periode 4.5 Tage an denen der Schwellenwert von 35 mm überschritten wird. Beiden Modellen ist langfristig also eine deutliche Zunahme der Häufigkeit von nassen Tagen zu entnehmen.

Abbildung B.7 im Anhang stellt die Beobachtungen der Referenzperiode nach Jahreszeiten differenziert und die entsprechenden Reanalysen von CLM und WETTREG dar. Zukünftig mögliche Entwicklungen werden in Abbildung 3.18 gezeigt. Die meisten Kenn-

## Jahreszeitliche Verteilung von nassen Tagen im 21. Jahrhundert

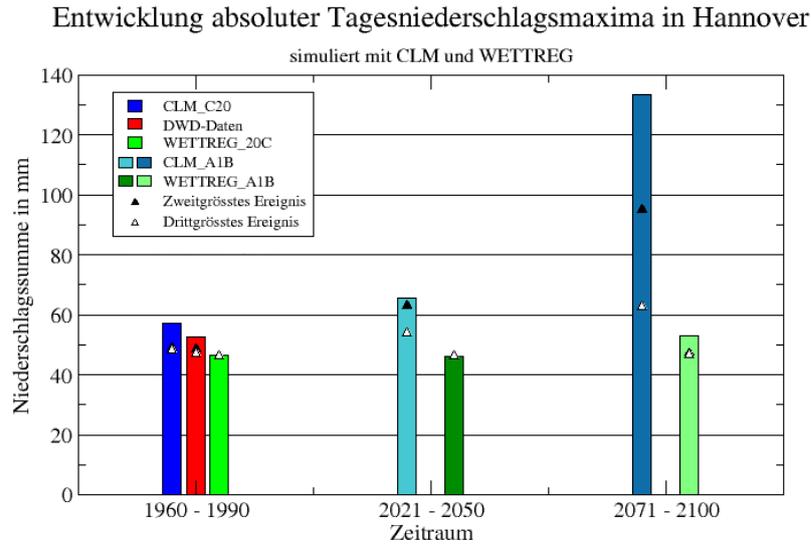


**Abbildung 3.18:** Entwicklung der jahreszeitlichen Verteilung von Extremniederschlägen, den sogenannten nassen Tagen ( $\geq 25$  mm), in Hannover. Sowohl die Ergebnisse der modellspezifischen Kontrollläufe für den Referenzzeitraum sowie die Projektionen der Modelle für das 21. Jahrhundert sind aufgetragen. Angegeben ist jeweils die Anzahl der Ereignisse pro Dekade in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100.

tage dieser Art treten den Auswertungen zufolge in den Sommermonaten auf. Bei CLM ist die Häufigkeit in den übrigen Jahreszeiten relativ ausgeglichen. WETTREG hingegen simuliert fast keine nassen Tage im Winter. Die mittelfristige Entwicklung dieses Parameters beider Modelle weist große Unterschiede auf. CLM nimmt, ausgenommen von einem starken Rückgang der Häufigkeit im Winter, kaum Veränderungen bis zum Zeitraum 2021 bis 2050 an. Auch langfristig ist nur in den Frühjahrs- und Wintermonaten eine deutliche Zunahme zu verzeichnen. Im Gegensatz dazu sind in den WETTREG-Berechnungen große, mittelfristige Änderungen mit häufigeren nassen Tagen im Sommer und Herbst zu beobachten. Langfristig liegt die Häufigkeit in den Jahreszeiten überwiegend auf dem Niveau der Referenzperiode.

### Absolute Tagesniederschlagsmaxima

Die Analyse der absoluten Tagesniederschlagsmaxima innerhalb der 30-jährigen Betrachtungsperioden liefert interessante Erkenntnisse (siehe Abbildung 3.19). Die Dreiecke markieren darin zusätzlich die zweit- und drittgrößten Tagesniederschlagssummen (schwarz bzw. weiß). Die vom DWD gemessene maximale Summe im Beobachtungszeitraum liegt bei 52.5 mm. Unter Berücksichtigung der starken räumlichen Variabilität dieses Klimaparameters und seiner großen Fehlerbehaftung, wird diese Größe gut durch die Regionalmodelle reproduziert. CLM berechnet 57.1 mm, WETTREG 46.4 mm. Die mögliche Entwicklung im Laufe des Jahrhunderts wird von beiden Simulationen sehr unterschiedlich projiziert. Insgesamt ist mit einer Zunahme des möglichen Tagesmaximums zu rechnen. Die Ausprägung dieser Änderung umfasst einen weiten Bereich von einem Anstieg um 7 mm (WETTREG) bis hin zu einer Verdoppelung auf über 130 mm (CLM). Dieser lang-



**Abbildung 3.19:** Entwicklung absoluter Niederschlagsmaxima in Hannover. Vergleich der modell-spezifischen Kontrollläufe mit den Messdaten im Referenzzeitraum und Projektionen der Modelle für das 21. Jahrhundert. Aufgetragen ist jeweils die Anzahl pro Dekade in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100. Zusätzlich werden die zweit- und drittgrößten Tagesniederschlagssummen der Perioden durch Dreiecke (schwarz bzw. weiß) markiert.

Daten	1961 - 1990 Beob./Kon.	2021 - 2050 A1B	2071 - 2100 A1B
<b>DWD</b>	<b>100.6 mm</b>		
<b>CLM</b>	<b>93.48 mm</b>	1.11 mm	45.23 mm
<b>WETTREG</b>	<b>102.8 mm</b>	-6.5 mm	-6.1 mm

**Tabelle 3.4:** Maximale 5 - Tage - Niederschlagssummen in Hannover für den jeweiligen Kontrolllauf (1961 - 1990) und ihre mittelfristige sowie langfristige Veränderung für das Szenario A1B berechnet durch CLM und WETTREG.

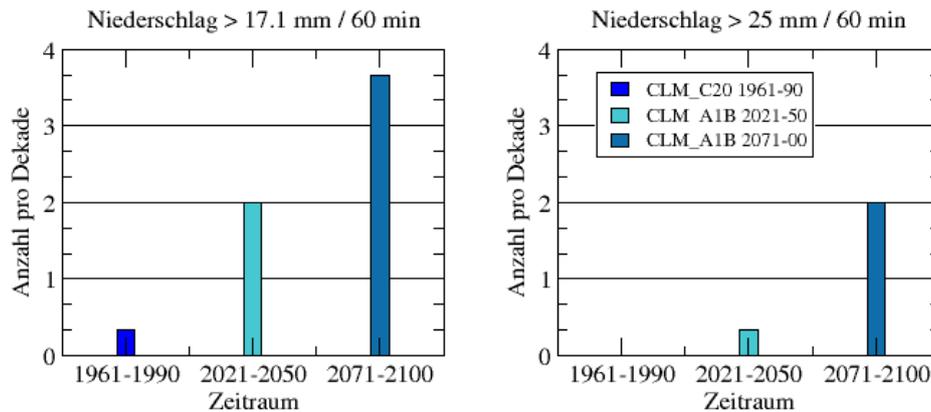
fristige Anstieg auf 133.58 mm, wie er durch CLM simuliert wird, beschreibt jedoch in der weiteren Betrachtung ein konvektives Einzelereignis. Die zweithöchste Tagesniederschlagsmenge liegt bei 94.95 mm, die drittgrößte bei nur noch 62.55 mm. Diese Tatsache zeigt die Fähigkeit des dynamischen, nicht-hydrostatischen Modells, konvektive Ereignisse aufzulösen. WETTREG besitzt diese Fähigkeit nicht und hat keine Möglichkeit neue Extreme zu berechnen. Tabelle C.1 auf Seite XVII im Anhang fasst die Ergebnisse dieses Parameters zusammen.

### 5 - Tages - Niederschlagssummen

Tabelle 3.4 fasst die Entwicklung der 5 - Tage - Niederschlagssumme im 21. Jahrhundert zusammen. Die durch den DWD aufgezeichnete maximale Niederschlagssumme über einen Zeitraum von fünf Tagen liegt in der Referenzperiode bei 100.6 mm. Dieser Wert ist fast doppelt so groß wie das maximale Einzelereignis des Beobachtungszeitraums, das mit

## Entwicklung von Starkregen- und heftigen Starkregenereignissen

Hannover



**Abbildung 3.20:** Entwicklung der Häufigkeit von Starkregen- und heftigen Starkregenereignissen in Hannover im 21. Jahrhundert simuliert mit CLM. Aufgetragen ist jeweils die Anzahl an Ereignissen mit jeweiliger Schwellenwertüberschreitung pro Dekade in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100.

52.5 mm detektiert wurde. Es kam also zu einer Serie von Tagen mit relativ hohen Niederschlagssummen.

CLM simuliert diese Größe in der Referenzperiode mit 93.48 mm. Wobei es diesem dynamischen Modell zufolge mittelfristig zu einem nur sehr geringen Anstieg, langfristig aber zu einer deutlichen Zunahme kommt. Die maximale 5 - Tage - Niederschlagssumme liegt dann bei 138.7 mm. Das maximale Einzelereignis wird für diesen Zeitraum mit etwa 133 mm projiziert und ist in der genannten 5 - Tage - Summe enthalten. Die nächstgrößte Summe einer weiteren Serie von 5 Tagen liegt bei knapp über 100 mm. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die maximale Summe die Folge eines einzelnen konvektiven Niederschlagsereignisses ist und kein eindeutiger Trend zu höheren Summen daraus abzuleiten ist.

Die durch WETTREG simulierten Ergebnisse deuten demgegenüber sogar auf einen leicht rückläufigen Trend diesbezüglich hin. Von etwa 102 mm im Kontrolllauf, nehmen die über fünf Tage summierten Niederschlagsmengen mittelfristig auf maximal 96.3 mm ab. Langfristig nimmt dieser Wert um nur 0.4 mm zu. Einzelereignisse dieser Simulation liegen im Bereich um 50 mm. Dieses Modell weist damit weiterhin auf Serien von Tagen mit relativ hohen Niederschlagssummen hin.

Zu erwarten ist demnach keine signifikante Änderung der bisherigen Verhältnisse. 5 - Tage - Niederschlagssummen werden voraussichtlich bei maximal 100 mm liegen.

### Stündliche Niederschlagsmaxima

Der Deutsche Wetterdienst definiert Starkniederschläge auf unterschiedlichen Zeitskalen. Die von CLM bereitgestellten Daten in zeitlich hoher Auflösung erlauben Untersuchungen auf der Ebene einzelner Stunden. Als Starkregen gelten auf dieser Skala Niederschlagsmengen über 17.1 mm. Als Unwetterwarnkriterium dient der sogenannte „heftige Starkregen“ mit einer stündlichen Niederschlagssumme von über 25 mm (DWD 2009c).

Daten	1961 - 1990 C20	2021 - 2050 A1B	2071 - 2100 A1B
CLM	24.95 mm	36.49 mm	51.34 mm

**Tabelle 3.5:** Maximale einstündige Niederschlagssummen in Hannover für den Kontrolllauf (1961-1990) und ihre mittelfristige sowie langfristige Entwicklung für das Szenario A1B berechnet durch CLM.

Die Abbildung 3.20 zeigt die Entwicklung von 60-minütigen Starkniederschlägen innerhalb des 21. Jahrhunderts, wie sie durch CLM projiziert wird. Es zeichnet sich ein deutlicher Trend ab, der eine starke Zunahme insbesondere von heftigen Starkniederschlägen erwarten lässt. Traten Ereignisse dieser Art nach den Ergebnissen der Reanalyse in der Referenzperiode noch nicht auf, so kommt es am Ende des Jahrhunderts zu immerhin 2 Ereignissen dieser Größenordnung innerhalb von 10 Jahren.

Die Analyse der maximalen Stundensummen des Niederschlags, die in Tabelle 3.5 erkennbar ist, deutet auf eine Verdoppelung des Wertes im Verlauf des Jahrhunderts hin. Während für den Beobachtungszeitraum 1961 bis 1990 knapp 25 mm simuliert wurden, liegen die Zukunftsprojektionen bei 36.5 mm in der Mittelfrist und bei 51.3 mm in der Periode 2071 bis 2100.

Da es sich bei diesen Auswertungen jedoch um Ergebnisse eines einzelnen Modells für ein einziges Szenario handelt, ist die Aussagekraft dieser simulierten Entwicklung kritisch zu bewerten.

