

# **Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück**

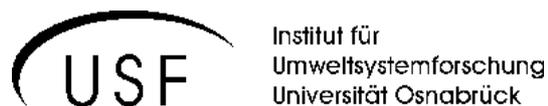
**Herausgeber: Prof. Dr. Michael Matthies**

**Beitrag Nr. 41**

## **Klimawandel**

**Michael Matthies (Hrsg.)**

**Oktober 2007**



**ISSN Nr. 1433-3805**

Herausgeber

Prof. Dr. Michael Matthies  
Universität Osnabrück  
Institut für Umweltsystemforschung  
Barabarastr. 12

D-49069 Osnabrück

Tel. 0541/ 969 - 2576/2575  
Fax. 0541/ 969 - 2599

e-mail: Matthies@usf.Uni-Osnabrueck.DE  
Internet: <http://www.usf.Uni-Osnabrueck.DE>

©® USF - Institut für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück

Dieser Beitrag enthält die Ausarbeitungen der im Sommersemester im Hauptseminar Angewandte Systemwissenschaft gehaltenen Referate.

## Inhaltsverzeichnis

### Michael Sieber

Das Atmosphären-Modell ECHAM5.....	5
------------------------------------	---

### Frauke Böckmann

Ozeanmodellierung und Meeresspiegelanstieg.....	23
---	----

### Daniella Schittler

Land-Vegetationsmodell.....	53
-----------------------------	----

### Robert Hagen

Potentielle Auswirkungen auf Küstenzonen und marine Ökosysteme.....	71
---	----

### Matthias Kalkuhl

Klimarekonstruktion.....	103
--------------------------	-----

### Marcel Junker

Adaptation an Klimawandel.....	133
--------------------------------	-----

### Nils Kehrein

Klimatrendanalyse.....	165
------------------------	-----

### Timo Woyzichovski

CCS - Carbon Capture and Storage.....	187
---------------------------------------	-----

### Arnim Bleier

Der Preis des Klimaschutzes.....	221
----------------------------------	-----



# **Das Atmosphären Zirkulationsmodell**

## **ECHAM5**

**Michael Sieber**

Hauptseminar Systemwissenschaft, SS 2007

Universität Osnabrück

## **Zusammenfassung**

Grundlage dieser kurzen Ausarbeitung sind die Reports No. 349 und No. 354 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg [1,2]. Es werden zunächst kurz die physikalischen Grundlagen der atmosphärischen Zirkulation dargestellt. Anschließend werden ausgehend von bestimmten vereinfachenden Annahmen statische Modelle eingeführt, welche die globalen Strukturen der Atmosphärenzirkulation abbilden. Ausgehend hiervon wird dann das dynamische Atmosphärenzirkulationsmodell ECHAM5 vorgestellt.

## 1 Grundlagen zur Atmosphärenzirkulation

Die Energie um die gewaltigen Luftmassen der Atmosphäre in Bewegung zu versetzen liefert die Sonne. Dabei erwärmt die Sonnenstrahlung die Luft nicht direkt. Kurzwellige Strahlung mit Wellenlängen im Bereich von 300 nm gelangt bis zur Erdoberfläche und wird dort absorbiert. Die resultierende Wärmeenergie wird in Form langwelliger Strahlung wieder abgestrahlt und erst diese Strahlung erhitzt dann die unteren Luftschichten. Die warmen Luftmassen steigen aufgrund ihrer geringeren Dichte auf und sorgen damit für eine vertikale Luftbewegung, die einen erhöhten Luftdruck in der Höhe und einen verringerten Luftdruck an der Erdoberfläche zur Folge hat. Diese Druckunterschiede sind natürlich immer relativ zu Luftschichten gleicher Höhe zu sehen, da der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt.

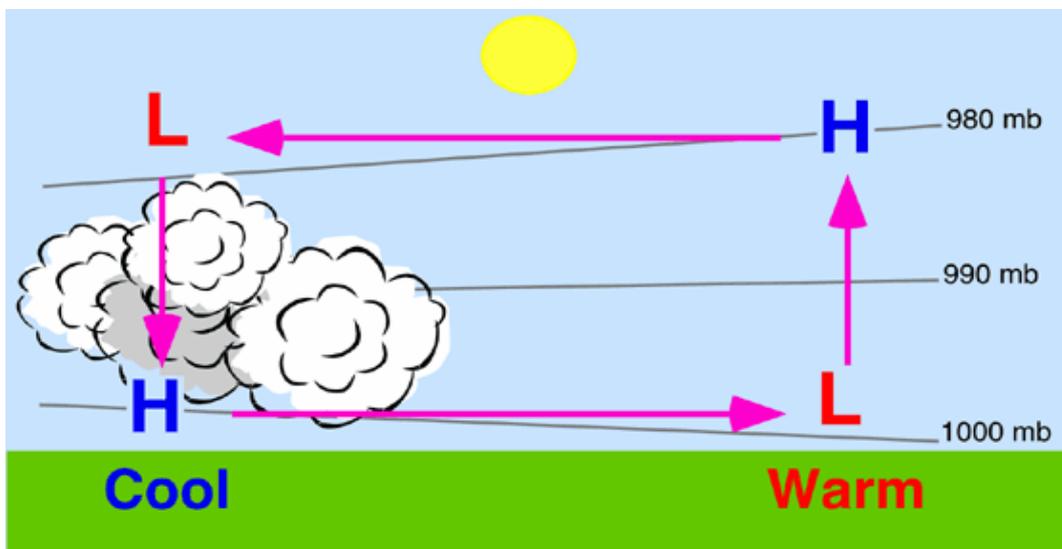


Abbildung 1: Schematische Darstellung Atmosphärenzirkulation, [www.physicalgeography.net](http://www.physicalgeography.net).

Nun wird nicht jeder Teil der Erdoberfläche gleich stark durch die Sonnenstrahlung erwärmt. Global erreicht aufgrund der Neigung der Erdachse die Äquatorregionen mehr Sonnenstrahlung als nördliche bzw. südliche Breiten. Regional wird der Anteil der absorbierten Sonnenstrahlung stark von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Einer der wichtigsten Parameter ist hier die Albedo der Oberfläche. Die Albedo ist der Quotient aus reflektierter und einfallender Strahlungsleistung und gibt damit an, welcher Anteil der einfallenden Strahlung reflektiert wird. So hat zum Beispiel Eis eine sehr hohe (0,8 - 0,9) und eine Waldfläche eine sehr niedrige (0,05-0,2) Albedo. Alle diese Faktoren sind natürlich im Allgemeinen auch zeitlich variabel und verändern sich zum Beispiel im Verlauf der Jahreszeiten.

Die auf diese Weise entstehenden Temperaturdifferenzen an der Erdoberfläche führen durch die unterschiedliche Erwärmung der bodennahen Luftschichten zu Luftdruckunterschieden sowohl am Boden als auch in der Höhe. In der Folge kommt es zu ausgleichenden horizontalen Luftmassenbewegungen. Zusammen mit den vertikalen Bewegungen durch aufsteigende bzw. absinkende Luftmassen ergibt sich ein einfaches erstes Zirkulationsschema, wie es in Abbildung 1 dargestellt ist.

## 2 Modellierung

Da sich die Atmosphäre nicht direkt im Experiment manipulieren und beobachten lässt, müssen Modelle der Atmosphärendynamik als Ausweg gewählt, um Erkenntnisse zu gewinnen. Ziel dieser Modelle soll es sein, das dynamische Verhalten der Atmosphäre bei Variation verschiedener Parameter zu simulieren. Interessant sind hier insbesondere die Struktur der Atmosphärenzirkulation und die regionalen bzw. global gemittelten Lufttemperaturen.

### 2.1 Einfache Modelle

Die Grundlagen des ersten Abschnitts legen nahe, dass die an der Erdoberfläche absorbierte Strahlungsleistung der Sonne den wichtigsten Parameter bei der Atmosphärenzirkulation darstellt. Als Indikator hierfür kann man die gemessene mittlere Temperatur der bodennahen Luftschichten heranziehen, wie sie in Abbildung 2 dargestellt sind.

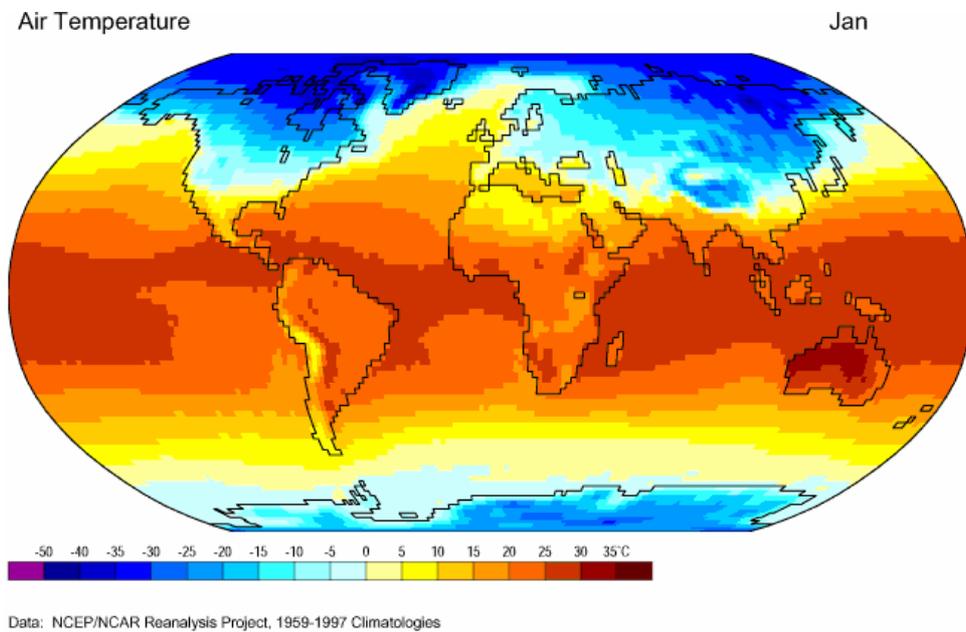


Abbildung 2: Mittlere Erdoberflächentemperatur im Januar.

Mit den Grundlagen des vorherigen Abschnitts lässt sich nun bereits ein einfaches Zirkulationsschema der globalen Atmosphäre aufstellen. Dazu wird zunächst angenommen, dass die Erde nicht rotiert und ihre Oberfläche homogen ist. Man erhält das linke Zirkulationsmuster in Abbildung 3, mit einem Luftdruckgefälle in den niedrigen Luftschichten von den Polen zum Äquator. Die Luftströmungen verlaufen von den Gebieten des höchsten Luftdruckes an den Polen zu dem äquatorialen Band tiefen Drucks, entsprechend der beobachteten Temperaturverteilung. In der Höhe ergeben sich dementsprechend entgegengesetzte Luftdrücke bzw. Luftströmungen.

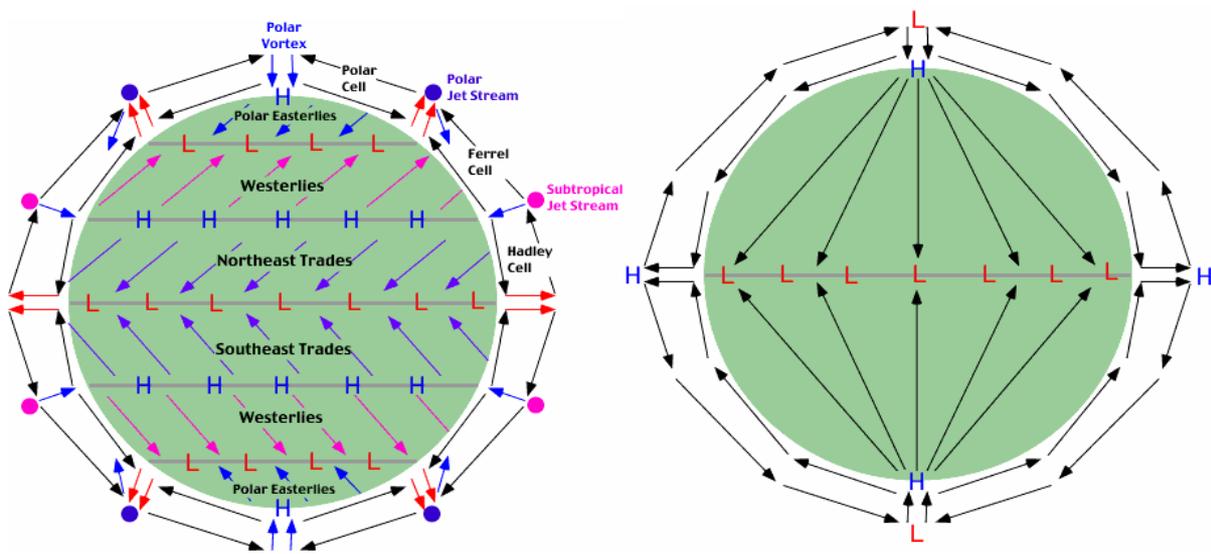


Abbildung 3: Zirkulationsmuster ohne (links) und mit (rechts) Erdrotation, www.physicalgeography.net.

Berücksichtigt man die Erdrotation, so sind die bewegten Luftmassen der Corioliskraft unterworfen. Diese werden daraufhin auf der Nordhalbkugel nach rechts und auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt. Zusätzlich stellt man fest, dass die von den Polen süd- bzw. nordwärts strömenden Luftmassen sich bereits auf ca.  $60^\circ$  Breite soweit erwärmt haben, dass sie beginnen aufzusteigen. Umgekehrt sinken die in der Höhe vom Äquator weg strömenden Luftmassen bereits auf etwa  $30^\circ$  Breite wieder ab. Somit ergibt sich ein etwas komplexeres Strömungsmuster, dargestellt rechts in Abbildung 3. Man erkennt nun auf beiden Hemisphären jeweils drei getrennte Zirkulationszellen, wobei die Oberflächenströmung in der mittleren Zelle der allgemeinen Strömungsrichtung entgegengesetzt verläuft. Die mittlere Zelle ist dabei auf  $30^\circ$  und  $60^\circ$  Breite durch die angesprochenen Zonen aufsteigender bzw. absinkender Luftmassen von der polaren und äquatorialen Zelle getrennt. Diese Übergangszonen entsprechen dabei Breiten mit relativ hohem bzw. niedrigem Luftdruck.

Ein Vergleich mit den in Abbildung 4 dargestellten, über 30 Jahre gemittelten Luftdruck- und Windmessungen zeigt, dass dieses Modell die globalen Strömungsverhältnisse schon recht gut widerspiegelt. Man erkennt in den Messdaten besonders auf der Südhalbkugel deutlich die beiden Zonen niedrigen Luftdrucks am Äquator und auf ca.  $60^\circ$  Breite, welche von einer Zone hohen Luftdrucks getrennt werden. Diese Zone hohen Luftdrucks wird nur von den Landmassen Südamerikas, Afrikas und

Australiens unterbrochen. Dieser Effekt zeigt sich noch deutlicher auf der Nordhalbkugel, wo insbesondere der zirkumpolare Tiefdruckgürtel aufgrund der großen Landmassen nicht so deutlich ausgeprägt ist wie im Bereich der Antarktis. Dennoch ist auch hier das grundlegende Muster zu erkennen.

## 2.2 Wettermodelle und globale Zirkulationsmodelle

Komplexere Modelle, welche die Prozesse in der Atmosphäre abbilden, wurden in den 60er Jahren zunächst zur Wettervorhersage entwickelt. Diese und die nachfolgenden Wettermodelle unterscheiden sich von den globalen Zirkulationsmodellen wie ECHAM5

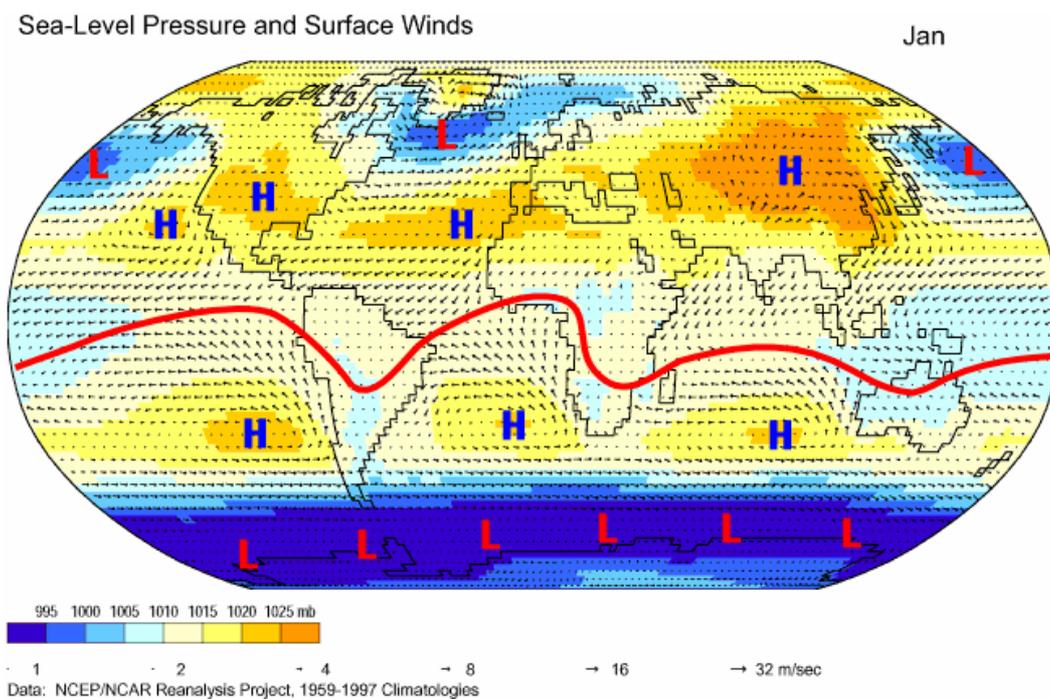


Abbildung 4: Mittlerer Luftdruck und mittlere Luftströmung im Januar

durch andere Zielsetzungen. Während die grundlegenden Prinzipien bei beiden Modelltypen die gleichen sind, unterscheiden sie sich vor allem in den Raum- und Zeitskalen sowie der räumlichen und zeitlichen

Auflösung. Denn im Gegensatz zu den globalen und langfristigen Simulationen der Zirkulationsmodelle soll ein Wettermodell regional beschränkt und für einen kurzen Zeitraum, üblicherweise wenige Tage, die Entwicklung simulieren. In Tabelle 1 sind Eigenschaften der beiden Modelltypen gegenübergestellt.

