

# Klimaprojektionen für die Bremer Region



**Auftraggeber:**

Der Senator für Umwelt, Verkehr, Bau und Europa (SUBVE)  
Bremen

**Juni 2010**

---

**Auftraggeber:** Der Senator für Umwelt, Verkehr, Bau und Europa (SUBVE)  
Bremen  
Dr. Christof Voßeler  
Tel.: 0421 361-17247  
E-Mail: [christof.vosseler@umwelt.bremen.de](mailto:christof.vosseler@umwelt.bremen.de)

---

**Titel:** Projizierte Klimaänderungen für die Bremer Region.  
Studie im Rahmen des Fachkonzepts Klimaanpassung

---

**Auftragnehmer:** BIOCONSULT  
Schuchardt & Scholle GbR

Reeder-Bischoff-Str. 54  
28757 Bremen  
Telefon 0421 · 620 71 08  
Telefax 0421 · 620 71 09

Klenkendorf 5  
27442 Gnarrenburg  
Telefon 04764 · 92 10 50  
Telefax 04764 · 92 10 52

Internet [www.bioconsult.de](http://www.bioconsult.de)  
eMail [info@bioconsult.de](mailto:info@bioconsult.de)

---

**Bearbeiter:** Dr. Bastian Schuchardt  
Dipl.-Biol. Stefan Wittig

---

**Datum:** Juni 2010

## Inhalt

<b>1. Ziele und Rahmen</b> .....	<b>4</b>
1.1 Ziele der Studie.....	4
1.2 Der Rahmen „nordwest2050“ .....	5
<b>2. Klimawandel, Klimamodelle und Klimaprojektionen</b> .....	<b>6</b>
2.1 Beobachtbare globale und regionale Klimaänderungen .....	6
2.2 Globale Klimaprojektionen.....	9
2.3 Vorgehensweise für die Erstellung von Klimaprojektionen .....	11
2.3.1 Unterschiede zwischen Wetter und Klima.....	11
2.3.2 SRES-Szenarien und IPCC-Storylines .....	12
2.3.3 Globale Klimamodelle.....	14
2.3.4 Regionale Klimamodelle: Unterschiede und Vorteile .....	15
2.4 Unsicherheiten in den regionalen Klimaprojektionen .....	17
<b>3. Erstellung der beiden regionalen Klimaszenarien</b> .....	<b>21</b>
3.1 Ansatz und Randbedingungen .....	21
3.2 Überblick über die Klimaparameter .....	24
<b>4. Ergebnisse der beiden regionalen Klimaszenarien</b> .....	<b>27</b>
<b>5. Empfehlungen und Ausblick</b> .....	<b>35</b>
5.1 Umgang mit Unsicherheit.....	35
5.2 Kipp-Punkte und „stärkeres“ Klimasignal .....	37
5.3 Entwicklung des Klimawissens .....	39
<b>6. Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>41</b>
<b>7. Literatur</b> .....	<b>42</b>

# 1. Ziele und Rahmen

## 1.1 Ziele der Studie

Beim Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa (SUBVE) erarbeitet die AG „Klimaanpassung“ derzeit das Fachkonzept „Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Bremen“. In diesem Rahmen ist BioConsult Schuchardt & Scholle GbR im Mai 2010 vom SUBVE mit der Erstellung einer Studie zu Klimaprojektionen für die Bremer Region beauftragt worden. Ziel der Studie ist zum einen die Darstellung des Wissens über Klimaprojektionen und die Vermittlung der fachlichen Grundlagen über globale und regionale Klimamodelle sowie Emissionsszenarien in der Weise, dass die „Anwender“ bzw. „Nutzer“ die Aussagen zum Klimawandel einschätzen und angemessen damit umgehen können. Zum anderen werden aus den Erkenntnissen über Klimaprojektionen zwei Klimaszenarien für die Bremer Region entwickelt und die resultierenden Ergebnisse des möglichen regionalen Klimawandels dargestellt. Die Studie soll als Grundlage für das einleitende Kapitel 2 „Projizierte Klimaänderung für die Bremer Region“ des Fachkonzepts dienen, auf dem anschließend einzelne Kapitel zu den Auswirkungen und Anpassungserfordernissen in ausgewählten Handlungsfeldern basieren werden.

Beim Umgang mit den Aussagen von Klimaprojektionen bzw. -szenarien treten oftmals Missverständnisse hinsichtlich des Zustandekommens und der Interpretation der Ergebnisse auf. In der vorliegenden Studie wird von **Klimaprojektionen** gesprochen, wenn die in ihnen beschriebenen möglichen Klimaänderungen auf einem Treibhausgasemissionsszenario basieren. Klimaprojektionen hängen also von den jeweils verwendeten Emissionsszenarien (bzw. Konzentrations- und Strahlungsantriebsszenarien) ab, die auf Annahmen z.B. über zukünftige gesellschaftliche und technologische Entwicklungen beruhen, die nur eventuell verwirklicht werden. **Klimaszenarien** stellen hier hingegen eine auf Klimaprojektionen beruhende Festlegung des zukünftigen Klimawandels dar, die auf einem konsistenten Ansatz mit definierten Randbedingungen beruhen und die v.a. zum Zweck der Analyse der Klimafolgen konstruiert werden. Klimaszenarien integrieren dabei zusätzliche Informationen aus anderen Quellen über klimawandelbedingte Veränderungen regional relevanter Parameter (z.B. Wasserstandsparameter).

In der vorliegenden Studie wird daher zu erst dargestellt, welche Erkenntnisse über den gegenwärtigen Klimawandel und über globale Klimaprojektionen derzeit vorliegen. Dazu werden grundlegende Begriffe und die zurzeit übliche methodische Vorgehensweise der Klimaforschung für die Erstellung regionaler Klimaprojektionen erläutert. Darauf aufbauend wird dargestellt, welcher Ansatz und welche Randbedingungen für die Erstellung der beiden regionaler Klimaszenarien gewählt worden sind. Anschließend werden dann die resultierenden Ergebnisse für die beiden regionalen Klimaszenarien dargestellt und beschrieben. Wie aussagekräftig und belastbar diese Klimaszenarioergebnisse sind und wie mit den Spannweiten und Unsicherheiten in den Szenarioaussagen umgegangen werden kann, wird insbesondere unter dem Aspekt der Entscheidungsfindung für Klimaanpassung diskutiert.

## 1.2 Der Rahmen „nordwest2050“

Für die vorliegende Studie zu den Klimaprojektionen für die Bremer Region kann und soll an das Forschungsverbundprojekt „nordwest2050: Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten“, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogramms „KLIMZUG: Klimawandel in den Regionen zukunftsfähig gestalten“ gefördert wird, angeschlossen werden.

Hintergrund dafür ist, dass in nordwest2050 erstmalig regionale Klimaszenarien für die Metropolregion Bremen-Oldenburg erstellt werden konnten, die auf den Daten der aktuellen regionalen Klimamodelle basieren. Dieses hat in der SUBVE-AG „Klimaanpassung“ Interesse an einem aufbereiteten fachlichen Input für das Fachkonzept Klimaanpassung geweckt, der im Wesentlichen an die Methodik sowie die vorhandenen Klimadaten und -informationen in nordwest2050 anschließt. Insofern mussten vom SUBVE für das Fachkonzept keine zusätzlichen Ressourcen für die Auswertung der Klimarohdaten bereitgestellt werden und die vorliegende Studie konzentriert sich auf die fachkonzeptspezifische Aufbereitung des Klimawissens. Zu dieser Aufbereitung gehört u.a. die Anpassung der Randbedingungen für die Erstellung der regionalen Klimaszenarien an die zwischen SUBVE und BioConsult abgesprochenen Anforderungen.

Die fachkonzeptspezifische Aufbereitung der Informationen über Klimamodelle, Klimaprojektionen und Klimaszenarien grenzt sich von nordwest2050 insofern ab, da hier die politikrelevanten Aspekte bei den Aussagen über den möglichen Klimawandel im Vordergrund stehen, während in nordwest2050 die Klimaszenarien bisher v.a. als Grundlage einer sektoralen und regionalen Vulnerabilitätsanalyse dienen. Es werden damit die Fragen, wie mit den Unsicherheiten von Klimawandelaussagen umgegangen werden kann und wie belastbar bzw. aussagefähig die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarien sind sowie zusätzlich einige Aspekte bezüglich der „Übersetzung“ des Klimawissens für Entscheidungsträger diskutiert.

## 2. Klimawandel, Klimamodelle und Klimaprojektionen

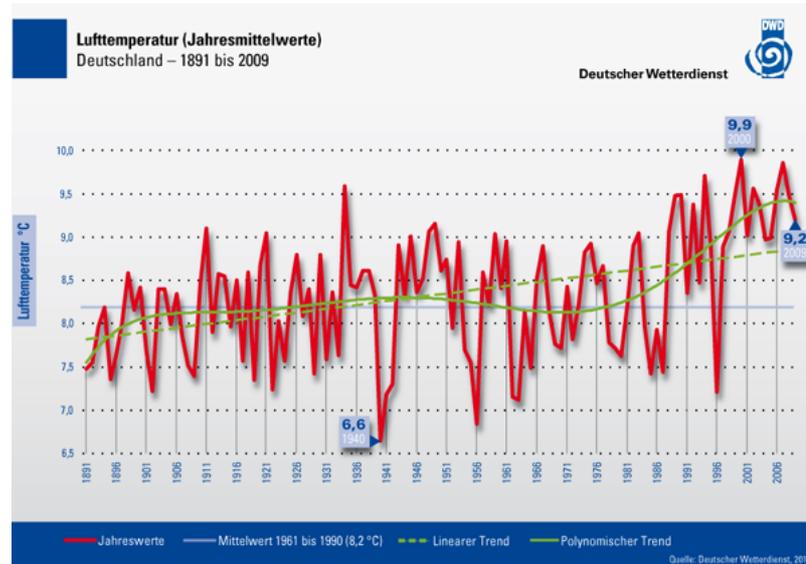
### 2.1 Beobachtbare globale und regionale Klimaänderungen

Die Aussagen des IPCC<sup>1</sup> (2007b) über den gegenwärtigen Klimawandel sind eindeutig: Der größte Teil des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Temperatur von ca. 0,7°C seit Anfang des 20. Jahrhunderts ist sehr wahrscheinlich auf die anthropogen erhöhten Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre zurückzuführen. Die menschlichen Treibhausgasemissionen haben weltweit im Zeitraum von 1970 bis 2004 um 70 Prozent zugenommen und die Zunahme hat sich in den letzten zehn Jahren beschleunigt. Der Anstieg der mittleren globalen Luft- und Meerestemperaturen, das ausgedehnte Abschmelzen von Schnee und Eis und der Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels sind eindeutige Hinweise auf den anthropogen beschleunigten Klimawandel. Der 4. Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahr 2007 zeigt deutlich, dass auf vielen räumlichen Skalen zahlreiche Klimaänderungen beobachtet werden können. Zu diesen Änderungen gehören neben der Temperaturerhöhung auch Veränderungen in den Niederschlags- und Windmustern sowie veränderte Häufigkeiten von extremen Wetterereignissen wie Trockenperioden, Starkniederschläge und Hitzewellen (weitere Details unter <http://www.ipcc.ch>).

Hinsichtlich der bisherigen Klimaentwicklung in Deutschland kann auf langjährige Messwerte der Klima- und Niederschlagsmessstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD: [www.dwd.de/cdc](http://www.dwd.de/cdc)) zurückgegriffen werden (s. **Abb. 1**). Vom DWD werden Analysen der rezenten Klimatrends auch für Niedersachsen und Bremen durchgeführt. Zusammengefasst sind die beobachtbaren Klimaänderungen z.B. in den regelmäßigen Klima-Reports des DWD und in einem Strukturpapier des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt und Klimaschutz (s. Nds. MUK 2009). Für Bremen hat z.B. Heinemann (2003) die Entwicklung des Klimas u.a. anhand der Veränderungen von Temperatur und Niederschlagsverteilung in den letzten Jahrzehnten beschrieben.

---

<sup>1</sup> Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wird von der WMO (World Meteorological Organisation) und dem UNEP (United Nations Environment Programme) getragen. Im IPCC sind weltweit mehrere 1.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler organisiert, die in drei Arbeitsgruppen (Klimatologie, Klimawirkungen und Anpassung, Klimaschutz) den jeweiligen Stand des Wissens zur Klimaproblematik zusammentragen und regelmäßig so genannte Sachstandsberichte veröffentlichen. Der aktuelle 4. Sachstandsbericht stammt aus dem Jahr 2007; der nächste ist für die Jahre 2013/14 geplant.



**Abb. 1:** Messreihe des Deutschen Wetterdienstes der mittleren Jahrestemperaturen von 1891 bis 2009 für Deutschland (DWD 2010b).

Die **Jahresmitteltemperatur** lag in Niedersachsen im Zeitraum von 1950 bis 2000 mit 8,7°C um 0,4°C höher als der Mittelwert für ganz Deutschland und über diesen Zeitraum ist ein Anstieg von ca. 1,4°C zu verzeichnen. Die Temperaturen im Winter und Frühjahr weisen einen stärkeren Anstieg auf und eine auffällige Häufung überdurchschnittlich warmer Jahre ist seit Ende der 1980er Jahre zu beobachten (die Jahre 2000 und 2007 waren im Mittel für Deutschland die wärmsten, seit es Temperaturaufzeichnungen gibt: s. **Abb. 1**). Durch den Einfluss der Nordseewassermassen sind im Bereich des niedersächsischen Flachlandes die jahreszeitlichen Temperaturunterschiede vergleichsweise gering (Nds. MUK 2009, DWD 2010a).

Bezüglich der saisonalen Temperaturverteilung, die wesentlich für die Steuerung von Wachstumsvorgängen ist, konnte in Niedersachsen beobachtet werden, dass der letzte Spätfrost in der Periode 1961-1991 durchschnittlich am 22. April und der erste Frühfrost am 30. Oktober auftritt. Die frostfreie Zeit liegt damit mit 191 Tagen über der Gesamtdeutschlands (184 Tage) und sie hat sich seit 1961 im Mittel um 9,9 Tage verlängert. Auch die mittlere thermische Vegetationsperiode, die anhand der dauerhaften Überschreitung der Tagesmitteltemperatur von 5°C definiert ist, liegt in Niedersachsen mit einem Wert von 311 Tagen etwas über dem Bundesdurchschnitt (305 Tage) und hat sich durch die gegenwärtige Klimaerwärmung seit 1961 um 21 Tage verlängert (Nds. MUK 2009).

Die langjährige mittlere jährliche **Niederschlagsmenge** in Niedersachsen liegt mit 736 mm um 43 mm unter der von Deutschland. In den Niederschlagsmessungen ist eine deutliche Abnahme der Niederschlagshöhen von den westlichen zu den östlichen Landesteilen erkennbar; dies spiegelt den abnehmenden Einfluss der Nordsee wider. Für den Herbst und den Winter sind in den letzten Jahren leichte Anstiege der Niederschläge zu verzeichnen (Nds. MUK 2009, DWD 2010a).

Wie die Niederschläge weisen auch die **Windgeschwindigkeiten** deutliche Gradienten innerhalb Niedersachsens auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit nimmt von der Nordseeküste nach Osten und ins Landesinnere ab.

Die Messwerte des DWD für die Metropolregion Bremen-Oldenburg (MPR HB-OL: s. **Abb. 6**) als gemittelte Werte über sieben Klimastationen und für die zwei ausgewählten Klimastationen Bremen und Bremerhaven sind in **Tab. 1** dargestellt.

**Tab. 1:** Jahresmittelwerte (für Temperatur und Niederschlag zusätzlich auch saisonale Mittelwerte) für die MPR HB-OL gemittelt und für die zwei DWD-Klimastationen Bremen und Bremerhaven ausgewählter Klimaparameter für die Referenzperiode 1971 bis 2000. Die Beschreibung der Parameter ist **Tab. 4** zu entnehmen.

Parameter	Mittelwerte für die MPR HB-OL* (1971-2000)	Bremen (1971-2000)	Bremerhaven (1971-2000)
Jahresmitteltemperatur	9,22°C	9,28°C	9,43°C
Frühling (MAM)	8,16°C	8,62°C	8,46°C
Sommer (JJA)	16,41°C	16,81°C	16,73°C
Herbst (SON)	9,83°C	9,44°C	10,04°C
Winter (DJF)	2,36°C	2,12°C	2,38°C
Sommertage	18,25 Tage	25,7 Tage	16,47 Tage
Tropische Nächte	0,31 Nächte	0,03 Nächte	0,53 Nächte
Frosttage	56,33 Tage	68,47 Tage	48,13 Tage
Eistage	13,41 Tage	14,17 Tage	13,7 Tage
Gesamtniederschlag	734 mm	672 mm	717 mm
Frühling (MAM)	146 mm	146 mm	145 mm
Sommer (JJA)	208 mm	200 mm	213 mm
Herbst (SON)	212 mm	173 mm	202 mm
Winter (DJF)	168 mm	152 mm	157 mm
Regentage	125,07 Tage	122,33 Tage	124,73 Tage
Starkregentage	3,1 Tage	2,3 Tage	2,8 Tage
Schneemenge	11,71 mm	6,85 mm	8,52 mm
Schneebedeckung	17 Tage	19,2 Tage	17,47 Tage
Schneetage	11,3 Tage	12,3 Tage	12,43 Tage
Mittlere Windgeschwindigkeit	5,69 m/s	4,27 m/s	5,21 m/s
Maximale Windgeschwindigkeit	18,3 m/s	15,5 m/s	18,9 m/s
Sturmtage	7,44 Tage	2,43 Tage	7,97 Tage
Windstille Tage	0,9 Tage	2,1 Tage	0,47 Tage
Sonnenscheindauer	1599 Stunden	1512 Stunden	1522 Stunden
Bewölkungsgrad	67,52 %	67,63%	68,25 %

\*: gemittelt sind die Messwerte der DWD-Stationen Helgoland, Bremerhaven, Cuxhaven, Jever, Bremen, Worpswede und Nienburg (soweit vorhanden).