### 3.2.3 Sturmereignisse

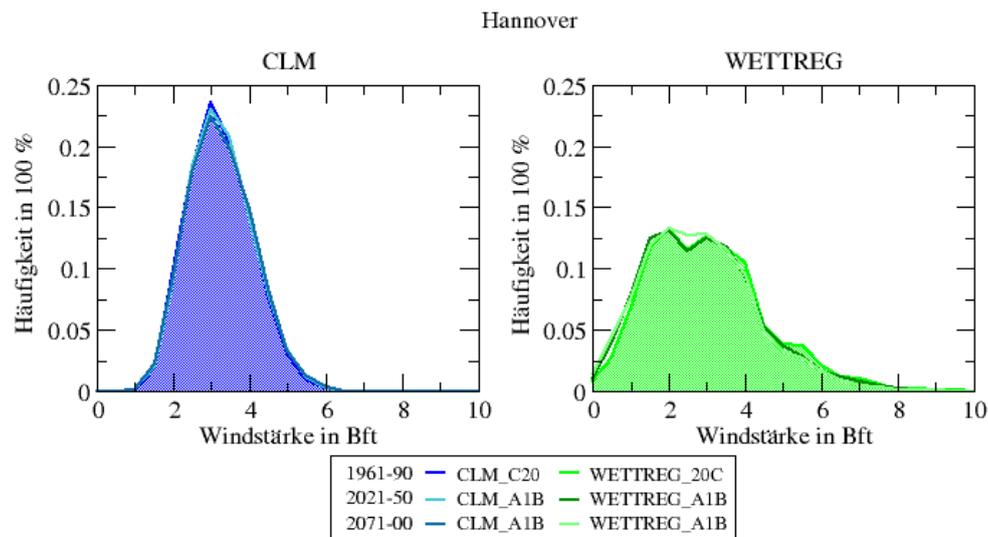
Das Windverhalten ist sowohl räumlich als auch zeitlich sehr variabel. Die Angabe von Windverhältnissen erfolgt auf unterschiedlichen Zeitskalen. Während im Folgenden zunächst mittlere Windstärken einzelner Tage betrachtet werden, ist die Angabe von 10-minütigen Mittelwerten oft aussagekräftiger. Sturmtage werden vom DWD beispielsweise durch ein solches maximales Mittel eines Tages von über 8 Beaufort (Bft) gekennzeichnet (DWD 2009d). Da die maximale zeitliche Auflösung der zur Verfügung stehenden Klimaprojektionen bei CLM eine Stunde beträgt und bei WETTREG nur Tageswerte ausgegeben werden, können Sturmtage dieser Definition nicht betrachtet werden. Stattdessen werden diese Kenntage an dieser Stelle für die, im Rahmen dieser Arbeit, durchgeführten Auswertungen durch eine mittlere Windstärke von über 6 Bft am Tag definiert.

Aufgrund unterschiedlicher Einheiten, die ausgegeben werden, ist insbesondere bei den von CLM berechneten Winddaten in Metern pro Sekunde eine Umrechnung in Beaufort nötig. Eine empirische Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und -stärke der seit 1946 verwendeten Beaufortskala wird durch die Formel

$$v = 0.8360 \frac{m}{s} \cdot B^{\frac{3}{2}} \quad \Leftrightarrow \quad B = \sqrt[3]{\left(\frac{v}{0.8360 \frac{m}{s}}\right)^2} \quad (3.2)$$

gegeben (STEWART 1997).

## Entwicklung der Häufigkeitsverteilung der Windstärken im 21. Jahrhundert



**Abbildung 3.21:** Entwicklung der Häufigkeitsverteilung der mittleren Windstärke in Hannover im 21. Jahrhundert simuliert mit CLM und WETTREG. Aufgetragen ist jeweils die Anzahl an Tagen mit der jeweiligen mittleren Windstärke pro Jahr in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100.

Zunächst wird jedoch die Analyse der allgemeinen Windverteilung im Raum Hannover durchgeführt. Dabei werden Häufigkeitsverteilung für die Jetztzeit und Zukunftsprojektionen mit einer Klassenweite von 0.5 Bft erstellt. Die Reanalysen weisen im Vergleich zu Beobachtungsdaten der Jetztzeit zum Teil große Abweichungen auf (siehe Abbildung B.8 im Anhang). CLM simuliert die Form der Verteilung im Wesentlichen gut, ist jedoch insgesamt etwas zu höheren Windstärken verschoben. Die häufigste Windstärke bei CLM liegt aber ähnlich wie in den Auswertungen der Messdaten zwischen 2.5 und 3.0 Bft. Die Windverteilung wie sie durch WETTREG berechnet wird, weist eine deutlich höhere Streuung auf, wobei das Maximum der Häufigkeit im Bereich 1.5 bis 2.0 Bft vorzufinden ist. Dieses Modell simuliert weitaus höhere Tagesmittel der Windstärke (bis zu 9 Bft) als in der Beobachtungsperiode eingetreten sind.

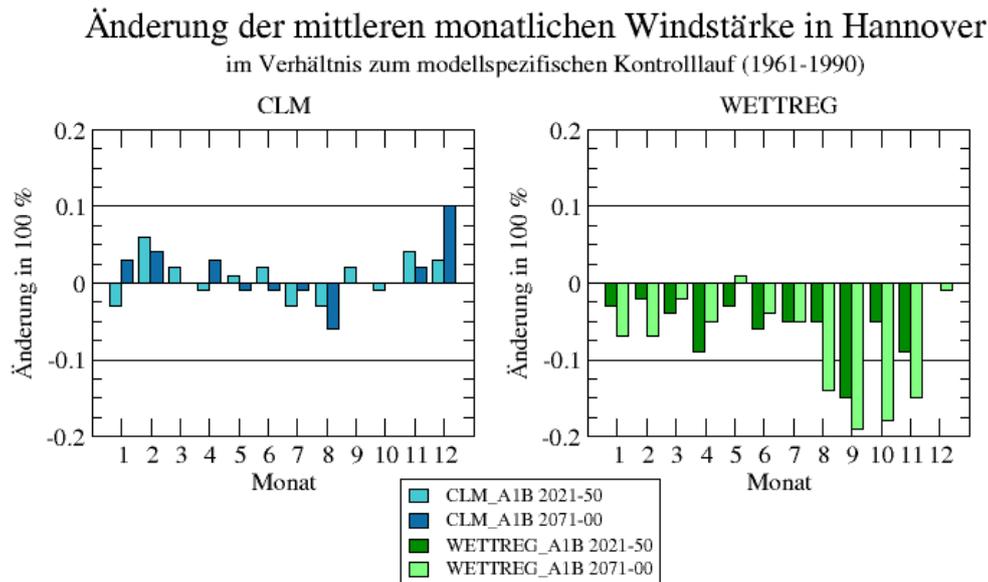
In Abbildung 3.21 ist die zukünftige Entwicklung dieses Parameters dargestellt, wie sie durch CLM und WETTREG berechnet wird. Die Auswertung zeigt die bereits in den Reanalysen beobachteten signifikanten Unterschiede der Modelle. Während das Histogramm bei CLM einen Bereich von etwa 0.5 bis 6.5 Bft ausfüllt, beginnt das Spektrum bei WETTREG bereits bei Tagen ohne jegliches Windaufkommen. Es erstreckt sich dann bis 12.5 Bft. Eine signifikante Verschiebung der Spektren im Laufe der Zeit ist jedoch bei beiden Modellen nicht zu beobachten.

Die Jahresmittel der täglichen Windstärke sind aus Tabelle 3.6 ersichtlich. Während bei CLM kaum ein Trend einer Zunahme der Windstärke zu verzeichnen ist, simuliert WETTREG einen doch deutlichen Rückgang dieses Parameters.

Monatlich differenziert ist ein leichtes Minimum der Windstärke im Sommer aus Messdaten erkennbar, wie in Abbildung B.9 im Anhang ersichtlich ist. Diese Graphik zeigt den Vergleich zwischen Reanalysen und Messdaten des DWD. WETTREG stellt den Verlauf

Daten	1961 - 1990 Beob. /Kon.	2021 - 2050 A1B	2071 - 2100 A1B
<b>DWD</b>	2.72 Bft		
<b>CLM</b>	2.98 Bft	3.00 Bft	3.01 Bft
<b>WETTREG</b>	2.84 Bft	2.69 Bft	2.61 Bft

**Tabelle 3.6:** Jahresmittel der Tageswindstärke in Hannover für den Kontrolllauf (1961-1990) und ihre mittelfristige sowie langfristige Entwicklung für das Szenario A1B berechnet durch CLM und WETTREG.

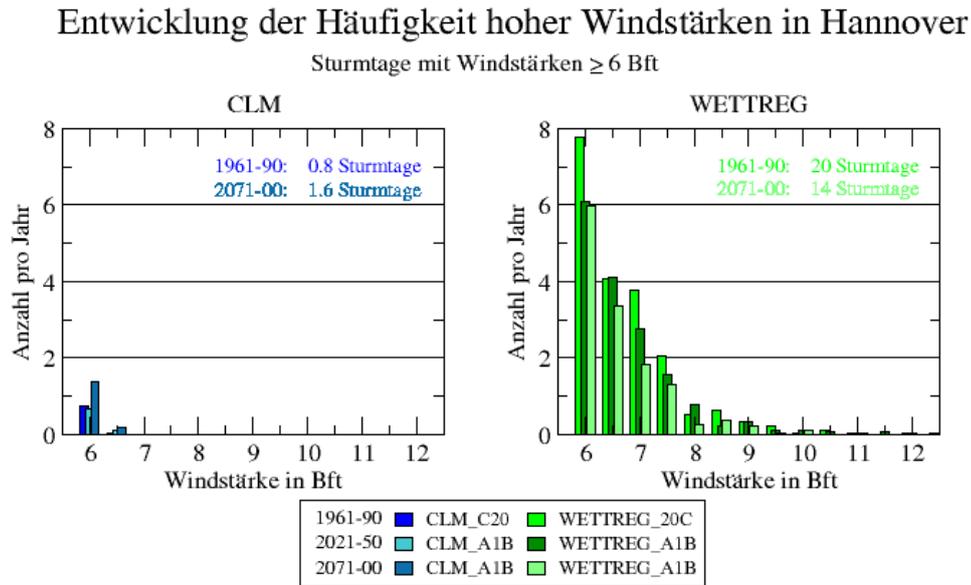


**Abbildung 3.22:** Veränderung der mittleren monatlichen Windstärke in Hannover im 21. Jahrhundert. Aufgetragen ist jeweils die prozentuale Änderung der Simulation für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 als Differenz zum jeweiligen, modellspezifischen Kontrolllauf von CLM und WETTREG.

über das Jahr hinweg gut dar. Bei den Berechnungen von CLM bleibt hingegen der Jahresgang mit einem Minimum im Sommer, und dem Maximum in den Wintermonaten aus. Die weitere Entwicklung ist in Abbildung 3.22 dargestellt. Aufgetragen ist jeweils die prozentuale Abweichung vom Kontrolllauf des jeweiligen Modells. Während bei WETTREG (rechts) hauptsächlich eine Abnahme der Windstärken besonders in den Herbstmonaten (bis zu 18 %) zu verzeichnen ist, projiziert CLM keinen eindeutigen Trend. Stattdessen sind überwiegend vernachlässigbare Schwankungen mit einer Tendenz zu steigenden Windstärken in den Wintermonaten zu beobachten.

Um nun auf die Analyse der Extremwerte einzugehen, wird die Häufigkeit von Windstärken ab 6 Bft nochmals näher betrachtet (siehe Abbildung 3.23). Wie im einleitenden Abschnitt definiert, gelten Tage mit Windstärken oberhalb dieses Schwellenwertes in dieser Arbeit als Sturmtage.

Signifikant im Vergleich der Modellprojektionen ist die unterschiedliche Häufigkeit von Sturmtagen. CLM berechnet sowohl für die Referenzperiode, als auch für die Mittelfrist knapp 0.8 Sturmtage pro Jahr mit einer Tendenz zu doppelt so vielen Tagen dieser Art



**Abbildung 3.23:** Entwicklung der Häufigkeit von mittleren Windstärken ab 6 Bft in Hannover im 21. Jahrhundert. Aufgetragen ist jeweils die Anzahl an Tagen mit der jeweiligen mittleren Windstärke pro Jahr in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100.