	Wettermodell	Zirkulationsmodell
Ziel	Wettervorhersage	Klimaprognose
Zeitskala	Tage	Jahre
Raumskala	regional oder global	global
Auflösung	regional oder global	global
Anfangsbedingungen	wichtig	unwichtig
Sonneneinstrahlung	unwichtig	wichtig
Stabilität	unwichtig	wichtig

Tabelle 1: Eigenschaften von Wettermodellen und Zirkulationsmodellen.

Wie schon angedeutet, ergeben sich die unterschiedlichen Eigenschaften aus den verschiedenen Zielsetzungen der Modelltypen. Für die Simulation der globalen Zirkulationsmuster sind lokale Windsysteme oder kurzzeitige Ereignisse wie zum Beispiel Gewitter nicht von Bedeutung. Andererseits sind solche Informationen sehr wichtig für die Wettervorhersage. Daher kommen Zirkulationsmodelle mit

einer geringeren räumlichen und zeitlichen Auflösung aus, dies ist für eine effiziente rechnergestützte Behandlung sogar unumgänglich.

Ebenso verhält es sich mit den zu Anfang der Simulation vorgegebene Bedingungen. Während diese Anfangsbedingungen im Verlauf der über viele Jahre simulierten Zirkulation nur von untergeordneter Bedeutung sind, spielen sie bei den Wettermodellen eine große Rolle. Hier sei an das aus den Anfangstagen der Wettervorhersage stammende Stichwort "Schmetterlingseffekt" erinnert, welches diese kritische Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen umschreibt. Weitere Unterschiede gibt es beim Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche. Hiermit ist nicht die sehr kleinskalige Einstrahlung im Tagesverlauf gemeint, die zum Beispiel durch Wolkenbedeckung beeinflusst wird, sondern die großräumige Einstrahlung, die hauptsächlich von astronomischen Parametern wie der Ausrichtung der Erdachse oder der Exzentrizität der Erdumlaufbahn abhängt. Diese Parameter bestimmen die Gesamtstrahlungsleistung, welche die Erde von der Sonne erhält und sind somit Einflussfaktoren für die globale Zirkulation. Für das Wettergeschehen sind sie kaum von Bedeutung, da sie sich nur im Laufe von Jahrhunderten bzw. Jahrtausenden verändern. Die Langzeitstabilität des Modells ist bei den eher kurzen Simulationsläufen eines Wettermodells ebenfalls nicht so wichtig, für die im Rahmen von Klimaszenarien oft über Jahrzehnte simulierenden globalen Zirkulationsmodelle spielt dieser Punkt aber eine entscheidende Rolle. Trotz der oben beschriebenen Unterschiede wurden die meisten der aktuellen Zirkulationsmodelle direkt von vorhandenen Modellen zur Wettervorhersage abgeleitet, denn die grundlegenden atmosphärischen Zusammenhänge und damit die bestimmenden Gleichungen und Parameter sind bei beiden Typen gleich.

### **3 ECHAM5**

Das Zirkulationsmodell ECHAM5 basiert auf einer erprobten und zur Wettervorhersage eingesetzten Version eines Modells des European Centers for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) aus dem Jahr 1989, wobei die hier vorgestellte Version 5 des Zirkulationsmodells aus dem Jahr 2003 stammt. Die umfangreiche Parametrisierung des Zirkulationsmodells erfolgt beim Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Die wesentlichen Teile des Modells entsprechen dem ursprünglichen Wettervorhersagemodell.

ECHAM5 modelliert die untere Erdatmosphäre bis in eine Höhe von ca. 30 km. Hier spielen sich alle wetter- und klimarelevanten Prozesse in der Atmosphäre ab. Das heißt auch, dass ECHAM5 ein reines Atmosphärenmodell ist, also die Erdoberfläche nur als Randbedingung mit in die Simulationen eingeht. Alle Eigenschaften der Oberfläche, ob es sich also um eine Wasseroberfläche oder ein Waldgebiet handelt, die Albedo, die Temperatur und die Bodenfeuchtigkeit werden entweder statisch vorgegeben, aus vorgegebenen Parametern errechnet oder zeitlich variabel angepasst. Um aussagekräftige Klimaszenarien simulieren zu können, wird ECHAM5 im Allgemeinen mit weiteren spezialisierten Modellen gekoppelt. Dies sind insbesondere Ozeanzirkulationsmodelle, Land-Vegetationsmodelle und Module, die chemische Prozesse in der Atmosphäre simulieren. Ein Beispiel für so ein gekoppeltes Modell ist ECHAM5/MPI-OM 1, bei dem ECHAM5 mit einem am MPI Hamburg entwickelten Ozeanmodell gekoppelt wird. Dieses Modell eignet sich besonders dafür, Auswirkungen von Klimaveränderungen auf ozeanische Strömungssysteme wie zum Beispiel die thermohaline Zirkulation zu simulieren.

### 3.1 Aufbau

#### Prognostische Variable

ECHAM5 liefert im Wesentlichen fünf Variablen, an welchen die Dynamik des simulierten Szenarios abgelesen werden kann. Die erste dieser Variablen ist die Vortizität  $\nu$ , welche als Rotation  $= \nabla \times \mathbf{w}$  eines Vektorfeldes  $\mathbf{w}$  definiert ist. In diesem Fall entspricht die Vortizität der Wirbelstärke des Windfeldes  $\mathbf{w}$ . Die zweite Variable ist die Divergenz  $d = \nabla \cdot \mathbf{w}$  des Windfeldes, welche Informationen über Windrichtung und -stärke liefert. Die bei Klimaszenarien meistens interessanteste und offensichtlichste Variable ist die Lufttemperatur  $T$ . Der Luftdruck  $p$  und die Luftfeuchtigkeit sind weitere Variablen, welche für die Dynamik des Modells eine entscheidende Rolle spielen.

Die meisten dieser prognostischen Variablen werden durch eigene Evolutionsgleichungen beschrieben, andere aus diesen und weiteren Daten errechnet. Die Evolutionsgleichungen sind partielle Differentialgleichungen, welche verschiedene Terme zum Beispiel zur Massenbilanz, zum Strahlungstransport und zur Impulsübertragung enthalten. Stellvertretend soll im Folgenden die entsprechende Gleichung für die Temperatur etwas genauer beschrieben werden. Die Gleichung für die Temperaturänderung eines Gemisches aus den Komponenten trockene Luft, Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eis ergibt sich aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik. In kartesischen Koordinaten und nach einigen Vereinfachungen und Abschätzungen erhält man daraus

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R_d T_v}{p C_p} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{C_p} (Q_R + Q_L + Q_D - \frac{1}{\rho} (\frac{\partial J_s}{\partial z} - C_{pd} T (\delta - 1) \frac{\partial J_{qv}}{\partial z})) + K_T$$

Im ersten Term auf der rechten Seite bezeichnet  $R_d$  die spezifische Gaskonstante für trockene Luft und  $T_v$  die Temperatur des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes.  $T_v$  lässt sich mit Hilfe der Lufttemperatur  $T$  durch  $T_v = T(1 + (R_d R_v - 1)q_v)$  ausdrücken, dabei ist  $R_v$  die spezifische Gaskonstante für Wasserdampf und  $q_v$  gibt die spezifische Masse der trockenen Luft an. Die spezifische Masse einer Atmosphärenkomponente gibt an, welchen Anteil an der Gesamtmasse die entsprechende Komponente in einem bestimmten Volumen hat. Die spezifischen Massen  $q_i$  der vier Komponenten trockene Luft, Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eis spielen eine wichtige Rolle in den thermodynamischen Gleichungen und sie werden jeweils durch eigene Evolutionsgleichungen beschrieben.  $p$  gibt wie schon angesprochen den Luftdruck an und  $C_p$  die spezifische Wärmekapazität der Atmosphäre bei diesem Luftdruck. Die Wärmekapazität  $C_p$  lässt sich dabei durch die Wärmekapazitäten der einzelnen Atmosphärenkomponenten ausdrücken, wie  $C_{pd}$  für die Wärmekapazität trockener Luft. Durch  $Q_R$ ,  $Q_L$  und  $Q_D$  werden verschiedene Arten des Wärmeaustausches mit der Umgebung beschrieben. Zum Beispiel bezeichnet  $Q_R$  die durch langwellige Strahlung eingebrachte Wärme. Mit  $J$  werden vertikale Flüsse beschrieben, so entspricht  $J_{qv}$  dem Transfer von Wasserdampf in höhere oder niedrigere Luftschichten und die entsprechend Änderungsrate dieses Transfers abhängig von der Höhe  $z$ . Die Dichte des gesamten Atmosphärenmischungs geht durch den Faktor  $\rho$  in die Gleichung ein und  $K_T$  beschreibt die Auswirkung von horizontalen Flüssen auf die Temperatur  $T$ .

### Parametrisierungen

Atmosphärische Prozesse, deren Ablauf nur unzureichend verstanden ist oder die deutlich unterhalb des räumlichen Auflösungsvermögens ablaufen, werden in den Evolutionsgleichungen parametrisiert. Das heißt, sie werden nicht dynamisch berechnet, sondern vorgegeben. Dazu gehören zum Beispiel Strahlungsprozesse, chemische Prozesse der Atmosphären-gase und die Wolkenbildung in hohen

Luftschichten. Ebenfalls parametrisiert werden alle Eigenschaften der Erdoberfläche, wie Orographie, zeitlicher Wandel der Vegetation, Wasserhaushalt der verschiedenen Böden und die Oberflächenalbedo.

Weitere Parametrisierungen betreffen die Variabilität einiger Eigenschaften des Erdorbits. Mitte des 19. Jahrhunderts kam die Theorie auf, dass solche orbitalen Einflüsse für das Wechselspiel von Eiszeiten und Warmzeiten verantwortlich sein könnten [3, 4, 5]. Bis heute wurde diese Theorie durch weitere Hinweise unterstützt. Diese Einflüsse spielen also bei Klimamodellen eine Rolle und daher werden sie in ECHAM5 ebenfalls parametrisiert.

In Abbildung 5 ist beispielhaft der Einfluss der schwankenden Exzentrizität des Erdorbits dargestellt. Ist der Orbit fast kreisförmig, so erhält die Erdatmosphäre auf ihrer Bahn eine nahezu konstante Menge an Strahlungsenergie von der Sonne. Ist die Bahn sehr exzentrisch, kann die Differenz an erhaltener Energie zwischen sonnennächsten bzw. sonnenfernten Punkt bis zu 30% betragen.

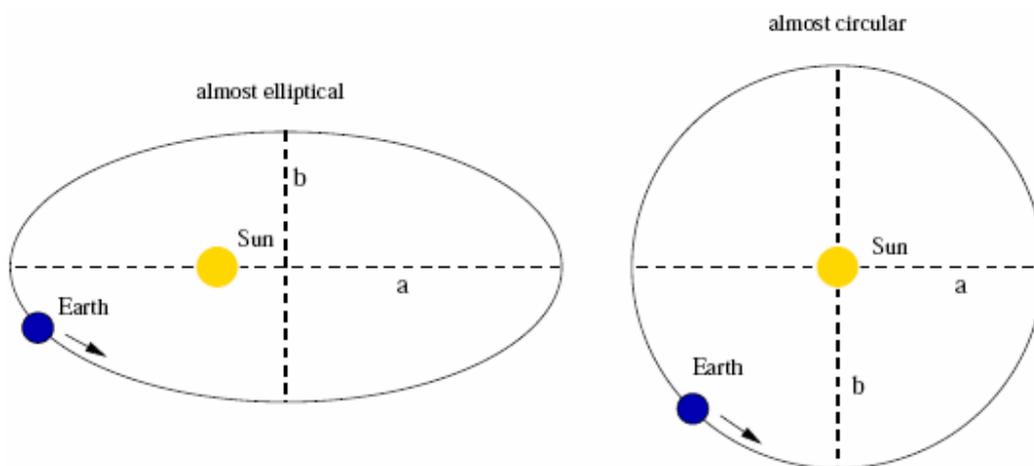


Abbildung 5: Exzentrizität des Erdorbits.

Während die Exzentrizität also die Gesamtmenge der an jedem Punkt des Erdorbits auf die Erdatmosphäre einfallenden Strahlung beeinflusst, bewirken Änderungen der Neigung der Erdachse und der Präzession des Erdorbits eine Umverteilung der Strahlungsmenge zwischen nördlicher und südlicher Hemisphäre. Auch diese Faktoren gehen durch entsprechende Parametrisierungen in das Modell ein.

### 3.2 Numerik

Die vorgestellte Gleichung (1) lässt sich genauso wie die anderen Evolutionsgleichungen des Modells effektiv nur numerisch lösen. Dazu werden die zunächst in kartesischen Koordinaten formulierten Gleichungen in Kugelkoordinaten überführt. Dies ist die natürliche Wahl für Prozesse, die sich auf bzw. in bestimmten Höhen über der Erdoberfläche abspielen. Der erste Schritt zur Anwendung von numerischen Lösungsverfahren ist stets, das zugrundeliegende kontinuierliche Problem zu diskretisieren. Das heißt, die auftretenden Differentialquotienten werden durch Differenzenquotienten approximiert.

Für die zeitliche Koordinate wird dabei das Leapfrog-Verfahren verwendet. Der Zeitschritt hängt dabei im Wesentlichen von der räumlichen Auflösung ab, das heißt bei höherer räumlicher Auflösung ist auch ein kleinerer Zeitschritt notwendig. Das Courant-Friedrichs-Levy Kriterium gibt dabei die obere Schranke vor. Bei mittleren räumlichen Auflösungen entspricht ein Zeitschritt etwa 30 Minuten. Es wird also implizit angenommen, dass Prozesse, die auf kürzeren Zeitskalen ablaufen, auf das Klima keine oder nur eine sehr geringe Auswirkung haben. Im Folgenden wird etwas detaillierter beschrieben, wie die drei räumlichen Koordinaten behandelt werden.

#### Horizontale Diskretisierung

Für die horizontale Diskretisierung wird der zugrundeliegende Ortsraum durch eine Fourier-Transformation in den sogenannten Spektralraum übertragen. Im Spektralraum nehmen die Ortsableitungen in den Differentialgleichungen eine einfachere Form an und sind effizienter zu behandeln. Die horizontale Auflösung ergibt sich aus der bei der Fourier-Transformation verwendeten Wellenzahl, wobei es in der beschriebenen ECHAM Version Wellenzahlen von 21 (T21) bis 159 (T159) verwendet werden. Dies entspricht einer räumlichen Auflösungen von etwa 400 km (T21) bis zu etwa 80 km (T159). ähnlich wie bei der zeitlichen Auflösung können dabei kleinräumige Prozesse unterhalb des Auflösungsvermögens nicht dynamisch simuliert werden, sie werden wie bereits beschrieben entsprechend parametrisiert.

#### Vertikale Diskretisierung

Um die vertikale Dynamik der prognostischen Variablen erfassen zu können, wird die Atmosphäre in  $N$  diskrete Schichten unterteilt. Die Schichten werden dabei durch eine Luftdruckkoordinate definiert,

welche im Wesentlichen vom Luftdruck  $p_s$  an der Erdoberfläche abhängt. Die Drücke an den Grenzen zwischen zwei vertikalen Schichten sind dabei durch

$$p_{k+1/2} = A_{k+1/2} + B_{k+1/2} p_s, \quad k=0,1,2, \dots, N$$

gegeben, wobei  $A_{k+1/2}$  und  $B_{k+1/2}$  Konstanten sind. Der für die  $k$ -te Schicht maßgebliche Druck ergibt sich dann einfach zu  $p_k = 1/2 (p_{k+1/2} + p_{k-1/2})$ . Durch die Abhängigkeit vom Bodenluftdruck  $p_s$  folgen die vertikalen Schichten zunächst dem Verlauf der Erdoberfläche. Das heißt, die erste Schicht liegt immer direkt über dem Boden unabhängig von der Höhe der Oberfläche über dem Meeresspiegel. Die Konstanten  $A_{k+1/2}$  und  $B_{k+1/2}$  werden dabei aber so gewählt, dass dieser Effekt in größeren Höhen abnimmt und die obersten Schichten nahezu parallel zu einer perfekten Kugeloberfläche verlaufen. Abbildung 6 veranschaulicht die vertikale Diskretisierung.