Das **heutige Klima** der MPR HB-OL für die Referenzperiode 1971-2000 kann folgendermaßen charakterisiert werden (vgl. **Tab. 1**):

- Die Nordseeküstenregion mit den Inseln ist durch ein maritimes Klima charakterisiert, d.h. milde Winter (Monate Dezember, Januar und Februar) mit mittleren Temperaturen von ca. 2°C und mäßig warme Sommer (Monate Juni, Juli und August) mit mittleren Temperaturen zwischen 16 und 17°C charakterisieren die Jahresamplitude der Temperaturen.
- Die Zahlen für die Temperaturkenntage weisen einen z.T. deutlichen Gradienten zwischen den küstennahen Station Bremerhaven und der weiter im Binnenland liegenden Station Bremen auf: mit Ausnahme der tropischen Nächte sind in Bremen deutlich mehr Kenntage sowohl für warme (Sommertage) als auch kalte (Frost- und Eistage) Klimazustände zu beobachten. Die

küstennahe Verringerung der Temperaturamplitude zeigt sich also auch bei den maximalen und minimalen Temperaturen.

- Die mittleren jährlichen Gesamtniederschlagsmengen betragen ca. 730 mm für die MPR HB-OL, wobei die Niederschlagsmengen im Sommer und Herbst größer sind, als im Winter und Frühjahr; die saisonal Unterschiede sind vergleichsweise gering.
- Die Zahlen für die Niederschlagskenntage weisen keine ausgeprägte regionale Differenzierung auf: ca. ein Drittel der Tage pro Jahr sind Regentage und pro Jahr kommen durchschnittlich 3 Starkregentage vor. An ca. 17 Tage pro Jahr kann eine Schneedecke beobachtet werden und Schnee fällt im Jahresdurchschnitt an ca. 12 Tagen.
- Bezüglich der Windgeschwindigkeiten und der Windkenntage ist eine Differenzierung zwischen Küste und Binnenland zu beobachten: sowohl die mittleren als auch die maximalen Geschwindigkeiten nehmen Richtung Binnenland ab. Entsprechendes gilt für die Sturmtage, wo im Jahresmittel in Bremerhaven mit ca. 8 Tagen mehr als doppelt so viele wie in Bremen gemessen worden sind, und die windstillen Tage, deren Zahl in Bremerhaven geringer ausfällt.
- Die mittlere Jahresstundenzahl der Sonnenscheindauer beträgt über 1.500 Stunden und der Bewölkungsgrad beträgt ca. 68%.

## 2.2 Globale Klimaprojektionen

Die zukünftige Klimaentwicklung ist abhängig vom Ausmaß des globalen Treibhausgasausstoßes und damit von menschlichem Handeln und politischen Entscheidungen. Da die Emissionsmenge von der Entwicklung der Menschheit im 21. Jahrhundert abhängt, die für die Langfristperspektive nicht eindeutig bestimmt werden kann, werden vom IPCC verschiedene Emissionsszenarien (sog. SRES<sup>2</sup>-Szenarien) aufgestellt, die mögliche Emissionspfade der Zukunft aufzeigen (s.a. Kap. 2.3.2). Diese Emissionsszenarien werden in die globalen Klimamodelle eingespeist, um daraus dann Projektionen der globalen Klimaänderung abzuleiten. Je nach SRES-Szenario muss demnach bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einer Temperaturzunahme zwischen 1,1 und 6,4°C gerechnet werden (bezogen auf 1990).

Eine zentrale Aussage des IPCC aus dem Jahr 2007 lautet: „Für die nächsten zwei Jahrzehnte wird für eine Reihe von SRES-Szenarien eine Erwärmung von 0,2°C pro Jahrzehnt projiziert. Selbst wenn die Konzentrationen aller Treibhausgase und Aerosole auf dem Niveau des Jahres 2000 konstant gehalten würden, wäre eine weitere Erwärmung von 0,1°C pro Jahrzehnt zu erwarten“ (s.a. Abb. 3). Weiterhin heißt es dort, dass „andauernd gleich hohe oder höhere Treibhausgasemissionen als heute eine weitere Erwärmung verursachen würden und im 21. Jahrhundert viele Änderungen im globalen Klimasystem bewirken, die sehr wahrscheinlich größer wären als die im 20. Jahrhundert beobachteten.“ Es wird auch betont, dass anthropogene Erwärmung und Meeresspiegelanstieg aufgrund der langen Zeitskalen, die mit Klimaprozessen und Rückkopplungen innerhalb des Klimasystems verbunden sind, über Jahrhunderte andauern würden, selbst wenn die Treibhausgaskonzentrationen stabilisiert würden (IPCC 2007b).

---

<sup>2</sup> SRES = Special Report on Emissions Scenarios von Nakicenovic et al. 2000.

Für die ersten Jahrzehnte des 21. Jahrhunderts (2011-2030 im Vergleich zu 1980-1999) zeigen die globalen Klimamodelle eine von den Emissionsszenarien fast unabhängige Erwärmung um 0,64 bis 0,69°C (IPCC 2007a). In der 2. Hälfte des Jahrhunderts ist die globale Erwärmung bei den einzelnen SRES-Szenarien erkennbar verschieden. Der Zusammenhang zwischen dem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre und ihrer Temperatur kann folgendermaßen charakterisiert werden: Eine Verdoppelung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration führt in den Modellen zu einer mittleren globalen Temperaturerhöhung um 2 bis 4,5°C mit 3°C als wahrscheinlichstem Wert (IPCC 2007a). Die globalen Klimaprojektionen bezüglich Temperatur und Meeresspiegel sind in **Tab. 2** zusammengefasst.

**Tab. 2:** Projizierte mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche und mittlerer globaler Meeresspiegelanstieg am Ende des 21. Jahrhunderts (nach IPCC 2007b).

SRES-Szenarien	Temperaturänderung (2090-2099 verglichen mit 1980-1999)		Meeresspiegelanstieg (2090-2099 verglichen mit 1980-1999)
	beste Schätzung	wahrscheinliche Bandbreite	modellbasierte Bandbreite ohne zukünftige rapide Änderungen des Eisflusses
A1B	2,8°C	1,7°C – 4,4°C	21 – 48 cm
A2	3,4°C	2,0°C – 5,4°C	23 – 51 cm
B1	1,8°C	1,1°C – 2,9°C	18 – 38 cm
B2	2,4°C	1,4°C – 3,8°C	20 – 43 cm

Die projizierte globale Klimaerwärmung fällt regional unterschiedlich aus (s. Kap. 2.3.4): die Temperaturerhöhung über dem Land ist größer als über den Ozeanen, da sich die Wassermassen langsamer erwärmen, und sie ist in den nördlichen Breiten (Sibirien, Kanada und Alaska) größer als auf der Südhalbkugel der Erde. Eine weitere Auffälligkeit ist die stärkere Temperaturzunahme im Innern der Kontinente im Vergleich zu den küstennahen Gebieten, wo sich der dämpfende Einfluss der angrenzenden Meere auswirkt.

Eine Ausnahme ist die Atmosphäre über dem arktischen Ozean: sie erwärmt sich unter Berücksichtigung des A1B-Emissionsszenarios bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um ca. 7°C (mit einer Spannweite von 4 bis 11°C) und damit um 1°C mehr als die angrenzenden Landmassen (IPCC 2007a). Ursache hierfür ist das starke Abschmelzen des arktischen Meereises, wodurch ein Selbstverstärkender Rückkopplungseffekt angestoßen wird (sog. Kipp-Punkt im Klimasystems: vgl. Kap. 5.2). Für die stärkere Erwärmung über den Landgebieten in den hohen nördlichen Breiten, die nach dem A1B-Szenario ca. 6°C beträgt (mit einer Bandbreite von 3 bis 11°C), ist ebenfalls ein Kipp-Punkt verantwortlich: Die heute von großen Eis- und winterlichem Schnee bedeckten Areale werden durch die Erwärmung immer weiter zurückgehen, wodurch sich die Rückstrahlung (Albedo) verringert und die Erwärmung erhöht, was wiederum die Eis- und Schneeflächen noch schneller schrumpfen lässt. Auf der Südhalbkugel wirkt sich dieser Effekt weniger aus. Hier ist nur die Antarktis nennenswert mit Eis- und Schnee bedeckt, woran die globale Erwärmung nach heutigem Kenntnisstand wenig ändern wird (Ausnahme stellt hier der westantarktische Eisschelf dar).

## 2.3 Vorgehensweise für die Erstellung von Klimaprojektionen

Die vom IPCC berücksichtigten globalen Klimamodelle sind meist gekoppelte Atmosphären-Ozean-Modelle (AOGCM: s.a. Kap. 2.3.3), die von den großen Klimarechenzentren der Welt betrieben werden. In Deutschland sind v.a. das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) und das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg zu nennen. Ausgabegrößen sind v.a. die Atmosphärentemperatur, aber auch Niederschlag, Wind, Wassertemperatur der Ozeane und, als daraus abgeleitete globale Größe, der Anstieg des Meeresspiegels.

Da der anthropogene Klimawandel sich nicht überall auf der Erde gleich schnell und in die gleiche Richtung ausprägt, sondern regional sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann, werden regionale Klimamodelle benötigt. Die globalen Klimamodelle mit einer Auflösung von bislang 100 bis 200 Kilometern können die Kleinräumigkeit des Klimawandels nicht abbilden. In den letzten Jahren ist daher die Entwicklung regionaler Klimamodelle und die Ableitung regionaler Klimaprojektionen – nicht zuletzt durch die zunehmende Leistungsfähigkeit von Computern und das wachsende Verständnis klimatischer Prozesse – stark vorangetrieben worden. Mit einer horizontalen Auflösung von 10 bis 20 Kilometern sind jetzt detaillierte Aussagen über mögliche Klimaentwicklungen einzelner Regionen möglich (Jacob et al. 2008, Walkenhorst & Stock 2009, Spekat et al. 2007).

In den folgenden Kapiteln wird erläutert, wie regionale Klimaprojektionen erstellt werden können. Im Kap. 3 wird dann der für diese Studie gewählte Ansatz, die zu berücksichtigenden Randbedingungen sowie die resultierenden Ergebnisse für die auf den Klimaprojektionen basierenden zwei regionalen Klimaszenarien dargestellt. Die Erstellung einer regionalen Klimaprojektion erfolgt üblicherweise in drei Schritten:

1. Auswahl eines SRES-Szenarios, in dem die Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen beschrieben ist. Die SRES-Szenarien liegen allen globalen und darauf beruhenden regionalen Klimaprojektionen zugrunde (Kap. 2.3.2).
2. Simulation der zugehörigen globalen, räumlich grob aufgelösten Klimaentwicklung unter Verwendung eines globalen Klimamodells (Kap. 2.3.3).
3. Erhöhung der räumlichen Auflösung der modellierten globalen Klimaentwicklung anhand eines oder mehrerer regionaler Klimamodelle (Kap. 2.3.4).

Vorab soll noch kurz auf den Unterschied zwischen Wetter(-vorhersage) und Klima(-projektionen) eingegangen werden.

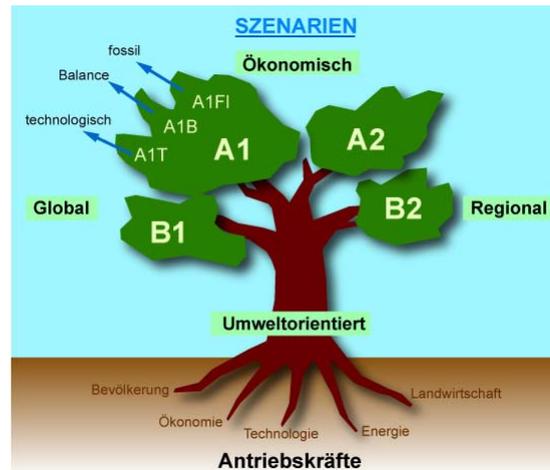
### 2.3.1 Unterschiede zwischen Wetter und Klima

Häufige Missverständnisse im Umgang mit den Aussagen der Klimamodelle resultieren aus dem Unterschied zwischen Wetter(-vorhersage) und Klima(-projektionen). Es wird bezüglich der Aussagefähigkeit bzw. Belastbarkeit der Klimaprojektionen kritisch angemerkt, dass Wettervorhersagen für kaum mehr als 10 Tage möglich seien, während Klimaprojektionen für die nächsten 100 Jahre erstellt werden. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass die Vorhersagbarkeit des Wetters aufgrund der chaotischen Natur des Wettersystems stark begrenzt ist: geringe

Unterschiede in den Anfangswerten der meteorologischen Parameter können innerhalb kurzer Zeit zu riesigen Differenzen in der weiteren Entwicklung führen. Klima hingegen ist „gemitteltes“ Wetter. Das heißt, es ist gekennzeichnet durch die langfristige Statistik (Mittelwerte, Varianzen, Wahrscheinlichkeiten von Extremwerten usw.) der meteorologischen Elemente an einem Ort oder in einer Region, wobei mit „langfristig“ ein Zeitraum von typischerweise 30 Jahren gemeint ist. Diese Mittelwerte hängen primär von den längerfristigen Randbedingungen des Energie- und Stofftransports (Strahlung, Luftmassen, Wasserdampf usw.) in eine Region ab und kaum von den für einen konkreten Wetterverlauf relevanten Anfangsbedingungen der atmosphärischen Felder zu einem bestimmten Zeitpunkt. Daher ist das Klima prinzipiell besser vorhersagbar als das Wetter (BMVBS 2007, Walkenhorst & Stock 2009).

### 2.3.2 SRES-Szenarien und IPCC-Storylines

Ein weiteres Missverständnis bezüglich der Vorhersagegenauigkeit globaler Aussagen zum Klimawandel betrifft die Emissionsszenarien (SRES-Szenarien), in denen die unbekannt zukünftige Entwicklung der globalen Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen (Schmutzpartikel wie Staub und Ruß) sowie unbekannt zukünftige Landnutzungsänderungen festgelegt werden. Diese Entwicklungen werden durch vielfältige Faktoren bestimmt, wie etwa die demographische, ökonomische, politische und technologische Entwicklung der Welt, die sich kaum vorhersagen lassen. Daher sind die insgesamt 40 vom IPCC mit Hilfe demographischer und ökonomischer Modelle entwickelten SRES-Szenarien alle ohne zugewiesene Eintrittswahrscheinlichkeit gleichmäßig gültig bzw. stichhaltig. Im Unterschied zu Wetterprognosen, die das Wetter unter der Annahme deterministischer meteorologischer Prozesse mittlerweile kurzfristig recht genau vorhersagen können, sind Aussagen zum Klimawandel deshalb keine Prognosen, sondern Projektionen verschiedener möglicher zukünftiger Veränderungen der Klimaparameter. Klimaprojektionen sind also als plausible klimatische Zukunftswelten zu verstehen, die auf der Basis von SRES-Szenarien mit Hilfe von Klimamodellen berechnet werden. Eine Prognose der klimatischen Verhältnisse in einem bestimmten Jahr oder gar an einem bestimmten Tag in der Zukunft ist also aufgrund der Unvorhersagbarkeit der Emissionen und aufgrund des oben beschriebenen statistischen Charakters des Klimas prinzipiell nicht möglich. Die für die IPCC-Klimaprojektionen verwendeten SRES-Szenarien sind in **Abb. 2** dargestellt; die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die resultierenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in **Tab. 3**.



**Abb. 2:** Darstellung der vier SRES-Szenariofamilien des IPCC. Vier qualitative Storylines beschreiben vier Szenariofamilien: A1, A2, B1 und B2. Aus den Szenariofamilien sind sechs Szenariogruppen abgeleitet: eine Gruppe in A2, B1, B2 und drei Gruppen in der A1-Familie (nach IPCC 2001).

Die SRES-Szenarien basieren auf vier verschiedenen sog. Storylines (A1, A2, B1, B2). Die Storylines sind grobe Beschreibungen von nach Weltregionen aufgeschlüsselten Entwicklungen, die verschiedene Grundtendenzen beinhalten: zum einen, ob die globale zukünftige Entwicklung vorwiegend ökonomisch orientiert ist (A) oder ob sie zunehmend auf einen ökologischen Umbau hin orientiert ist (B); zum anderen, ob Globalisierungsprozesse zu einer Homogenisierung der Welt mit einer Angleichung von Lebensweisen und Konsumniveaus führen (1) oder ob weiterhin große regionale Differenzen bestehen bleiben und eher nach lokalen und regionalen Lösungen gesucht wird (2) (IPCC 2007b, Walkenhorst & Stock 2009).

Die SRES-Szenarien beinhalten keine zusätzlichen Klimaschutzanstrengungen oder -initiativen, d.h. es sind keine Szenarien berücksichtigt, die ausdrücklich eine Umsetzung des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) oder der Emissionsziele des Kyoto-Protokolls annehmen. Die aus den Szenariofamilien resultierenden Kohlendioxidemissionen sind in **Tab. 3** dargestellt.

**Tab. 3:** Projizierte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für ausgewählte SRES-Szenarien (CO<sub>2</sub>-Emissionen sind vorgegeben, atmosphärische Konzentrationen sind Modellergebnisse; es sind sowohl die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe als auch von Landnutzungsänderung berücksichtigt; verändert nach Nakicenovic et al. 2000).