Daten	<i>1961 - 1990 Beob. / Kon.</i>	<i>2021 - 2050 A1B</i>	<i>2071 - 2100 A1B</i>
<b>DWD</b>	7.3 Bft		
<b>CLM</b>	6.2 Bft	6.3 Bft	6.4 Bft
<b>WETTREG</b>	11.6 Bft	12.1 Bft	9.8 Bft

**Tabelle 3.7:** Maximale mittlere Tageswindstärke in Hannover für den Kontrolllauf (1961 - 1990) und ihre mittelfristige sowie langfristige Entwicklung für das Szenario A1B berechnet durch CLM und WETTREG.

zum Ende des Jahrhunderts. Der DWD führt in seinen Beobachtungen etwa 1.4 Tage dieser Art auf (siehe Abbildung B.10 im Anhang). WETTREG hingegen geht von deutlich mehr stürmischen Tagen aus und berechnet im Kontrolllauf fast 20 Tage pro Jahr für den Beobachtungszeitraum. Im Laufe des Jahrhunderts ist die Zahl der Sturmtage, diesem Modell zufolge, jedoch deutlich rückläufig. Für die Periode 2071 bis 2100 werden dann nur noch knapp 14 Tage pro Jahr berechnet. Ebenso auffällig ist die häufige Projektion extremer Tageswindstärken, deren Realitätsnähe bereits im Vergleich mit Beobachtungsdaten widerlegt wurde. Ein Trend zu größeren Windstärken ist aber auch hier nicht zu beobachten.

Tabelle 3.7 fasst die Entwicklung der maximalen Tageswindstärken zusammen. Während CLM einen leichten Anstieg des Maximums zum Ende des Jahrhunderts simuliert, kommt es bei WETTREG zunächst mittelfristig zu einer Zunahme, langfristig aber zu einer Abnahme der maximalen mittleren Windstärke eines Tages.

Abschließend ist anzumerken, dass anhand der zwei verwendeten Modelle kein eindeutiger Trend der Windverhältnisse zu erwarten ist. Um fundierte Aussagen diesbezüglich treffen zu können, sind weitere Untersuchungen mit Hilfe zusätzlicher Szenarien oder an-

derer Modelle nötig. Festzuhalten bleibt dennoch, dass CLM von etwa gleich bleibenden Verhältnissen mit schwacher Tendenz zu mehr Extremen ausgeht. Winterstürme könnten diesem Modell zufolge etwas in ihrer Häufigkeit zunehmen. WETTREG hingegen neigt bereits in der Verteilung des Windes zu deutlich höheren Windstärken, was sich besonders stark in der Anzahl der Sturmtage auswirkt. Im Verlauf des 21. Jahrhunderts projiziert dieses statistische Modell dann aber einen deutlichen Rückgang sowohl in der Zahl dieser Kenntage, als auch in der Ausprägung des Jahresmittels der Windstärke. Um gesicherte Folgen beispielsweise für Windenergieerzeuger abzuschätzen, sei ebenso auf die bereits oben genannten weiteren Auswertungen verwiesen. WETTREG würde nach den bereits durchgeführten Untersuchungen negative Beeinflussung dieses Energiezweiges erwarten lassen.

## Kapitel 4

# Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertungen der vorherigen Kapitel zeigen mögliche Entwicklungen einiger Klimaparameter für die Region Hannover auf. Es wird deutlich, dass auch dieses Gebiet durch ein sich veränderndes Klima beeinflusst wird. Global analysierte Trends bestätigen sich nach den hier durchgeführten Auswertungen auch auf regionaler Ebene im Raum Hannover. Besonders ausgeprägt lässt sich dies an einem wahrscheinlichen Temperaturanstieg zwischen  $2.4^{\circ}\text{C}$  und  $3.3^{\circ}\text{C}$  bis zur Periode 2071 bis 2100 ausmachen. Dabei handelt es sich um die Größenordnung, die auch im globalen Mittel zu erwarten ist. Die maximale Erwärmung wird jahreszeitlich differenziert in den Wintermonaten zu beobachten sein und kann bis über  $4^{\circ}\text{C}$  betragen.

Entscheidende Auswirkungen werden sich voraussichtlich auch in Folge der sich jahreszeitlich stark verschiebenden Niederschlagsverteilung ergeben. Die für die Vegetation und Landwirtschaft wichtigen Sommerniederschläge nehmen langfristig um bis zu 20 % ab. Bei den Winterniederschlägen ist nach den hier durchgeführten Analysen hingegen ein deutlicher Anstieg um etwa 35 % zu erwarten. Eine Reduktion der Niederschlagstage führt zusätzlich zu weniger häufigen und stattdessen konzentrierteren Niederschlägen.

Die Analyse der Kenntage bestätigt die Erwartungen, die sich nach Auswertungen des Temperaturänderungssignals ergeben. Neben einer deutlichen Abnahme von Eis- und Frosttagen, ist ein langfristiger Trend zu fast doppelt so vielen heißen Tagen pro Jahr im Vergleich zur Referenzperiode zu verzeichnen. Auch die Anzahl von Tropennächten wird voraussichtlich zunehmen. Die zusätzliche Analyse von Heiztagen sowie die der Gradtagzahl, geben Aufschluss über den zukünftig nötigen Heizenergiebedarf. Ihre Entwicklung lässt auf einen Rückgang dieses Bedarfs hoffen und würde zu Energieeinsparungen auf diesem Gebiet führen.

In einem eigenen Abschnitt dieser Arbeit wurde sich mit der Entwicklung extremer Ereignisse, wie Hitzewellen, Starkniederschlägen und Sturmereignissen beschäftigt. Vorkommnisse dieser Art sind meist nicht großflächig über ganz Deutschland festzustellen, sondern in einzelnen Regionen anzutreffen. Dennoch sind sie oftmals mit hoher, volkswirtschaftlicher Schadwirkung verbunden. Ihre Analyse für den Raum Hannover ist deshalb von großer Bedeutung und gibt zusätzlich Aufschluss über eine mögliche Bandbreite der Veränderung der einzelnen Parameter. Im Zuge dessen sind trotz großer Abweichungen zwischen den Modellen in der Ausprägung der verschiedenen Ereignisse Tendenzen zu beobachten. So

gilt es als wahrscheinlich, dass die Häufigkeit und Andauer von Perioden mit Maximumtemperaturen über 30 °C deutlich zunehmen werden. Hitzeserien mit einer Länge von 10 bis 12 Tagen sind in dieser Hinsicht aufgrund der bereits jetzt vereinzelt auftretenden 9-tägigen Periodenlängen nicht unwahrscheinlich. Weniger lange Perioden (bis zu 5 Tagen) werden auch mit Maximumtemperaturen über 35 °C zu erwarten sein. Die Auswertung für heiße Perioden mit gleichzeitig ausbleibendem Niederschlag weist ebenfalls auf eine deutliche Zunahme in Häufigkeit und Andauer hin.

Die zukünftige Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen zeigt je nach Modell unterschiedliche Tendenzen auf. Während WETTREG überwiegend an aktuellen Ausprägungen festhält, ist bei CLM eine deutliche Zunahme aller betrachteten Parameter dieses Untersuchungsbereichs zu verzeichnen. Die Möglichkeit konvektive Ereignisse zu simulieren wird besonders in der Analyse der absoluten Tagesniederschlagsmaxima deutlich. Eine Niederschlagssumme von über 130 mm wird dort einmalig in der Langfrist simuliert. Die Zahl an sogenannten nassen Tagen wird im Laufe des 21. Jahrhunderts zunehmen. Serien von Tagen mit großen Niederschlagsmengen werden im Gegensatz zu stündlichen Niederschlagssummen voraussichtlich keine Entwicklung durchlaufen.

Abschließend wurde sich der Analyse von zukünftigen Windverhältnissen gewidmet. Einheitliche Tendenzen der Entwicklung wurden dennoch nicht festgestellt. Wohingegen WETTREG von einem doch signifikanten Rückgang der mittleren Jahreswindstärke und insbesondere der hier ab Windstärke 6 definierten Sturmtage ausgeht, berechnet CLM gleich bleibende mittlere Windstärken und eine leichte Zunahme der Kenntage des Windes. Aufgrund großer Diskrepanzen zwischen beiden Regionalmodellen im Hinblick einzelner Klimaparameter sind weiterführende Untersuchungen in der Region Hannover sowohl für die Windverhältnisse als auch für alle anderen Klimagrößen unverzichtbar.

Die Herausnahme eines einzelnen Gitterpunktes für die Klimaprojektionen des 21. Jahrhunderts ist kritisch zu betrachten und dient als Anstoß räumlich ausgeweiteter Untersuchungen auf regionaler Ebene in Niedersachsen sowie im Speziellen in der Metropolregion. Wie es bereits im Projekt „KlimaFolgenManagement — Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen“ angestrebt wird, sollten Zusammenhänge und Auswirkungen des sich ändernden Klimas auf betroffene Umweltsektoren erarbeitet und über mögliche Handlungsoptionen nachgedacht werden. Des Weiteren sollte eine Gegenüberstellung der regional erzielten Ergebnisse vor dem Hintergrund Deutschlands stattfinden. Vergleiche der Änderungssignale mit dem gesamtdeutschen Verhalten sollten durchgeführt werden um relative Aussagen der Betroffenheit vom Klimawandel treffen zu können. Zukünftig wird ebenso ein vollständiger Vergleich mehrerer Regionalmodelle in verschiedenen, zur Verfügung stehenden Klimaszenarien angestrebt. Ein vergleichbares Ergebnis und die Art der Darstellung, wie es vom IPCC auf globaler Ebene bereits erstellt wurde (Abbildung A.2 im Anhang), wäre dann wünschenswert. Fundiertere Aussagen zur Klimaentwicklung in Deutschland und in hochaufgelösten Gebieten wären dadurch möglich und würden einen Beitrag zur Zuverlässigkeit der Klimafolgenabschätzung leisten. In Folge abgesicherter Erkenntnisse ist es dann notwendig Ansprechpartner der regionalen Sektoren, die durch die Auswirkungen des sich ändernden Klimas in Mitleidenschaft gezogen werden könnten, zu kontaktieren, um in Kooperation regionale Strategien zur Anpassung an den Klimawandel umzusetzen.

# Literaturverzeichnis

**Bardt, H., H. Biebeler, M. Mahammadzadeh, 2009:** *Klimaschutz und Anpassung - Ergebnisse des klimazwei-Förderschwerpunktes.* — Institut der deutschen Wirtschaft Köln, pp. 66–67.

**Bernstein, L., P. Bosch, et. al., 2008:** *Klimaänderung 2007 - Synthesebericht.* — Deutsche IPCC Koordinierungsstelle, Berlin, 109 pp.

**BMVBS, 2007:** *Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland - Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels, Bestandsaufnahme.* — Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt, pp. 11–14.

**BTU Cottbus, 2008:** *Klimawandel in Europa im 21. Jahrhundert, Freigabe der Ensemble-Klimasimulationen mit dem regionalen Klimamodell CLM - Zuverlässigkeit und Anwendbarkeit.* — BTU Cottbus.

**Canadell, P., P. Ciais, et al., 2008:** *Recent Carbon Trends and the Global Carbon Budget - updated to 2006.* — Global Carbon Project - [Website: [http://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/GCP\\_CarbonCycleUpdate.pdf](http://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/GCP_CarbonCycleUpdate.pdf)], 12.08.2009.

**CEC-Potsdam, 2009:** *Szenarien mit WettReg (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode).* — Climate & Environment Consulting Potsdam - [Website: [http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/ZWEK/sga\\_websites\\_readme\\_deutsch.pdf](http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/ZWEK/sga_websites_readme_deutsch.pdf)], 12.07.09.

**CLM-Community, o. J.:** *Neue detaillierte Klimasimulationen für Europa erweitern die Grundlage für Handlungsstrategien.* — Website: [[http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/CLM\\_WS\\_2008/CLM\\_Szenarien.pdf](http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/CLM_WS_2008/CLM_Szenarien.pdf)], 14.07.09.

**Deutschländer, T., 2008:** *Modellvergleich: Jahresmitteltemperatur.* — DWD - [Website: [http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/ZWEK/FINAL\\_Jahresmitteltemperatur.pdf](http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/ZWEK/FINAL_Jahresmitteltemperatur.pdf)], 12.07.09.

**DWD, 2009a:** *Klimatologische-Kenntage.* — DWD, Wetterlexikon - [Website: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=K&DAT=Klimatologische-Kenntage>], 06.08.09.