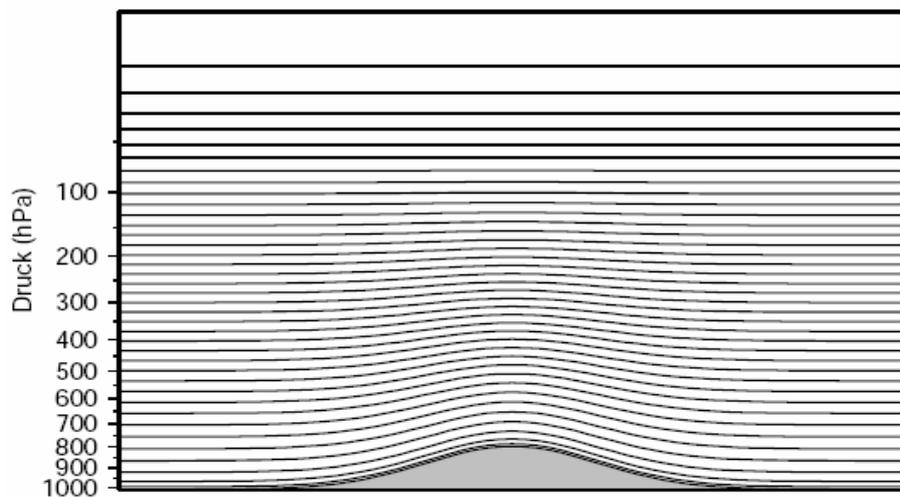


Abbildung 6: Vertikale Diskretisierung.

Im Modell werden üblicherweise 19 oder 31 vertikale Schichten verwendet, bezeichnet mit L19 bzw. L31. Die höchste Schicht liegt dabei in beiden Fällen bei einem Druck von ungefähr 10 hPa, was einer Höhe von etwa 30 km entspricht.

### 3.3 Validierung

Die Validierung von globalen Zirkulationsmodellen stellt ein besonderes Problem dar, denn ein Abgleich mit Versuchsdaten aus begleitenden Experimenten ist offensichtlich nicht möglich. Ein einfacher und pragmatischer Weg, grobe Modellierungsfehler aufzudecken und auszuschließen, ist der Vergleich mit anderen Zirkulationsmodellen wie Potsdam-3 oder HadSM3. Hierbei werden die verschiedenen Modelle mit gleichen Anfangsbedingungen gestartet und die Entwicklung der Simulationen verglichen. Verhält sich das zu prüfende Modell deutlich abweichend oder liefert es unrealistische Werte, deutet dies auf Fehler im Modell hin.

Ob das Modell tatsächlich in der Lage ist, reale Zirkulationsvorgänge abzubilden, lässt sich mit Hilfe historischer Klimadaten prüfen. Hier bei wird durch sogenannte Proxydaten, die man zum Beispiel aus Eisbohrkernen gewinnt, das Klima vergangener Epochen rekonstruiert. Mit dem Zirkulationsmodell wird nun versucht, diese historische Klimaentwicklung nachzuvollziehen. Dabei können die Modelle Hinweise liefern, warum es in vergangenen Zeiten zu bestimmten Klimaereignissen wie zum Beispiel sich schnell entwickelnden Eiszeiten in Europa gekommen ist.

Die neuerliche Analyse von klimatischen Messdaten, zum Beispiel durch das ERA15 Projekt des ECMWF, liefert die Möglichkeit, das Modell mit relativ aktuellen globalen Klimadaten zu vergleichen und zu kalibrieren. Im ERA15 Projekt wurden Beobachtungsdaten aus unterschiedlichsten Quellen auf der ganzen Welt analysiert, um das weltweite Klimageschehen im Zeitraum 1979-1994 zu rekonstruieren [7].

Bei der Validierung des ECHAM5 Modells war eine zentrale Frage, wie fein die horizontale Auflösung sein muss, um sinnvolle Ergebnisse zu liefern. Es stellte sich heraus, dass eine steigende horizontale Auflösung nur bei gleichzeitig steigender vertikaler Auflösung signifikant bessere Ergebnisse liefert. Grundsätzlich erhielt man die Erkenntnis, dass eine höhere vertikale Auflösung sinnvoller ist als eine hohe horizontale Auflösung. So liefert zum Beispiel das Modell mit den Schrittweiten T63L31 bessere Ergebnisse als das Modell mit T106L19. Zudem lassen sich höhere vertikale Auflösungen numerisch effizienter behandeln.

### 3.4 Vorgehensweise

Anhand des Vorgehens beim Klimasimulationsprojekt *climateprediction.net* [6] soll exemplarisch der Ablauf einer Klimasimulation zur Prognose veranschaulicht werden. Am Anfang einer Simulationsreihe steht die Auswahl eines passenden Parametersatzes. Ist keine plausible Parametrisierung bekannt, werden zunächst Testläufe mit Parametersätzen gestartet, die ein möglichst breites Spektrum an Parameterkombinationen abdecken. Dabei können einige Testläufe vollkommen unrealistische Klimazustände erreichen, mit Erdoberflächentemperaturen von mehreren hundert Grad oder solche, welche die Erde in einen Eisball verwandeln. Diese Parametersätze werden aussortiert. Aus den verbliebenen Parametersätzen werden nun diejenigen ausgewählt, welche bei den folgenden Klimaszenarien verwendet werden.

Die erste Aufgabe ist nun, das Klima der Jahre 1950-2000 möglichst genau in der Simulation zu rekonstruieren. Hierbei können weitere Anpassungen an den Parametern vorgenommen werden. Erst anschließend wird ein Klimaszenario für die Jahre 2000-2100 simuliert, welches als Prognose der Klimaentwicklung unter den gegebenen Szenariobedingungen interpretiert werden kann. Zu den Szenariobedingungen gehören Einflüsse wie der weltweite Ausstoß an CO<sub>2</sub> und die angenommene Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung.

## 4 Fazit

Die Klimaforschung ist zur Zeit ein sehr spannendes Forschungsfeld und hier gewonnene wissenschaftliche Ergebnisse werden oftmals öffentlich und politisch heftig diskutiert. Globale Zirkulationsmodelle sind dabei ein unverzichtbarer Baustein der Forschung. Im Zusammenspiel mit weiteren Modellen werden sie eingesetzt, um Prognosen über die zukünftige Entwicklungen des Klimas abzugeben. Um auf Grundlage dieser Prognosen Entscheidungen zu treffen, ist es notwendig, sich nicht nur auf ein Modell zu stützen. Im Idealfall lässt sich aus vergleichbaren Szenarien mehrerer Modelle ein eindeutiger Trend ablesen, der eine Bewertung der verschiedenen Handlungsalternativen zulässt.

Offensichtliche Probleme beim Modellieren der globalen Zirkulation und insbesondere beim Validieren der Ergebnisse wurden im Wesentlichen schon angesprochen. Besonders die Parametrisierung von subskaligen geophysikalischen Prozessen ist Gegenstand intensiver Forschung. Prominentestes Beispiel hierfür ist der Prozess der Wolkenbildung und daraus resultierender Niederschlag.

Im Zuge des Klimawandels gewinnen außerdem lokale Extremereignisse wie außergewöhnlich heftige Stürme eine immer größere Bedeutung. Das Auftreten solcher Ereignisse hängt oft von relativ kleinräumigen, schlecht verstandenen Faktoren ab und ist somit in einem globalen Zirkulationsmodell nur schwer nachzuvollziehen.

Ein Problem speziell für die Validierung dieses und anderer Modelle ist der Mangel an weit zurückreichenden Klimamessdaten. Die Klimarekonstruktion und Projekte wie ERA15 stellen dabei eigenständige Forschungsfelder dar, deren Ergebnisse einen wichtigen Beitrag nicht nur zur Validierung und Kalibrierung, sondern insbesondere auch zur Interpretation der Simulationsergebnisse leisten.

## Literatur

[1] Roeckner, E. et al. (2003). The atmospheric general circulation model ECHAM5,

Part I. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 349.

[2] Roeckner, E. et al. (2003). The atmospheric general circulation model ECHAM5,

Part I. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 354.

[3] Croll, J. (1867). On the change in the obliquity of the ecliptic, its influence on the climate of the polar regions and on the level of the sea. Philosophical Magazine 33, 426-445.

[4] Croll, J. (1867). On the excentricity of the earths orbit, and its physical relations to the glacial epoch. Philosophical Magazine 33, 119-131.

[5] Milankovitch, M. M. (1941). Canon of Insolation and the Ice Age Problem.

Königlich Serbische Academie, Belgrade.

[6] [www.climateprediction.net](http://www.climateprediction.net)

[7] [www.ecmwf.int/research/era/ERA-15/](http://www.ecmwf.int/research/era/ERA-15/)



OZEANMODELLIERUNG  
UND  
MEERESSPIEGELANSTIEG

FRAUKE BÖCKMANN



## INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung .....	26
2. Ozeanströmungen.....	26
2.1 Modellierung .....	27
2.2 Auswirkungen der THC auf den Meeresspiegel.....	27
3. Meeresspiegelanstieg .....	28
3.1 Der beschleunigte Meeresspiegelanstieg.....	31
3.1.1 Thermische Expansion: .....	34
3.1.2 Verschiebungen im Wasserhaushalt .....	34
3.1.2.1 Antarktis.....	36
3.1.2.2 Grönland.....	37
3.1.2.3 Gletscher und Eiskappen .....	38
3.2 Folgen des Meeresspiegelanstiegs.....	38
3.2.1 Geophysikalische und ökologische Folgen .....	39
3.2.2 Sozioökonomische Folgen .....	39
4. Modellierung .....	40
4.1 Modell des IPCC Berichtes von 2001.....	40
4.1.1 Special Report on Emissions Scenarios (SRES) .....	41
3.1.2 IPCC Modellgleichung .....	43
4.2 Diskussion .....	49
5. Fazit.....	49
6. Literaturverzeichnis.....	50
7. Abbildungsverzeichnis.....	51

## 1. EINLEITUNG

Der Klimawandel und seine Folgen werden zur Zeit stark diskutiert. Immer mehr Klima-modelle werden erstellt und erzeugen mehr oder minder aussagekräftigen Prognosen. Diese Arbeit beschäftigt sich vor allem mit dem beschleunigten Meeresspiegelanstieg.

Zunächst sollen die Ozeanströmungen kurz erwähnt werden, da vor allem in der populärwissenschaftlichen Literatur mit dem Versiegen des Golfstroms viel argumentiert wird. Es werden die thermohaline Zirkulation sowie ein einfaches Boxenmodell vorgestellt. Daraufhin werden die Auswirkungen der thermohalinen Zirkulation auf den Meeresspiegelanstieg thematisiert.

Die Faktoren und Zusammenhänge, die den Meeresspiegel und damit auch seinen Anstieg beeinflussen, werden daraufhin näher erläutert. Darauf basierend werden die Modellierungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vorgestellt. Sie geben einen guten Überblick über die Thematik. Diese Modelle wurden ausgewählt, um an einem Beispiel einen Überblick über die Thematik zu erhalten. Die dabei gewonnenen Informationen werden abschließend auf Fehlerquellen und Verbesserungsmöglichkeiten diskutiert.

## 2. OZEANSTRÖMUNGEN

Ozeanströmungen werden durch Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Wassermassen angetrieben. Für die Dichte von Wasser sind vor allem die Wassertemperatur (thermo) und die Salinität (halin) maßgeblich. Dabei ist die Dichte von kaltem Wasser höher als die des warmen Wassers und die Dichte von salzreichem Wasser höher als des salzarmen Wassers.

Eine der größten Ozeanströmungen ist die thermohaline Zirkulation (THC). Die THC ist ein globales Strömungssystem, das allgemein gesagt warmes Oberflächenwasser nach Norden und kaltes Tiefenwasser nach Süden transportiert. Um die THC aufrecht zu erhalten, muss die Salinität im nördlichen Atlantik hoch genug sein, um das Absinken der Wassermassen zu ermöglichen. Da der THC sehr salzreiches Wasser aus den tropischen Gebieten nach Norden führt, wird dort die nötige Salinität erreicht. Der THC ist ein selbsterhaltendes Strömungssystem. Fällt jedoch die Salinität unter einen kritischen Wert (z.B. durch starken Frischwasserzufluss), ist das Absinken des Oberflächenwassers nicht mehr möglich und die Strömung wird unterbrochen.

## 2.1 MODELLIERUNG

Hier soll nach Rahmstorf (1996) ein sehr einfaches Modell für die thermohaline Zirkulation vorgestellt werden (siehe Abb. 1). Box 2 ist das Tiefenwasser der Nordatlantiks, Box 2 das der Tropen und Box 1 das des Südatlantiks. Der Fluss zwischen den Boxen ist proportional zum Dichteunterschied. Die Dichte wiederum ist abhängig von der Salinität und der Temperatur ( $T_1$ ,  $T_2$ ). Die Frischwasserzuflüsse  $F_1$  und  $F_2$  in den Boxen 1, 2 und 3 beeinflussen wiederum die Salinität. Dieses Modell bildet einen geschlossenen Kreislauf, sodass der vertikale Fluss zwischen Box 3 und 4 nicht mitmodelliert wird. Trotz der Einfachheit sind die Aussagen dieses Modells bzgl. der Stabilität der thermohalinen Zirkulation gleich der komplexerer Modelle. Es gibt zwei stabile Zustände: zum einen die sich selbsterhaltende Zirkulation und zum anderen der Stillstand. Welche Auswirkungen eine Zusammenbruch der thermohalinen Zirkulation auf den Meeresspiegel hat, soll im Folgen kurz beschrieben werden.

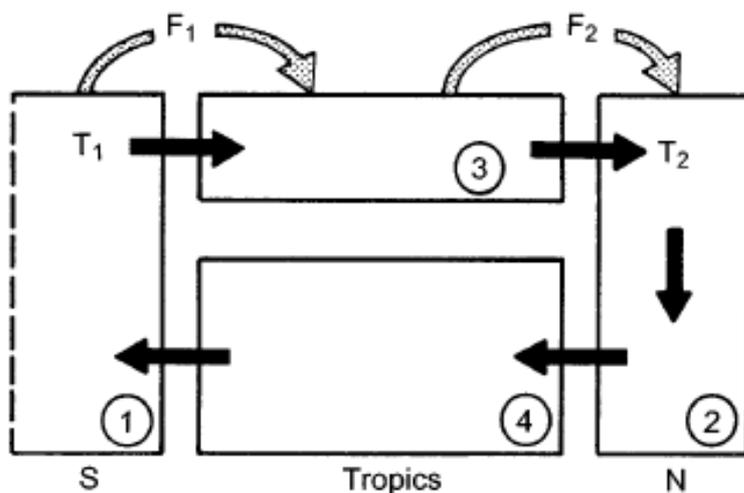
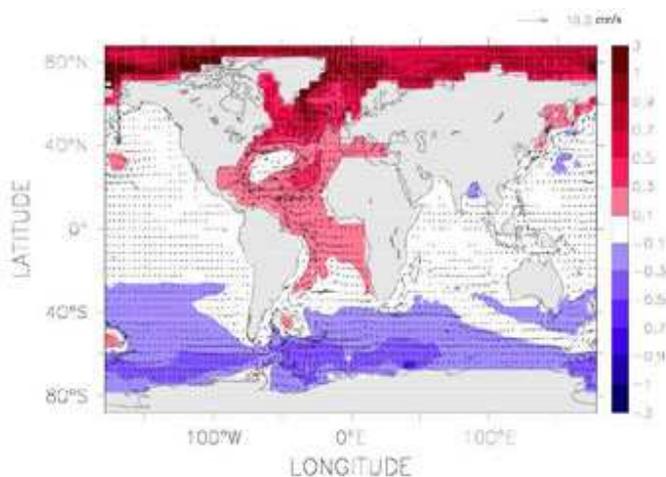


Abbildung 1: Boxenmodell

## 2.2 AUSWIRKUNGEN DER THC AUF DEN MEERESSPIEGEL

Veränderungen oder gar ein Versiegen der THC werden nach Levermann et al. (2005) starken Einfluss auf den Meeresspiegel haben. Falls die THC zusammenbricht, werde der Meeresspiegel

im Nordatlantik um bis zu 1 m ansteigen, da bisher durch das Absinken großer Wassermassen im Nordatlantik der Meeresspiegel hier besonders niedrig ist. An den Küsten des Südatlantiks werde der Meeresspiegel hingegen sinken, und somit zu einem globalen Ausgleich der Meeresspiegeländerungen führen (siehe Abb.2). Dazu kommt, dass die oberen Wasserschichten sich schneller erwärmen und den Effekt durch Ausdehnung zusätzlich verstärken würden. An manchen Stellen werde es zu einem Anstieg von 25 mm pro Jahr kommen. Andere Meeresspiegelanstiegsfaktoren liegen weit darunter (siehe folgende Kapitel).