SRES-Szenarien	CO <sub>2</sub> -Emissionen (GtC* pro Jahr)		Kumulierte CO <sub>2</sub> -Emissionen	Atmosphärische Konzentrationen (ppm**)	
	2050	2100	2001 bis 2100 (GtC*)	2050	2100
A1B	16,4	13,5	1415	490-600	615-920
A2	17,4	19,1	1780	490-600	735-1080
B1	11,3	4,2	900	455-545	485-680
B2	11,0	13,3	1080	445-530	544-770

\* Gigatonnen Kohlenstoff; \*\* parts per million = Teile von einer Millionen

Die in **Tab. 3** aufgeführten illustrativen SRES-Szenarien, die repräsentativ für die jeweilige Szenariofamilie sind, dienen als Input für globale Klimamodelle, die die Emissionsentwicklung in eine daraus resultierende Klimaentwicklung übersetzen und somit eine Klimaprojektion liefern. Hinsichtlich der Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen bis 2100 können die SRES-Szenarien wie folgt charakterisiert werden: die niedrigsten globalen Treibhausgasemissionen im Jahr 2100 ergeben sich aus B1, die höchsten aus A2, während etwa A1B ein „mittleres“ SRES-Szenarien darstellt (vgl. Abb. 3).

Da viele Modellrechnungen – insbesondere auch der regionalen Klimamodelle – mit den im A1B-Emissionsszenario formulierten Vorgaben bezüglich der Emissionen durchgeführt werden, wird es im Folgenden kurz dargestellt. Die innerhalb der Szenariofamilie A1 unterschiedenen drei Szenariengruppen (s. **Abb. 2**) gehen von einer ähnlichen demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und den technologischen Wandel betreffenden Modellgeschichte aus, unterscheiden sich jedoch bezüglich der zukünftigen Energieproduktion bzw. -technologie: Das A1B-Szenario geht von einer ausgewogene Nutzung aller Energiequellen aus, wobei ausgewogene Nutzung hier definiert ist als eine nicht allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle und durch die Annahme eines ähnlichen Verbesserungspotentials für alle Energieversorgungs- und Energieverbrauchstechnologien (Nakicenovic et al. 2000, IPCC 2007b).

Die Szenariofamilie A1 beschreibt weiterhin eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer in der Mitte des 21. Jahrhunderts den Höchststand erreichenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung sowie rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Wichtige grundlegende Themen sind die Annäherung von Regionen, die Entwicklung von Handlungskompetenz sowie die zunehmende kulturelle und soziale Interaktion bei gleichzeitiger substanzieller Verringerung regionaler Unterschiede der Pro-Kopf-Einkommen.

Das Szenario A1B kann folgendermaßen charakterisiert werden:

- schnelle wirtschaftliche Entwicklung;
- Bevölkerungswachstum bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts;
- Entwicklung und Einsatz von effizienten Technologien;
- Nutzung fossiler und nicht-fossiler Energieträger;
- Globalisierung auch in kultureller und sozialer Hinsicht.

### 2.3.3 Globale Klimamodelle

Ein globales Klimamodell (General Circulation Model: GCM) ist ein Computermodell, das eine dreidimensionale Repräsentation der Atmosphäre enthält und die in ihr ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse beschreibt. Es basiert in der Regel auf einem Meteorologiemodell, wie es auch bei der (numerischen) Wettervorhersage zum Einsatz kommt. Da die Atmosphäre nicht als isoliertes System betrachtet werden kann, wird üblicherweise ein Ozeanmodell angekoppelt, so dass man ein sog. Atmosphäre-Ozean-Klimamodell (AOGCM) erhält, an das zudem ein Schnee-

und Eismodell für die Kryosphäre und ein Vegetationsmodell für die Biosphäre angekoppelt wird. Die das globale Klima bestimmenden Größen wie insbesondere die solare Einstrahlung, die Zusammensetzung der Atmosphäre und die Art der Bedeckung der Erdoberfläche gehen als Eingangsgrößen in die globale Klimamodelle ein. Rückkopplungseffekte werden so weit wie möglich berücksichtigt (Endlicher & Gerstengarbe 2007, MPI-M 2006, Walkenhorst & Stock 2009).

Da die Entwicklung globaler Klimamodelle sehr aufwändig ist und Klimasimulationen leistungsfähige Großrechner benötigen, kamen bei der Erstellung globaler Klimaprojektionen für den 4. Sachstandsbericht des IPCC weltweit etwa 20 verschiedene AOGCM's zum Einsatz. Diese berechnen die Entwicklung wichtiger klimatischer Parameter bis zum Jahr 2100 mit einer horizontalen Auflösung zwischen 125 und 400 km auf der Basis verschiedener SRES-Szenarien. Die vergleichsweise grobe räumliche Auflösung hat zur Folge, dass kleinräumige Phänomene wie etwa Wolkenbildung oder Niederschläge in AOGCM's nur ungenau abgebildet werden können (s. Kap. 2.3.4).

Für die aktuellen Klimaprojektionen steht das globale Atmosphären- und Landoberflächenmodell ECHAM5 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M), welches mit dem Ozeanmodell MPI-OM gekoppelt wird, zur Verfügung. Das Modell ECHAM5/OM ist deutlich realitätsnäher als sein Vorgänger ECHAM4 und steht im internationalen Vergleich an der Spitze der globalen Klimamodelle (Walkenhorst & Stock 2009). Wichtige Verbesserungen sind z.B. die Berücksichtigung von Landoberflächenprozessen und Oberflächeneigenschaften der Erde. Zusätzlich wurde die Berechnung von Wolkenbildungsprozessen überarbeitet (BMVBS 2007). Ein ganz wesentlicher Unterschied zum Vorgängermodell ist die genauere Beschreibung des Ausgangszustands des Klimasystems bei der Modellinitialisierung. Hierdurch weisen die ECHAM5-Simulationen im globalen Durchschnitt keine signifikanten Temperaturabweichungen zu den beobachteten Daten im Kontrollzeitraum mehr auf (MPI-M 2006, Jacob et al. 2008).

Ein zusätzlicher Informationsgewinn ergibt sich durch die höhere räumliche Auflösung; vom MPI-M sind Simulationen mit einem Gitterpunktabstand von rund  $2^\circ$  (ca. 220 km) durchgeführt worden (die Simulationsrechnungen mit ECHAM4 hatten eine horizontale Auflösung von ca.  $2,8^\circ$ ). Auch die vertikale Auflösung wurde in ECHAM5 auf 31 anstelle von zuvor 20 Schichten erhöht (MPI-M 2006, BMVBS 2007). Mit zunehmender Rechnerleistung wird es in Zukunft möglich sein, die räumliche Auflösung globaler Klimamodelle weiter zu erhöhen. Trotz dieser Bemühungen ist die Erstellung regionaler Klimaprojektionen mit einer horizontalen Auflösung unterhalb von 100 km heute in der Regel noch auf regionale Klimamodelle angewiesen, die die Ergebnisse der globalen Modelle für eine ausgewählte Region verfeinern.

### 2.3.4 Regionale Klimamodelle: Unterschiede und Vorteile

Die aus regionalen Klimamodellen abgeleiteten regionalen Klimaprojektionen können zu regionalen Klimaszenarien zusammengestellt werden, die dann die Grundlage für Abschätzungen möglicher Auswirkungen und Folgen des Klimawandels auf regionaler Ebene liefern. Zur Erhöhung der räumlichen Auflösung der Ergebnisse von globalen Klimamodellen stehen mit dynamischen und statistischen Modellen prinzipiell zwei Ansätze zur Verfügung: Regionale dynamische Klimamodelle repräsentieren – wie globale Klimamodelle – die Dynamik der physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre. Da sie nur einen Ausschnitt der Atmosphäre modellieren, ist ihre horizontale Auflösung bei gleich bleibendem Rechenaufwand größer als bei globalen Klimamodellen. Regionale

dynamische Klimamodelle benötigen die Ergebnisse globaler Klimamodelle, da die ozeanischen und lateralen atmosphärischen Randbedingungen aus den GCM an den Modellrändern der Regionalmodelle eingehen; sie sind also in die GCM eingebettet. Im Gegensatz dazu beruhen regionale statistische Klimamodelle auf der Ermittlung skalenübergreifender Beziehungen zwischen Klimaparametern, d.h. Beziehungen zwischen großskaligen Klimavariablen (z.B. globale Mitteltemperatur) und regionalen Klimavariablen (z.B. mittlere Januar­temperatur an einem bestimmten Ort). Diese Beziehungen werden aus langjährigen Messdatenreihen abgeleitet und sind in der Regel für jede Region unterschiedlich (Spekat et al. 2007, Jacob et al. 2008, Walkenhorst & Stock 2009).

**Dynamische Modelle** haben im Vergleich zu statistischen den Vorteil, dass sie Projektionen berechnen können, die weit von den heutigen klimatischen Verhältnissen entfernt sind. Da sie die atmosphärischen Prozesse direkt abbilden und nicht wesentlich auf die Stationarität, d.h. die zeitliche Unveränderlichkeit, von verwendeten statistischen Beziehungen angewiesen sind, sind sie also prinzipiell auch für die Modellierung fernerer Zukünfte geeignet. Für unterhalb der räumlichen Auflösung des Modells stattfindende Prozesse verwenden allerdings auch die dynamischen Modelle statistische Beziehungen für die Parametrisierungen, von denen dann ebenfalls angenommen werden muss, dass sie in einem veränderten Klima weiter gültig sind. Außerdem ist die Kohärenz zwischen verschiedenen Klimavariablen automatisch gewährleistet, d.h. alle Klimavariablen passen zueinander, da die modellierten Prozesse u.a. von vornherein bestimmten physikalischen Erhaltungssätzen genügen. Diese Kohärenz ist bei statistischen Verfahren nicht notwendigerweise gegeben (MPI-M 2006, IPCC 2007a, Walkenhorst & Stock 2009).

**Statistische Modelle** haben im Vergleich zu dynamischen den Vorteile, dass sie für ähnliche klimatische Verhältnisse wie diejenigen, aus denen die statistischen Beziehungen abgeleitet sind, in der Regel zuverlässigere Ergebnisse liefern als dynamische Modelle und sich daher besonders für kurz- bis mittelfristige Klimaprojektionen eignen. Dafür müssen langjährige und flächendeckende Messdatenreihen zur Verfügung stehen, die in Europa und Deutschland meist verfügbar sind. Weiterhin ist der Arbeitsaufwand zur Erstellung statistischer Modelle geringer, es ist nur ein vergleichsweise geringer Rechenaufwand erforderlich und sie sind folglich auch nicht – wie dynamische Modelle – auf leistungsfähige Großrechner angewiesen. Zusätzlich ist mit statistischen Modellen theoretisch eine beliebig hohe räumliche Auflösung erreichbar, die nur von der Verfügbarkeit entsprechend hochaufgelöster langjähriger Messdatenreihen abhängt (Spekat et al. 2007, Walkenhorst & Stock 2009; s.a. KomPass<sup>3</sup>)

In Deutschland werden derzeit vier regionale Klimamodelle zur Erstellung regionaler Klimaprojektionen eingesetzt: die beiden dynamischen Modelle REMO (MPI-M) und CLM (DWD und weitere Institutionen) sowie die beiden statistischen Modelle STAR (PIK<sup>4</sup>) und WettReg (CEC Potsdam<sup>5</sup>).

- **REMO:** Das hydrostatische dynamische Modell REMO (Regional Model: weitere Informationen unter <http://www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/atmosphaere-im-erdsystem/arbeitsgruppen/regionale-klimamodellierung.html>) wird vom MPI-M in Hamburg betrieben. In einer Studie für das Umweltbundesamt (UBA) wurden in einem zweistufigen Verfah-

<sup>3</sup> Das Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) vom Umweltbundesamt hat auf seiner Website Basis- und Nutzerinformationen für die regionalen Klimamodelle zusammengestellt ([www.anpassung.net](http://www.anpassung.net)).

<sup>4</sup> Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung ([www.pik-potsdam.de](http://www.pik-potsdam.de)).

<sup>5</sup> Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH ([www.cec-potsdam.de](http://www.cec-potsdam.de)).

ren basierend auf den SRES-Szenarien A1B, A2 und B1 regionale Klimaprojektionen für Deutschland mit einer horizontalen Auflösung von 10 x 10 km für den Zeitraum 1950-2100 erstellt. Die Randbedingungen lieferte das ebenfalls am MPI-M betriebene globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM (s. Kap. 2.3.3). Die Ausgabedaten sind die wichtigsten Klimaparameter wie z.B. Temperatur, Niederschlag, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit; diese liegen für jeden Modelllauf je nach Klimaparameter in einer zeitlichen Auflösung von einer bis sechs Stunden vor.

- **CLM:** Das nicht-hydrostatische dynamische Modell CLM (Klimaversion des Lokalmodells des DWD; Kurzbeschreibung unter [www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/CLM/clm.html](http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/CLM/clm.html)), mittlerweile umbenannt und weiterentwickelt zu COSMO-CLM (<http://clm.gkss.de>), ist eine Gemeinschaftsentwicklung von etwa 25 verschiedenen Institutionen. Bisher liegen sog. Konsortialläufe für die SRES-Szenarien A1B und B1 mit den Randbedingungen aus dem globalen Klimamodell ECHAM5/MPI-OM für 1960-2100 vor.
- **STAR:** Das statistische Modell STAR (Statistisches Regionalmodell: Kurzbeschreibung unter [www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/STAR/star.html](http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/STAR/star.html)) wurde am PIK entwickelt. Basierend auf einem großräumig vorgegebenen Temperaturtrend von +1,4°C für 2001-2055, der sich aus dem globalen Klimamodell ECHAM4 für das Emissionsszenario A1B ergibt, wurde ein regionales Klimaszenario bis 2055 für Deutschland erstellt. Der Output besteht aus Tageswerten für elf Klimaparameter für mehr als 2000 Wetterstationen in Deutschland. Dieses Modell wird für die regionalen Klimaszenarien dieser Studie (s. Kap. 3 und Kap. 4) nicht verwendet, da es erstens nur bis zum Jahr 2055 rechnet und zweitens das ältere globale Klimamodell ECHAM4 für die Randbedingungen nutzt (die neue Version STAR II rechnet bis 2060 und basiert auf ECHAM5/MPI-OM).
- **WettReg:** Das auf einer Typisierung von Wetterlagen basierende statistische Modell WettReg (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode: Kurzbeschreibung unter [www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/WettReg/wettreg.html](http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/WettReg/wettreg.html)) wurde von der CEC in Potsdam entwickelt. In einer Studie für das UBA wurden basierend auf den SRES-Szenarien A1B, A2 und B1 regionale Klimaprojektionen für Deutschland für den Zeitraum 1950-2100 erstellt. Die Randbedingungen lieferte das globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM.

## 2.4 Unsicherheiten in den regionalen Klimaprojektionen

Bei der Erstellung regionaler Klimaprojektionen ist zu beachten, dass die Aussagen mit Unsicherheiten behaftet sind. Dabei lassen sich v.a. folgende Quellen für Unsicherheit unterscheiden (BMVBS 2007, Bundesregierung 2008, Daschkeit & Renken 2009, Walkenhorst & Stock 2009):

1. Die Unsicherheit der zukünftigen **Treibhausgasemissionen** (s. Abb. 3 links) bzw. der zukünftigen Entwicklung der das Klima bestimmenden natürlichen und anthropogenen Größen wie z.B. die Art der Landnutzung: Die Unsicherheit aus der globalen Emissionsentwicklung kann durch die Berücksichtigung des Spektrums der SRES-Szenarien näherungsweise erfasst werden. Die globalen Auswirkungen der unterschiedlichen SRES-Szenarien sind bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts ähnlich und die Unsicherheit nimmt zu, je weiter der Zeithorizont in der Zukunft liegt (s. Abb. 3 rechts).

2. Die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den **globalen Klimamodellen** (s. Abb. 3 ganz rechts), deren Ergebnisse als Randbedingungen für regionale Klimamodelle dienen: Die aus den globalen Klimamodellen resultierende Unsicherheit kann dadurch abgeschätzt werden, dass die Ergebnisse verschiedener globaler Modelle für ein und dasselbe SRES-Szenarien miteinander verglichen werden.

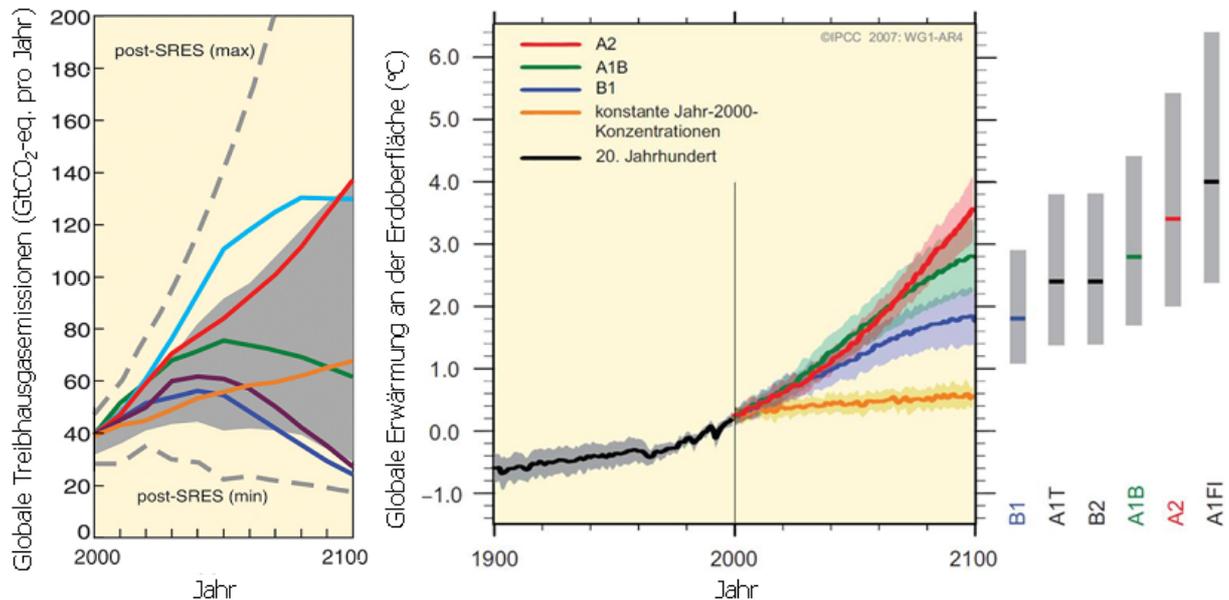


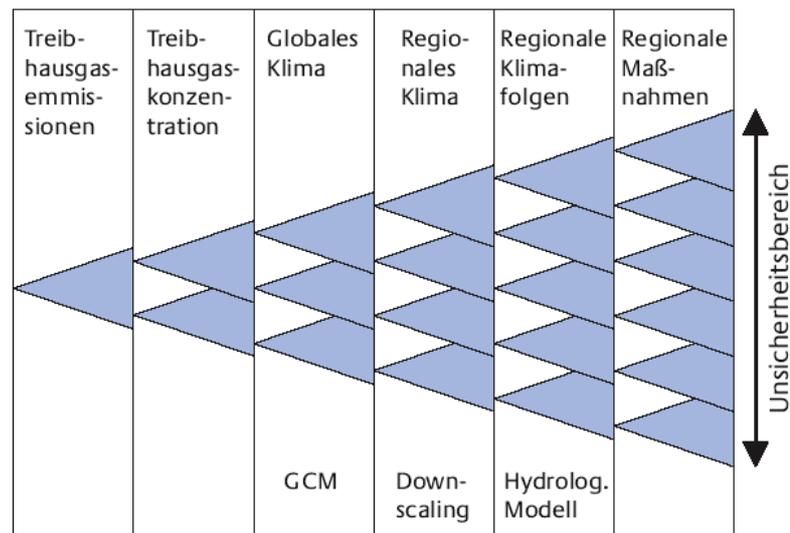
Abb. 3: SRES-Szenarien der globalen Treibhausgasemissionen bis 2100 (links: Unsicherheiten bezüglich der Treibhausgasemissionen) sowie Beobachtungsdaten der globalen mittleren Temperatur von 1900 bis 2000 und Projektionen der globalen Erwärmung bis 2100 (rechts: Unsicherheiten bezüglich der Emissionen). Die Balken rechts außen geben für jedes illustrative SRES-Szenario die Bandbreite der Unsicherheit aufgrund der Verwendung verschiedener Klimamodelle an (Unsicherheiten bezüglich der globalen Klimamodelle)(verändert nach IPCC 2007b sowie Walkenhorst & Stock 2009).