**DWD, 2009b:** *Niederschlagstag.* — DWD, Wetterlexikon - [Website: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=N&DAT=Niederschlagstag>], 19.08.09.

- DWD, 2009c:** *Starkregen (Starkniederschlag)*. — DWD, Wetterlexikon - [Website: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm>], 31.08.09.
- DWD, 2009d:** *Sturmtag*. — DWD, Wetterlexikon - [Website: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=S&DAT=Sturmtag>], 31.08.09.
- Enke, W., 2003:** *Abschlussbericht - "Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima-Simulationslaufes, bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen"*. — Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen und Meteo-Research, Stahnsdorf.
- Formayer, H., C. Matulla, P. Haas, N. Groll, H. Kromp-Kolb, 2004:** *Endbericht für das Forschungsprojekt "Einsatzmöglichkeiten verschiedener Downscalingmethoden für Klimaänderungsszenarien in topographisch stark gegliederten Terrain und explizite Anwendung auf Österreich für Niederschlag und Temperatur"*. — Universität für Bodenkultur - Institut für Meteorologie, Wien, pp. 4–6.
- Hoppe, H., 2006:** *Unsicherheiten von Grundlagendaten im Rahmen integrierter Planungen urbaner Abwasserentsorgungssysteme*. — Nr. Band 51, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, pp. 53–55.
- IPCC, 2007a:** *4th Assessment Report Intergovernmental Panel on Climate Change [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, eds.]*. — Nairobi.
- IPCC, 2007b:** *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) — Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, eds.]*. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 18 pp.
- IPCC, 2007c:** *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller eds.]*. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacob, D., H. Göttel, S. Kotlarski, P. Lorenz, K. Sieck, 2008:** *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. — Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 154 pp.
- Keuler, K., A. Block, S. Doms, o. J.:** *QUIRCS - Quantifizierung von Unsicherheiten regionaler Klimasimulationen - Poster 6 - Methodik der Quantifizierung von Modellunsicherheiten*. — Lehrstuhl Umweltmeteorologie, BTU Cottbus.
- KLIWA, 2001:** *Regionale Klimamodelle - Möglichkeiten und Grenzen*. — Techn. Ber. Heft 1, KLIWA-Berichte.

- KLIWA, 2006:** *Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.* — Techn. Ber. Heft 9, KLIWA-Berichte.
- Kreienkamp, F., A. Spekat, 2006:** *IDP2006 - Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse.* — Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH, Potsdam, 58 pp.
- LFU Bayern, 2009:** *Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert.* — Bayerisches Landesamt für Umwelt - [Website: [http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/klima/projektionen\\_21jahrhundert/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/klima/projektionen_21jahrhundert/index.htm)], 30.05.09.
- LUG Hessen, 2009:** *Umweltatlas Hessen, Klimawandel: Atmosphäre, Regionale Klimaprojektionen.* — Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie - [Website: [http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klimawandel/atmo/einleitung\\_txt.htm](http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klimawandel/atmo/einleitung_txt.htm)], 12.08.2009.
- Matulla, C., E. A. Penlap, H. von Storch, 2003:** Empirisches Downscaling - Überblick und zwei Beispiele. — *Klimastatusbericht 2002*, 20–31.
- M & D, 2008:** *Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios.* — Techn. Ber. Nr. 3, Max-Planck-Institute for Meteorology, Modelle & Daten.
- Müller-Westermeier, G., 1996:** *Klimadaten von Deutschland Zeitraum 1961 - 1990 (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Sonnenschein, Bewölkung).* — Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- NASA, 2009:** *GLOBAL Land-Ocean Temperature Index in .01 C.* — NASA - [Website: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/taledata/GLB.Ts+dSST.txt>], 12.08.2009.
- Rahmstorf, S., 2009:** “Am Nordpol schmilzt das Eis“ von Margit Kautenburger. — Hannoversche Allgemeine Zeitung, 8 pp., 12.08.2009.
- Rockel, B., A. Will, A. Hense, 2008:** The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM) in: Regional climate modelling with COSMO-CLM (CCLM). — *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, Nr. 4, 347–348.
- Schönwiese, C.-D., 2006:** Indizien für den Klimawandel der letzten 100 Jahre. — In: *Wandel von Vulnerabilität und Klima - Müssen unsere Vorsorgewerkzeuge angepasst werden?*, G. Tetzlaff, H. Karl, G. Overbeck, eds., Schriftenreihe des Deutschen Komitee Katastrophenvorsorge e.V., Bonn, Nr. 35, pp. 4–15.
- Schulzweida, U., o. J.:** *CDO Introduction - Climate Data Operators.* — Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Seedorf, H. H., H.-H. Meyer, 1992:** *Landeskunde Niedersachsen - Natur- und Kulturgeschichte eines Bundeslandes.* — Nr. Band 1. Historische Grundlagen und naturräumliche Ausstattung, Karl Wachholtz Verlag, Neumünster, pp. 173–198.
- SGA, 2007:** *Das Projekt ZWEK des Deutschen Wetterdienstes.* — [Website: [http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/ZWEK/sga\\_websites\\_readme\\_deutsch.pdf](http://www.mad.zmaw.de/fileadmin/extern/SGA-Files/ZWEK/sga_websites_readme_deutsch.pdf)], 12.07.09.

- SGA, 2008:** *CLM info*. — [Website: <http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/clm/clm-info/>], 17.07.09.
- Simon, N., 2007:** *Die Klimakrise - Brisante Anzeichen eines unterschätzten Klimawandels*. — [Website: <http://klimakrise.de/2007/11/16/brisante-anzeichen-eines-unterschatzten-klimawandels/>], 12.08.2009.
- Spekat, A., W. Enke, F. Kreienkamp, 2007:** *Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2*. — Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH, Potsdam, 112 pp.
- Stewart, R. H., 1997:** *Starkregen (Starkniederschlag)*. — Department of Oceanography, Texas A & M University - [Website: [http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng\\_textbook/chapter04/chapter04\\_04.htm](http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter04/chapter04_04.htm)], 02.09.09.
- UBA, 2007:** *Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen - Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG*. — Umweltbundesamt, Dessau.
- Welfens, M. J., 2008:** *Klimaszenarien - Methoden und Erkenntnisse*. — Bundeszentrale für politische Bildung - [Website: <http://www.bpb.de/themen/DQUV8L,1,0,Klimaszenarien.html>], 30.05.09.
- Werner, P. C., F.-W. Gerstengarbe, 2007:** *Welche Klimaänderungen sind in Deutschland zu erwarten?* — Humboldt-Universität Berlin, Website: [<http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/56/PDF/56.pdf>], 17.07.09.
- WetterOnline, 2008:** *Orkantief „Emma“ zu Frühlingsbeginn*. — WetterOnline Extremwetter - [Website: [http://www.wetteronline.de/feature/extremwetter/02\\_be.html](http://www.wetteronline.de/feature/extremwetter/02_be.html)], 09.09.2009.
- ZAMG, o. J.:** *Heizgradtage*. — ZentralAnstalt für Meteorologie und Geodynamik - [Website: [http://www.zamg.ac.at/produkte/thema/klimainformation/daten\\_statistiken/heizgradtage/](http://www.zamg.ac.at/produkte/thema/klimainformation/daten_statistiken/heizgradtage/)], 06.08.09.

# Anhang A

## Die Emissionsszenarien des IPCC

Das IPCC hat im Special Report on Emission Scenarios (SRES) dementsprechend aus einer Reihe von Annahmen über die zukünftige gesellschaftliche Entwicklung insgesamt 40 Szenarios der Entwicklung von Treibhausgas-Emissionen vorgestellt, die als unverzichtbare Grundlage der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion um den weiteren Verlauf des Klimawandels dienen. Diese zahlreichen Szenarien lassen sich in die 4 verschiedenen SRES-Szenario-“Familien“ **A1**, **A2**, **B1** und **B2** unterteilen, denen eine Kopplung der unterschiedlichen sozioökonomischen Ausgangsannahmen zugrunde liegt. Sie unterscheiden sich in den Parametern Bevölkerungswachstum und Umweltbewusstsein, mehr oder weniger ausgeprägter Wissenstransfer, Gerechtigkeit sowie wirtschaftliches Bestreben, wodurch es zu einem differenzierten Umgang mit Energie und Ressourcen kommt (siehe Abb. A.1). Jedem dieser Szenarien liegt eine andere Vorstellung einer zukünftigen Welt zugrunde. Während die **A1**-Szenariofamilie eine Welt mit einem sehr hohen Wirtschaftswachstum und einer raschen Entwicklung neuer effizienter Technologien ausgeht, spiegelt die **B2**-Szenariofamilie eine Welt mit einem Wirtschaftswachstum auf mittlerem Niveau wieder.

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

**Abbildung A.1:** Qualitative Beschreibung der zeitlichen Verläufe unterschiedlicher natürlicher und sozialer Sachverhalte, die den IPCC-SRES Emissionsszenarien zugrunde liegen (SPEKAT *et al.* 2007).

Wie in Abbildung A.1 erkennbar ist, wird das Szenario A1 erneut in Gruppen differenziert, die sich darin unterscheiden, inwieweit bei einer sich global weiter entwickelnden Wirtschaft vom Einsatz fossiler Energieträger Gebrauch gemacht wird.

Im Folgenden wird nun die Beschreibung der Szenariofamilien dargestellt, wie sie in IPCC (2007b) zu finden ist.

**Szenario A1:** Die A1-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Wichtige grundlegende Themen sind Annäherung von Regionen, Entwicklung von Handlungskompetenz sowie zunehmende kulturelle und soziale Interaktion bei gleichzeitiger substantieller Verringerung regionaler Unterschiede der Pro-Kopf-Einkommen. Die A1-Szenarien-Familie teilt sich in drei Gruppen auf, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich in ihrer technologischen Hauptstoßrichtung:

- fossil-intensiv (A1FI),
- nichtfossile Energiequellen (A1T) oder
- eine ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B)

(wobei ausgewogene Nutzung definiert ist als eine nicht allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle und durch die Annahme eines ähnlichen Verbesserungspotentials für alle Energieversorgungs- und -verbrauchstechnologien).

**Szenario A2:** Die A2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Das Grundthema ist Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten. Regionale Fruchtbarkeitsmuster konvergieren nur sehr langsam, was eine stetig zunehmende Bevölkerung zur Folge hat. Die wirtschaftliche Entwicklung ist vorwiegend regional orientiert und das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und technologische Veränderungen sind bruchstückhafter und langsamer als in anderen Modellgeschichten.

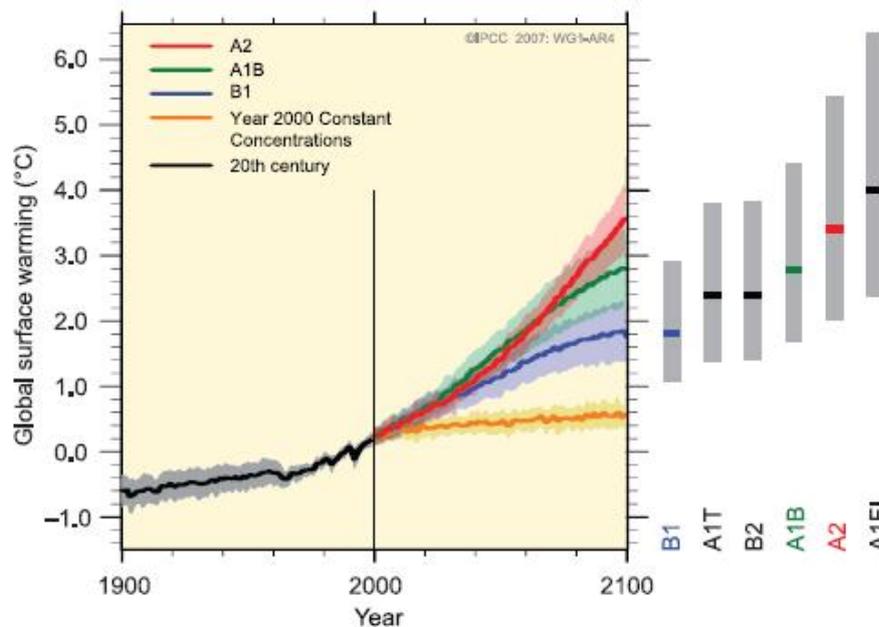
**Szenario B1:** Die B1-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine sich näher kommende Welt, mit der gleichen, Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung wie in der A1-Modellgeschichte, jedoch mit raschen Änderungen der wirtschaftlichen Strukturen in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft, bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs und Einführung von saubereren und ressourcen-effizienten Technologien. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, aber ohne zusätzliche Klimainitiativen.