**Abbildung 2:** Meeresspiegelanstieg (in m) nach dem Zusammenbruch des THC

Nach dem IPCC Bericht 2007 ist es sehr wahrscheinlich, dass die THC im Atlantik im 21. Jahrhundert schwächer wird. Die durchschnittliche Reduzierung liege bei den Szenarien bei 25% (wobei die Spanne von 0% bis ca. 50% geht). Allerdings sei es auch sehr unwahrscheinlich, dass sich der Golfstrom im 21. Jahrhundert abrupt ändern wird. Langfristigere Änderungen beim Golfstrom könnten bisher aber noch nicht mit ausreichender Sicherheit abgeschätzt werden. Trotz evtl. Umschwünge werde aber die Temperatur im Atlantik ansteigen (IPCC, 2007).

### 3. MEERESSPIEGELANSTIEG

Laut Definition ist der „Meeresspiegel“ ein „aus Messungen statistisch bestimmter mittlerer Wasserstand“ (Behnen, 2000, 20). Diese Messungen sind sehr fehleranfällig, da sich die Bezugspunkte (z.B. durch Erdgezeiten) stetig verändern. Des weiteren muss beachtet werden,

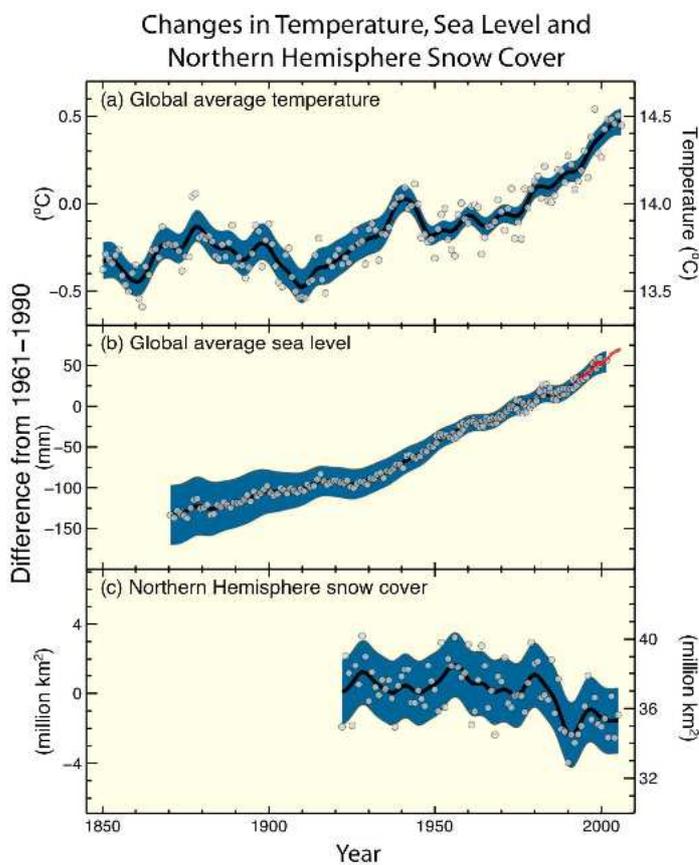
dass der Meeresspiegel in sehr unterschiedlichen Zeitskalen „schwankt“, von Stunden (Tiden) bis zu Jahrmillionen (tektonische Verschiebungen). Hauptschwierigkeit ist es hierbei, die Größe bzw. den Trend der entgegengesetzten bzw. gleichsinnigen kontinentalen und marinen Bewegungen zu bestimmen. Generell wird der relative Meeresspiegel als Pegelstand direkt an der Küste und über eine sehr lange Zeitspanne gemessen, damit Tiden, Wellen u.ä. ausgemittelt werden können.

Im Folgenden sollen die Effekte aufgeführt werden, die zu einem relativen Anstieg/Sinken des Meeresspiegels führen (Sterr, 1996):

- eustatische Effekt, d.h. Veränderungen des Wasserhaushalts und damit des Meeresspiegels, z.B. aufgrund von Klimaveränderungen. Ein Beispiel hierfür ist die durch den Treibhauseffekt bedingte globale Temperaturerhöhung, die ein verstärktes Abschmelzen von Inlandeis (Grönland) und Gebirgsgletschern zur Folge hat. Nach dem IPCC Bericht von 2001 sind auf der Zeitskala von Jahrzehnten und Jahrhunderten manche der größten den Meeresspiegel beeinflussenden Faktoren klimatisch bedingt (IPCC, 2001 a).
- sterische, also räumliche Effekte. Ein Beispiel hierfür ist die thermisch bedingte Ausdehnung der oberen Wasserschichten.
- isostatische Ausgleichseffekte, also das Bestreben einen Zustand der Isostasie zu erreichen, in dem das Gewicht aller Massen in einer bestimmten Tiefe innerhalb der Erde gleich ist. Ein Beispiel hierfür sind die „großräumigen Senkungsbewegungen der Erdkruste in den Randbereichen der einst von pleistozänen Inlandeismassen bedeckten Gebiete“ (Sterr, 1996, 132) wie z.B. in Skandinavien (ca. 9 mm/a). Desgleichen gibt es auch großräumige Hebungsbewegungen, die ein Sinken des Meeresspiegels zur Folge hätten.
- geologischer Effekte in Form von Sackungsprozessen in Lockersediment-ablagerungen, wie z.B. in großen Deltas

Da sich die Welt noch in einer Nacheiszeit befindet, gibt es einen signifikanten globalen Meeresspiegelanstieg in den letzten Jahrtausenden. Es können zwar teilweise Neotektonik und Eustasie diesen beschleunigen bzw. ihm entgegenwirken, doch diese Veränderungen sind nur regional und haben keinen Auswirkungen auf den grundsätzlichen Trend der Meeresspiegelerhöhung (Behnen, 2000). Der globale durchschnittliche Meeresspiegel ist von

1961 bis 2003 mit einer durchschnittlichen Rate von 1,8 mm pro Jahr angestiegen. Die Rate war von 1993 bis 2003 höher mit 3.1 mm pro Jahr. Ob diese höhere Rate in der natürlichen Variabilität oder in einem langfristigen Trend begründet ist, ist unklar. Es ist aber sehr sicher, dass die Rate vom 19. bis zum 20. Jahrhundert angestiegen ist. Der totale Anstieg im 20. Jahrhundert wird auf 0,17 m geschätzt (IPCC, 2007).



Observed changes in (a) global average surface temperature; (b) global average sea level rise from tide

gauge (blue) and satellite (red) data and (c) Northern Hemisphere snow cover for March-April. All changes are relative to corresponding averages for the period 1961-1990. Smoothed curves represent decadal averaged values while circles show yearly values. The shaded areas are the uncertainty intervals estimated from a comprehensive analysis of known uncertainties (a and b) and from the time series (c).

**Abbildung 3:** Veränderungen bei Temperatur, Meeresspiegel und Schneedecke der nördlichen Hemisphäre

### **3.1 DER BESCHLEUNIGTE MEERESSPIEGELANSTIEG**

Als gefährliche Erscheinung und Folge der Klimaerwärmung wird der beschleunigte Meeresspiegelanstieg gesehen. Für ihn werden in der Literatur vor allem die folgenden vier „Hauptfaktoren“ angegeben: „thermische Expansion des Wassers, die Akkumulation in der Antarktis, das Abschmelzen des grönländisches Inlandeises und das Abschmelzen von Gletschern und Eiskappen“(Behnen, 2000, 21).

Es gibt noch weitere anthropogene Abläufe, die den Wasserhaushalt verändern (Bewässerung, Talsperrenbau, Abholzung, Permafrostboden,...). Diese haben aber nur geringe Effekte bzw. sind nur wenig erforscht und werden deshalb kaum in Modellierungen etc. mit einbezogen.

Allgemein sind die Veränderungen des Meeresspiegels regional sehr unterschiedlich. Das liegt zum einen an der regional unterschiedlich starken thermischen Expansion (siehe unten), aber auch in den regionalen Unterschieden im Salzgehalt, den Winden und der Ozeanzirkulation (IPCC, 2001 a).

Die anthropogene Erwärmung und damit verbunden der Meeresspiegelanstieg wird, selbst wenn die Emissionen an Treibhausgasen stabilisiert werden, noch für Jahrhunderte andauern aufgrund der großen Zeitskalen, die mit klimatischen Prozessen und deren Rückkopplungen verbunden sind (IPCC, 2007). In Tabelle 1 sind die bisherigen Beiträge der wichtigsten Gebiete und in Tabelle 2 die Meeresspiegelanstiegs-Vorhersagen der einzelnen Szenarien des IPCC 2007 aufgeführt.

**Tabelle 1:** Gemessene Rate des Meeresspiegelanstiegs und Beiträge verschiedener Quellen (nach Table SPM-1 in IPCC, 2007, 7)

Source of sea level rise	Rate of sea level rise (mm per year)	
	1961 – 2003	1993 – 2003
Thermal expansion	$0.42 \pm 0.12$	$1.6 \pm 0.5$
Glaciers and ice caps	$0.50 \pm 0.18$	$0.77 \pm 0.22$
Greenland ice sheet	$0.05 \pm 0.12$	$0.21 \pm 0.07$
Antarctic ice sheet	$0.14 \pm 0.41$	$0.21 \pm 0.35$
Sum of individual climate contributions to sea level rise	$1.1 \pm 0.5$	$2.8 \pm 0.7$
Observed total sea level rise	$1.8 \pm 0.5$ a	$3.1 \pm 0.7$ a
Difference (Observed minus sum of estimated climate contributions)	$0.7 \pm 0.7$	$0.3 \pm 1.0$

a Data prior to 1993 are from tide gauges and after 1993 are from satellite altimetry.

**Tabelle 2.** Prognostizierte durchschnittliche Erwärmung und Meeresspiegelanstieg gegen Ende des 21. Jh. (nach Table SPM-3 in IPCC, 2007, 13)

Case	Temperature Change		Sea Level Rise
	Best estimate	<i>Likely</i> range	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
	(°C at 2090-2099 relative to 1980-1999)		(m at 2090-2099 relative to 1980-1999)
	a		
Constant Year 2000 Concentrations	b		
B1 scenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2 scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B scenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 scenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI scenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

a These estimates are assessed from a hierarchy of models that encompass a simple climate model, several Earth Models of Intermediate Complexity (EMICs), and a large number of Atmosphere-Ocean Global Circulation Models (AOGCMs).

b Year 2000 constant composition is derived from AOGCMs only.

### **3.1.1 THERMISCHE EXPANSION:**

Das Volumen des Wassers ist von der Dichte abhängig und diese wiederum vor allem von der Temperatur und in geringem Maße vom Salzgehalt. Durch die Erwärmung der oberen Meeresschichten kommt es zu Ausdehnungen des Wassers. Diese sind regional verschieden (aufgrund des verzögerten Wärme- und Massenaustausches) und sind vor allem in Randmeeren (da es keine Durchmischung mit kälterem Tiefenwasser gibt) besonders stark. Vorteilhaft für die Beurteilung dieses Faktors ist, dass es schon seit mehreren Jahrzehnten Beobachtungsreihen dazu gibt und deswegen nicht nur auf Modelle zurückgegriffen werden muss (Behnen, 2000). Auf der Basis dieser Beobachtungsreihen, aber auch der Modelle, wird nach dem IPCC-Bericht des Jahres 2001 angenommen, dass die thermische Expansion eine der Hauptbeitragenden zum Meeresspiegelanstieg bisher war und auch in den nächsten 100 Jahren sein wird (IPCC, 2001 a) „Observations since 1961 show that the average temperature of the global ocean has increased to depths of at least 3000 m and that the ocean has been absorbing more than 80% of the heat added to the climate system.“ (IPCC, 2007, 17) Diese durchgehende Erwärmung führt zu einer stärkeren und langlebigeren Expansion als „nur“ die Erwärmung der oberen Schichten. Nach dem IPCC-Bericht des Jahres 2001 wird der Meeresspiegel in den nächsten 1000 Jahren durch thermische Expansion um 1-3 m ansteigen.

Aufgrund der Zeit, die der Wärmetransport in die Tiefen des Ozeans benötigt, wird die thermische Expansion noch für viele Jahrhunderte andauern, auch wenn es einen radikalen Wandel in der Klimapolitik gibt. Selbst wenn ab 2100 die Treibhausgasemissionen stabil bleiben würden, würde die thermale Expansion immer noch zu einer Meeresspiegelerhöhung von 0.3 – 0.8 m bis 2300 führen (IPCC, 2007).

### **3.1.2 VERSCHIEBUNGEN IM WASSERHAUSHALT**

Durch Verschiebungen im Wasserhaushalt zu Gunsten der Meere wie z.B. durch das Abschmelzen der Gletscher ändert sich ebenfalls der Meeresspiegel. Der größte Teil der Wasserreservoirs auf dem Land ist das gefrorene Wasser in Gletschern und Inlandeis. Der Meeresspiegel ist nach der letzten Eiszeit vor allem aufgrund des Schmelzens der dicken Eisschicht über den Kontinenten der nördlichen Hemisphäre so stark angestiegen. Tabelle 3 stellt das Meeresspiegelerhöhungspotential der einzelnen mit eisbedeckten Gebiete dar:

**Tabelle 3:** Verteilung des Festlandeises (nach Table 11.3 in IPCC, 2001 a, 648)

	<b>Glaciers</b>	<b>Ice caps</b>	<b>Glaciers and ice caps a</b>	<b>Greenland ice sheet b</b>	<b>Antarctic ice sheet b</b>
<b>Number</b>	>160 000	70			
<b>Area</b> ( $10^6$ km <sup>2</sup> )	0.43	0.24	0.68	1.71	12.37
<b>Volume</b> ( $10^6$ km <sup>3</sup> )	0.08	0.10	$0.18 \pm 0.04$	2.85	25.71
<b>Sea-level equivalent</b> (m) d	<b>rise</b> 0.24	0.27	$0.50 \pm 0.10$	7.2c	61.1c
<b>Accumulation</b> (sea-level equivalent, mm/yr) d			$1.9 \pm 0.3$	$1.4 \pm 0.1$	$5.1 \pm 0.2$

a Including glaciers and ice caps on the margins of Greenland and the Antarctic Peninsula, which have a total area of  $0.14 \times 10^6$  km<sup>2</sup>. The total area of glaciers and ice-caps outside Greenland and Antarctica is  $0.54 \times 10^6$  km<sup>2</sup>. The glaciers and ice caps of Greenland and Antarctica are included again in the next two columns.

b Grounded ice only, including glaciers and small ice caps.

c For the ice sheets, sea level rise equivalent is calculated with allowance for isostatic rebound and sea water replacing grounded ice, and this therefore is less than the sea level equivalent of the ice volume.

d Assuming an oceanic area of  $3.62 \times 10^8$  km<sup>2</sup>.

Auf die einzelnen Gebiete soll nun im Detail eingegangen werden.

### **3.1.2.1 ANTARKTIS**

Die Antarktis hat zwar nach dem Climate Change 2001 das größte Meeresspiegelanstiegspotential (61,1 m), jedoch werden durch die globale Erwärmung in der Antarktis die Niederschläge zunehmen und sich dort aufgrund der dort herrschenden geringen Temperatur (selbst beim Worst-Case-Szenario) akkumulieren (IPCC, 2007 und IPCC, 2001 a). Von 1990 bis 2090 werde der Beitrag der Antarktis zum Meeresspiegelanstieg -0,07 bis -0,01 m sein (IPCC, 2001 a).

„However, net loss of ice mass could occur if dynamical ice discharge dominates the ice sheet mass balance“ (IPCC, 2007, 17)<sup>1</sup>.

Das antarktische Meereis hingegen wird nach allen Szenarien des IPCC 2007 abnehmen.

### **3.1.2.2 GRÖNLAND**

Die globale Erwärmung wird die „Massenbilanz des grönländischen Eises signifikant beeinflussen“ (Behnen, 2000, 23). Grönland liegt in niedrigeren Breiten und hat schon heute starke Eisbergabgabe und oberflächliches Schmelzen. Nach den derzeitigen Modellen wird ab einer globalen durchschnittlichen Erwärmung von 1,9 bis 4,6°C der Verlust an Eismasse mit steigender Temperatur größer als der Gewinn durch stärkeren Niederschlag. Die Massenbilanz

---

<sup>1</sup> Mit einem evtl. „Abrutschen des West Antarctic Ice Sheet (WAIS) ist erst in 200-700 Jahren zu rechnen“ (Behnen, 2000, 22). Dies würde dann aber zu einem Anstieg von 4-6 m führen. Diese Angaben sind allerdings noch sehr unsicher und dennoch nicht zu vernachlässigen (Behnen, 2000).

wird somit negativ mit der globalen Erwärmung. Falls die negative Massenbilanz über 1000 Jahre anhält, werde es aufgrund des Schmelzens der Grönlandeises zu einem Meeresspiegelanstieg von ca. 7 m kommen (IPCC, 2007) Allein bis 2090 werde das schmelzende Grönlandeis 0,01-0,03 m zum Meeresspiegelanstieg beitragen (IPCC, 2001 a).

Nach dem IPCC- Bericht von 2007 wird die Abnahme des Inlandeises auf Grönland auch nach 2100 weiterhin den Meeresspiegel steigen lassen.