3. Die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den **regionalen Klimamodellen**: Zur Abschätzung der aus den regionalen Klimamodellen resultierenden Unsicherheit können die Ergebnisse verschiedener Modelle bzw. Modellansätze miteinander verglichen werden, wenn dasselbe SRES-Szenarien und dasselbe globale Klimamodell zugrunde gelegt wird. So deuten Analysen regionaler Klimaprojektionen für Europa bis 2100 darauf hin, dass bei monatlichen und jährlichen Mitteltemperaturen die Unsicherheit durch das jeweils verwendete regionale Klimamodell im Vergleich zu den Unsicherheiten aus den SRES-Szenarien und Globalmodellen klein ist. Hingegen sind z.B. bei den täglichen Minimal- und Maximaltemperaturen sowie bei den Niederschlägen die drei Unsicherheiten von der gleichen Größenordnung (IPCC 2007a). Bezüglich der räumlichen Auflösung muss einschränkend gesagt werden, dass die in den dynamischen Klimamodellen abgebildeten physikalischen Prozesse den realen Prozessen nur annähernd entsprechen. Insbesondere kleinskalige dynamische Vorgänge (z.B. Wolkenbildung) müssen dabei pauschal parametrisiert und raum-zeitlich gemittelt werden. Somit könnte eine Erhöhung der Auflösung die enthaltenen Fehler sogar vergrößert. Eine Grenze der horizontalen Auflösung in den Regionalmodellen liegt derzeit bei 10 x 10 km (Walkenhorst & Stock 2009).
4. Die Unsicherheit, die dadurch entsteht, dass sich die Startbedingungen für die **Simulationsläufe** der Regionalmodelle unterscheiden und dass das modellierte Klima nur aus einer begrenzten Anzahl von Modelljahren geschätzt werden muss. Ihre Größe hängt ab von der An-

zahl unterschiedlicher Realisierungen des projizierten Klimas, d.h. von der Anzahl der unterschiedlichen Rechenläufe eines Klimamodells, die durch Variation der Anfangsbedingungen der meteorologischen Felder zustande kommen. Selbst für ein SRES-Szenarien und ein Globalmodell unterscheiden sich verschiedene Rechenläufe je nach Anfangsbedingungen und ergeben so unterschiedliche Klimaprojektionen. Diese Unsicherheit tritt grundsätzlich bei allen Klimamodellen auf, unabhängig von Typ (statistisch oder dynamisch) und raum-zeitlicher Auflösung. Allerdings kann mit statistischen Modellen in der Regel eine erheblich größere Anzahl von Realisierungen gerechnet werden als mit dynamischen Modellen, so dass die Unsicherheit bei statistischen Modellen leichter reduziert werden kann (Spekat et al. 2007).

5. Eine weitere Unsicherheitsvergrößerung resultiert aus der Verwendung der Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen in **Klimawirkungs- oder Klimafolgenmodellen**: Die in den regionalen Klimaprojektionen festgelegten Veränderungen werden häufig in verschiedenste Wirk- bzw. Folgenmodelle eingespeist, um z.B. Analysen zur regionalen Vulnerabilität durchführen und daraus regionale Anpassungsmaßnahmen und -strategien ableiten zu können. Da diese Modelle notwendigerweise die Wirklichkeit nur vereinfacht betrachten können und deshalb ebenfalls Unsicherheiten in ihren Aussagen beinhalten, können sich die Spannbreiten der resultierenden Modellergebnisse vergrößern.

Die Größe der genannten verschiedenen Unsicherheitsaspekte lässt sich nur schwer abschätzen und sie kann je nach Klimaparameter, Region und Zeithorizont variieren. Die **Abb. 4** fasst alle Unsicherheitsquellen zusammen und verdeutlicht, dass sich der Unsicherheitsbereich im ungünstigen Fall stark vergrößern kann. Für die Klimaanpassungsforschung sind insbesondere solche Fragen und Probleme bedeutsam, die sich mit der Ableitung von regionalen Anpassungsstrategien und -maßnahmen aus den großen Unsicherheitsbereichen beschäftigen.



**Abb. 4:** Vergrößerung der statistischen Unsicherheit bei der Übertragung globaler SRES-Szenarien in regionale Klimafolgen und -maßnahmen (aus BMVBS 2007).

Bei der Erstellung von regionalen Klimaprojektionen und darauf basierenden regionalen Klimaszenarien für die Abschätzung von Klimafolgen und Anpassungserfordernissen ist also zu beachten, dass ihnen Unsicherheiten inhärent sind und die Gründe für die Fokussierung von Maßnahmen zur Klimaanpassung auf einen bestimmten Bereich der Ergebnisspanne der regionalen Aussagen zum Klimawandel im Zuge von Anpassungsstrategien oder -prozessen explizit kommuniziert werden sollten (Mahrenholz 2007, Jacob et al. 2008). Es wird daher von der Klimaforschung empfohlen, neben den mittleren Änderungen für ein ausgewähltes Emissionsszenario zusätzlich immer auch die emissions- und modellbedingten Spannweiten der Änderungen mit zu betrachten (s.a. Kap. 5).

### 3. Erstellung der beiden regionalen Klimaszenarien

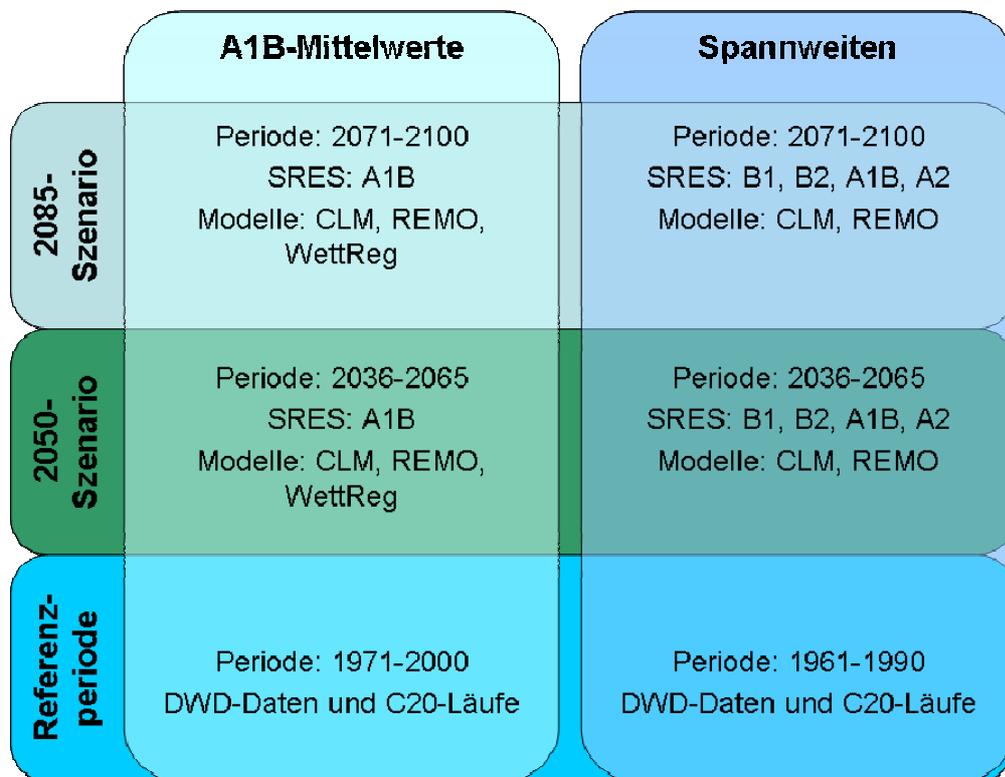
Im Folgenden wird – basierend auf der in Kap. 2.3 beschriebenen Vorgehensweise für die Erstellung regionale Klimaprojektionen – dargestellt, auf welchem Ansatz und auf welchen Randbedingungen die in dieser Studie vorgestellten zwei regionalen Klimaszenarien basieren. In Kap. 4 wird dann dargestellt, welche Veränderungen (Differenzen und absolute Werte) für die Klimaparameter aus den regionalen Klimamodellen resultieren.

#### 3.1 Ansatz und Randbedingungen

Aus den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle (s. Kap. 2.3.4) können regionale Klimaszenarien erstellt werden: In ihnen wird festgelegt, wie sich für die jeweiligen Betrachtungszeiträume die möglichen mittleren klimatischen Randbedingungen inklusive der Spannweiten für eine Betrachtungsregion verändern. Der im Folgenden beschriebene Ansatz für die Erstellung der beiden regionalen Klimaszenarien basiert auf der Zusammenarbeit mit zwei Institutionen: Zum einen steht innerhalb der BMBF-Förderaktivität KLIMZUG das Climate Service Center (CSC; früher Service Gruppe Anpassung SGA) für Beratung und Datenlieferung zu Verfügung. Die Klimadaten wurden vom CSC aus der CERA-Datenbank (<http://cerawww.dkrz.de>) des World Data Center for Climate (WDCC) bereitgestellt. Zum anderen konnte mit dem vom Norddeutschen Klimabüro ([www.klimabuero.de](http://www.klimabuero.de), angesiedelt am GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht) erstellten Norddeutschen Klimaatlas ([www.norddeutscher-klimaatlas.de](http://www.norddeutscher-klimaatlas.de)) kooperiert werden. Diese Vorgehensweise spiegelt sich in den zwei Bestandteilen der regionalen Klimaszenarien wider: einerseits sind auf der Basis des A1B-Emissionsszenarios Jahrs- und saisonale Mittelwerte aus den Klimarohdaten berechnet und andererseits unter Verwendung weiterer SRES-Szenarien Spannweiten möglicher Klimaänderungen zusammengestellt worden, um ein Szenario möglicher Klimaänderungen für die Mitte des 21. Jahrhunderts (2050-Szenario) und eins für das Ende des 21. Jahrhunderts (2085-Szenario) festlegen zu können.

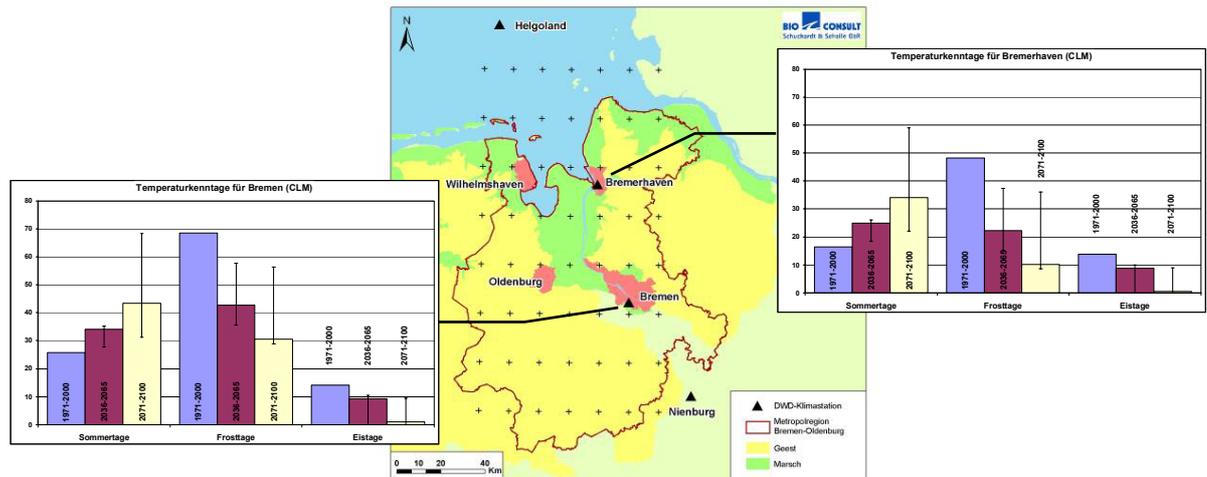
Die A1B-Mittelwerte basieren auf der Auswertung der Klimadaten aus der CERA-Datenbank. Für die Zusammenstellung der Spannweiten, für die auf die Auswertungen des Norddeutschen Klimaatlas zurückgegriffen werden konnte und der ebenfalls auf den Klimadaten der CERA-Datenbank basiert, mussten daher keine zusätzlichen Auswertungen der Rohdaten erfolgen. Im Norddeutschen Klimaatlas ist eine Art Ensemble-Ansatzes umgesetzt, der nicht nur Daten verschiedener Regionalmodelle nutzt, sondern auch verschiedene Läufe der jeweiligen Regionalmodelle und mehrere SRES-Szenarien auswertet. Es sind bisher insgesamt 11 verschiedene Klimarechnungen bzw. -läufe eingegangen: u.a. 4 Klimarechnungen mit dem regionalen Klimarechenmodell CLM (Hollweg et al. 2008) und 3 Klimarechnungen durch das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg mit dem regionalen Klimarechenmodell REMO (Jacob et al. 2008). Somit lassen sich die modellbedingten Spannweiten der möglichen Klimaentwicklung darstellen und die in Kap. 2.4 beschriebenen Unsicherheitsdimension bezüglich der Aussagen der regionalen Klimamodellierung einschätzen. Zusätzlich können so auch die emissionsbedingten Spannweiten berücksichtigt werden, da im Norddeutschen Klimaatlas neben dem Emissionsszenario A1B auch die Emissionsszenarien B1, B2 und A2 (s. Kap. 2.3.2) berücksichtigt worden sind.

Die Randbedingungen für die Erstellung der regionalen Klimaszenarien, die in Anlehnung an nord-west2050 für die vorliegende Studie gewählt worden sind, sind in **Abb. 5** illustriert.



**Abb. 5:** Randbedingungen für die Erstellung der beiden regionalen Klimaszenarien.

Ein erster Schritt der Szenarioerstellung ist die **räumliche Abgrenzung** der zu betrachtenden Region. Dafür wurden die geografischen Länge und Breite der MPR HB-OL bestimmt, um aus den dynamischen Regionalmodellen CLM und REMO die entsprechenden Gitterzellen auswählen zu können. Zusätzlich wurden für die DWD- und WettReg-Daten Messstationen in der Region ausgewählt (s. **Abb. 6**). Sowohl für die A1B-Mittelwerte als auch für die Spannweiten sind identische geografische Koordinaten herangezogen worden, die auch im Norddeutschen Klimaatlas implementiert bzw. auswählbar sind.



**Abb. 6:** Karte mit den Grenzen der MPR HB-OL, den Gitterzellenschnittpunkten (hier nur für CLM) und den ein Transekt bildenden DWD-Klimastationen. In den beiden Balkendiagrammen sind die CLM-Werte und die Spannweiten für die Referenzperiode (1971-2000: blau), das 2050-Szenario (2036-2065: lila) und das 2085-Szenario (2071-2100: gelb) der Temperaturtage (von links nach rechts: Sommer-, Frost- und Eistage) für Bremen (links) und Bremerhaven (rechts) dargestellt (zu den Werte vgl. auch Kap. 4).

Ein nächster Schritt ist die Festlegung der zu betrachtenden **Zeiträume**, für die Aussagen über den möglichen Klimawandel getroffen werden sollen. Für den hier gewählten Ansatz ist ein Szenario für die Mitte des 21. Jahrhunderts, welches die 30-jährige Zukunftsperiode 2036-2065 mittelt (sog. 2050-Szenario), und ein Szenario für das Ende des 21. Jahrhunderts, welches die 30-jährige Zukunftsperiode 2071-2100 mittelt (sog. 2085-Szenario), erstellt worden. Als Vergleichszeitraum, also die Referenzperiode zur Berechnung der zukünftigen Differenzen und absoluten Werte, sind die Jahre 1971-2000 sowohl für die Messdaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) als auch für die Gegenwartsläufe der Regionalmodelle (sog. C20-Läufe) herangezogen worden. Die Spannweitenbetrachtung basiert davon abweichend auf der Referenzperiode 1961-1990 (vgl. **Abb. 5**).