**Szenario B2:** Die B2-Modellgeschichte bzw. -Szenarien-Familie beschreibt eine Welt mit Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit. Es ist eine Welt mit einer stetig, jedoch langsamer als in A2 ansteigenden Weltbevölkerung, wirtschaftlicher Entwicklung auf mittlerem Niveau und weniger raschem, dafür vielfältigerem technologischem Fortschritt als in den B1- und A1-Modellgeschichten. Obwohl das Szenario auch auf Umweltschutz und soziale Gerechtigkeit ausgerichtet ist, liegt der Schwerpunkt auf der lokalen und regionalen Ebene.

	<b>Wirtschaftsorientiert</b> (ökonomisch ausgerichtet)	<b>Umweltorientiert</b> (ökologisch ausgerichtet)
<b>Globalisierung</b> (homogene Welt)	<b>A1</b> (hohes Wirtschaftswachstum)	
	<b>A1T</b>	<b>A1B</b>
	1.4 - 3.8°C	1.7 - 4.4°C
	<b>A1FI</b>	
	2.4 - 6.4°C	
<b>Regionalisierung</b> (heterogene Welt)	<b>A2</b> (regionale Wirtschaftsentwicklung) 2.0 - 5.4°C	
	<b>B2</b> (regionale Nachhaltigkeit) 1.4 - 3.8°C	

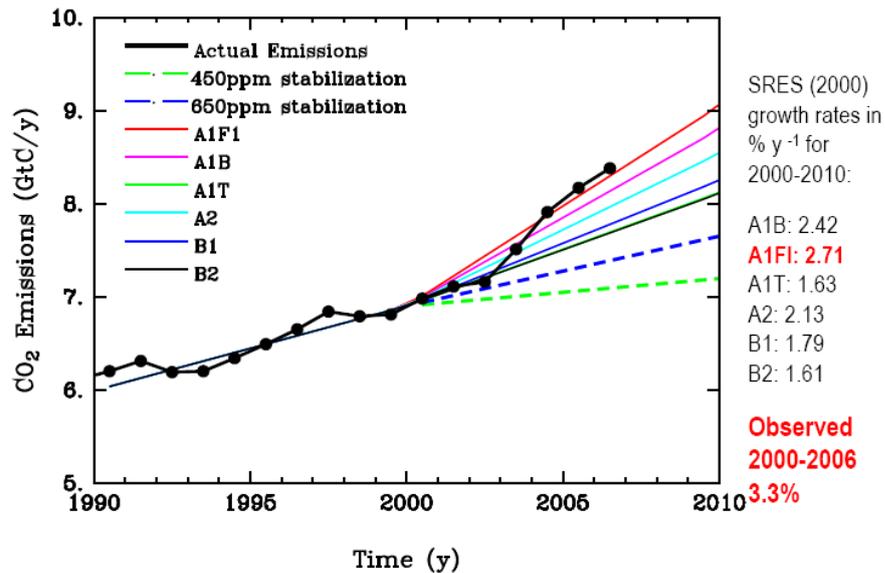
**Tabelle A.1:** Die vier SRES-Szenariofamilien mit der jeweils prognostizierten Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100 nach IPCC (2007c).

Für jedes dieser Szenarien wurden Zukunftsprojektionen gerechnet. Die jeweilige zukünftige Temperaturerhöhung ist in Tabelle A.1 und Abbildung A.1 erkennbar.



**Abbildung A.2:** Multimodell-Mittel und geschätzte Bandbreiten der Erdoberflächenerwärmung. Die durchgezogenen Linien stellen jeweils das Mittel der Multimodelle für einzelne Szenarien dar. Die graue Schattierung kennzeichnet die Standardabweichung. Die orange Kurve stellt die Temperaturentwicklung dar, die sich bei konstanter CO<sub>2</sub>-Konzentration auf dem Niveau des Jahres 2000 ergeben würde. Die vertikalen Balken rechts neben dem Diagramm, deuten auf die Spanne des Unsicherheitsbereichs hin, wobei der farbige Strich darin jeweils der besten Schätzung entspricht (IPCC 2007c).

Bedenklich ist die Situation jedoch in der Hinsicht, dass aktuelle Studien belegen, dass der CO<sub>2</sub>-Ausstoß bereits jetzt oberhalb dessen liegt, was im emissionsreichsten, dem „worst-case“ Szenario A1FI zugrunde gelegt wurde. Dort wird von einem jährlichen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emission von 2.71 % bis 2010 ausgegangen. Die Zunahme zwischen 2000 und 2006 liegt jedoch bei 3.3 % pro Jahr. Bei knapp 8.5 Gigatonnen CO<sub>2</sub>, die mittlerweile jährlich in die Atmosphäre eingebracht werden, ist nicht von einem signifikanten Rückgang der



**Abbildung A.3:** Vergleich der tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen mit den Szenarien des IPCC aus dem Jahr 2000 (CANADELL *et al.* 2008).

Emissionen in den kommenden Jahren zu rechnen (SIMON 2007). Veranschaulicht wird diese Entwicklung in Abbildung A.3.

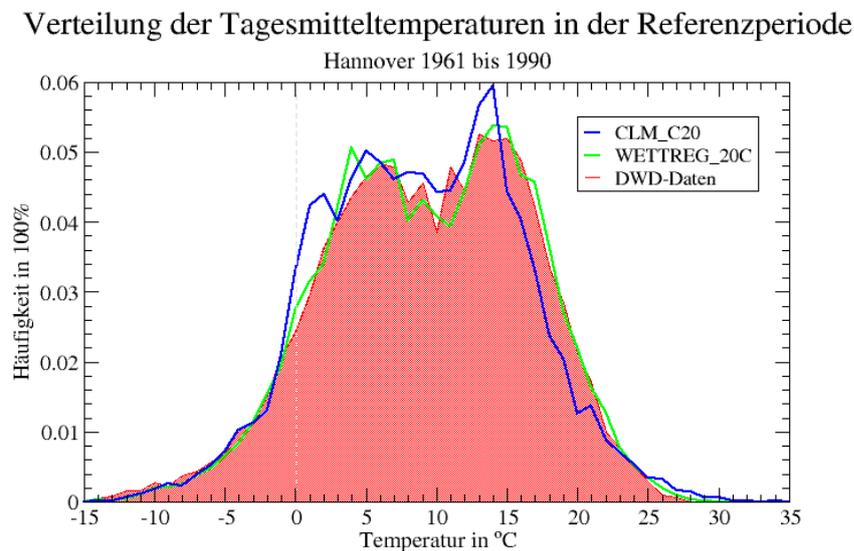
Das Klimasystem reagiert empfindlich auf die in sie eingebrachten Spurenstoffe. So heizt sich die Atmosphäre auf, die Meeresspiegel steigen an und das arktische Eis schmilzt sehr viel schneller als erwartet. So wurde im Juli diesen Jahres eine enorme Eisschmelze beobachtet. Alle drei Tage verschwand eine Eisfläche der Größe Deutschlands. Je nach Wetter ist ein neues Rekordjahr nach 2007 erreichbar, wie RAHMSTORF (2009) anmerkt. Damit sei ein langfristiger Trend der Erwärmung zu verzeichnen und einzusehen, dass die SRES-Szenarien für die Klimaprognosen zu optimistisch gewählt wurden.

## Anhang B

# Vergleich der Reanalysen mit Beobachtungen

Damit die in Kapitel 3 durchgeführten Analysen über eine solide Grundlage verfügen, wird jeweils zu Beginn der Auswertung einer Größe dargestellt, inwieweit das Modell in der Lage ist, eben diese Größe im Kontrolllauf zu reproduzieren. Die dazugehörigen Abbildungen und der Vergleich mit den DWD-Daten sind in diesem Abschnitt des Anhangs zu finden.

### Temperatur



**Abbildung B.1:** Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen im Vergleich zwischen DWD-Daten und modellspezifischen Kontrollläufen von CLM und WETTREG für die Referenzperiode 1961 bis 1990.

Der Vergleich der Temperaturverteilung in der Referenzperiode zwischen Messdaten und reproduzierten Ergebnissen, zeigt eine starke Übereinstimmung der WETTREG-Simulation mit den Beobachtungen. Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit Folge der direkten

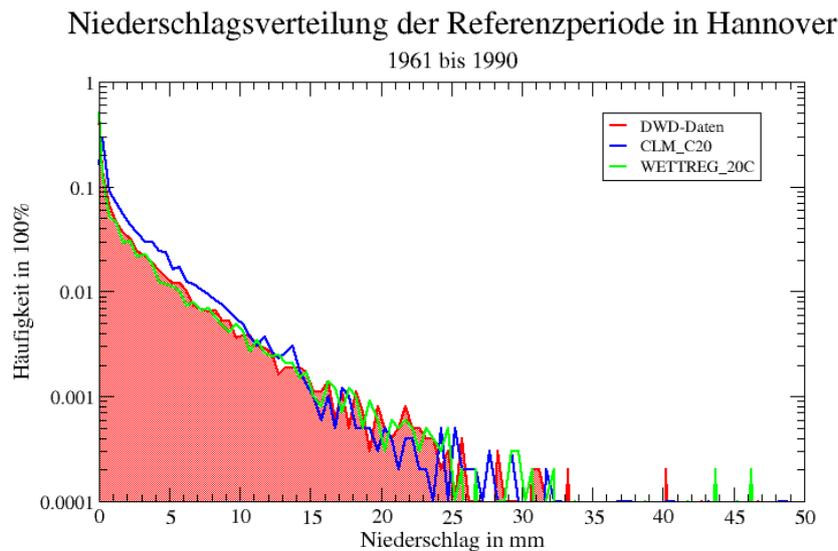
Verwendung von Messungen als Eingangsdaten des statistischen Modells. CLM hingegen simuliert größere Häufigkeiten bei Temperaturen um 0 °C. Bei Temperaturen zwischen 15 °C und 23 °C liegt eine leichte Unterschätzung der Häufigkeit vor. Temperaturen über 25 °C werden für diesen Zeitraum zu häufig berechnet.

Daten	$T_n$ in °C	$\overline{T}_n$ in °C	$\overline{T}_m$ in °C	$\overline{T}_x$ in °C	$T_x$ in °C
<b>DWD-Daten</b>	-22.4	4.8	8.9	13.0	35.4
<b>CLM_C20</b>	-18.3	5.2	8.4	11.9	43.8
<b>WETTREG_20C</b>	-22.2	5.0	9.1	13.2	37.4

**Tabelle B.1:** Reanalyse mittlerer Temperaturen sowie der Temperaturextreme von CLM und WETTREG für die Referenzperiode 1961 bis 1990 im Vergleich zu Messdaten des DWD an der Station „Hannover-Langenhagen“.

Die Tabelle B.1 fasst die mittleren Temperaturverhältnisse sowie die absoluten Extreme, wie Minimum- und Maximumtemperatur der Referenzperiode zusammen. Sowohl die Daten der Messstation „Hannover-Langenhagen“, als auch die Reanalysen von CLM und WETTREG sind aufgeführt. Während die Berechnungen von WETTREG die Messdaten gut wiedergeben und Mitteltemperaturen um 9 °C angeben, liegen im Vergleich dazu Abweichungen gegenüber CLM vor. Die Mitteltemperatur liegt diesem Modell zufolge bei 8.4 °C. Größere Unterschiede sind bei den Extremwerten zu verzeichnen. CLM simuliert sowohl die Minimum-, als auch die absolute Maximumtemperatur deutlich zu warm.