Das Meereis in der Arktis wird wie das Meereis in der Antarktis weiter schrumpfen. Satellitendaten seit 1978 zeigen, dass das arktische Meereis pro Decade um 2,7% geschrumpft ist. Nach manchen Vorhersagen wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts sogar das Sommereis in der Arktis komplett schmelzen (IPCC, 2007).

### **3.1.2.3 GLETSCHER UND EISKAPPEN**

Das Abschmelzen der Gletscher und Eiskappen ist regional sehr unterschiedlich, dennoch kann man grundsätzlich von einem „signifikantem Abschmelzen der Gletscher“ (Behnen, 24) sprechen. Laut IPCC (2001 a) wird das Abschmelzen der Gletscher/Eiskappen von 1990 bis 2090 zu einem Meeresspiegelanstieg von 0,06 bis 0,15 m führen. Nach der thermischen Expansion gilt das Abschmelzen der Gletscher und Eiskappen als der größte Faktor, der zum Anstieg des Meeresspiegels führt, obwohl sie nur einen geringen Teil des gefrorenen Wassers auf der Erde ausmachen. Denn sie sind aufgrund ihrer Lage und Beschaffenheit wesentlich empfindlicher gegenüber Klimaveränderungen als die großen Eisflächen wie z.B. die Antarktis (IPCC, 2001 a).

Nach dem IPCC-Bericht 2007 wird die Schnee- und Eisdecke weiter zurückgehen und auch die Permafrostböden werden zumindest in den oberen Schichten auftauen.

## **3.2 FOLGEN DES MEERESSPIEGELANSTIEGS**

Der Mensch ist um seine Umwelt, aber doch vor allem um sich selbst besorgt. So bekommt das Thema „beschleunigter Meeresspiegelanstieg“ eine hohe Relevanz, zumal die Folgen häufig in ihrem Ausmaß und ihrer Stärke kaum bisher abschätzbar sind.

Deshalb soll sich dieses Kapitel mit den Folgen des Meeresspiegelanstiegs für die Umwelt und damit auch für den Menschen beschäftigen.

### **3.2.1 GEOPHYSIKALISCHE UND ÖKOLOGISCHE FOLGEN**

Der ansteigende Meeresspiegel hat viele unmittelbare, morphologische Folgen, die hier nicht ausschließlich aufgelistet sind (Behnen, 2000):

- Erosion der Küstenlinie,
- Abtragung und Verlagerung von Niederungs- und Feuchtgebieten,
- verstärkte Überflutung nach Sturmfluten,
- erhöhter Salzgehalt in Ästuaren,
- Gefährdung der Süßwasseraquifere,
- erhöhter Tidenhub in Flußästuaren und Buchten,
- veränderte sedimentologische Prozesse,
- und Verringerung des in größere Wassertiefe vordringenden Lichts.

Diese sehr allgemeinen Aspekte sind je nach Küstentyp unterschiedlich ausgeprägt. Es gibt jedoch Küstentypen, die aufgrund ihrer Eigenschaften besonders stark vom ansteigenden Meeresspiegel betroffen sind. Diese sind vor allem niedrig gelegene Küstenebenen, Deltabereiche, Sandstrände, Barriereinseln, Küstenfeuchtgebiete, Ästuare, Lagunen, Mangroven und Korallenatolle (Behnen, 2000).

Neben den morphologischen Folgen sind auch Ökosysteme von den Änderungen, die der Meeresspiegel mit sich bringt, betroffen. Unter ihnen sind es vor allem die küstennahen und marinen Ökosysteme, wie z.B. Dünenökosysteme oder die aquatische Biota.

### **3.2.2 SOZIOÖKONOMISCHE FOLGEN**

Da „die vielfältigen Überlagerungen der Raumansprüche im Küstenraum zu einem komplexen Gefüge führen, in dem Naturschutz- und Nutzungsaspekte eng miteinander verknüpft sind“ (Behnen, 2000, 62), sind sozioökonomische Folgen von den oben beschriebenen nicht klar zu

trennen. Nach dem IPCC Bericht von 2001 sind folgende sozioökonomischen Bereiche vom Meeresspiegelanstieg betroffen: menschliche Siedlungen, Landwirtschaft, Trinkwasserverfügbarkeit und -qualität, Fischerei, Finanzdienstleistungen, und menschliche Gesundheit.

Eine interessante Folge des Meeresspiegelanstiegs und der damit verbundenen Massenumverteilung ist eine Veränderung des Trägheitsmoments der Erde. Falls nicht die Anziehungskraft des Mondes, Vorgänge im Inneren der Erde oder andere bremsende Effekte diesem Trend entgegenwirken, ist damit eine Verkürzung des Tages um 0,12 ms in den nächsten 200 Jahren verbunden (Landerer et al., in prep.).

#### **4. MODELLIERUNG**

Um zukünftige Entwicklungen abschätzen zu können und zum Selbstschutz hat der Mensch schon immer versucht Vorhersagen zu machen. Mit der (computergestützten) Modellierung ist es möglich - wenn auch nicht zu völliger Zufriedenheit - das Klima und seine Veränderungen zu modellieren und so Vorhersagen zu treffen.

Um das Klima modellieren zu können, werden meist Ozeanmodelle mit einem Eismodell (für die Kryosphäre = eisbedeckte Oberfläche der Erde) und einem Vegetationsmodell (für die Biosphäre) gekoppelt. Da die hier betrachteten Zeiträume sehr groß sind und auch viele Parameter einbezogen werden, muss hier mit einer großen Unsicherheit bezüglich der Aussagen umgegangen werden. Ein Weg, dieser Unsicherheit entgegenzuwirken, ist es, die einzelnen Klimamodelle und ihre Klimaszenarien miteinander zu vergleichen und aufgrund der vielen verschiedenen Aussagen eine „Klimaprognose“ zu machen. Dieser Weg wird vor allem vom Intergovernmental Panel on Climate Change verfolgt.

##### **4.1 MODELL DES IPCC BERICHTES VON 2001**

Der Intergovernmental Panel on Climate Change versucht die vielen verschiedenen Klimaszenarien - mit teilweise sehr unterschiedlichen Endergebnissen - miteinander zu

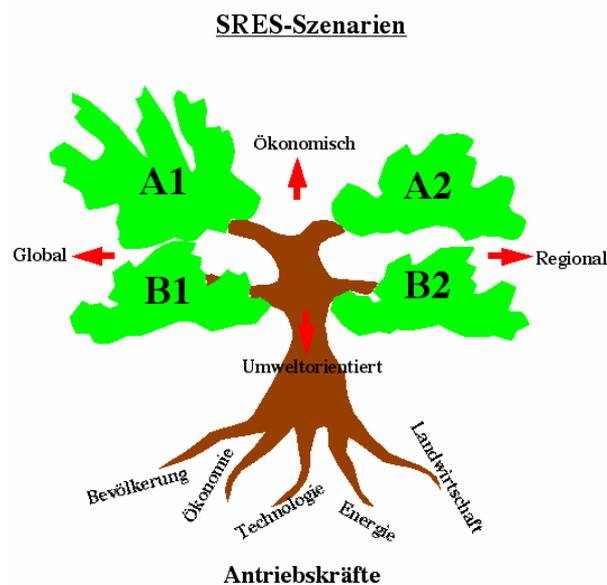
vergleichen und darauf basierend eine Klimaprognose zu liefern, die natürlich immer nur eine Spannweite an Möglichkeiten sein kann.

Die Arbeitsweise bzw. mathematischen Gleichungen der Working Group 1 zum Meeresspiegelanstieg sollen hier nun beruhend auf dem IPCC Bericht von 2001 beschrieben werden, um ein Bild von der Zuverlässigkeit und Aussagegenauigkeit der IPCC-Berichte zu vermitteln.

Dafür müssen zunächst die SRES-Szenarien vorgestellt werden, die die Basis für die Klimaprognosen der Working Group 1 des IPCC 2001 bilden.

#### 4.1.1 SPECIAL REPORT ON EMISSIONS SCENARIOS (SRES)

Die SRES Szenarien sind Emissionsszenarien, die von Nakićenović et. al (2000) entwickelt wurden und von der Working Group 1 des IPCC seit 1996 als Basis für ihre Klimavorhersagen genommen werden, da sie die zukünftige Entwicklung von u.a. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und Schwefeldioxyden verlässlich wiedergeben. Die 40 Szenarien sind in Familien gruppiert. Die Szenarien einer Familie sind sich in Demographie, Ökonomie, Sozialen Strukturen und im technischen Fortschritt ähnlich. Es gibt vier Familien: A1, A2, B1 und B2 (IPCC, 2001 b), die wie folgt gekennzeichnet sind (siehe auch Abb.4):



**Abbildung 4:** Übersicht über die Familien der SRES-Szenarien

## A1:

- Die Welt ist global, d.h. es besteht ein Ausgleich von regionalen Unterschieden bzgl. Einkommen, Kultur, soziale Gegebenheiten und technologische Entwicklung
- Das Maximum der Weltbevölkerung ist in der Mitte des 21. Jh. Danach geht die Bevölkerungszahl zurück.
- Es gibt ein starkes Wirtschaftswachstum.
- Neue und effizientere Technologien werden schnell eingeführt.

## A2:

- Die Welt ist heterogen.
- Die Geburtenraten sind regional sehr unterschiedlich und bedingen so ein ständiges Weltbevölkerungswachstum.
- Die wirtschaftliche Entwicklung ist regional orientiert.
- Das Wachstum des Bruttosozialprodukts ist insgesamt langsamer als bei den anderen Familien.
- Die technologische Entwicklung ist insgesamt langsamer als bei den anderen Familien.

## B1:

- Die Welt ist wie in A1 global.
- Auch die Weltbevölkerung ist wie bei A1.
- Ein schneller Wandel der wirtschaftlichen Strukturen führt zu einer Dienstleistungs- und Informationsökonomie mit einer Reduzierung des Materialverbrauchs und der Einführung von sauberer, ressourcenschonender Technologie.
- Die Entwicklung ist auf globale Lösungen für ökonomische, soziale und umweltbezogene Nachhaltigkeit sowie eine ausgewogene Wohlstandsverteilung ausgerichtet.

## B2:

- Die Welt ist heterogen mit einem wirtschaftlichen Wachstum auf mittlerem Niveau.
- Die technologische Entwicklung ist langsamer als bei A1 und B1.
- Das Wachstum der Weltbevölkerung ist kontinuierlich, aber geringer als bei A2.

- Die Entwicklung ist auf regionale Lösungen für ökonomische, soziale und umweltbezogene Nachhaltigkeit sowie eine regional ausgewogene Wohlstandsverteilung ausgerichtet.

In den Szenarien sind keine zusätzlichen Klimainitiativen wie z.B. das Kyoto Protokoll mit aufgenommen. Jedoch werden Emissionen auch von vielen Strategien beeinflusst, die nicht direkt auf das Problem des Klimawandels ausgerichtet sind, z.B. Luftqualität oder Wasserqualität. Außerdem können politische Strategien auch demographischen Wandel, soziale und ökonomische Entwicklung, technischen Wandel, Ressourcennutzung und Umweltverschmutzung entscheidend beeinflussen. Dies wird in den Szenarien aufgenommen (IPCC, 2001 b).

Da 2000 noch nicht alle Szenarien geprüft waren, konnten nicht alle mit aufgenommen werden und es wurden für die Familien sogenannte „Marker“ (=Beispielszenarien) verwendet. Die dadurch entstandenen Abweichungen (meist 1-2%) sollen im neuen IPCC-Bericht 2007 berichtet werden.

### 3.1.2 IPCC MODELLGLEICHUNG

Im Folgenden werden die Gleichungen vorgestellt, mit denen die IPCC-Working Group 1 von 2001 die SRES Szenarien für das 21. Jahrhundert berechnet hat.

Der globale durchschnittliche Meeresspiegelanstieg  $h(t)$  ist eine Funktion der Zeit  $t$  und wird relativ zum Meeresspiegel von 1990 berechnet:

$$h(t) = X(t) + g(t) + G(t) + A(t) + I(t) + p(t) + s(t).$$

Die einzelnen Terme drücken den Meeresspiegelanstieg aufgrund von

$X$       thermischer Expansion

- g* Abschmelzen von Gletschern und Eiskappen
- G* Abschmelzen des Grönlandeises ( abhängig vom derzeitigen und vorhergesagten Klimawandel)
- A* Abschmelzen des Eises in der Antarktis( abhängig vom derzeitigen und vorhergesagten Klimawandel)
- I* Abschmelzen von Grönland- und Antarktiseis aufgrund der immer noch stattfindenden Anpassung an den letzten Klimawandel
- p* Tauwasser von Permafrostböden
- s* Ablagerung von Sedimenten am Grunde des Ozeans

aus. Alle diese Terme sind zum Zeitpunkt 1990 gleich Null.

Die Terme  $X$ ,  $g$ ,  $G$  und  $A$  werden für alle 35 SRES Szenarien mit Hilfe der Berechnungen eines „upwelling-diffusion energie-balance“ Modell (DU/EB) bestimmt. Dieses Modell ist für jedes der sieben AOGCMs<sup>2</sup> kalibriert. Dadurch ist die Unsicherheit genügend repräsentiert und es wird kein extra Unsicherheitsterm bei der thermischen Expansion  $X$  mit aufgenommen<sup>3</sup>.

Die **thermische Expansion  $X$**  gewinnt man nun direkt aus der thermischen Expansion  $X_m(t)$  aus dem DU/EB Modell:

$$X(t) = X_m(t) - X_m(1990).$$

---

<sup>2</sup> Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCM) sind gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Meereis-Zirkulations-Modelle, die das Klimasystem global repräsentieren. (IPCC, 2001 a)

<sup>3</sup> siehe dazu auch Appendix 9.1 in IPCC, 2001 a

Der Term  **$g$  (Gletscher und Eiskappen)** wird berechnet über die globale durchschnittliche Temperaturänderung  $T_m(t)$  des DU/EB Modells. Zunächst wird die Massenänderung  $g_u$

nur in Bezug auf den „steady state“ bestimmt, ohne die Kontraktion der Gletscher zu beachten:

$$g_u(t) = g_{1990} \int_{1990}^t (T_{1990} + \Delta T_b + T_m(t') - T_m(1990)) \frac{\partial B_g}{\partial T_g} dt' .$$

$g_u(t)$  ist der Meeresspiegelanstieg aufgrund von Schmelzwasser der Gletscher und Eiskappen bis 1990 und wurde aus dem AOGCM Ergebnissen ohne die Kontraktion des Gletschergebiets berechnet.  $T_{1990}$  ist der Wert der globalen durchschnittlichen Temperatur-änderung der AOGCMs in Bezug auf das Klima des späten 19. Jahrhunderts.  $\Delta T_b = 0,15$  K ist der Unterschied zwischen der globalen durchschnittlichen Temperatur im späten 19. Jahrhundert und dem „steady state“ der Gletscher. Und  $\frac{\partial B_g}{\partial T_g}$

ist die Sensitivität der globalen Gletscher Massenbilanz für konstante Gletschergebiete gegenüber globaler durchschnittlicher Temperaturänderung. Dieser Term wird äquivalent zum Meeresspiegel ausgedrückt.

Nun wird der Massenverlust  $g_s$  in Bezug auf den steady state der Gletscher und die Kontraktion der Gletschergebiete berechnet. Dabei wird ein empirisches Verhältnis zwischen dem Massenverlust für ein kontrahierendes und für ein konstantes Gebiet aus den Ergebnissen der Modelle gezogen:

$$g_s(t) = 0,934 g_u(t) - 1,165 (g_u(t))^2 ,$$

$g_u$  und  $g_s$  in Metern.

Als Drittes wird die Änderung seit 1990 berechnet:

$$g(t) = g_s(t) - g_s(1990) .$$

Die Unsicherheit  $\delta g(t)$  für diesen Term wird bestimmt, indem eine Unsicherheit von  $\pm 40\%$  (Standardabweichung) in der Sensitivität der Massenbilanz angenommen wird:

$$\delta g(t) = 0,40 g(t) .$$

Der Term **G (Grönlandeis)** wird wie folgt berechnet:

$$G(t) = \int_{1990}^t (T_{1990} + T_m(t') - T_m(1990)) \frac{dB_G}{dT_g} dt' ,$$

wobei  $dB_G/dT_g$  die Sensitivität der Grönland Massenbilanz bezüglich dem globalen durchschnittlichen Temperaturwandel ist und ebenfalls als äquivalent zum Meeresspiegel ausgedrückt wird.

Die Unsicherheit enthält bei diesem Term zwei Komponenten: Die erste Komponente ist eine Massenbilanz-Unsicherheit

$$\delta G_1(t) = \int_{1990}^t (T_{1990} + T_m(t') - T_m(1990)) \frac{\Delta T_G}{\Delta T_g} \delta m_G dt' ,$$

wobei  $\delta m_G = 0,05 \text{ mm/a/}^\circ\text{C}$  und  $\Delta T_G/\Delta T_g$  das Verhältnis der Änderung der durchschnittlichen Temperatur in Grönland zu der globalen, durchschnittlichen Temperatur-änderung ist.