Für beide Szenarien musste als anschließender Arbeitsschritt ausgewählt werden, welche **SRES-Szenarien** (s. Kap. 2.3.2) und welche **regionale Klimamodelle** (s. Kap. 2.3.4) bei der Erstellung der regionalen Klimaszenarien berücksichtigt werden sollten. Bezüglich der Mittelwerte wurde das A1B-Emissionsszenario gewählt, da einerseits die beobachteten CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich die in den B-Storylines angenommen überschreiten, andererseits aber die globalen Bemühungen zum Klimaschutz doch dazu führen könnten, dass die im A2-Emissionsszenario festgelegten nicht erreicht werden (vgl. a. Kap. 5.2). Zusätzlich basieren viele regionale Aussagen zum Klimawandel und seinen Folgen auf dem A1B-Szenario, die so für vergleichende Betrachtungen herangezogen werden können. Bezüglich der Regionalmodelle sind die für Deutschland aktuell verfügbaren, deren Resultat in der CERA-Datenbank vorgehalten werden, betrachtet worden (außer STAR: zur Begründung s. Kap. 2.3.4).

Die im Kap. 4 aufgeführten Werte stellen die klimawandelbedingten Veränderungen der Klimaparameter als Differenzen und absolute Werte (in Prozent, Tagen, Stunden usw.) bezogen auf die Referenzperiode dar. Die absoluten Werte sind nicht unmittelbar aus den Regionalmodellen zu entnehmen, sondern müssen berechnet werden. Hierzu werden die Klimasimulationen der Gegenwart (die sog. C20-Modellläufe für die Jahre 1971-2000) mit den Messungen der Referenzperiode verglichen (sog. **Biaskorrektur**; Deutschländer et al. 2009). Die Berechnung der absoluten Werte

erfolgt anhand folgender Schritte: von den Modellierungsergebnissen der Zukunftszeiträume werden die Modellierungsergebnisse der Gegenwärtsläufe abgezogen. Hieraus erhält man die Differenzen zwischen jeweiliger Zukunfts- und der Referenzperiode (diese sind in den **Tab. 6** und **Tab. 9** dargestellt). Um eine Einordnung der Größenordnung der Differenzen bezogen auf die Beobachtungsdaten zu ermöglichen, werden im nächsten Berechnungsschritt die Differenzen auf die Gegenwärtswerte der Referenzperiode addiert bzw. subtrahiert, um absolute Werte zu erhalten (diese sind in den **Tab. 7** und **Tab. 10** dargestellt).

Hintergrund dieser Korrekturen ist die Erkenntnis, dass die regionalen Klimamodelle mit ihren Gegenwärtsläufen die gemessenen Klimadaten nicht exakt reproduzieren. Es kommt in den einzelnen Regionalmodellen zu unterschiedlichen Abweichungen: So sind z.B. die Modellierungsergebnisse bezüglich des Niederschlags von REMO eher zu feucht (Jacob et al. 2008) und die Gegenwärtsläufe der beiden Modelle CLM und REMO weichen z.B. für die Parameter Schneemenge, -bedeckung und -tage deutlich ab. Details bezüglich des Vorgehens für die Biaskorrekturen sowie die Prüfung der Modell- und Parametergüte sind Bestandteil kontinuierlicher Aktivitäten der Klimawissenschaftler und sollen der Belastbarkeit und Aussagefähigkeit der Klimamodellergebnisse verbessern (vgl. Kap. 5.2).

### 3.2 Überblick über die Klimaparameter

Die für die beiden regionalen Klimaszenarien berechneten bzw. ausgewerteten Klimaparameter mit ihrer Beschreibungen bzw. Definitionen sind in **Tab. 4** dargestellt. Die Definition der Parameter resultiert aus den Datensätzen des DWD und der CERA-Klimadatenbank, in der die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle eingestellt sind. In beiden Datenquellen sind die Daten von Temperatur und Niederschlag zusätzlich weiter aufbereitet worden, um die in **Tab. 4** aufgeführten Kenntage ableiten zu können. Aus den Parametern lassen sich weitere sektor- oder handlungsfeldspezifische Kenntage ableiten, die für Klimafolgen- oder Vulnerabilitätsanalyse genutzt werden können (für Tourismuswirtschaft und Stadtplanung z.B. schwüle, nebelige oder sonnige Tage).

**Tab. 4:** Zusammenstellung über die verfügbaren und ausgewerteten Klimaparameter vom DWD und aus den regionalen Klimamodellen inklusive der Spannweiten (x = vorhanden, - = nicht vorhanden, \* = saisonale Auswertung vorhanden).

Parameter	DWD	CLM	REMO	WettReg	Spannweiten
<b>Jahresmitteltemperatur</b> (2 m Höhe)	x*	x*	x*	x*	x*
<b>Sommertage:</b> Tage mit Maximaltemperatur größer oder gleich 25°C	x	x	x	-	x
<b>Tropische Nächte:</b> Tage mit Minimaltemperatur größer oder gleich 20°C	x	x	x	-	x
<b>Frosttage:</b> Tage mit Minimaltemperatur kleiner oder gleich 0°C	x	x	x	-	x
<b>Eistage:</b> Tage mit Maximaltemperatur kleiner oder gleich 0°C	x	x	x	-	x
<b>Gesamtniederschlag</b>	x*	x*	x*	x*	x*
<b>Regentage:</b> Tage mit mehr als 1 mm Niederschlag	x	x	x	x	-

Parameter	DWD	CLM	REMO	WettReg	Spannweiten
<b>Starkregentage:</b> Tage mit mind. 20 mm Niederschlag	X	X	X	X	X
<b>Schneemenge</b>	X	X	-	-	X
<b>Schneebedeckung:</b> Tage mit Schneedecke	X	X	-	-	X
<b>Schneetage:</b> Tage mit Schneefall	X	X	X	-	X
<b>Mittlere Windgeschwindigkeit</b> (in 10 m Höhe über Boden)	X	X	X	X	X
<b>Maximale Windgeschwindigkeit</b> (in 10 m Höhe über Boden)	X	X	X	-	-
<b>Sturmtage:</b> maximale Windgeschwindigkeit größer oder gleich 17,2 m/s	X	X	X	-	X
<b>Windstille Tage:</b> maximale Windgeschwindigkeit kleiner oder gleich 3,3 m/s	X	X	X	-	X
<b>Sonnenscheindauer</b>	X	X	-	X	X
<b>Bewölkungsgrad</b>	X	X	X	X	X

Neben den in **Tab. 4** aufgeführten Klimaparametern ist es insbesondere für die Küstenregion notwendig, weitere Parameter des Klimawandels zu betrachten und auszuwerten. Vor allem die klimawandelbedingt veränderten Wasserstände spielen für die Küste der MPR HB-OL eine große Rolle. Diese können aber nicht aus den regionalen Klimamodellen abgeleitet werden, so dass für sie die Ergebnisse der globalen Klimamodelle herangezogen werden müssen sowie weitere Beobachtungen bzw. Messungen und Literaturlauswertungen zu berücksichtigen sind, die in der folgenden **Tab. 5** zusammengefasst sind.

**Tab. 5:** Parameter, die nicht aus den regionalen Klimamodellen abgeleitet werden können mit den ausgewerteten Quellen.

Parameter	Quellen
<b>Mittlerer Meeresspiegel (MW)</b>	IPCC (2007), Jensen & Mudersbach (2007), Rahmstorf (2007 und 2009), Rahmstorf & Richardson (2007), Rahmstorf et al. (2007), Grinsted et al. (2009), WBGU (2006), UKCIP (2008)
<b>Mittleres Tidehochwasser (MThw)</b>	Jensen & Mudersbach (2004 und 2007), Woth & von Storch (2008), Grabemann et al. (2005)
<b>Wasserstände durch Windstau:</b>	von Storch et al. (1997 und 2005), Woth et al. (2005), Woth & von Storch (2008), Wittig et al. (2007)
<b>Sturmflutwasserstände:</b> Summe aus mittlerem Meeresspiegel, MThw und Windstau	von Storch et al. (1997 und 2005) und eigene Berechnung

Hintergrund der Notwendigkeit auch für klimawandelbedingte Veränderungen von Wasserständen Angaben machen zu müssen ist die Erkenntnis, dass sie an den Küsten der MPR HB-OL deutlich

Wirkungen entfalten können, an die es sich anzupassen gilt (Schuchardt & Schirmer 2007). Folgende Aspekte sind dabei zu beachten:

- **Meeresspiegelanstieg:** Mit der globalen Erwärmung gehen eine thermische Expansion des Meerwassers sowie ein teilweises Abschmelzen der terrestrischen Eismassen einher, was den Meeresspiegel ansteigen lässt. Würde das gesamte grönländische Eis abschmelzen, was allerdings viele Jahrhunderte in Anspruch nehmen würde, käme es zu einem globalen Meeresspiegelanstieg von ca. 7 Meter. Das bislang noch schwer abzuschätzende Verhalten der großen grönländischen und arktischen Eisschilde birgt Unsicherheiten bezüglich der Aussagen über die Geschwindigkeit und die Höhe des Meeresspiegelanstiegs (IPCC 2007, BMVBS 2007, UBA 2008).
- **Tidehoch- und Tideniedrigwasser, Tidehub:** Der klimabedingte Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels wird sich in einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels der Küstenrandmeere wie der Nordsee fortsetzen. Dort und insbesondere auch in den Buchten und Ästuaren kann es zu einer Intensivierung der Gezeitendynamik kommen, bei der überwiegend das mittlere Tidehochwasser stärker ansteigt, als der mittlere Meeresspiegel. Insgesamt lässt der Klimawandel an den Küsten der Nordsee eine Zunahme des Tidehubs erwarten (Schirmer 2005, Grabemann et al. 2005, Schuchardt et al. 2008).
- **Tideströmungen:** Infolge veränderter Tidewasserstände und Fortschrittgeschwindigkeit der Tidewelle kommt es zu veränderten Tideströmungen an der Küste und in den Ästuaren (Wittig et al. 2007).
- **Extremsituationen:** Klimabedingte Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation, insbesondere veränderte Zugbahnen der Sturmtiefs sowie sich intensivierende Westwindlagen in der Deutschen Bucht, können häufiger extreme Wasserstands- und Seegangssituationen eintreten lassen. Sowohl die Wahrscheinlichkeit extremer Tidewasserstände (**Sturmfluten**) als auch die Wahrscheinlichkeit extremer Seegangsbedingungen (Intensität und Richtungen) könnte zunehmen (von Storch et al. 1997 und 2005, BMVBS 2007, Mai et al. 2004).
- **Morphodynamik:** Aus den vorgenannten Wirkungen des Klimawandels auf die Küste könnte sich eine Veränderung der Tiefenverteilung des Gewässerbodens ergeben, da Strömung, Seegang und Stofftransport in gegenseitiger Wechselwirkung mit der Morphodynamik stehen (BMVBS 2007, Wittig et al. 2007).

Die vom Klimawandel beeinflussten abiotischen Systeme haben Einfluss auf die biotischen Prozesse und damit auf die aquatischen und terrestrischen Natur- und Lebensräume der Region. Die globalen Projektionen beschäftigen sich jedoch zunächst mit den Folgen globaler Mittelwerte und der Abweichung von diesen Mittelwerten auf großmaßstäblicher Ebene. Regionale Auswirkungen z.B. auf die Deutsche Bucht, das Wattenmeer oder auf das Weserästuar, sind bisher in Ansätzen beschrieben worden (z.B. in Schuchardt et al. 2008, Wittig et al. 2007, Wittig & Schirmer 2006). Entsprechend variiert die Belastbarkeit der bisher möglichen regionalen Aussagen zu den Folgen der klimawandelbedingten Veränderungen einzelner Wasserstandsparameter.

## 4. Ergebnisse der beiden regionalen Klimaszenarien

Die folgenden Tabellen stellen die Ergebnisse der beiden regionalen Klimaszenarien für die MPR HB-OL dar. In der **Tab. 6** sind die **Differenzen der Jahresmittelwerte** und in **Tab. 7** die **absoluten Jahresmittelwerte** (für Temperatur und Niederschlag zusätzlich auch die saisonalen Mittelwerte: die Buchstaben kürzen die jeweiligen Monate ab) für das 2050-Szenario aufgeführt. Die **Tab. 8** stellt die nicht aus den regionalen Klimamodellen ableitbaren Parameter für die klimawandelbedingten **Wasserstandsänderungen** für das 2050-Szenario dar. Hier sind die regionspezifischen Annahmen über die Klimaparameter mittlerer Meeresspiegel, mittleres Tidehochwasser, Wasserstand durch Windstau und die resultierenden Sturmflutwasserstände für das 2050-Szenario zusammengestellt. In **Tab. 9**, **Tab. 10** und **Tab. 11** sind entsprechend die Werte für das 2085-Szenario zusammengefasst.

**Tab. 6:** Differenzen der Jahresmittelwerte unter Berücksichtigung des A1B-Emissionsszenarios für die Referenzperiode 1971-2000 und Differenzen der **Spannweiten** unter Berücksichtigung der Emissionsszenarien B1, B2, A1B und A2 für die Referenzperiode 1961-1990 für das **2050-Szenario** (2036-2065 bzw. 2041-2070). Für Temperatur und Niederschlag sind zusätzlich die saisonalen Mittelwerte dargestellt. Berücksichtigte Regionalmodelle sind REMO, CLM und WettReg (vgl. **Abb. 5**).

Parameter	CLM: A1B-Mittelwerte (Differenzen zw. 1971-2000 und 2036-2065)	REMO: A1B-Mittelwerte (Differenzen zw. 1971-2000 und 2036-2065)	WettReg: A1B-Mittelwerte (Differenzen zw. 1971-2000 und 2041-2070)	Spannweiten (Differenzen zw. 1961-1990 und 2036-2065)
Jahresmitteltemperatur	+1,5°C	+1,6°C	+1,4°C	+1,0 bis +2,0°C
Frühling (MAM)	+1°C	+1,1°C	+1°C	+0,3 bis +1,7°C
Sommer (JJA)	+1,6°C	+1,5°C	+1,1°C	+1,1 bis +1,8°C
Herbst (SON)	+1,8°C	+1,7°C	+1°C	+1,4 bis +2,2°C
Winter (DJF)	+1,8°C	+2°C	+2,4°C	+1,1 bis +2,8°C
Sommertage	+8,4 Tage	+8,2 Tage	-	+2 bis +9,6 Tage
Tropische Nächte	+1,6 Nächte	+1,7 Nächte	-	+0,3 bis +1,7 Nächte
Frosttage	-25,8 Tage	-18,7 Tage	-	-33 bis -10,8 Tage
Eistage	-4,9 Tage	-7,3 Tage	-	-16 bis -3,7 Tage
Gesamtniederschlag	+6,5%	+9,9%	-7,8%	+3 bis +9%
Frühling (MAM)	+6,3%	+5,9%	+2,3%	+2 bis +10%
Sommer (JJA)	-6,4%	0%	-28,7%	-13 bis +8%
Herbst (SON)	+18,5%	+26,3%	-14,2%	+2 bis +19%
Winter (DJF)	+8,6%	+7,9%	+42,7%	+9 bis +27%
Regentage	-5,3 Tage	-2,7 Tage	-5,9 Tage	-1,4 bis +2 Tage*
Starkregentage	+0,5 Tage	+1,4 Tage	+0,1 Tage	0 bis +1**
Schneemenge	-57%	-	-	-92 bis -38%
Schneebedeckung	-2,4 Tage	-23,3 Tage	-	-10 bis 0 Tage**
Schneetage	-1,5 Tage	-0,4 Tage	-	-2,5 bis +0,1 Tage
Mittlere Windgeschwindigkeit	+1,1%	+2,5%	-2,1%	0 bis +2%
Maximale Windgeschwindigkeit	+4,2%	+3,5%	-	-
Sturmtage	+0,47 Tage	+0,34 Tage	-	-1,3 bis +3 Tage
Windstille Tage	-0,37 Tage	-2,27 Tage	-	-0,2 bis +0,8 Tage
Sonnenscheindauer	-2,8%	-	+9,5%	-5 bis -2%
Bewölkungsgrad	0%	+0,3%	-6%	-1 bis +1%

\* Spannweiten für Regentage beziehen sich auf Tage mit größer oder gleich 1 mm Niederschlag;

\*\* Spannweiten beziehen sich auf die Zukunftsperiode 2041 bis 2070;

**Tab. 7: Jahresmittelwerte** unter Berücksichtigung des A1B-Emissionsszenarios für die Referenzperiode 1971-2000 und absolute Werte für die **Spannweiten** unter Berücksichtigung der Emissionsszenarien B1, B2, A1B und A2 für die Referenzperiode 1961-1990 für das **2050-Szenario** (2036-2065 bzw. 2041-2070). Für Temperatur und Niederschlag sind zusätzlich die saisonalen Mittelwerte dargestellt. Berücksichtigte Regionalmodelle sind REMO, CLM und WettReg (vgl. **Abb. 5**). Die DWD-Werte der Referenzperiode sind in **Tab. 1** dargestellt.