## Niederschlag

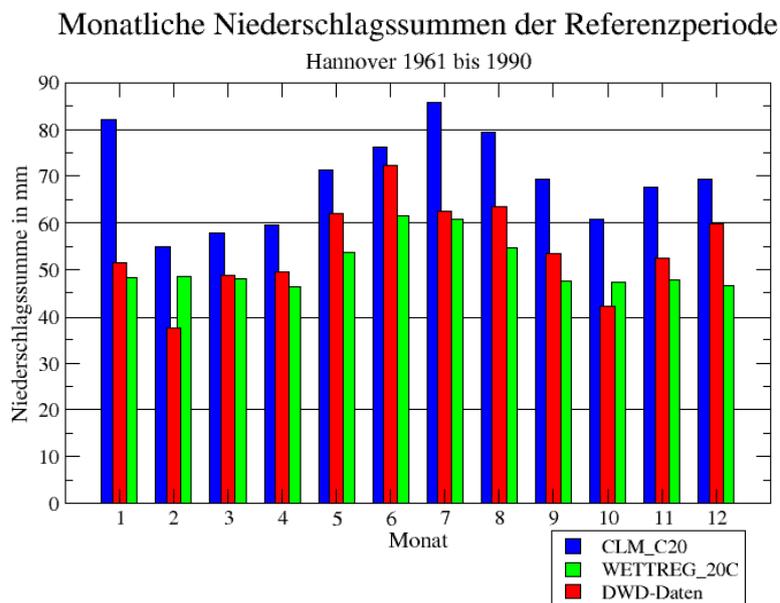


**Abbildung B.2:** Durch CLM und WETTREG reanalyzierte Niederschlagsverteilung im Vergleich zu den ausgewerteten Messdaten des DWD für die Periode 1961 - 1990.

Die Niederschlagsverteilung im Raum Hannover in der Referenzperiode ist aus Abbil-

derung B.2 ersichtlich. Neben den Messdaten, die in rot dargestellt sind, ist die jeweilige Häufigkeitsverteilung der Berechnungen der regionalen Modelle eingezeichnet. Beide Modelle haben für diesen Beobachtungszeitraum deutlich weniger niederschlagsfreie Tage simuliert als eingetreten sind. Während die sonstige Verteilung relativ gut wiedergegeben wird, sind generelle Unterschiede in den Häufigkeiten festzustellen. CLM simuliert überwiegend größere Häufigkeiten, WETTREG hingegen weniger häufige Niederschlagsmengen als detektiert wurden.

Anhand des Vergleichs der mittleren Jahresniederschlagssumme zwischen den gemessenen 655.6 mm an der Station „Hannover-Langenhagen“ und durch WETTREG simulierte 629.4 mm wird die Verwendung von Messdaten als Eingangsdaten dieses Modells deutlich. CLM berechnet demgegenüber eine durchschnittliche Jahresniederschlagssumme von 834.0 mm.

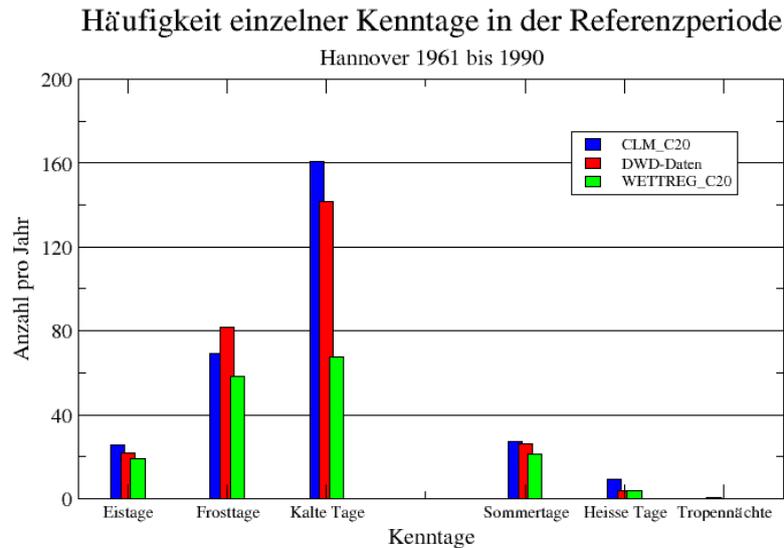


**Abbildung B.3:** Mit CLM und WETTREG reanalyzierte monatliche Niederschlagssummen der Referenzperiode 1961 - 1990 im Vergleich zu Messdaten des DWD.

Die Auswertung der Niederschlagssummen auf monatlicher Ebene liefert einen ausgeprägten Jahresgang mit einem Maximum über 70 mm in den Sommermonaten sowie einem weiteren Maximum mit maximal 60 mm im Dezember. Die Übergangsmonate weisen dennoch mehr als 35 mm auf. Die Reanalysen reproduzieren die relative Verteilung zufriedenstellend. CLM geht dabei, wie bereits anhand der Jahresniederschlagssumme festgestellt, von größeren Niederschlagsmengen aus. WETTREG simuliert insgesamt geringere Niederschlagssummen als gemessen, gibt aber die Minima nicht so ausgeprägt wieder.

## Kenntage

Abbildung B.4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der durch CLM und WETTREG im Kontrolllauf berechneten Kenntage der Referenzperiode im Vergleich zu den vom DWD aufzeichneten Daten. Die Betrachtung dieser Auswertung zeigt, dass CLM im Wesentlichen in

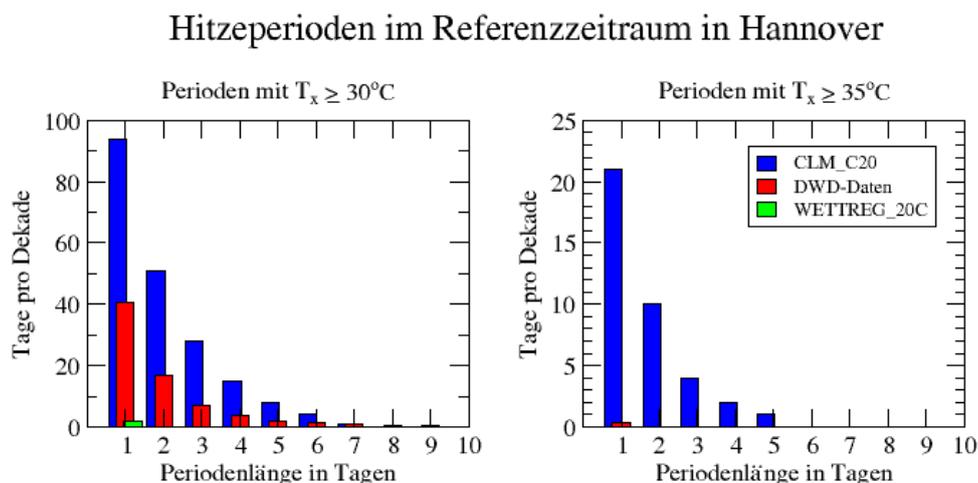


**Abbildung B.4:** Mit CLM und WETTREG reanalyzierte Anzahl der Kenntage im Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD für die Periode 1961 - 1990.

der Lage ist, die Verteilung gut wiederzugeben. Lediglich die Frosttage werden um knapp 13 Tage pro Jahr unter-, kalte Tage um 19 Tage pro Jahr überschätzt.

WETTREG hingegen neigt zu einer generellen Unterschätzung aller Kenntage, was besonders deutlich anhand der kalten Tage ersichtlich ist. Pro Jahr werden für die Periode 1961 bis 1990 67.4 Tage mit maximalen Temperaturen unter 10 °C durch WETTREG simuliert. Dies entspricht, bei 160 eingetretenen Tagen dieser Art, einer Abweichung von 58 %. Es deutet darauf hin, dass dieses Klimamodell sehr gemäßigte Temperaturen annimmt.

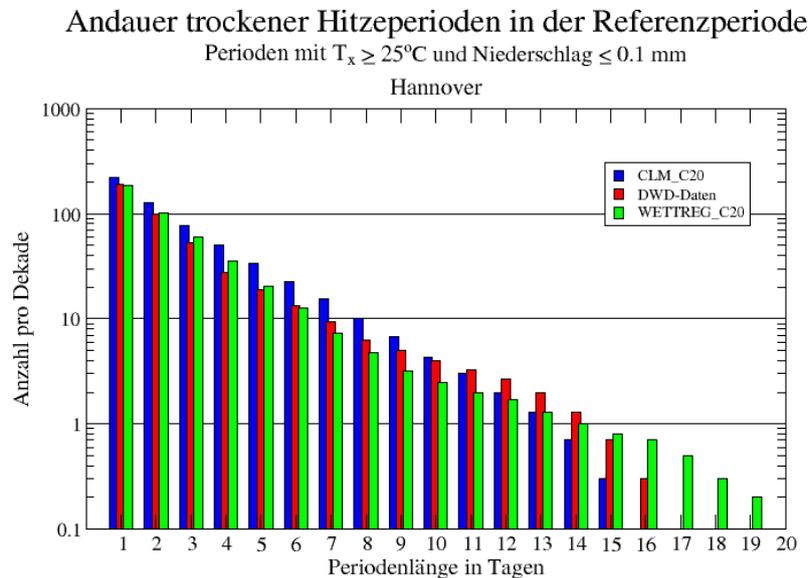
## Hitzeperioden



**Abbildung B.5:** Mit CLM und WETTREG reproduzierte Häufigkeit und Andauer von Hitzeperioden pro Dekade im Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD für die Periode 1961 - 1990.

Die Reanalyse der Andauer und Häufigkeit von Hitzeperioden weist große Abweichungen nicht nur zwischen den Modellen, sondern ebenfalls im Vergleich mit Messdaten auf. Während CLM deutlich zu häufig Perioden mit täglichen Maximumtemperaturen über  $30^{\circ}\text{C}$  simuliert, ist die berechnete maximale Periodenlänge von 7 Tagen um zwei Tage geringer als maximal im Referenzzeitraum eingetreten. WETTREG stößt bei diesem Parameter an seine Grenzen und simuliert nur wenige einzelne Tage mit Schwellenwertüberschreitungen dieser Art. Bei Perioden mit Tagesmaximumtemperaturen über  $35^{\circ}\text{C}$  sind noch größere Abweichungen zu beobachten. WETTREG reproduziert kein Ereignis dieser Art. Detektiert wurde in der dreißigjährigen Beobachtungsperiode lediglich ein einzelner Tag mit einer Temperatur über  $35^{\circ}\text{C}$ . CLM hingegen berechnet auch dafür deutlich zu viele Ereignisse dieser Art mit Serien von bis zu 5 Tagen.

## Trocken - heiße Perioden



**Abbildung B.6:** Mit CLM und WETTREG reproduzierte Häufigkeit und Andauer von trockenen Hitzeperioden mit Temperaturen über  $25^{\circ}\text{C}$  und täglichen Niederschlagssummen unter  $0.1$  mm und Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD für die Periode 1961 bis 1990. Aufgetragen ist die Anzahl pro Dekade.

Trocken - heiße Perioden mit Temperaturen über  $25^{\circ}\text{C}$  und täglichen Niederschlagssummen unter  $0.1$  mm werden von beiden Regionalmodellen zutreffend für die Beobachtungsperiode reproduziert. Die maximale Andauer liegt nach CLM-Berechnungen bei 15 Tagen, laut DWD-Messungen bei 16 Tagen und gemäß der WETTREG-Simulationen bei 19 Tagen.

## Starkniederschläge

Die Auswertungen der Niederschlagsmessungen im Hinblick auf Tage mit Niederschlagssummen über  $25$  mm zeigt ein ausgeprägtes Maximum der Häufigkeit im Herbst. 6 Tage dieser Art wurden in dieser Jahreszeit pro Dekade aufgezeichnet. Die Modelle simulieren

Jahreszeitliche Verteilung von nassen Tagen in der Referenzperiode

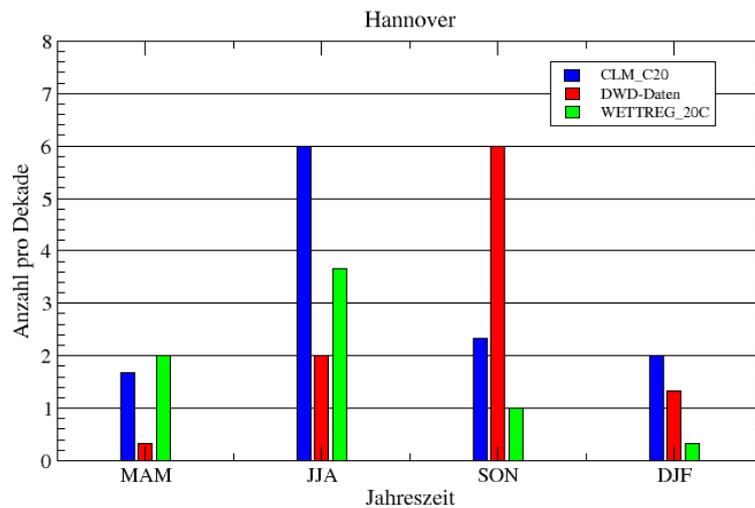


Abbildung B.7: Mit CLM und WETTREG reproduzierte jahreszeitliche Verteilung nasser Tage pro Dekade im Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD für die Periode 1961 - 1990.

das Maximum in den Sommermonaten. Minima sind im Winter und Frühjahr zu beobachten.