Die zweite Komponente ist eine Unsicherheit in der Eisdynamik:

$$\delta G_2(t) = 0,1G(t) .$$

Der Term **A (Eis der Antarktis)** wird wie folgt bestimmt:

$$A(t) = \int_{1990}^t (T_{1990} + T_m(t') - T_m(1990)) \frac{dB_A}{dT_g} dt' ,$$

mit  $dB_A/dT_g$  als Sensitivität der antarktischen Massenbilanz gegenüber dem globalen Temperaturwandel. Wiederum als Äquivalent zum Meeresspiegel ausgedrückt.

Die Unsicherheit in Bezug auf die Eisdynamik wurde wie die Unsicherheit für ein Abbrechen von Eismassen (Ablation) nicht integriert. Die Niederschlagsunsicherheit wird wie folgt berechnet:

$$\delta A(t) = \int_{1990}^t (T_{1990} + T_m(t') - T_m(1990)) \frac{\Delta T_A}{\Delta T_g} \delta m_A dt' ,$$

mit  $\delta m_A = 0,08 \text{ mm/a/}^\circ\text{C}$  und  $\Delta T_A/\Delta T_g$  ist das Verhältnis der Änderung der durchschnittlichen Temperatur in der Antarktis zu der globalen, durchschnittlichen Temperaturänderung.

Zusammenfassend werden die Unsicherheits-Terme der obigen Gleichungen kombiniert zu:

$$\delta h_v = \sqrt{(\delta g)^2 + (\delta G_1)^2 + (\delta G_2)^2 + (\delta A)^2} .$$

Für die übrigen Terme wird angenommen, dass sie zum Meeresspiegelanstieg mit einer konstanten Rate beitragen, unabhängig von den AOGCMs und den Szenarien:

Grönland- und Antarktiseis, vergangener Klimawandel:  $I(t) = \int_{1990}^t \frac{dI}{dt'} dt'$

Permafrost:  $p(t) = \int_{1990}^t \frac{dp}{dt'} dt'$

Ablagerung von Sedimenten:  $s(t) = \int_{1990}^t \frac{ds}{dt'} dt'$

Jede Rate hat einen eigenen Unsicherheitsbereich:  $[I_{min}, I_{max}]$ ,  $[p_{min}, p_{max}]$  und  $[s_{min}, s_{max}]$ . Somit ist der minimale berechnete Meeresspiegelanstieg  $h_{min}(t)$  für ein gegebenes AOGCM und SRES Szenario durch

$$h_{min}(t) = X(t) + g(t) + G(t) + A(t) - 2\delta h_v(t) + I_{min}(t) + p_{min}(t) + s_{min}(t)$$

und das Maximum durch

$$h_{max}(t) = X(t) + g(t) + G(t) + A(t) + 2\delta h_v(t) + I_{max}(t) + p_{max}(t) + s_{max}(t)$$

bestimmt.

## 4.2 DISKUSSION

Die Berechnungen und Datensets werden immer besser. So wurden die Vorhersagen des IPCC Berichts von 2001 für den Zeitraum bis 2003 innerhalb eines gewissen Intervalls durch Messungen bestätigt (IPCC, 2007). Dennoch hat die Modellierung des Meeresspiegelanstiegs immer noch mit zahlreichen Unsicherheiten zu kämpfen.

Die Unsicherheiten in der Berechnung von Meeresspiegeländerungen bestehen zum einen in den Parametrisierungen im jeweiligen Modell, es sind also Prozesse, die räumlich oder zeitlich (noch) nicht aufgelöst werden können. Hier müssen unterschiedliche Modelle miteinander verglichen werden, um den Einfluss solcher Parametrisierungen abschätzen zu können. Zum anderen gibt es Prozesse wie z.B. das Abschmelzen der großen Landeismassen, die physikalisch noch nicht richtig verstanden sind. „Understanding of these processes is limited and there is no consensus on their magnitude.“ (IPCC, 2007, 17) Diese sind zur Zeit die größten Unsicherheiten für eine Prognose des Meeresspiegelanstiegs im 21. Jhd. (IPCC, 2007). Hier wird man in den nächsten Jahren viel aus Beobachtungen, insbesondere mit Satelliten, erfahren können. Gute Fortschritte werden bei den Daten über Gletscher und Eiskappen gemacht, dennoch bleibt auch hier die Datenabdeckung lückenhaft. (IPCC, 2007) Und schließlich gibt es die natürlichen Schwankungen des Meeresspiegels, die ebenfalls noch nicht vollkommen nachvollzogen werden können. Die Modelle stimmen in ihren Abschätzungen der natürlichen Variabilität noch nicht ganz mit den Beobachtungen überein. Dies kann mit den Problemen bei der Parametrisierung zusammenhängen oder auch an unzureichend dichten Beobachtungen des Ozeans liegen.

## 5. FAZIT

Aufgrund vieler Unsicherheitsfaktoren, wie z.B. die unzureichenden Messdaten oder Unklarheiten bei den Prozessen, sind die Ozeanmodellierungen und ihre Aussagen mit einer gewissen Vorsicht zu behandeln. Dennoch sind sie innerhalb ihrer festgesteckten Grenzen sehr konkret und haben eine starke Aussagekraft bzgl. Trends und Möglichkeiten, wie sich der Meeresspiegelanstieg weiterentwickeln kann. Es bleibt die Frage, ob Prognosen trotz unvollständigem Wissen in der Politik anerkannt und beachtet werden (sollten). Dabei wird von Seiten der Forschung immer wieder darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der Simulationen für zukünftige Zeitabschnitte nicht als Prognosen zu werten sind, sondern als Szenarienrechnungen bei verschiedenen angenommenen anthropogenen Einflüssen. Interpretiert

man die Simulationsergebnisse mit diesem Wissen sorgfältig und unter Beachtung der Fehler durch vereinfachende Annahmen, gibt es keinen Grund, den Modellrechnungen jede Relevanz bei der Entscheidungsfindung abzusprechen.

## **6. LITERATURVERZEICHNIS**

**BEHNEN, T.** (2000): Der beschleunigte Meeresspiegelanstieg und seine sozio-ökonomischen Folgen. Eine Untersuchung der Ursachen, methodischen Ansätze und Konsequenzen unter besonderer Berücksichtigung Deutschlands (= Hannoversche Geographische Arbeiten, Bd. 54). Münster.

**IPCC** (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Cambridge.

**IPCC** (2001 a): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge.

**IPCC** (2001 b): Climate Change 2001: Synthesis Report. Technical Summary of the Working Group 1. Cambridge.

**LANDERER, F. W.;** Jungclaus, J. H.; Marotzke, J. (in prep.): Ocean Bottom Pressure Changes Lead to a Decreasing Length-of-Day in a Warming Climate. Hamburg.

**LEVERMANN, A.;** Griesel, A.; Hofmann, M.; Montoya, M.; Rahmstorf, S. (2005): Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 24, 347-354.

**NAKIĆENOVIĆ, N.;** Alcamo, J.; Davis, G.; de Vries, B.; Fenhann, J.; Gaffin, S.; Gregory, K.; Grubler, A.; Jung, T. Y.; Kram, T.; La Rovere, E.L.; Michaelis, L.; Mori, S.; Morita, T.; Pepper, W.; Pitcher, H.; Price, L.; Raihi, K.; Roehrl, A.; Rogner, H.-H.; Sankovski, A.; Schlesinger, M.; Shukla, P.; Smith, S.; Swart, R.; van Rooijen, S.; Victor, N.; Dadi, Z. (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge.

**RAHMSTORF, S.** (1996): On the freshwater forcing and transport of the Atlantic thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 12: 799–811.

**STERR, H.** (1996): Zur Frage eines – anthropogen bedingten – Meeresspiegelanstiegs und dessen möglicher Konsequenzen, in: Behnen, Tobias (Hrsg.): *Beiträge zur Geographie der Meere und Küsten* (= Hannoversche Geographische Arbeiten, Bd. 52), Münster, 130-145.

## **7. ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

- **ABBILDUNG 1:** Rahmstorf, 1996, 800
- **ABBILDUNG 2:** Levermann et al., 2005, 351
- **ABBILDUNG 3:** IPCC, 2007, 6
- **ABBILDUNG 4:** Hamburger Bildungsserver: <http://hamburgerbildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/ipcc2001/> (14.04.2007)



# **Land-Vegetations-Modelle**

**Daniella Schittler**

**Ausarbeitung im Rahmen des  
Hauptseminars Systemwissenschaft**

**Sommersemester 2007**

## Inhalt

1. Einleitung
2. Begriffe
3. Modellierung der Landbiosphäre durch Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs)
4. Das LPJ-Modell
5. Das LPJmL-Modell und PBM
6. Das JSBACH-Modell
7. Modellübergreifende Resultate und Prognosen
8. Unsicherheiten und Sensitivität
9. Fazit

Quellen

## 1. Einleitung

Mittlerweile fast täglich finden sich Nachrichten über neue Auswirkungen des Klimawandels. Dabei ist längst nicht mehr nur das Klima selbst betroffen; vielmehr wird ein komplexes Wirkungsgefüge ersichtlich, das in immer mehr Bereichen unseres Ökosystems und unseres Lebens grundlegende Änderungen verursacht. Zu solchen Nachrichten gehört auch folgende Meldung, die ab Ende April 2007 auf Spiegel-Online zu lesen war:

### **Wo der Klimawandel nach Salz schmeckt**

[...] Früher gediehen hier Reisfelder - jetzt stinken in Bangladeschs Südwesten Kloaken mit Zuchtgarnelen. Schuld ist der Klimawandel: Der Boden versalzt durch steigende Meeresspiegel. Auf einem Hektar arbeiten heute zwei statt 200 Menschen, und die Ernte füllt die Bäuche der Europäer. [...]

(<http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,479221,00.html>)

Dieses Beispiel zeigt, dass als Folge des Klimawandels schon jetzt in bestimmten Regionen der Erde bestehende Strukturen der Nahrungs- und Lebensgrundlagen zerstört werden. Eine Umorientierung, wie hier in der Landwirtschaft vom Reisanbau zur Garnelenzucht, wird weitere Konsequenzen nach sich ziehen; die veränderte Bodenbewirtschaftung kann über Eigenschaften wie Albedo, Kohlenstoffspeicherung oder -freisetzung wiederum Einfluss auf das Klima haben.

Eine komplizierte Folge von Veränderungen wird die nächsten Jahrzehnte auf uns zukommen, und es gilt, diese möglichst gut abschätzen und ggf. steuern zu können. Dazu sind leistungsfähige Modelle notwendig, die auch eine adäquate Repräsentation von Landoberflächen und Vegetation mit einschließt. In diesem Text sollen einige solcher Land-Vegetations-Modelle vorgestellt und näher erläutert werden.

## 2. Begriffe

Einige wichtige Begriffe tauchen im Zusammenhang mit Land-Vegetations-Modellierung immer wieder auf und sollten deshalb etwas näher erläutert werden; die Definition von Biosphäre und Kohlenstoffkreislauf führt dann zum Verständnis der Rolle von Land und Vegetation für die Klimamodellierung.

Als *Biosphäre* bezeichnet man einerseits den Teil der obersten Erdkruste, der Erdoberfläche und der Atmosphäre, die von lebenden Organismen bewohnt wird, demnach also eine Zone von Geosphären; andererseits auch die komplette Gesamtheit der lebenden organischen Substanzen, Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen, inklusive uns Menschen – also eine Ansammlung von Biomasse (<http://de.wikipedia.org/wiki/Biosphäre>).

Der *Kohlenstoffkreislauf* entsteht durch „das System der chemischen Umwandlungen kohlenstoffhaltiger Verbindungen [...] sowie den Austausch dieser Verbindungen zwischen den Geosphären“ (Atmosphäre, Landbiosphäre, Ozeane, Sedimente), dargestellt in Abb. 1 (<http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffkreislauf>).

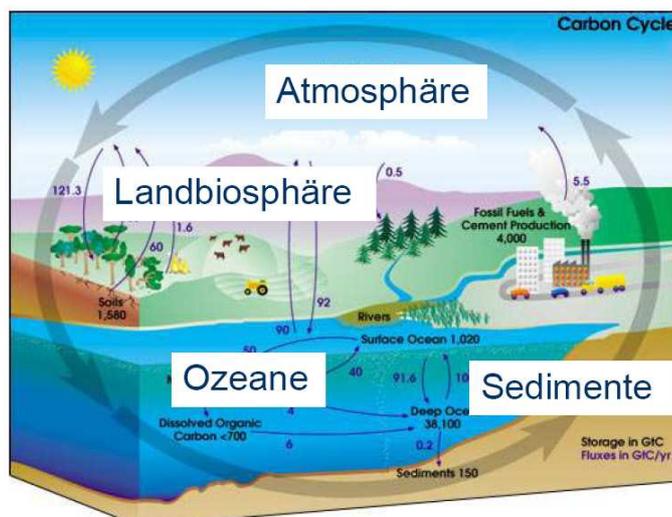


Abb. 1: Der Kohlenstoffkreislauf als Austausch kohlenstoffhaltiger Verbindungen zwischen den Geosphären (verändert aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffkreislauf>).

Um die Zusammenhänge von Kohlenstoffkreislauf und Klima sowie die besondere Rolle von Land und Vegetation verstehen zu können, ist die Unterscheidung von lang- und kurzfristigem Kohlenstoffkreislauf wichtig.

Der langfristige Kohlenstoffkreislauf beinhaltet die Speicherung von CO<sub>2</sub> in Kohle und Kerogen, der Grundlage für Erdöl. Der kurzfristige Kreislauf dagegen findet in lebenden Organismen durch Photosynthese und Zellatmung statt und unterliegt folglich jahreszeitlichen Schwankungen. In diesem kurzfristigen Kreislauf gebundenes CO<sub>2</sub> geht z.B. durch Absterben von Organismen und Sedimentation dieser Biomasse in den langfristigen Kreislauf über, und wird durch Verbrennung fossiler Energieträger wieder aus dem langfristigen Kreislauf freigesetzt.

Kommt es zu einem CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre, bewirkt der Treibhauseffekt einen Temperaturanstieg. Bei höherer Temperatur steigt auch die Oxydationsrate der Organismen an, die Carboxylierungsrate dagegen erhöht sich nicht oder nicht entsprechend stark; es wird also mehr Sauerstoff in Kohlenstoffdioxid umgewandelt. Damit steigt der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre weiter an und es kommt zu einer positiven Rückkopplung mit Eigendynamik.

### **3. Modellierung der Landbiosphäre durch Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs)**

Landoberfläche und Vegetation sind offensichtlich eng mit dem Klimageschehen auf der Erde verknüpft und damit nicht zu vernachlässigende Faktoren für die Klimamodellierung. Bisherige Klimamodelle benutzten meist keine oder veraltete Darstellungen der Landbiosphäre, und die Landmodellierung berücksichtigte wiederum nicht die Resultate der Klimamodellierung.

Sogenannte Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs) versuchen, die Verknüpfung von Landoberflächen- und Klimamodellen in beide Richtungen zu realisieren. Aufgabe der Landoberflächenmodelle ist es dabei, langsam stattfindende, kleinskalige Prozesse wie Pflanzenwachstum, CO<sub>2</sub>-Bodenspeicherung, etc. zu repräsentieren, die Auswirkungen auf den globalen CO<sub>2</sub>-Haushalt und damit das Klima haben; die Klimamodelle wiederum sollten diesen

Output berücksichtigen, um ihrerseits die schnell stattfindenden, großskaligen Prozesse in der Atmosphäre zu modellieren, und die resultierenden Klimaveränderungen wieder an das verwendete Landbiosphärenmodell zurückgeben (Abb. 2).

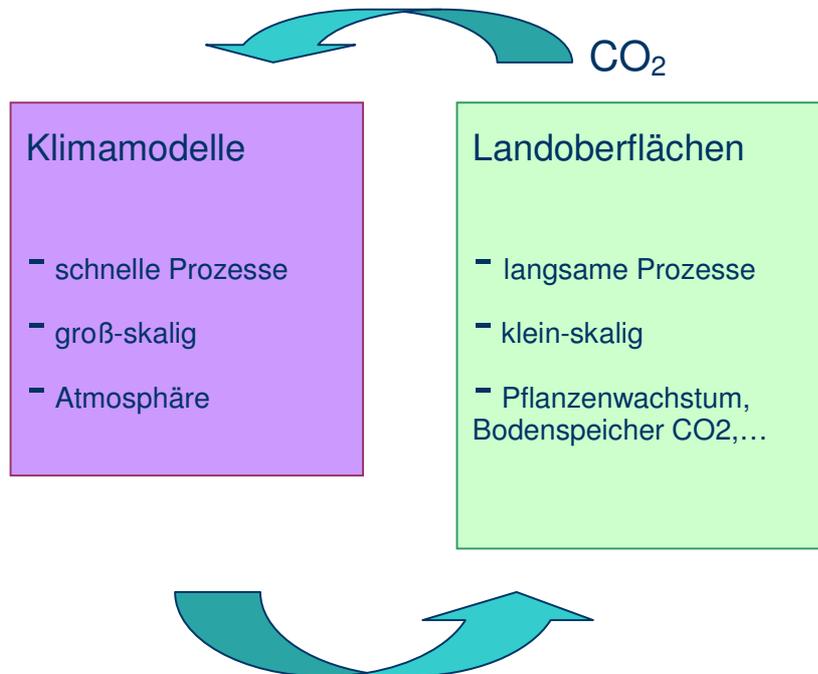


Abb. 2: Verknüpfung von Klima- und Landbiosphärenmodellierung in DGVMs.