Parameter	CLM: A1B-Mittelwerte (2036-2065)	REMO: A1B-Mittelwerte (2036-2065)	WettReg: A1B-Mittelwerte (2041-2070)	Spannweiten (2036-2065)
Jahresmitteltemperatur	10,75°C	10,78°C	10,6°C	10,22 bis 11,22°C
Frühling (MAM)	9,12°C	9,3°C	9,16°C	8,46 bis 9,86°C
Sommer (JJA)	17,97°C	17,86°C	17,53°C	17,51 bis 18,21°C
Herbst (SON)	11,63°C	11,49°C	10,88°C	11,23 bis 12,03°C
Winter (DJF)	4,16°C	4,36°C	4,72°C	3,46 bis 5,16°C
Sommertage	26,62 Tage	26,49 Tage	-	20,25 bis 27,85 Tage
Tropische Nächte	1,89 Nächte	2,04 Nächte	-	0,61 bis 2,01 Nächte
Frosttage	30,52 Tage	37,62 Tage	-	23,33 bis 45,53 Tage
Eistage	8,52 Tage	6,12 Tage	-	0 bis 9,71 Tage
Gesamtniederschlag	794 mm	831 mm	726 mm	756 bis 800 mm
Frühling (MAM)	158 mm	158 mm	149 mm	149 bis 161 mm
Sommer (JJA)	191 mm	208 mm	179 mm	181 bis 225 mm
Herbst (SON)	258 mm	281 mm	198 mm	217 bis 253 mm
Winter (DJF)	188 mm	186 mm	211 mm	183 bis 213 mm
Regentage	120 Tage	122 Tage	119 Tage	124 bis 127 Tage*
Starkregentage	3,59 Tage	4,54 Tage	3,23 Tage	3,1 bis 4,1 Tage**
Schneemenge	9 mm	-	-	0,94 bis 7,26 mm
Schneebedeckung	14,6 Tage	0 Tage	-	7 bis 17 Tage**
Schneetage	9,84 Tage	10,93 Tage	-	8,6 bis 11,4 Tage
Mittlere Windgeschwindigkeit	5,77 m/s	5,8 m/s	-	5,69 bis 5,8 m/s
Maximale Windgeschwindigkeit	19,18 m/s	19,06 m/s	-	-
Sturmtage	7,91 Tage	7,78 Tage	-	6,14 bis 10,44 Tage
Windstille Tage	0,53 Tage	0 Tage	-	0,7 bis 1,7 Tage
Sonnenscheindauer	1555 Stunden	-	1749 Stunden	1520 bis 1568 Stunden
Bewölkungsgrad	67,52%	67,72%	63,59%	66,84 bis 68,2%

\* Spannweiten für Regentage beziehen sich auf Tage mit größer oder gleich 1 mm Niederschlag;

\*\* Spannweiten beziehen sich auf die Zukunftsperiode 2041 bis 2070;

**Tab. 8:** Annahmen über die klimawandelbedingten Veränderungen des mittleren Meeresspiegels, des mittleren Tidehochwassers, des Wasserstands durch Windstau und der Sturmflutwasserstände für das **2050-Szenario**. Diese Parameter sind auf Basis der in **Tab. 5** angegebenen Quellen abgeschätzt worden.

Parameter	A1B-Mittelwerte	Spannweiten
<b>Mittlerer Meeresspiegel</b> (Vergleich zu 1980-1999)	+17,5 cm	+9 bis +70 cm
<b>Mittleres Tidehochwasser</b> (MThw: Hochrechnung vergangener Messwerte)	+15,5 cm	+10 bis +21 cm
<b>Wasserstände durch Windstau</b>	+10 cm	0 bis +20 cm
<b>Sturmflutwasserstände</b> (Summe aus mittlerem Meeresspiegel, MThw und Windstau)	+43 cm	+19 bis +111 cm

Aus den in den **Tab. 6** bis **Tab. 8** aufgeführten Ergebnissen der regionalen Klimamodelle bzw. den getroffenen Annahmen über die Veränderungen der einzelnen Klimaparameter, können für die MPR HB-OL folgende überblicksartig Trendergebnisse für das **2050-Szenario** getroffen werden:

- Die Jahresmitteltemperatur nimmt zu, wobei die Wintermonate sich am deutlichsten und die Frühlingsmonate sich am geringsten erwärmen (alle drei Regionalmodelle zeigen hier einen weitgehend einheitlichen Trend). Küstenfernere Bereiche der Region zeigen eine stärkere Temperaturzunahme im Winter als küstennahe, wobei die gegenwärtigen winterlichen Temperaturmittelwerte im Binnenland niedriger sind als an der Küste.
- Die Zahl der Sommertage nimmt um über die Hälfte und die der tropischen Nächte um ca. das fünffache im Vergleich mit der Referenzperiode zu (die dynamischen Regionalmodelle stimmen hier überein).
- Die Zahl der Frosttage und der Eistage nimmt um ca. die Hälfte ab (die dynamischen Regionalmodelle stimmen auch hier überein).
- Der Jahresgesamtniederschlag verändert sich je nach Klimamodell unterschiedlich: während die dynamischen Modelle (CLM und REMO) eine Zunahme berechnen, kommt es im statistischen Modell WettReg zu einer Abnahme vergleichbarer Größenordnung. Unterschiede sind auch bei den saisonalen Niederschlagsmengen zu beobachten: in CLM und REMO nimmt die Regenmenge am stärksten in den Herbstmonaten zu, während WettReg abnehmende Niederschlagsmengen berechnet. Bei allen Modellen ist in den Sommermonaten eine Abnahme und in den Wintermonaten eine Zunahme der Niederschlagsmengen zu beobachten, die in WettReg in beiden Fällen am deutlichsten ist. Die jahreszeitliche Verteilung der saisonalen Regenmengen bleibt weitgehend gleich, wobei sich abzeichnet, dass zukünftig der Winter den Sommer als regenreichstes Quartal ablöst. Küstennah ist eine etwas größere Zunahme des Jahresniederschlags und des Winterniederschlags bei schon heute höheren Niederschlagsmengen festzustellen. Die Sommerniederschläge nehmen küstennah stärker ab.
- Die Zahl der Regentage nimmt leicht ab, die Zahl der Starkregentage z.T. deutlicher zu.
- Die Schneemenge nimmt deutlich ab, wobei allerdings nur Ergebnisse eines Modells vorhanden sind. Die Zahl der Tage mit Schneedecke nimmt ab, wobei sich allerdings die beiden dynamischen Modelle hinsichtlich der Höhe stark unterscheiden. Tage mit Schneefall (Schneetage) nehmen geringfügig ab.
- Die mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten nehmen zu, wobei die Zunahme bei den maximalen Geschwindigkeiten deutlicher ist. Für die mittleren Geschwindigkeiten berechnet WettReg eine Abnahme. Die Zahl der Sturmtage nimmt in CLM und REMO einheitlich leicht zu. Die Zahl der windstillen Tage nimmt deutlich ab, wobei die Unterschiede zwischen CLM und REMO groß sind. Die Zunahme der Windgeschwindigkeiten und Sturmtage ist küstennah größer als im Binnenland.
- Die Veränderungen in der Sonnenscheindauer und des Bewölkungsgrads sind uneinheitlich: bezüglich der Sonnenscheindauer berechnet CLM eine Abnahme, WettReg eine Zunahme. Für den Bewölkungsgrad ist es umgekehrt: CLM und REMO berechnen eine nahezu unveränderte

prozentuale Bedeckung, während WettReg eine geringe Abnahme ergibt. Insgesamt verändern sich beide Parameter nur geringfügig.

- Der mittlere Meeresspiegel, das mittlere Tidehochwasser, die Wasserstände durch Windstau und damit die Sturmflutwasserstände steigen im Mittel um einige Dezimeter an. Die obere Spannweite für die Sturmflutwasserstände überschreitet 1 Meter.

Der Vergleich der A1B-Mittelwerte mit den **Spannweiten** für das **2050-Szenario** ergibt folgende Einordnung:

- Die Veränderungen für die Jahresmitteltemperatur sowie für die Frost- und Eistage liegen im mittleren Bereich, die Veränderungen für die Sommertage und tropische Nächte im oberen Bereich der Spannweiten.
- Die Veränderungen des Gesamtniederschlags und der Starkregentage aus CLM und REMO bewegen sich am oberen Rand der Spannweiten bzw. liegen darüber; WettReg zeigt mit einer Abnahme ein gegenläufiges Bild und fällt aus den Spannweiten heraus. Die Veränderungen bezüglich der Regentage liegen mit stärkeren Abnahmen ebenfalls außerhalb der Spannweiten.
- Die Einordnung der Veränderungen in Schneemenge, -bedeckung und -tage sowie Windgeschwindigkeiten und Windkenntagen ist uneinheitlich, da z.T. nur Ergebnisse einzelner Regionalmodelle vorliegen, für die Spannweiten andere Randbedingungen herangezogen werden mussten und die Gegenwärtsläufe mit den gemessenen Werten teilweise wenig übereinstimmen.
- **Fazit:** Bis zum Jahr 2050 stellen die Veränderungen aus dem A1B-Emissionsszenario im Vergleich mit den Spannweiten für die Parameter Sommertage, tropische Nächte, Gesamtniederschlag und Starkregentage ein starkes, bezüglich der Parameter Jahresmitteltemperatur, Frosttage und Eistage ein mittleres Klimasignal dar. Die Ergebnisse der A1B-Mittelwerte für die Niederschlags- und Windparameter über- oder unterschreiten teilweise die Spannweiten.

In den folgenden Tabellen werden die Ergebnisse für das 2085-Szenario dargestellt (in **Tab. 9** Differenzen, in **Tab. 10** absolute Werte und in **Tab. 11** die regionsspezifischen Annahmen über die Klimaparameter mittlerer Meeresspiegel, mittleres Tidehochwasser, Wasserstand durch Windstau und die resultierenden Sturmflutwasserstände).

**Tab. 9: Differenzen der Jahresmittelwerte** unter Berücksichtigung des A1B-Emissionsszenarios für die Referenzperiode 1971-2000 und Differenzen der **Spannweiten** unter Berücksichtigung der Emissionsszenarien B1, B2, A1B und A2 basierend für die Referenzperiode 1961-1990 für das **2085-Szenario** (2071-2100). Für Temperatur und Niederschlag sind zusätzlich die saisonalen Mittelwerte dargestellt. Berücksichtigte Regionalmodelle sind REMO, CLM und WettReg (vgl. **Abb. 5**).

Parameter	CLM: A1B-Mittelwerte (Differenzen zw. 1971-2000 und 2071-2100)	REMO: A1B-Mittelwerte (Differenzen zw. 1971-2000 und 2071-2100)	WettReg: A1B-Mittelwerte (Differenzen zw. 1971-2000 und 2071-2100)	Spannweiten (Differenzen zw. 1961-1990 und 2071-2100)
Jahresmitteltemperatur	+2,7°C	+2,8°C	+2,3°C	+1,9 bis +3,1°C
Frühling (MAM)	+1,8°C	+2°C	+1,1°C	+1,3 bis +2,4°C
Sommer (JJA)	+2,7°C	+2,6°C	+2°C	+1,8 bis +3,1°C
Herbst (SON)	+2,9°C	+2,9°C	+2°C	+2,1 bis +3,2°C
Winter (DJF)	+3,4°C	+3,8°C	+3,9°C	+2,3 bis +3,6°C
Sommertage	+17,6 Tage	+14,2 Tage	-	+5,6 bis +18,8 Tage
Tropische Nächte	+4 Nächte	+4 Nächte	-	+1,3 bis +4,2 Nächte
Frosttage	-38 Tage	-26,7 Tage	-	-39,5 bis -19,4 Tage
Eistage	-13,2 Tage	-10,1 Tage	-	-17,6 bis -5,9 Tage
Gesamtniederschlag	+6,1%	+5,8%	-3,4%	+4 bis +10%
Frühling (MAM)	+9,9%	+7,7%	0%	+7 bis +16%
Sommer (JJA)	-18,9%	-15,3%	-24,8%	-22 bis -9%
Herbst (SON)	+10,4%	+14,8%	-12%	+8 bis +17%
Winter (DJF)	+27,1%	+21,9%	+48,4%	+17 bis +44%
Regentage	+2,7 Tage	+5,7 Tage	-6,1 Tage	-6,5 bis +3,2 Tage*
Starkregentage	+1,5 Tage	+2 Tage	+0,7 Tage	+1 bis +2 Tage
Schneemenge	-70%	-	-	-93 bis -77%
Schneebedeckung	-3,5 Tage	-32,6 Tage	-	-10 bis 0 Tage
Schneetage	-2,4 Tage	-0,2 Tage	-	-2,7 bis -0,2 Tage
Mittlere Windgeschwindigkeit	+2,1%	+2,9%	-6,1%	0 bis +2%
Maximale Windgeschwindigkeit	+14,9%	+7,2%	-	-
Sturmtage	+0,71 Tage	+0,66 Tage	-	+1,5 bis +3 Tage
Windstille Tage	-1,9 Tage	-2,59 Tage	-	-0,8 bis +0,7 Tage
Sonnenscheindauer	-3,9%	-	+11,3%	-7 bis -3%
Bewölkungsgrad	+0,1%	+1,3%	-6,4%	0 bis +2%

\* Spannweiten für Regentage beziehen sich auf Tage mit größer oder gleich 1 mm Niederschlag;

**Tab. 10: Jahresmittelwerte** unter Berücksichtigung des A1B-Emissionsszenarios für die Referenzperiode 1971-2000 und absolute Werte für die **Spannweiten** unter Berücksichtigung der Emissionsszenarien B1, B2, A1B und A2 für die Referenzperiode 1961-1990 für das **2085-Szenario** (2071-2100). Für Temperatur und Niederschlag sind zusätzlich die saisonalen Mittelwerte dargestellt. Berücksichtigte Regionalmodelle sind REMO, CLM und WettReg (vgl. **Abb. 5**). Die DWD-Werte der Referenzperiode sind in **Tab. 1** dargestellt.

Parameter	CLM: A1B-Mittelwerte (2071-2100)	REMO: A1B-Mittelwerte (2071-2100)	WettReg: A1B-Mittelwerte (2071-2100)	Spannweiten (2071-2100)
Jahresmitteltemperatur	12,04°C	12,04°C	11,47°C	11,12 bis 12,32°C
Frühling (MAM)	10,01°C	10,19°C	9,22°C	9,46 bis 10,56°C
Sommer (JJA)	19,13°C	19,01°C	18,44°C	18,21 bis 19,51°C
Herbst (SON)	12,74°C	12,73°C	11,86°C	11,93 bis 13,03°C
Winter (DJF)	5,77°C	6,13°C	6,24°C	4,66 bis 5,96°C
Sommertage	35,83 Tage	32,48 Tage	-	23,85 bis 37,05 Tage
Tropische Nächte	4,3 Nächte	4,34 Nächte	-	1,61 bis 4,51 Nächte
Frosttage	18,37 Tage	29,63 Tage	-	16,83 bis 36,93 Tage
Eistage	0,23 Tage	3,35 Tage	-	0 bis 7,51 Tage
Gesamtniederschlag	790 mm	790 mm	710 mm	763 bis 807 mm
Frühling (MAM)	165 mm	161 mm	146 mm	157 bis 170 mm
Sommer (JJA)	158 mm	161 mm	159 mm	162 bis 189 mm
Herbst (SON)	238 mm	251 mm	188 mm	229 bis 248 mm
Winter (DJF)	230 mm	219 mm	242 mm	197 bis 242 mm
Regentage	128 Tage	131 Tage	119 Tage	119 bis 128 Tage*
Starkregentage	4,58 Tage	5,1 Tage	3,75 Tage	4,1 bis 5,1 Tage
Schneemenge	8,34 mm	-	-	0,82 bis 2,69 mm
Schneebedeckung	13,54 Tage	0 Tage	-	7 bis 17 Tage
Schneetage	8,9 Tage	11,14 Tage	-	8,6 bis 11,1 Tage
Mittlere Windgeschwindigkeit	5,82 m/s	5,83 m/s	-	5,69 bis 5,8 m/s
Maximale Windgeschwindigkeit	21,48 m/s	19,88 m/s	-	-
Sturmtage	8,15 Tage	8,1 Tage	-	8,94 bis 10,44 Tage
Windstille Tage	0 Tage	0 Tage	-	0,1 bis 1,6 Tage
Sonnenscheindauer	1539 Stunden	-	1777 Stunden	1488 bis 1552 Stunden
Bewölkungsgrad	67,62%	68,42%	63,33%	67,52 bis 68,87 %

\* Spannweiten für Regentage beziehen sich auf Tage mit größer oder gleich 1 mm Niederschlag;

**Tab. 11:** Annahmen über die klimawandelbedingten Veränderungen des mittleren Meeresspiegels, des mittleren Tidehochwassers, des Wasserstands durch Windstau und der Sturmflutwasserstände für das **2085-Szenario**. Diese Parameter sind auf Basis der in **Tab. 5** angegebenen Quellen abgeschätzt worden.