Sturmereignisse

Verteilung der Windstärken in der Referenzperiode

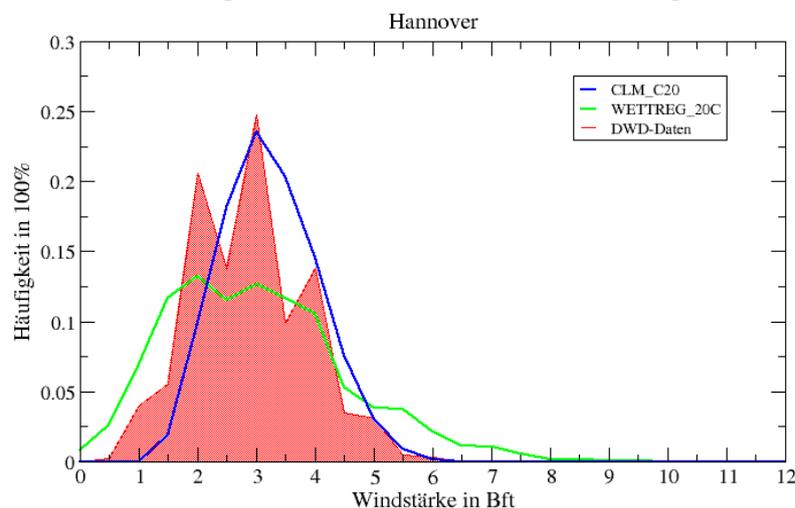
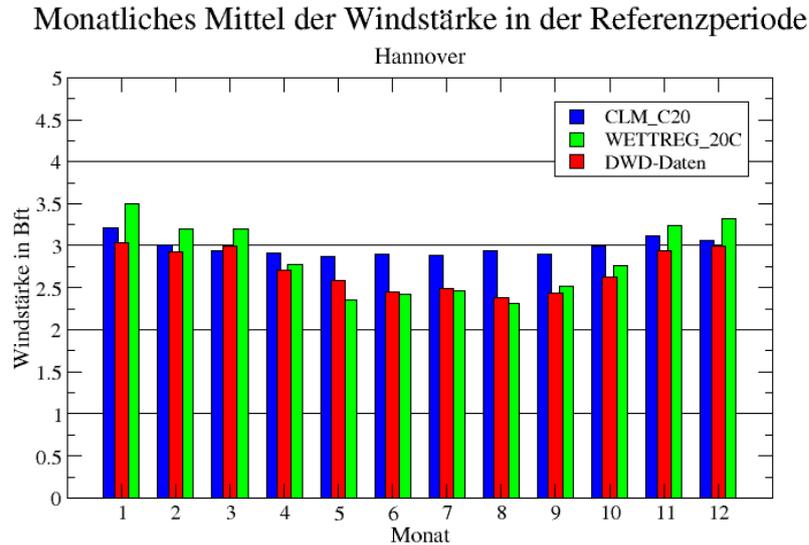


Abbildung B.8: Mit CLM und WETTREG reproduzierte Häufigkeitsverteilung der Windstärken im Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD für die Periode 1961 - 1990. Aufgetragen ist die Anzahl der Ereignisse pro Jahr.

Die Häufigkeitsverteilungen der Windverhältnisse weisen große Unterschiede auf. CLM berechnet die Form der in der Referenzperiode festgestellten Verteilung im Wesentlichen zutreffend, ist aber etwas zu größeren Windstärken verschoben. Die häufigste Windstärke

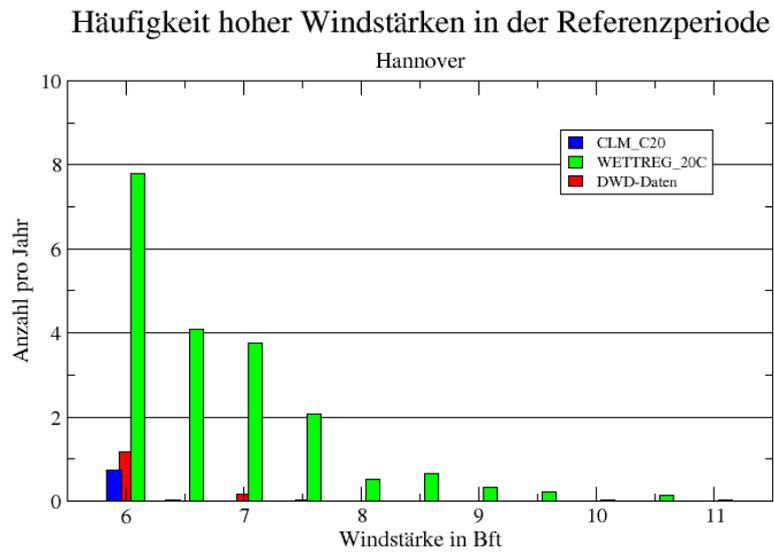
liegt diesem Modell zufolge, wie auch aus Messdaten gelesen, zwischen 2.5 und 3.0 Bft. WETTREG hingegen berechnet eine sehr viel größere Streuung mit einem Maximum der Häufigkeit im Bereich von 1.5 bis 2.0 Bft. Weitaus höhere Tagesmittel der Windstärken bis zu 9 Bft werden von diesem Modell reanalysiert.



**Abbildung B.9:** Mit CLM und WETTREG reproduzierte monatliche Verteilung der mittleren Windstärke im Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD für die Periode 1961 - 1990. Aufgetragen ist die Windstärke in Beaufort.

Die monatlich differenzierte Betrachtung der mittleren Windgeschwindigkeiten zeigt in Messdaten und WETTREG-Simulationen einen leichten Jahresgang mit einem Minimum um 2.5 Bft im Sommer. Laut Messungen liegt das Maximum in den Wintermonaten bei 3 Bft. WETTREG berechnet es zu 3.5 Bft. CLM reproduziert nahezu konstante Windstärken um 3 Bft über das ganze Jahr hinweg.

Die Reanalyse von Sturmtagen (hier: Tage mit mittleren Windstärken über 6 Bft) liefert bei CLM knapp 0.8 Tage dieser Art pro Jahr. WETTREG geht dahingegen mit rund 20 stürmischen Tagen pro Jahr von deutlich mehr Sturmereignissen aus. Auch auffällig ist die Simulation eines Tagesmittels von 11 Bft bei dem die Realitätsnähe fraglich erscheint. Der DWD führt in seinen Beobachtungen im Mittel 1.4 Sturmtage pro Jahr an der Station „Hannover-Langenhagen“ auf.



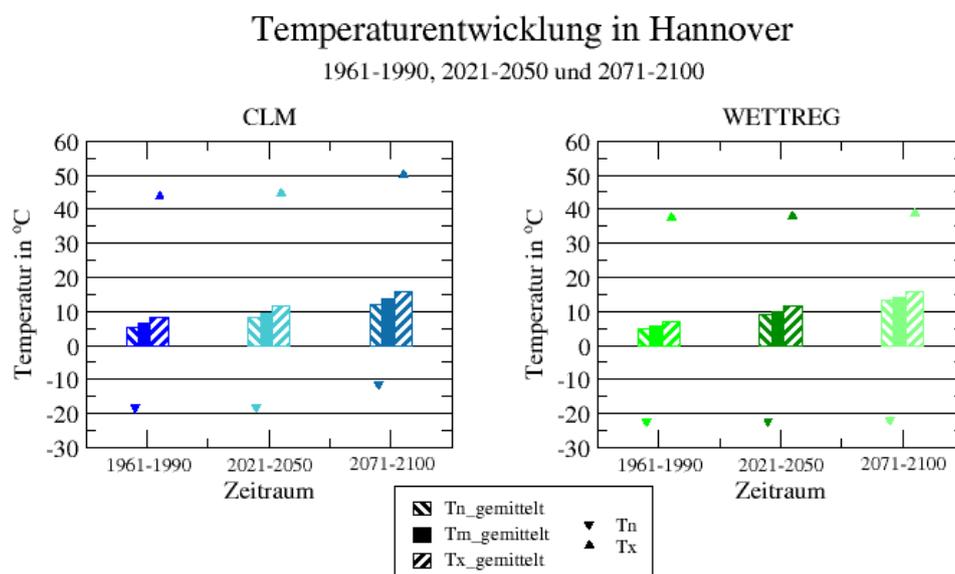
**Abbildung B.10:** Mit CLM und WETTREG reproduzierte Häufigkeit von Sturmtagen im Vergleich zu ausgewerteten Messdaten des DWD für die Periode 1961 - 1990. Aufgetragen ist die Anzahl der Ereignisse pro Jahr.

# Anhang C

## Weiterführende Auswertungen

In Kapitel 3 wurde bereits auf die Klimaentwicklung in Niedersachsen und die Veränderungen der Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremereignissen eingegangen. Ergänzend dazu sind hier nochmals vertiefende Abbildungen dargestellt. Hier werden ebenfalls die Auswertungen der jahreszeitlichen Differenzierung gezeigt.

### Temperatur



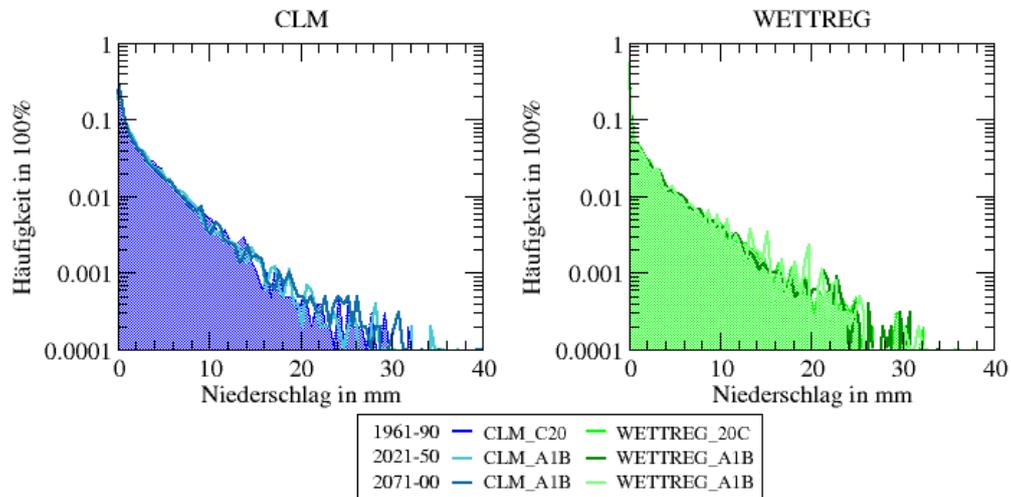
**Abbildung C.1:** Entwicklung der Minimum-, Mittel- und Maximumtemperaturen sowie der absoluten Extreme in Hannover in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 simuliert mit CLM und WETTREG.

Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.1 durchgeführten Auswertungen der Temperaturentwicklung in Hannover, wird hier der zu erwartende Trend der absoluten Extreme Minimum- und Maximumtemperatur abgebildet. Während bei CLM ein eindeutiger Anstieg beider Parameter bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu verzeichnen ist, lässt sich bei WETTREG kaum eine Tendenz dieser beiden Temperaturextreme ausmachen.

## Niederschlag

### Entwicklung der Niederschlagsverteilung in Hannover

1961-1990, 2021-2050 und 2071-2100



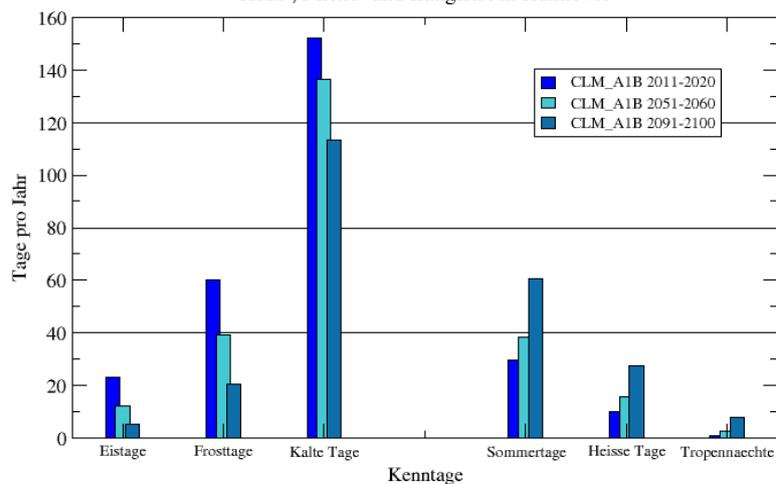
**Abbildung C.2:** Mit CLM und WETTREG simulierte Entwicklung der Niederschlagsverteilung in den Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100.