Die jüngste Generation von DGVMs verfolgt diesen Ansatz und koppelt Land-Vegetations-Modelle mit allgemeinen Klimamodellen wie z.B. ECHAM5. Beispiele für solche Modelle sind u.a. das am MPI Jena entwickelte JSBACH oder das LPJ(mL), das in Jena weiterentwickelt wird. Auf diese beiden Modelle wird im Folgenden näher eingegangen.

## 4. Das LPJ-Modell

Der Name des LPJ-Modells steht für Lund-Potsdam-Jena, die Orte an denen das Modell entwickelt wurde; schwerpunktmäßig findet die Weiterentwicklung am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) statt. Außerdem existiert eine Modellvariante mit Erweiterung um eine landwirtschaftliche Komponente (LPJmL-Modell) sowie dessen Fortführung zu einem umfassenden Potsdam Biosphären-Modul (PBM), auf die beide in einem späteren Abschnitt noch eingegangen wird.

Das LPJ-Modell ermöglicht als DGVM die Land-Atmosphären-Kopplung durch explizite Einbeziehung der Vegetationsdynamik. Dazu wird die gesamte Erdoberfläche in Gitterzellen von je  $0.5^\circ$  Breite und Länge eingeteilt, die dann von Pflanzentypen besiedelt werden. Es werden zehn verschiedene sog. Plant Functional Types (PFTs) definiert, die vereinfachend die unterschiedlichen Arten von Vegetation in Kategorien wiedergeben. Unterschieden wird dabei u.a. nach Grünphasen (immergrün, regengrün, sommergrün) und Gewächsart (holzig, krautartig); jeder Kategorie werden spezifische Parameter zugewiesen, wie z.B. typische Blattlänge, Waldbrandresistenz, Mindesttemperatur zum Überleben usw..

Auf dieser Basis werden dann die stattfindenden Prozesse auf unterschiedlichen Ebenen modelliert: Für jedes einzelne Individuum berechnet das Modell Verhältnisse wie Wurzel- zu Blatt-Wachstum, Stamm-Höhe zu Durchmesser etc.. Hieraus ergeben sich die Eigenschaften der Gitterzellen in Abhängigkeit von deren Besiedelung durch die jeweiligen PFTs. Eine Vielzahl von Variablen wird dann in jedem neuen Zeitschritt berechnet, u.a. Bodentemperatur, Photosynthese, Wasserhaushalt, Wachstum, Sterben durch Waldbrände oder Klimaschwankungen, Zerfall von organischem Material,  $\text{CO}_2$ -Dynamik. Das Flussdiagramm in Abb. 3 (Sitch et al., 2003) veranschaulicht diese Iterationsschritte.

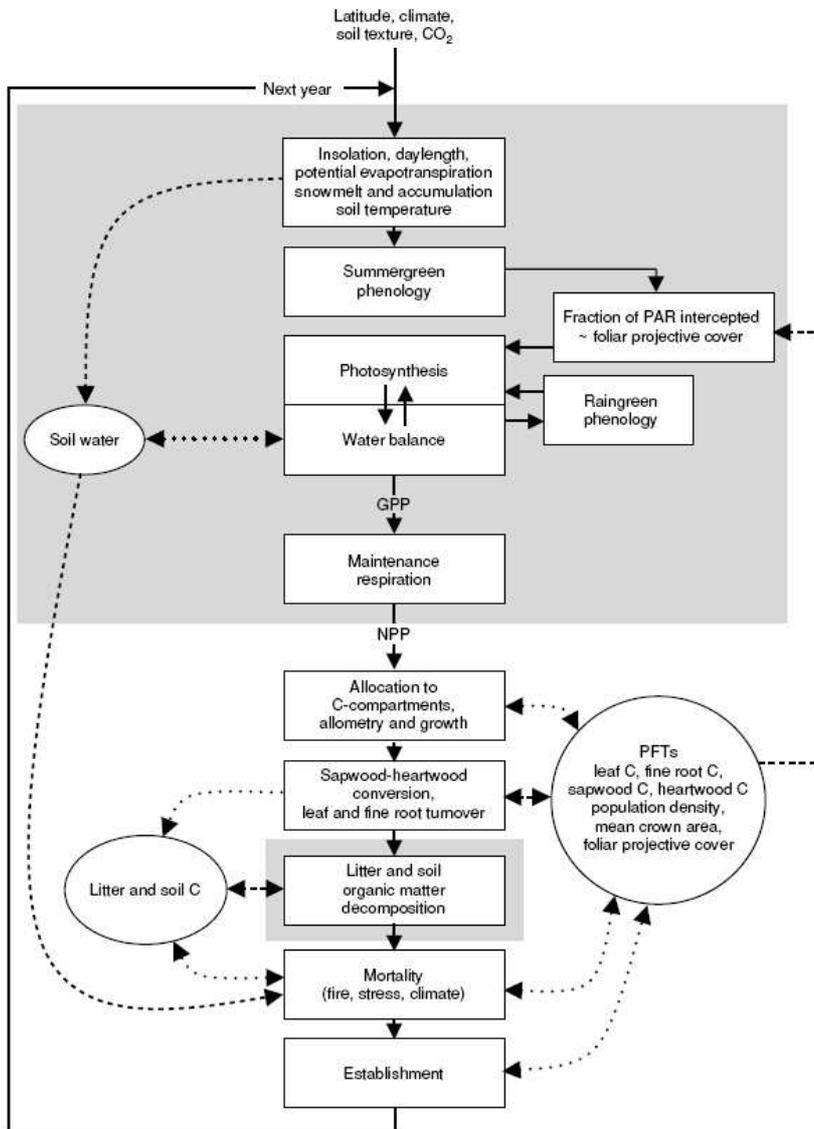


Abb. 3: Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Prozessrepräsentation im LPJ-Modell; grau hinterlegte Module werden in Zeitschritten von Tagen oder Monaten aktualisiert, die restlichen Module in jährlichen Zeitschritten. (Sitch et al., 2003)

Ein typischer Modelldurchlauf sieht folgendermaßen aus: Das Modell startet mit nacktem Boden, also ohne jegliche Vegetation. Es folgt eine sog. Spin-Up-Phase von 1000 Jahren, während der sich Kohlenstoffpools und Vegetation entwickeln können, bis sich diese im

Gleichgewichtszustand befinden; damit wird die Unabhängigkeit von den Anfangsbedingungen sichergestellt. Dann erfolgt der Input von Daten aus dem vergangenen Jahrhundert, u.a. aus Aufzeichnungen über Bewölkung, Temperatur, Niederschlag, Bodenbeschaffenheit und CO<sub>2</sub>-Konzentration. Daraus liefert das Modell die Simulation des vergangenen und die Prognose des nächsten Jahrhunderts.

Bei der Modellauswertung findet neben den üblichen Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen eine umfassende Multiparametervalidierung gegen biogeochemische, biophysikalische und hydrologische Datensätze auf unterschiedlichen Skalen (lokal, regional, global) statt. Die Resultate werden für kontinuierliche Verbesserungen der Prozessrepräsentationen im Modell genutzt. Auf die vom Modell gelieferten Ergebnisse wird in einem späteren Abschnitt noch ausführlich eingegangen.

## 5. Das LPJmL-Modell und PBM

Das beschriebene LPJ-Modell berücksichtigt lediglich die natürliche Vegetation, nicht menschliche Eingriffe durch die Landwirtschaft. Manche andere Land-Vegetations-Modelle beinhalten eine solche landwirtschaftliche Komponente, diese wird aber nur statisch, separat oder als konstanter Faktor modelliert. Gegebenheiten aus Boden und Klima bestimmen das Erntepotential, aus dem sich in diesen bisherigen Modellen die tatsächlichen Ernteerträge direkt als fester Anteil berechnen, was bestenfalls wiederum Auswirkungen auf Bodenbeschaffenheit und Klimaveränderung hat (s. Abb. 4).

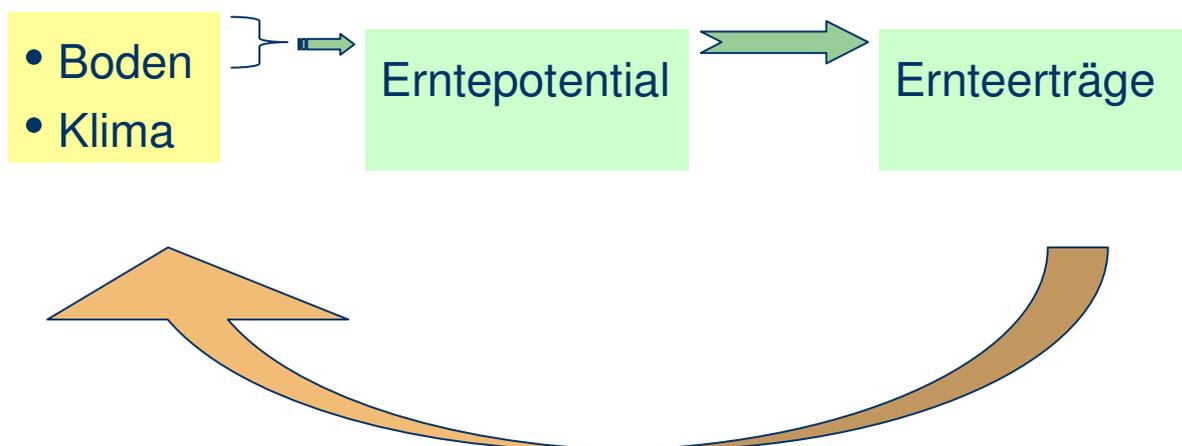


Abb. 4: Ansatz bisheriger Landwirtschafts-Modelle in der Vegetationsmodellierung.

Realistischer ist es jedoch, die Landwirtschaft nicht als konstanten, sondern als dynamischen Management-Faktor zu sehen. Im LPJmL-Modell wird dies berücksichtigt, indem der Management-Faktor explizit modelliert wird, die Ernteerträge ergeben sich als Folge diverser Landwirtschaftsprozesse (s. Abb. 5). Im Modellnamen kennzeichnet der Zusatz „mL“ für „managed Land“ diese Erweiterung.

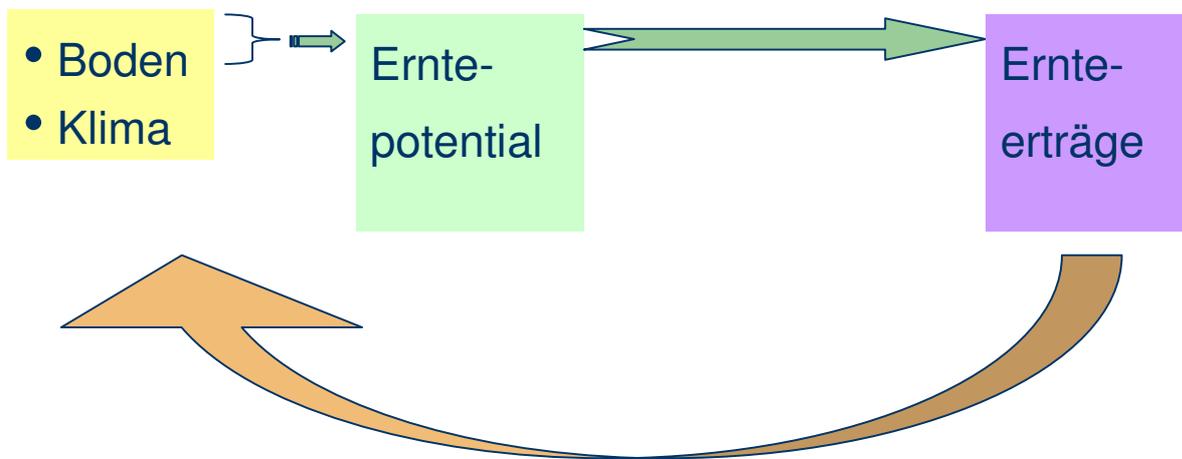


Abb. 5: Ansatz des LPJmL-Modells, das die Landwirtschaft als expliziten Management-Faktor berücksichtigt.

Das LPJmL-Modell koppelt also an die biophysikalischen und biogeochemischen Prozesse des LPJ-Modells das landwirtschaftliche Management, das Bewässerung, Düngung u.ä. modelliert. Diese Prozesse stellen Eingriffe in die Landoberfläche und damit wiederum auf den CO<sub>2</sub>-Haushalt dar. Die Beeinflussung des CO<sub>2</sub>-Kreislaufs hat letztendlich wieder Rückkopplungen zum Klimaverhalten.

Analog zu den zehn PFTs im LPJ definiert das LPJmL zusätzlich 13 Crop Functional Types (CFTs), die den unterschiedlichen Nutzpflanzen der Landwirtschaft entsprechen. Auch hier werden die Prozesse in das umfassende DGVM integriert. Eine ähnliche Erweiterung für forstwirtschaftliche Nutzung ist geplant, jedoch bisher noch nicht fertig gestellt.

Gegenwärtig findet eine Weiterentwicklung des LPJmL zum sog. Potsdam Biosphären-Modul (PBM) statt, das als Komponente eines umfassenden Earth System Models fungieren soll. In diesem Rahmen werden weitere Verbesserungen am Modell vorgenommen; dazu gehören eine Neustrukturierung zu objektbasierter Modellstruktur, Re-Codierung in C, sowie ein zusätzliches räumliches Looping das den Austausch zwischen den Zellen ermöglicht. Insgesamt wird das Modell damit schneller, leistungsfähiger und flexibler.

## 6. Das JSBACH-Modell

Am Max-Planck-Institut für Biogeochemie Jena wurde und wird in einer Hamburger Arbeitsgruppe das Landoberflächen-Modell Jena Scheme for Biosphere Atmosphere Coupling in Hamburg (JSBACH) entwickelt. Es läuft sowohl mit festen Datensätzen als auch gekoppelt innerhalb eines Atmosphärenmodells (z.B. ECHAM5); diese Eigenschaft ist wesentlich für die aktuelle Veröffentlichung von Raddatz et al. (2007), in der die Rückkopplung Klima – CO<sub>2</sub>-Kreislauf näher untersucht wird.

Die Existenz einer solchen positiven Rückkopplung gilt mittlerweile als wissenschaftlich belegt, bislang ungeklärt ist aber der Einfluss der Land-Biosphäre und dessen Größenordnung. Raddatz et al. (2007) adressieren deshalb mit ihrem Modell die Fragestellung: Wie hoch ist der Einfluss der globalen Erwärmung auf den CO<sub>2</sub>-Kreislauf? Welches sind die Hauptverursacher dieser positiven Rückkopplung? Zu diesem Zweck wurden mit JSBACH zwei Szenarien generiert und verglichen: Das sog. „entkoppelte“ Szenario mit konstanter CO<sub>2</sub>-Konzentration in dem die Klimaerwärmung außer Acht gelassen wird, und das sog. „gekoppelte“ Szenario, in dem die Folgen der Klimaerwärmung auf die Vegetation berücksichtigt werden und damit der Kreis der Rückkopplung geschlossen wird.

## 7. Modellübergreifende Resultate und Prognosen

Bei der Modellevaluation sind zunächst die Ergebnisse über das vergangene Jahrhundert interessant, da diese zur Validierung des Modells benutzt werden. Durch Vergleich der simulierten Werte mit Datensätzen aus Aufzeichnungen lässt sich feststellen, wie gut das Modell

arbeitet. Benutzt werden dabei Datensätze von unterschiedlicher räumlicher Skala: Zum Einen auf regionaler Ebene für Gegenden mit besonders detaillierten Daten, zum Anderen auf einem globalen Grid mit gröberer Auflösung. Zusätzlich werden Modelle wie LPJ, LPJmL, JSBACH und andere ähnliche im sog. Inter-Comparison Project untereinander verglichen.

Die Modellevaluation ergibt, dass der Großteil der Modellresultate sehr gut mit den Beobachtungen übereinstimmt. So werden neben unterschiedlichen Aspekten von Vegetationsmustern sogar Ereignisse wie El Niño realistisch abgebildet. Als Beispiel sei hier die von LPJ modellierte Verteilung der Blatttypen (Nadel- / Laubwald) angeführt (s. Abb. 6). Das Modell liefert eine qualitativ sehr ähnliche Verteilung (Abb. 6 links) wie aktuelle Satellitenaufnahmen (Abb. 6 rechts); die wesentlich geringeren Waldvorkommen z.B. in Europa oder Nordamerika sind vermutlich durch menschliche Eingriffe wie Forstwirtschaft zu erklären, die im LPJ-Modell nicht berücksichtigt sind.