Parameter	A1B-Mittelwerte	Spannweiten
<b>Mittlerer Meeresspiegel</b> (Vergleich zu 1980-1999)	34,5 cm	+18 bis +140 cm
<b>Mittleres Tidehochwasser</b> (MThw: Hochrechnung vergangener Messwerte)	+30,5 cm	+20 bis +41 cm
<b>Wasserstände durch Windstau</b>	+25 cm	+15 bis +35 cm
<b>Sturmflutwasserstände</b> (Summe aus mittlerem Meeresspiegel, MThw und Windstau)	+90 cm	+53 bis +216 cm

Für die MPR HB-OL können bis zum Ende des 21. Jahrhunderts für das **2085-Szenario** folgende – auch im Vergleich mit dem 2050-Szenario – Aussagen getroffen werden (vgl. **Tab. 9** bis **Tab. 11**):

- Es kommt zu einer weiteren Zunahme der Jahresmitteltemperatur, wobei sich die saisonal unterschiedlichen Erwärmungstrends fortsetzen: die Winter erwärmen sich überdurchschnittlich, die Frühjahrsmonate geringer (alle drei Regionalmodelle zeigen hier einen weitgehend einheitlichen Trend). Im Binnenland kommt es zu einer stärkeren Temperaturzunahme im Winter bei schon heute niedrigeren winterlichen Temperaturmittelwerten. Die Unterschiede zwischen Küste und Binnenland sind für die Temperaturen und Temperaturkenntage im 2085-Szenario insgesamt größer als im 2050-Szenario.
- Die Zahl der Sommertage und tropischen Nächte nimmt weiterhin zu und die Zunahme verdoppelt sich im Vergleich zum 2050-Szenario. Im Vergleich zur Referenzperiode kommen 2,5-mal so häufig Sommertage und über 8-mal so häufig tropische Nächte im Jahresmittel vor.
- Die Zahl der Frost- und Eistage nimmt weiter ab, wobei insbesondere die Abnahme bei den Eistagen mit einer Verdopplung im Vergleich mit dem 2050-Szenario deutlicher ausfällt. Die Anzahl der Eistage tendiert somit gegen Null und die Anzahl der Frosttage hat sich im Vergleich mit der Referenzperiode fast halbiert.
- Die Zunahme der Jahresniederschlagsmenge fällt für die dynamischen Modelle geringer aus, als im 2050-Szenario. Allerdings weicht auch hier WettReg mit einer Abnahme der Regenmenge ab. Die für das 2050-Szenario erwähnten saisonalen Trends in den Niederschlagsmengen, können auch im 2085-Szenario beobachtet werden: es kommt zu deutlich höheren Regenmengen im Winter, während die Sommer noch deutlicher eine Abnahme zeigen. Die oben erwähnten Unterschiede in den einzelnen Modellen treten auch hier insbesondere für Herbst und Frühling zutage, sind aber für die Sommer- und Wintermonate geringer als im 2050-Szenario. Die saisonalen Niederschlagsmengen verschieben sich weiter vom Sommer in Richtung Winter. Küstennah kommt es im Vergleich zum Binnenland zu einer deutlicheren Zunahme des Jahres- und des Winterniederschlags bei schon heute höheren Niederschlagsmengen.
- Die Zahl der Regentage nimmt im Gegensatz zum 2050-Szenario leicht zu und die Zahl der Starkregentage erhöht sich weiterhin.
- Die für das 2050-Szenario dargestellten Trends bezüglich der Schneemenge, -bedeckung und -tage setzen sich weiter fort, wobei allerdings auch im 2085-Szenario große Unterschiede in den jeweiligen Modellen auftreten.
- Für die mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten setzen sich die Trends aus dem 2050-Szenario fort: die mittlere Geschwindigkeit nimmt geringfügig zu, die maximale Geschwindigkeit deutlicher (auch hier für WettReg eine weitere Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeiten). Die Zunahme der Zahl der Sturmtage ist im Vergleich mit dem 2050-Szenario nahezu identisch, allerdings zwischen CLM und REMO unterschiedlich stark. Die Zahl der windstillen Tage nimmt weiter ab, so dass im 2085-Szenario zukünftig keine windstillen Tage mehr vorkommen.
- Bezüglich Sonnenscheindauer und Bewölkungsgrad sind zwischen beiden Szenarien keine großen Unterschiede festzustellen: die Veränderungen haben ähnlich geringe Größenordnungen, die Modelle unterscheiden sich weiterhin in den Vorzeichen der berechneten Veränderungen und beide Parameter verändern sich nur geringfügig.

- Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels, des mittleren Tidehochwassers, des Windstaus und damit der Sturmflutwasserstände schreitet weiter voran, wobei eine geringfügige Beschleunigung angenommen wird. Die Sturmflutwasserstände der oberen Spannweite überschreiten 2 Meter.

Der Vergleich der A1B-Mittelwerte mit den **Spannweiten** für das **2085-Szenario** ergibt folgende Einordnung:

- Die Veränderung der Jahresmitteltemperatur liegt weiterhin in der Mitte der Spannweite, die Veränderungen der Sommertage und tropische Nächte jetzt im oberen Bereich und die Veränderungen der Frost- und Eistage im unteren Bereich der jeweiligen Spannweiten.
- Die Veränderungen des Gesamtniederschlags und der Starkregentage aus CLM und REMO befinden sich jetzt eher im mittleren Bereich der Spannweiten; WettReg zeigt mit einer Abnahme weiterhin ein gegenläufiges Bild und fällt aus der Spannweite heraus.
- Die Einordnung bezüglich veränderter Schneemenge, -bedeckung und -tage sowie Windgeschwindigkeiten und Windkenntagen innerhalb der Spannweiten ist wie im 2050-Szenario uneinheitlich (s.o.).
- **Fazit:** Bis zum Jahr 2085 stellen die Veränderungen aus dem A1B-Emissionsszenario im Vergleich mit den Spannweiten für die Parameter Sommertage, tropische Nächte, Frosttage, Eistage, Starkregentage, mittlere Windgeschwindigkeit und windstille Tage ein starkes, bezüglich der Parameter Jahresmitteltemperatur und Gesamtniederschlag ein mittleres Klimasignal dar. Die Ergebnisse der A1B-Mittelwerte für die saisonalen Temperaturen, der Niederschlagsparameter aus WettReg, der mittleren Windgeschwindigkeit und der Windkenntage über- oder unterschreiten teilweise die Spannweiten.

## 5. Empfehlungen und Ausblick

### 5.1 Umgang mit Unsicherheit

Die Frage, wie mit den Unsicherheiten in regionalen Klimaprojektionen und -szenarien umgegangen werden kann (s.a. Kap. 2.4), ist insbesondere für die Findung von geeigneten Anpassungsmaßnahmen und -strategien relevant. Die Unsicherheiten, die in den z.T. großen Spanweiten der beiden regionalen Klimaszenarien deutlich werden, reduzieren die Belastbarkeit der Klimaszenarioaussagen für die politische Entscheidungsfindung. Festzuhalten ist diesbezüglich, dass Aussagen zu künftigen Klimaänderungen und Klimafolgen immer „Aussagen unter Unsicherheit“ (Daschkeit & Renken 2009, Zebisch et al. 2005) sind. Dieses resultiert daraus, dass das Wissen über die Zukunft prinzipiell eine mehr oder weniger große Unsicherheit aufweist. Im Zusammenhang mit den Herausforderungen der Klimaanpassung geht es also darum, dass Entscheidungsträger für Entscheidungen einen angemessenen Umgang mit diesen Unsicherheiten finden müssen (Bundesregierung 2008).

Für einen angemessenen Umgang mit den Aussagen der dargestellten regionalen Klimaszenarien für die Klimaanpassung kann die Berücksichtigung folgender ausgewählter Aspekte empfohlen werden:

- **Schaffung einer guten Informations- und Wissensgrundlage:** Da die regionalen Klimamodelle und die daraus abgeleiteten regionalen Klimaprojektionen bzw. -szenarien unterschiedlichen Ergebnisse ergeben, sollten die Aussagen über den möglichen Klimawandel für die Anpassungsplanung nicht nur auf einem SRES-Szenarien oder nur einem Klimamodell basieren. Zur Ableitung der Spannweiten möglicher Klimaänderungen sollten vielmehr mehrere SRES-Szenarien und mehrere regionale Klimamodelle verwendet werden, wie im dargestellten Ansatz für die beiden regionalen Klimaszenarien umgesetzt. Dabei zeigt sich, dass die Ergebnisse der verschiedenen Klimamodelle in vielen Grundtendenzen übereinstimmen und die Belastbarkeit der Modellergebnisse für einige Klimaparameter (z.B. Temperatur und Temperaturkennstage) dadurch vergleichsweise hoch ist. Nicht alle Klimaparameter sind gleich unsicher und Mittelwerte können generell zuverlässiger projiziert werden als klimatische Extremwerte. Zurzeit besteht die größte Unsicherheit bei den Extremereignissen wie Starkniederschläge, Hitzewellen und Stürme (vgl. a. Kap. 5.2). Widersprechen sich Aussagen der in den Klimaszenarien zusammengefassten Projektionen, sollte im Zweifel mit entgegen gesetzten „Klimazukünften“ gerechnet und geplant werden (EC 2009, IFOK 2009, Walkenhorst & Stock 2009).
- **Austausch und Kooperation zwischen Wissenschaft und Praxis:** Die Unsicherheiten in den Aussagen zu Klimaänderungen und Klimafolgen sollten nicht nur weiterhin analysiert werden, sondern müssen auch anhand geeigneter Strategien kommuniziert werden, um eine gute Wissensgrundlage praxiswirksam umsetzen zu können. Dazu gehören z.B. von der Klima- und Klimafolgenforschung zu entwickelnde Verfahren und Instrumente, die das Verständnis von Unsicherheiten erleichtern, wie z.B. grafische Darstellungen oder statistische Maße, die einen unmittelbaren Eindruck vom Grad der Unsicherheit geben. Das Verschweigen von Unsicherheiten oder Spannbreiten würde eine nicht vorhandene Sicherheit suggerieren (BMVBS 2007, IFOK 2009, Daschkeit & Renken 2009).

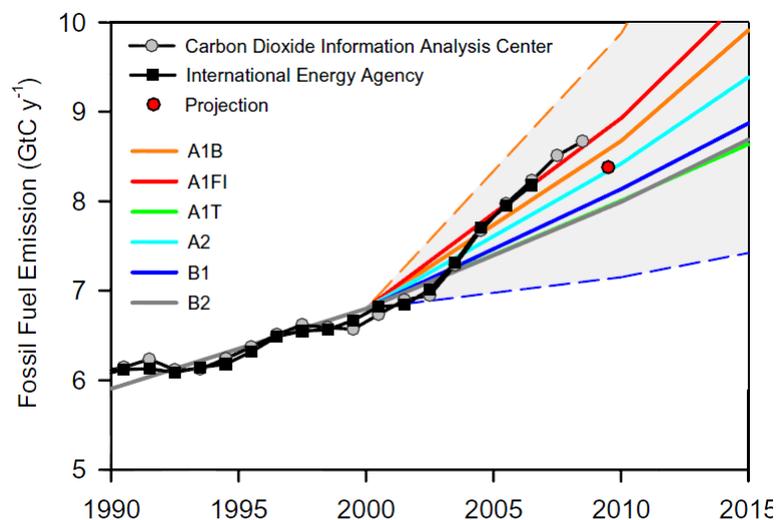
- **„No regret“- oder „low regret“-Anpassung:** Da in vielen Fachplanungen klimawandelbedingt Ergänzungen und Anpassungen von bestehenden planerischen Zielen oder Vorgaben notwendig werden, stellt sich die Frage, wie Handeln unter Unsicherheit möglich gemacht werden kann. Die Einführung von Risikozuschlägen oder „Klima- bzw. Baureserven“ als sog. „no regret“- oder „low-regret“-Ansätze, z.B. bei der Bemessung von Deichanlagen wie im Generalplan Küstenschutz für Niedersachsen und Bremen (NLWKN 2007) oder im Generalplan Inselerschutz für die Ostfriesischen Inseln (NLWKN 2010), können hier empfohlen werden (allerdings würde die Vulnerabilität der durch den Deich geschützten Gebiete nicht verringert, so dass diese Maßnahme durch Strategien zur Verminderung der Sensitivität und zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit ergänzt werden muss). Es sollten bei der Auswahl von Anpassungsmaßnahmen also z.B. solche bevorzugt werden, die eine flexible Nachsteuerung ermöglichen, sowie solche, die in der Lage sind heute auftretende Extremereignisse abzumildern. Damit lässt sich nicht nur eine starre Fixierung auf die Diskussionen über Unsicherheit in den Aussagen zum Klimawandel vermeiden, sondern sich sinnvolle Klimaanpassung auch dann begründen, wenn der Klimawandel regional stärker oder schwächer auswirkt als projiziert (EC 2009, IFOK 2009, Stock et al. 2009).
- **Kontinuität und Zielüberprüfung:** Ein zentraler Unterschied zwischen der Forschung zum Klimawandel und heutiger Planungspraxis ist der jeweils betrachtete Zeithorizont. So erfasst z.B. die räumliche Planung bislang nur relativ kurze Zeiträume: Regionalpläne und Fachplanungen haben einen Zeithorizont von etwa 15 Jahren, die EU-Agrarförderung reicht derzeit bis 2013 und Entwicklungsplanungen für andere Sektoren betreffen teilweise sogar noch kürzere Zeiträume. Die Wirkungen des anthropogenen Klimawandels erstrecken sich hingegen über das gesamte 21. Jahrhundert und vermutlich noch weit darüber hinaus. Für einen angemessenen Umgang mit dem Klimawandel muss Anpassungsplanung also eine langfristige Perspektive berücksichtigen, insbesondere für Planungen von Infrastrukturen, die eine Lebensdauer von 50 oder mehr Jahren haben können. Hier ist es erforderlich, Kontinuität in der Planung und Umsetzung von Anpassungsplanungen, -maßnahmen und -strategien zu implementieren und darauf basierend regelmäßige Zielüberprüfung der Strategien und Maßnahmen zur Klimaanpassung zu gewährleisten (IFOK 2009, Stock et al. 2009).
- **Analyse der regionalen Verwundbarkeiten:** Ein angemessener Umgang mit den Unsicherheiten in der Entscheidungsfindung über Klimaanpassung erfordert schließlich auch, dass sektor- oder handlungsbereichsspezifische sowie querschnittsorientierte Einschätzungen der regionalen Verwundbarkeit anhand von Vulnerabilitätsanalysen verstärkt durchgeführt werden müssen und die Erkenntnisse dann in die Entscheidungs- und Planungsgrundlagen einbezogen werden. Hierfür bieten sich z.B. Methoden des integrierten Risikomanagements an (Zebisch et al. 2005, Schuchardt & Schirmer 2007).

Generell gilt, dass selbst große Unsicherheiten nicht zu Untätigkeit bei der Klimaanpassung führen dürfen und weiterhin alle Bemühungen und Maßnahmen zum Klimaschutz intensiv verfolgt werden müssen. Ein weiterhin ungebremster Klimawandel kann sog. Kipp-Punkte bzw. -Prozesse im globalen Klimasystem in Gang setzen, die zu erheblichen weiteren Klimaveränderungen führen (s. Kap. 5.2). Obwohl solche irreversiblen Prozesse mit den heutigen Klimamodellen nur schwer abzuschätzen sind steht fest, dass sie gravierende Folgen hätten und trotz noch bestehender Unsicherheiten ernst genommen werden müssen. Ohne ambitionierten Klimaschutz wächst also die Wahrscheinlichkeit, dass Klimawirkungen eintreten, gegen die Anpassung nicht mehr möglich ist oder nur zu

hohen ökologischen, ökonomischen und sozialen Kosten zu haben wäre, die möglicherweise selbst die Anpassungsmöglichkeiten der Gesellschaften reicher Industrieländer übersteigen könnten (UBA 2008, Walkenhorst & Stock 2009).

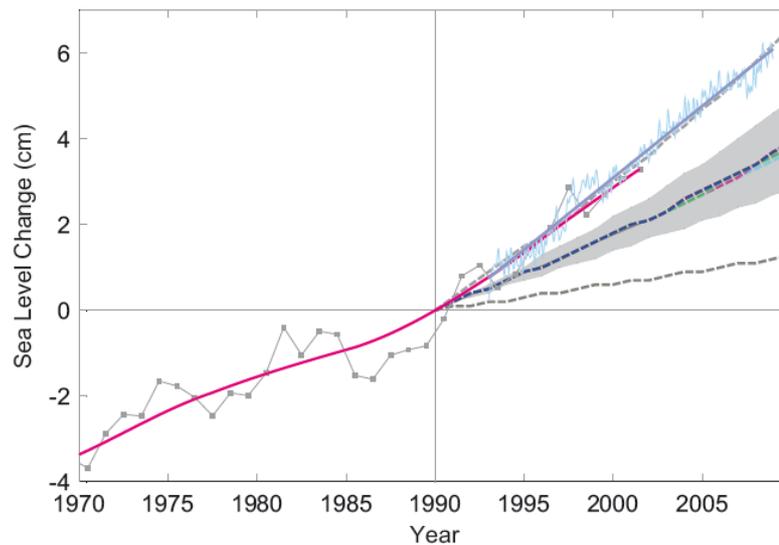
## 5.2 Kipp-Punkte und „stärkeres“ Klimasignal

Angesichts der genannten Unsicherheiten (s. Kap. 2.4) wird zuweilen behauptet, die Klimaprojektionen des IPCC würden die Zukunft des globalen Klimas „pessimistischer“ zeichnen als sie in Wirklichkeit ist. Vermutlich ist jedoch das Gegenteil der Fall, da zum einen der tatsächliche Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen in den Jahren 2000 bis 2007 mit durchschnittlich +3,5% pro Jahr größer ist, als der im „maximalen“ SRES-Szenario für diesen Zeitraum angenommene Anstieg (Global Carbon Project 2009: s. **Abb. 7**).



**Abb. 7:** Angenommener Verlauf der CO<sub>2</sub>-Entwicklung nach den SRES-Szenarien des IPCC und tatsächlicher Verlauf der Emissionen (aus Global Carbon Project 2009).

Zum anderen zeigt ein Vergleich der bis 2005 vorliegenden Messdaten z.B. der globalen Mitteltemperatur und des Meeresspiegelanstiegs mit den Klimaprojektionen des IPCC, dass die gegenwärtige Klimaentwicklung tendenziell unterschätzt wird: der gemessene Temperaturverlauf liegt am oberen Rand des von den IPCC-Projektionen aufgespannten Bereichs und der gemessene Meeresspiegelanstieg liegt sogar darüber (University of Copenhagen 2009: s. **Abb. 8**).



**Abb. 8:** Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels zwischen 1970 und 2008 im Vergleich mit 1990 sowie die IPCC-Projektionen mit ihren Unsicherheitsbereichen. Die durchgezogene dicke Linie basiert auf Messungen, die zur Entfernung interannueller Variabilität geglättet worden ist (Linie mit Datenpunkten; aus University of Copenhagen 2009).