Die Entwicklung der Niederschlagsverteilung weist beiden Modellen zufolge kaum eine zukünftige Veränderung auf. Einzig beachtenswert ist die leichte Zunahme in der Häufigkeit von Niederschlagsereignissen über 15 mm bei CLM und ab 12 mm bei WETTREG.

## Kenntage

### Entwicklung der Häufigkeit einzelner Kenntage mit CLM

Kurz-, Mittel- und Langfrist in Hannover



**Abbildung C.3:** Mit CLM simulierte Entwicklung der Anzahl der Kenntage pro Jahr in der Kurzfrist (2011 - 2020), der Mittelfrist (2051 - 2060) und in langfristiger Sicht (2091 - 2100). Diese Darstellung dient der Verdeutlichung der in Abbildung 3.11 beobachteten „Dreistufigkeit“, die insbesondere bei den kalten Tagen zum Tragen kommt.

Abbildung C.3 stellt die Verteilung für drei beliebig gewählte Dekaden in den auffälligen Perioden aus Abbildung 3.11 auf Seite 26 näher dar. In Abbildung 3.11 wurde eine Dreistufigkeit der CLM-Simulation, insbesondere bei der Entwicklung der kalten Tage beobachtet, die sich aber auch bei Frost- und Eistage abzeichnete. Da in der Betrachtung der dreißigjährigen Perioden, wie sie in dieser Arbeit gewählt wurden, auch die Übergangsphasen enthalten wären, wurde hierzu diese weitere Auswertung erstellt. Für diese Analyse wurden die Dekaden 2011 bis 2020 als Kurzfrist, 2051 bis 2060 als Mittelfrist sowie 2091 bis 2100 als Langfrist gewählt.

Deutlich erkennbar ist das unterschiedliche Verhalten von kalt- und warmtemperierten Kenntagen. Während die Erstgenannten bereits zwischen Kurz- und Mittelfrist eine große Änderung in ihrer Eintrittshäufigkeit erfahren, findet bei den warmtemperierten Tagen die starke Zunahme erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts statt. Ausgehend vom Stand 2011 bis 2020 mit 23 Tagen pro Jahr kommt es mittelfristig zu einer Halbierung der Anzahl an Eistagen, die sich langfristig auf nur noch 5 Tage pro Jahr reduziert. Auch die Zahl der Frosttage nimmt von anfangs 60 Tagen pro Jahr um jeweils ein Drittel ab.

Während sich die Anzahl an Sommertagen von knapp 30 Tagen pro Jahr im Zeitraum 2011 bis 2020 zunehmend erhöht und am Ende des Jahrhunderts doppelt so hoch liegt, kommt es bei den heißen Tagen annähernd zu einer Verdreifachung der Auftretenshäufigkeit im 21. Jahrhundert, die sich dann auf knapp 27 Tage pro Jahr beläuft. Besonders markant ist die Zunahme der Tropennächte, die durch minimale Temperaturen von immer noch über 20 °C gekennzeichnet sind. Diese nehmen von nur 0.9 Tagen pro Jahr im Ausgangsniveau mittelfristig auf 2.8 Tage und langfristig sogar 7.7 Tage pro Jahr zu. Dies entspricht einer Zunahme von über 750 %.

Die jahreszeitlich differenzierte Analyse der Entwicklung bestimmter Schwellenwertüberschreitungen wird in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt. Zunächst zeigt Abbildung C.4 die im 10-jährigen gleitenden Mittel simulierte Entwicklung der Kenntage. Anhand einzelner Kenngrößen lässt sich auch in dieser Analyse eine stufig ablaufende Veränderung beobachten. Im Wesentlichen werden aber erwartete Tendenzen gezeigt.

Des Weiteren wird nun auf die jahreszeitliche Entwicklung der jeweiligen Kenntage in den einzelnen 30-jährigen Perioden eingegangen, die aus Daten des Modells CLM abgeleitet wurden.

Während in den Übergangsmonaten Frühjahr und Herbst überwiegend gleichmäßige Entwicklungen in Mittel- und Langfrist zu beobachten sind, ist besonders in den Sommermonaten Juni, Juli und August eine zunächst moderate Zunahme, langfristig dann aber ein drastischer Anstieg in der Anzahl der warmen Kenntage zu verzeichnen. Im Winter zeichnet sich eine ähnliche Entwicklung, jedoch mit rückläufigen Häufigkeiten ab. Mittelfristig stagniert die Zahl der kalten Tage diesem Modell zufolge.

## Starkniederschläge

Der Übersicht halber wird an dieser Stelle nochmals auf die Entwicklung der absoluten Tagesniederschlagsmaxima eingegangen. Tabelle C.1 fasst die gemessenen Werte der Referenzperiode sowie die Reanalysen und Zukunftsprojektionen der regionalen Klimamodelle

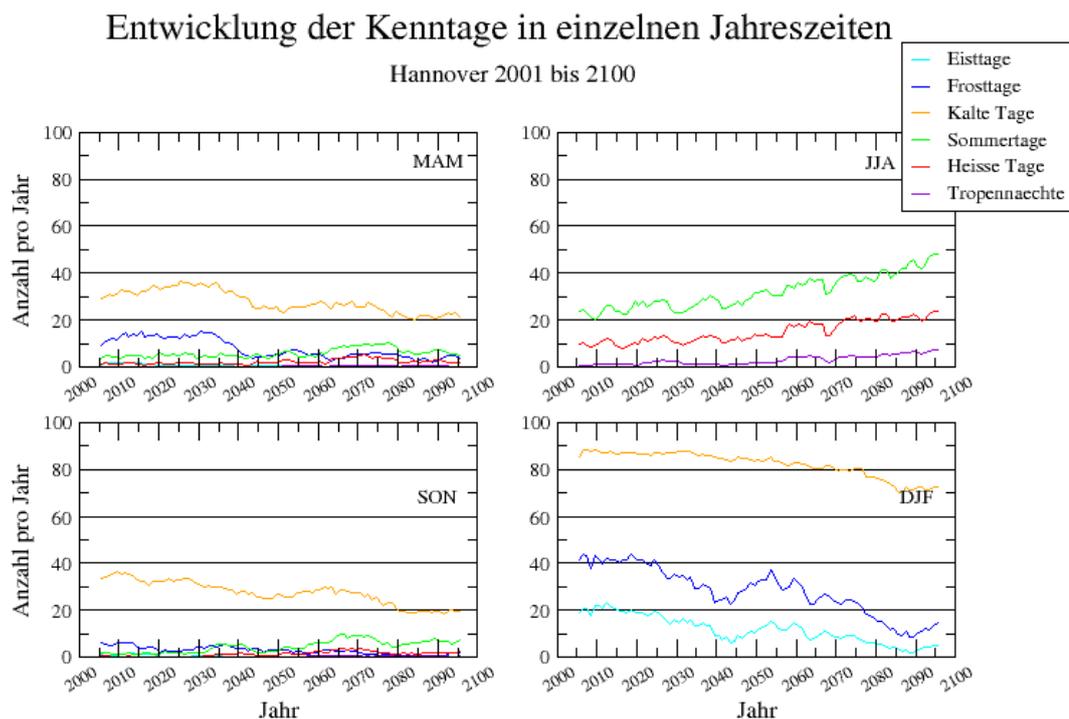


Abbildung C.4: Mit CLM simulierte Entwicklung der Anzahl der Kenntage pro Jahreszeit im Zeitraum 2001 bis 2100.

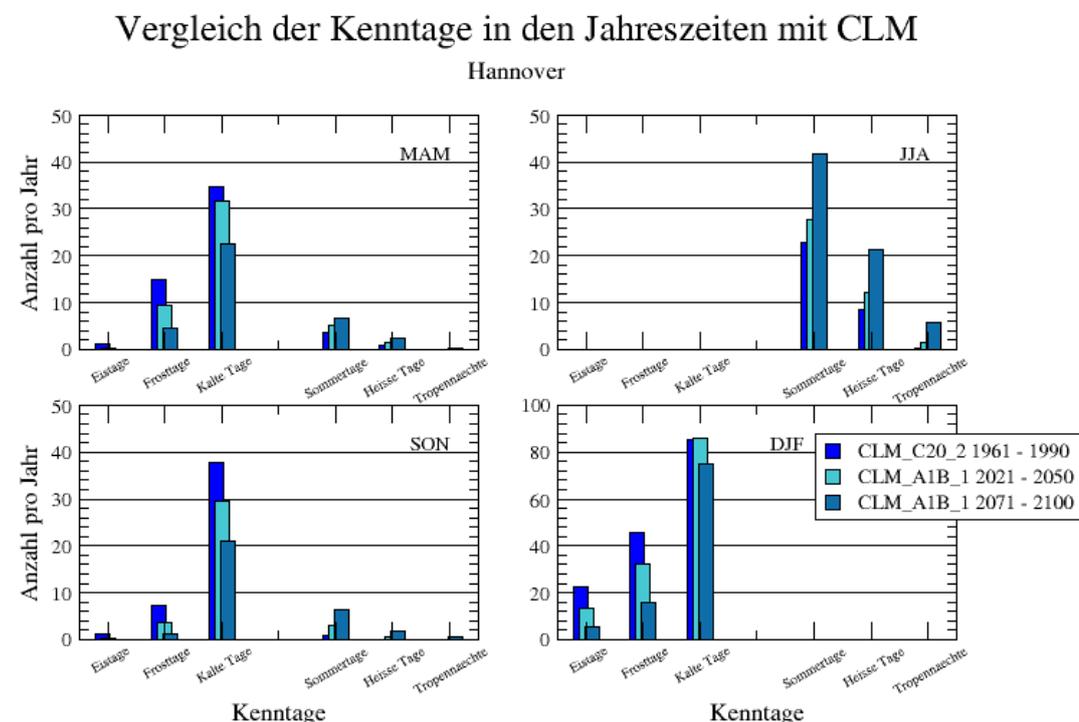


Abbildung C.5: Mit CLM simulierte Anzahl der Kenntage in den einzelnen Jahreszeiten der Perioden 1961 - 1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100. Zu beachten ist die Skala der Ordinate, die für die Wintermonate DJF einen doppelt so großen Wertebereich abbildet, als für die restlichen Jahreszeiten.

zusammen.

Daten	1961 - 1990 Beob./Kon.	2021 - 2050 A1B	2071 - 2100 A1B
<b>DWD</b>	<b>52.5 mm</b> 48.7 mm 47.0 mm		
<b>CLM</b>	<b>57.14 mm</b> 48.92 mm 48.06 mm	<b>65.4 mm</b> 63.17 mm 53.81 mm	<b>133.58 mm</b> 94.95 mm 62.55 mm
<b>WETTREG</b>	<b>46.4 mm</b> 46.4 mm 46.4 mm	<b>46.1 mm</b> 46.1 mm 46.1 mm	<b>53.1 mm</b> 47.2 mm 46.7 mm

**Tabelle C.1:** Absolute Tagesniederschlagsmaxima sowie zweit- und drittgrößte Tagesniederschlagssummen in Hannover für den jeweiligen Kontrolllauf (1961 - 1990), die Mittelfrist und die Langfrist für das Szenario A1B berechnet durch CLM und WETTREG.

Während in der Referenzperiode die absoluten Niederschlagsmengen in den Simulationen etwa dem entsprechen was vom DWD detektiert wurde, laufen die Berechnungen für die Zukunft auseinander. WETTREG simuliert lediglich geringe Zunahmen der Maxima. CLM hingegen lässt weitaus größere maximale Niederschlagssummen erwarten, die jedoch in der Langfrist konvektive Einzelereignisse mit jeweils einmalig 133,6 mm maximal und 94.95 mm als zweitgrößtes Ereignis beschreiben.