Insbesondere hinsichtlich des Meeresspiegelanstiegs müssen die IPCC-Klimaprojektionen aus dem Jahr 2007 also wahrscheinlich deutlich nach oben korrigiert werden, da u.a. das Abschmelzen des Grönland und des Westantarktis-Eisschildes, zwei der sog. Kipp-Punkte bzw. -Prozesse im globalen Klimasystem, nicht ausreichend berücksichtigt wurde. Solche Kipp-Punkte bzw. -Prozesse des Klimasystems sind durch Schwellwertverhalten und selbstverstärkende Rückkopplungsmechanismen geprägt, wie z.B. das vollständige Abschmelzen des arktischen Meereises und der grönländischen und antarktischen Eisschilde, das Auftauen des sibirischen Permafrostbodens oder der Zusammenbruch der nordatlantischen Ozeanzirkulation (vgl. Lenton et al. 2008, UBA (2008) oder unter [www.pik-potsdam.de/infothek/kipp-prozesse](http://www.pik-potsdam.de/infothek/kipp-prozesse)). Während der 4. Sachstandsbericht des IPCC (2007) für den Meeresspiegelanstieg bis 2100 einen relativ „moderaten“ Wert von max. 59 cm angibt, gehen neuere Forschungen davon aus, dass dieser bei Berücksichtigung der Eisschilddynamik erheblich angehoben werden muss (z.B. Rahmstorf 2009). Aufgrund der Trägheit und Nichtlinearität des Klimasystems ist auch über das Jahr 2100 hinaus mit einem weiterem Meeresspiegelanstieg zu rechnen. So geht der WBGU bei einer langfristigen Stabilisierung der globalen Erwärmung bei 3°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau von 3 bis 5 Metern Meeresspiegelanstieg bis 2300 gegenüber heute aus (WBGU 2006).

Neben den in Kap. 5.1 genannten Aspekten im Umgang mit Unsicherheiten kann hier also zusätzlich empfohlen werden, neben den dargestellten oberen Grenzen der Spannweiten bei Klimafolgenanalysen auch „mitzudenken“, was bei „stärkerer“ oder „ungünstigerer“ Klimaänderungen passieren könnte (wie z.B. im UKCIP (2008) für extreme Annahmen bezüglich des Meeresspiegels). Beim Umgang mit den beiden vorgestellten Klimaszenarien sollte daher vorsorglich stärker auf die obere Grenze bzw. das stärkere Klimasignal der Spannweiten fokussiert werden. Hierzu ist eine kontinuierliche Beobachtung der weiteren Klimaentwicklung und Berücksichtigung der neuesten Klimamodellergebnisse und des aktuellen Klimawissens in allen Entscheidungen zur Klimaanpassung erforderlich.

### 5.3 Entwicklung des Klimawissens

In den vergangenen Jahren sind als Resultat der intensiven Forschung im Bereich der Klimamodellierung mehrere neue und regionale Klimamodelle erstellt worden, für die aktuell und zukünftig weitere Klimaprojektionsläufe durchgeführt werden. Auch im Rahmen der Aktivitäten des IPCC werden für den nächsten 5. Sachstandsbericht, der voraus. in den Jahren 2013/14 erscheinen wird, neue Modellläufe auf globaler Ebene erstellt und für die Folgenbetrachtung berücksichtigt.

Für Deutschland stehen neben den Projektionen der regionalen Klimamodelle (s. Kap. 2.3.4) mittlerweile weitere bis zum Ende des 21. Jahrhunderts fortlaufende, regionale Simulationen zur Verfügung, z.B. vom EU-Projekt ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com/>), in dem mehr als 20 regionale Klimaprojektionen mit einer horizontalen Auflösung von ca. 25 km erzeugt worden sind. Die aktuellen Ergebnisse dieser Projektionen, deren Datengrundlage über die Website des Projekts verfügbar ist, sind auch für die Klimafolgenforschung interessant. Allerdings stellt der riesige Datenumfang solcher Klimaprojektions-Ensembles die Klimafolgen- und -anpassungsforschung vor neue Probleme: Die Nutzer können den für die Berücksichtigung aller verfügbaren Klimaprojektionen benötigten Aufwand kaum bewältigen, obwohl sich dadurch ein wissenschaftlich sachgerechterer Umgang mit den Unsicherheiten ergeben würde (Deutschländer et al. 2009).

Die Klimaforschung ist daher gefordert, geeignete Methoden zur Reduktion der verfügbaren Klimaprojektionen zu entwickeln. Obwohl durch die Verwendung des z.B. in der numerischen Wettervorhersage erprobten Ensembleansatzes die Modellunsicherheiten und interne Variabilität des Klimasystems in Form von Spannweiten besser abgeschätzt werden könnte, besteht für die Konzeption von Anpassungsmaßnahmen oder -strategien der Wunsch nach einer sinnvollen Auswahl von Klimasimulationen. Zur Unterstützung der Anwender und Nutzer der Klimasimulations- und Klimafolgenergebnisse wird aktuell nach Möglichkeiten gesucht, die Anzahl der Ensemble-Projektionen wissenschaftlich belastbar zu reduzieren, ohne die Belastbarkeit der dann noch ableitbaren Spannweiten wesentlich einzuschränken (MPI-M 2006, Deutschländer et al. 2009).

Daraus ergibt sich für die Forschungsaktivitäten zum Umgang mit Klimaprojektionsdaten auch die Notwendigkeit zur Verminderung der systematischen Modellfehler beizutragen (Deutschländer et al. 2009). Da die Nichtberücksichtigung einzelner Ensemble-Mitglieder immer einen Verzicht auf wertvolle Informationen darstellt, die daher prinzipiell soweit wie möglich zu vermeiden ist, sollte vor dem Ausschluss einzelner Ensemble-Mitglieder aufgrund ihrer Nichteignung versucht werden, mindestens das Änderungssignal zu verwenden anstatt der absoluten Ergebnisse (Biaskorrektur: Differenz zwischen den Klimamodell-Simulationen des Projektions- und des Referenzzeitraums; s. Kap. 2.3). Trotz der auch zukünftig nicht zu vermeidenden Schwächen der Klimaprojektionsrechnungen muss die Klimaforschung daher Methoden finden, die Simulationen der Klimamodelle der Realität durch nachträglich Bearbeitung anzupassen. Eine solche statistische Nachbearbeitung steht vor der Herausforderung, die raum-zeitlich Konsistenz der betrachteten Klimaparameter zu wahren. Hierdurch wird es zukünftig wahrscheinlich möglich werden, einerseits Aussagen über die Modellqualität zu treffen und andererseits die Qualität der Klimaprojektionen weiter zu erhöhen. Dieses ist auch Voraussetzung für die weitere Verwendung der Klimaprojektionen in Klimafolgenmodellen (BMVBS 2007, Deutschländer et al. 2009).

Die Verbesserung des Klimawissens auf der Seite der Folgen, Wirkungen und Anpassungserfordernisse wird aktuell in der KLIMZUG-Förderaktivität forciert. Hier wird nicht nur versucht, räumlich

und zeitlich höher aufgelöste Klimaprojektionen zu generieren, sondern auch durch die Anwendung vielfältiger Klimawirkmodelle die Folgen auf Naturräume und Gesellschaften besser abschätzen zu können. Damit ist die Hoffnung verknüpft, neben belastbareren Aussagen über den Klimawandel auch deutschlandweit vergleichbare und robuste Ergebnisse bezüglich der Klimawirkungen zu erlangen.

## 6. Abkürzungsverzeichnis

- AOGCM:** Atmosphere-Ocean General Circulation Model (gekoppeltes Atmosphäre-Ozean-Klimamodell)
- BMBF:** Bundesministerium für Bildung und Forschung
- C20:** Gegenwartsläufe der Klimamodelle
- CEC:** Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
- CERA:** Climate and Environmental Data Retrieval and Archive
- CLM:** Climate Local Model
- CSC:** Climate Service Center (früher **SGA:** Service Gruppe Anpassung)
- DAS:** Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
- DKRZ:** Deutsches Klimarechenzentrum
- DWD:** Deutscher Wetterdienst
- GCM:** Global Circulation Model (globales Klimamodell)
- IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
- KLIMZUG:** Klimawandel in den Regionen zukunftsfähig gestalten (Förderprogramm des BMBF)
- KomPass:** Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
- MPI-M:** Max-Planck-Institut für Meteorologie (Hamburg)
- MPR HB-OL:** Metropolregion Bremen-Oldenburg
- nordwest2050:** KLIMZUG-Projekt „Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten“
- PIK:** Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
- RCM:** Regional Climate Modell (regionales Klimamodell)
- REMO:** Regional Model
- SRES:** Special Report on Emissions Scenarios (Nakicenovic et al. 2000)
- STAR:** Statistisches Regionalisierungsmodell
- UBA:** Umweltbundesamt
- UNFCC:** United Nations Framework Convention on Climate Change (Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen)
- WDCC:** World Data Center for Climate
- WettReg:** Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode

## 7. Literatur

- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007): Schiffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels. Bestandsaufnahme, 58 S.
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17.12.2008 beschlossen.  
[<http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php>, 26.05.2010]
- Daschkeit, A. & A. L. Renken (2009): Klimaänderung und Klimafolgen in Hamburg - Fachlicher Orientierungsrahmen. Umweltbundesamt: Kompass - Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung, im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg, 38 S.
- Deuschländer, T., F. Imbery, S. Plagemann, J. Namyslo, B. Früh & P. Becker (2009): Zum Umgang mit Klimaprojektionen in der Klima- und Klimafolgenforschung. Deutscher Wetterdienst, Klima und Umwelt, 5 S.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2010a): Der Klima-Report 2009. 28 S. [<http://www.ksb.dwd.de>, 11.06.2010]
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2010b): Klimaservices im DWD. Broschüre des DWD, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, 11 S.
- EC – European Commission (2009): White Paper - Adapting to climate change: Towards a European framework for action. Brussels, 1.4.2009, COM(2009) 147 final, 17 S.  
[[http://ec.europa.eu/environment/water/adaptation/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/water/adaptation/index_en.htm), 14.06.2010]
- Endlicher, W. & F.-W. Gerstengarbe (2007, Hrsg.): Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam, 142 S.
- Global Carbon Project (2009): Carbon budget and trends 2008. Veröffentlicht am 17. November 2009 [<http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>, 26.05.2010]
- Grabemann, H. J., I. Grabemann & A. Müller (2005): Die Auswirkungen eines Klimawandels auf Hydrografie und Gewässergüte der Unterweser. In: Schuchardt, B. & M. Schirmer (Hrsg.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 59-77
- Grinsted, A., J. C. Moore & S. Jevrejeva (2009): Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. *Climate Dynamics*, Volume 34, Number 4, März 2010, S. 461-472 [<http://dx.doi.org/10.1007/s00382-008-0507-2>, 18.03.2010]
- Heinemann, H. J. (2003): Ein Beitrag zur Entwicklung des Klimas von Bremen in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts. *Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins zu Bremen* 45 (2), S. 191–210
- Hollweg, H. D., U. Böhm, I. Fast, B. Hennemuth, K. Keuler, E. Keup-Thiel, M. Lautenschlager, S. Legutke, K. Radtke, B. Rockel, M. Schubert, A. Will, M. Woldt & C. Wunram (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. M & D Technical Report 3

- IFOK (2009): Schwimmende Häuser und Moskitonetze: Weltweite Strategien zur Anpassung an den Klimawandel. Studie, November 2009, 134 S.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001): Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K., Johnson C. A. (eds.): Cambridge University Press
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007a): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>, 26.05.2010]
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007b): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007 - Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC): M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, C. E. Hanson and P. J. van der Linden (eds.): Cambridge University Press, Cambridge, UK, 22 S. [<http://www.de-ipcc.de>, 03.06.2009]
- Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S.; Lorenz, P. & Sieck, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland. Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. UBA, Reihe Climate Change 11/08. [<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3513.pdf>, 11.06.2010]
- Jensen, J. & C. Mudersbach (2004): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Gönnert, G., H. Graßl, D. Kelletat, H. Kunz, B. Probst, H. von Storch & J. Sündermann (Hrsg.): Klimaänderung und Küstenschutz. Tagungsband der Tagung „Klimaänderung und Küstenschutz, 29./30.11.2004, Hamburg, S. 115-128
- Jensen, J. & C. Mudersbach (2007): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. Ber. z. dt. Landeskunde Bd. 81, Heft 2, S. 99-112
- Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E.; Hall, J.W.; Lucht, W.; Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H.J. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences 105, 6, 1786-93. [<http://www.pnas.org/content/105/6/1786.full.pdf>, 11.06.2010]
- Mai, S., A. Elsner, V. Meyer & C. Zimmermann (2004): Klimaänderung und Küstenschutz. Endbericht des Teilprojekts 2 im KRIM Verbund „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste (KRIM)“, BMBF-Förderkennzeichen 01 LD 0014, 236 S.
- MPI-M – Max-Planck-Institut für Meteorologie (2006): Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. 32 S. [<http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/grafik/presse/Klimaprojektionen2006.pdf>, 19.06.2010]

- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H.H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor & Z. Dadi (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge. [<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>, 04.06.2010].
- Nds. MUK – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (2009): Der Klimawandel als Herausforderung für Staat und Gesellschaft - Struktur für eine Anpassungsstrategie. 2. Auflage, März 2009, 21 S. [<http://www.umwelt.niedersachsen.de>, 10.06.2009]
- Rahmstorf, S. & K. Richardson (2007): Wie bedroht sind die Ozeane? Fischer Verlag: 224 S.
- Rahmstorf, S. (2007): A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science*, Vol. 315, S. 368-370
- Rahmstorf, S. (2009): Sea Level Rise. Vortrag auf dem Climate Change Congress in Kopenhagen, 10.3.2009. [<http://climatecongress.ku.dk/speakers/stefanrahmstorf-plenaryspeaker-10march2009.pdf>, 07.06.2010]
- Rahmstorf, S., A. Cazenave, J. A. Church, J. E. Hansen, R. F. Keeling, D. E. Parker & R. C. J. Somerville (2007): Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science*, Vol 316, S. 709 [[http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Nature/rahmstorf\\_etal\\_science\\_2007.pdf](http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Nature/rahmstorf_etal_science_2007.pdf), 07.06.2010]
- Schirmer, M. (2005): Das Klimaszenario der Fallstudie „Klimaänderung und Unterweserregion“ (KLIMU). In: Schuchardt, B. & M. Schirmer (Hrsg.): Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. *Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 50-56
- Schuchardt, B. & M. Schirmer (2007, Hrsg.): Land unter? Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050. oekom-Verlag, München, 243 S.
- Schuchardt, B., S. Wittig & M. Schirmer (2008): Klimawandel und Ästuar - Perspektiven für den Naturschutz. Studie im Auftrag des World Wide Fund for Nature (WWF), Frankfurt, Hamburg, 70 S. [[http://www.wwf.de/fileadmin/fmwwf/pdf\\_neu/Report\\_Klimawandel\\_und\\_AEstuar.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fmwwf/pdf_neu/Report_Klimawandel_und_AEstuar.pdf), 07.04.2009]
- 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. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, FuE-Vorhaben, Förderkennzeichen 20441138, 149 S. [<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf>, 07.06.2010]
- Stock, M., Kropp, J. & Walkenhorst, O. (2009): Risiken, Vulnerabilität und Anpassungserfordernisse für klimaverletzliche Regionen. *Raumforschung und Raumordnung* 67, Heft 2, 97-113.

- UBA – Umweltbundesamt (2008): Kipp-Punkte im Klimasystem. Welche Gefahren drohen? Hintergrundpapier, Fachgebiet I 2.1, Juli 2008, 27 S. [<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/kipp-punkte.pdf>, 17.06.2009]
- UKCIP – United Kingdom Climate Impacts Programme (2008): The climate of the UK. [[http://www.ukcip.org.uk/scenarios/ukcip02\\_extras/images/UKCIP02Extras\\_SLC\\_map\\_final.gif](http://www.ukcip.org.uk/scenarios/ukcip02_extras/images/UKCIP02Extras_SLC_map_final.gif), 11.03.2008]
- University of Copenhagen (2009): Synthesis Report from Climate Change – Global Risk, Challenges & Decisions, March 2009. Copenhagen [<http://www.climatecongress.ku.dk>, 18.06.2010]
- von Storch, H., H. Reichardt & A. Pfizenmayer (1997): Auswirkungen von Klimaänderungen auf Sturmentwicklung und Extremwasserstände in der Nordsee. BMBF-Projekt, Förderkennzeichen 03F0141B [<http://w3g.gkss.de/G/Mitarbeiter/storch/storm.surges.html>, 20.08.2001]
- von Storch, H., M. Montoya, F. J. González-Rouco & K. Woth (2005): Projektionen für Meere und Küsten. Beitrag in Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft: Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? Eigenverlag Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, S. 107-113
- Walkenhorst, O. & M. Stock (2009): Regionale Klimaszenarien für Deutschland - Eine Leseanleitung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Hannover, E-Paper Nr. 6, 24 S.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (2006): Die Zukunft der Meere: zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten. [[http://www.wbgu.de/wbgu\\_sn2006.html](http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.html), 07.06.2010]
- Wittig, S., A. Elsner, W. Elsner, D.P. Eppel, I. Grabemann, H.-J. Grabemann, D. Kraft, S. Mai, V. Meyer, C. Otte, M. Schirmer, B. Schuchardt, I. Yu & C. Zimmermann (2007): Der beschleunigte Meeresspiegelanstieg und die Küstenschutzsysteme: Ergebnisse der erweiterten Risikoanalyse. In: Schuchardt, B. & M. Schirmer (Hrsg.): Land unter? Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050. oekom Verlag, S. 93-113
- Wittig, S. & M. Schirmer (2006): Watten und Vorländer vor dem Untergang? In: BUND - Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (Hrsg.): Klimawandel trifft Unterweserregion - aber wie? Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz, Band 8, S. 21-30
- Woth, K. & H. von Storch (2008): Klima im Wandel: Mögliche Zukünfte des Norddeutschen Küstenklimas. In: Dithmarschen: Landeskunde - Kultur - Natur, Heft 1/2008, S. 20-31
- Woth, K., R. Weisse & H. von Storch (2005): Dynamical modelling of North Sea storm surge extremes under climate change conditions - an ensemble study. Ocean Dyn. DOI 10.1007/s10236-005-0024-3
- Zebisch, M., T. Grothmann, D. Schröter, C. Hasse, U. Fritsch & W. Cramer (2005): Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. UBA, Reihe Climate Change 08/05. [[www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2947.pdf](http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2947.pdf), 07.06.2010]