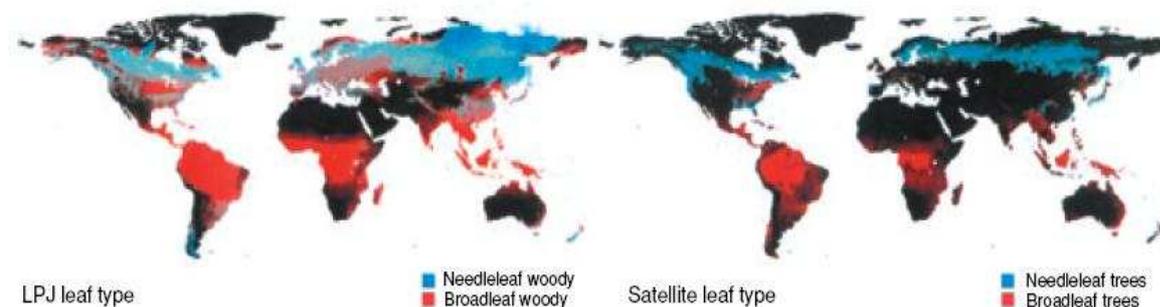


Abb. 6: Verteilung der Blatttypen (Nadel- / Laubwald) modelliert von LPJ (links) und erstellt durch Satellitenaufnahmen (rechts). Die beiden Muster sind qualitativ sehr ähnlich; quantitativ zeigt das LPJ-Modell einige Überschätzungen von Baumbeständen, die vermutlich von der Nichtberücksichtigung menschlicher Eingriffe herrühren. (Sitch et al., 2003)

Die Ergebnisse des LPJ-Modells waren im April 2007 auf der Internetseite des PIK unter dem Link [www.pik-potsdam.de/research/data/pik\\_lpj\\_baseline](http://www.pik-potsdam.de/research/data/pik_lpj_baseline) frei zugänglich, mittlerweile ist die Seite jedoch passwortgeschützt. Der Link bot eine Auswahl an Optionen, um eine gewünschte

Variable über einen benutzerdefinierten zeitlichen und räumlichen Ausschnitt darstellen zu lassen (Abb. 7).

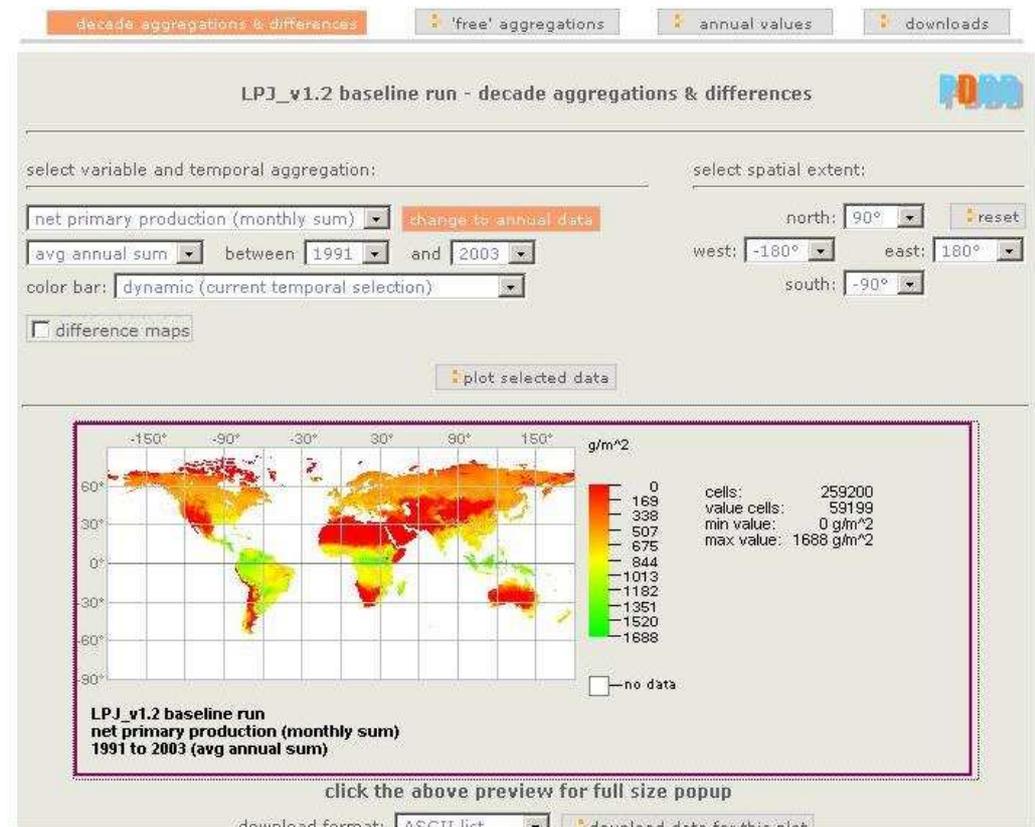


Abb. 7: Die Seite [www.pik-potsdam.de/research/data/pik\\_lpj\\_baseline](http://www.pik-potsdam.de/research/data/pik_lpj_baseline), auf der bis Ende April 2007 eine Vielzahl von Optionen zur Darstellung der LPJ-Modell-Ergebnisse verfügbar war.

Besonders interessant im Rahmen der aktuellen Debatte um die Klimaerwärmung und CO<sub>2</sub>-Emissionen sind die Modellaussagen zum Kohlenstoffhaushalt. Die meisten namhaften Modelle prognostizieren einheitlich, dass v.a. die Vegetation noch für das nächste halbe Jahrhundert weiterhin als CO<sub>2</sub>-Senke fungieren wird; dann wird allerdings um 2050 die steigende CO<sub>2</sub>-Aufnahme zusammen mit erhöhter Zellatmung und Temperaturanstieg dazu führen, dass eine Sättigung erreicht wird und keine weiteren Mengen an CO<sub>2</sub> mehr gespeichert werden können. Um 2100 wird die Vegetation sich weitab von Gleichgewicht befinden, d.h. ganze Vegetationszonen (z.B. die Tropen) könnten sich komplett verändern.

Die positive Rückkopplung bewirkt einen weiteren Temperaturanstieg, v.a. über Land. Dies zeigen die Ergebnisse des JSBACH-Modells (Raddatz et al., 2007): Durch Vergleich der zwei Szenarien „entkoppelt“ und „gekoppelt“ lässt sich der Einfluss der Kopplung Klima – Vegetation und umgekehrt sowohl für die Landoberflächen als auch für die Ozeane zeigen (Abb. 8). Gäbe es keine Rückkopplung vom Klimaverhalten auf die Vegetationsentwicklung, würde die Temperatur sowohl über Land- als auch über Meeresflächen die nächsten 100 Jahre nahezu konstant bleiben; berücksichtigt man jedoch die (mittlerweile anerkannte) Rückkopplung, so ergibt sich ein deutlicher Anstieg der Temperatur, der laut Modellsimulation über Land noch stärker als über dem Ozean ausfallen wird.

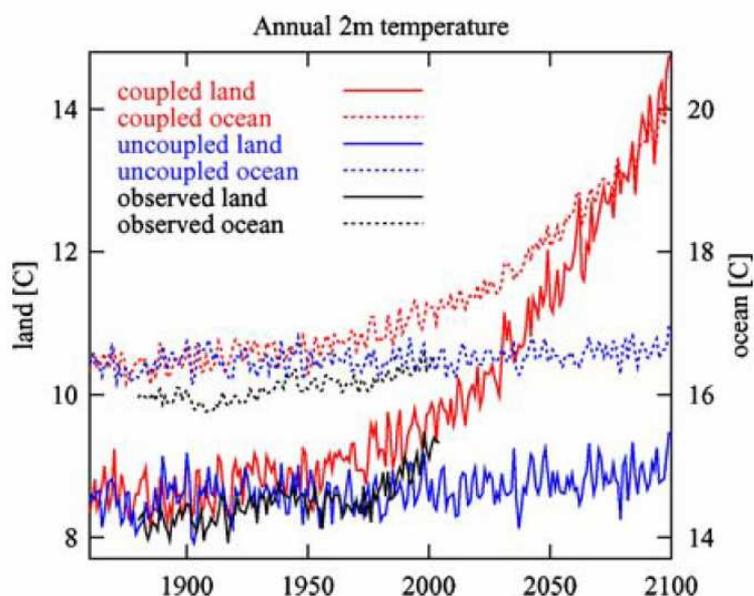


Abb. 8: Das Modell JSBACH zeigt den Einfluss der Rückkopplung Klima – Vegetation auf die Oberflächentemperatur durch Vergleich eines „entkoppelten“ (blau) mit einem „gekoppelten“ (rot) Szenario. Die Berücksichtigung der Kopplung führt zu einem deutlichen Temperaturanstieg (Differenz rote zu blauer Kurve). Die wirklichen Werte (schwarz) ähneln deutlich denen des gekoppelten Szenarios (rot). (Raddatz et al., 2007)

Als Hauptantrieb für die positive Rückkopplung zwischen Klima und Vegetation zeigen die Modelle einheitlich die tropische Land-Biosphäre. In Abb. 9 sind die Differenzen in der CO<sub>2</sub>-Aufnahme für die drei Kohlenstoffpools Ozean, gemäßigte Landzonen und tropische Landzonen aufgetragen, wie sie von elf verschiedenen Modellen berechnet wurden, darunter das JSBACH

(als MPI bezeichnet) sowie das LPJ (benutzt in BERN-CC und CLIMBER). Letztere sind die einzigen beiden der elf Modelle, die den stärksten Einfluss den gemäßigten Landzonen zusprechen. Eine Erklärung für die abweichende Aussage des LPJ-Modells sind vermutlich die regionalen Klimatrends in den verwendeten Daten (Raddatz et al., 2007).

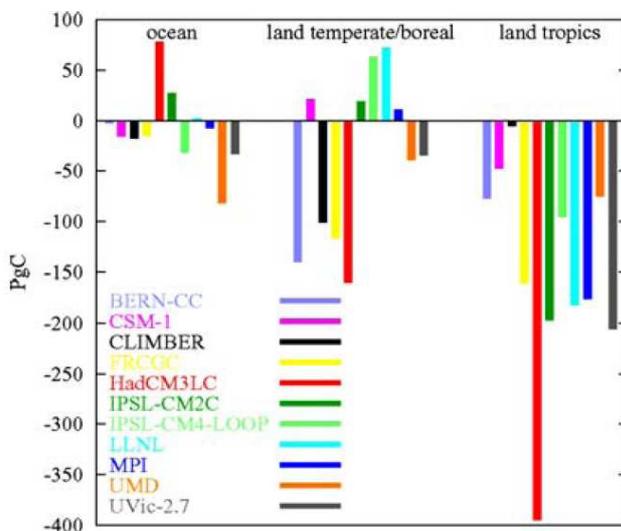


Abb. 9: Differenzen in CO<sub>2</sub>-Aufnahme der Kohlenstoffpools zwischen gekoppeltem und entkoppeltem Szenario, jeweils von elf verschiedenen Modellen. (Raddatz et al., 2007)

## 8. Unsicherheiten und Sensitivität

Unsicherheiten in den vorgestellten Land-Vegetations-Modellen ergeben sich durch die bei der Modellierung unvermeidlichen Abstrahierungen. So wird bisher z.B. keine Altersstruktur der Vegetation modelliert, sondern die Pflanzen behalten gleichbleibende Eigenschaften über eine konstante Lebenszeit. Weitere Unsicherheiten entstehen aus den Literaturwerten für den Vergleich der Modelldaten mit tatsächlichen Werten; so unterscheiden sich z.B. die aufgezeichneten Werte für CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Boden um ganze Größenordnungen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Sensitivität. Faktoren wie z.B. Waldbrände oder das Umkippen kompletter Ökosysteme (wie dem Amazonas) können tiefgreifende Folgen für ganze Vegetationszonen und sogar die ganze Biosphäre auf globaler Ebene haben, aber es ist kaum möglich diese Faktoren vorherzusagen oder quantitativ abzuschätzen. Weiterhin gibt es besonders sensitive Parameter, deren Implementierung das Modellverhalten maßgeblich beeinflussen kann. Ein Beispiel wäre hier die Modellierung der Optimaltemperatur für Photosynthese: Ob hierfür eine Gaußverteilung um einen Optimalwert oder ein festes Toleranzintervall verwendet wird, kann das Verhalten der Pflanzen wesentlich bestimmen.

Im Fall der Land-Vegetations-Modellierung kommt ein weiterer spezieller Aspekt hinzu: Durch die Kopplung vieler komplexer Modelle, die für sich genommen bereits Sensitivitäten und Unsicherheiten beinhalten, verstärken sich diese gegenseitig.

## 9. Fazit

Abschließend lässt sich feststellen, dass die wesentlichen Vorgänge von Modellen sehr gut erfasst werden, wie zahlreiche Vergleiche mit realen Daten belegen. Mindestens die qualitativen Aussagen von Klimamodellen sind also nicht zu leugnen – das menschliche Handeln beeinflusst die Biosphäre und das Klima in einem nicht zu vernachlässigendem Ausmaß. Es stellt sich zwangsläufig die Frage: Wie stark sollen wir auf Modellprognosen vertrauen und unser Handeln danach richten? Die Antwort könnte für das kommende Jahrhundert über die Bewohnbarkeit unseres Planeten Erde entscheiden.

## Quellen

[www.pik-potsdam.de](http://www.pik-potsdam.de)

[www.mpimet.mpg.de](http://www.mpimet.mpg.de)

[www.bgc-jena.mpg.de](http://www.bgc-jena.mpg.de)

<http://de.wikipedia.org>

<http://en.wikipedia.org>

Sitch S, Smith B, Prentice IC, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J, Levis S, Lucht W, Sykes M, Thonicke K, Venevsky S (2003) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Vegetation Model. *Global Change Biology* 9: 161–185

Bondeau A, Smith P, Zaehle S, Schaphoff S, Lucht W, Cramer W, Gerten D, Lotze-Campen H, Müller C, Reichstein M, Smith B (2007) Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology* 13, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x

Raddatz TJ, Reick CH, Knorr W, Kattge J, Roeckner E, Schnur R, Schnitzler K-G, Wetzel P, Jungclaus J (2007) Will the tropical land biosphere dominate the climate–carbon cycle feedback during the twenty-first century? *Clim Dyn* DOI 10.1007/s00382-007-0247-8



# Potentielle Auswirkungen des Klimawandels für Küstenzonen und marine Ökosysteme

**Hausarbeit zum Seminar „Hauptseminar Angewandte  
Systemwissenschaft“**

**(Sommersemester 2007)**

**Eingereicht von:**

**Robert Hagen**

**Natruper Str.154 49090 Osnabrück**

**E-Mail: [rhagen@uos.de](mailto:rhagen@uos.de)**

## ***Inhaltsverzeichnis***

### **1. Die Küstenzone**

#### **2. Meeresspiegelanstieg und Erderwärmung**

##### **2.1. Auswirkungen**

###### **2.1.1 Flora und Fauna**

###### **2.1.2 Küstenmorphologie**

###### **2.1.3 Bevölkerung**

###### **2.1.4 Ausgewählte Beispiele**

###### **2.1.4.1 Korallenriffe**

###### **2.1.4.2 Küstenzonen in Permafrostgebieten**

#### **3. Gefährdungsbestimmung**

##### **3.1 Zukünftiges Gefährdungspotential**

#### **4. Anpassungsmöglichkeiten**

##### **4.1 Statische Anpassung**

##### **4.2 Dynamische Anpassung**

#### **5. Kritik**

#### **6. Fazit**

#### **7. Anhang**

##### **7.1 Worterklärungen**

##### **7.2 Abbildungen**

##### **7.3 Tabellen**

#### **8. Literaturverzeichnis**

*Im Anhang (7.1 Worterklärungen) findet man zu Wörtern, die im Text kursiv dargestellt sind eine kurze Erläuterung!*

## **1. Die Küstenzone**

„Die Küsten der Welt umfassen eine Länge von fast einer halben Million Kilometer und sind ein bedeutender Lebensraum für den Menschen.“ ([8], Seite 271)

Zwanzig Prozent der Menschen leben in Gebieten welche einen Abstand von 20 Kilometer oder weniger zur Küstenlinie besitzen (nach [5]). Verbreitert man diesen Streifen entlang der Küstenlinie auf 60 Kilometer, so sind es bereits circa zwei Drittel der Menschheit, die sich für ihren Wohn- und Lebensraum in Küstenzonen entschieden haben (nach [2]).

Allgemein versteht man unter Küste den Übergangsbereich zwischen Festland und Meer.

Als Küstenzone kann die Zusammenfassung von den, der Küstenlinie angrenzenden Gebieten verstanden werden. Sie umfasst somit land- als auch seewärts gelagerte Gebiete.<sup>1</sup>

Morphologisch kann man diverse Küstenformen mit jeweils charakteristischen Eigenschaften unterscheiden.<sup>2</sup> Küstenzonen unterliegen dabei dem jeweiligen Meeresspiegelniveau, den Windverhältnissen, der Seegangsausprägung und der Strömungsdynamik. Falls sich bei den natürlichen geophysikalischen Gegebenheiten ein Sedimentgleichgewicht einstellt, also keine *Abrasion* oder *Akkumulation* zu beobachten ist, wird dieses durch Änderungen der eben genannten Einflussgrößen gestört.

Aufgrund der hohen Umweltvariabilität ist in den Küstenzonen eine hohe Biodiversität zu verzeichnen. Innerhalb der Küstenzonen kommt es zur Entwicklung und zur Existenz von enorm vielfältigen und produktiven Ökosystemen<sup>3</sup>. Die Umweltbedingungen unterscheiden sich bereits über kurze Distanzen, so dass man Übergänge von Süßwasser zu hypersalinen Wasser, von dem Meer zugewandten Regionen zu geschützten Gebieten im Küstenhinterland in wenigen 100 Metern Entfernung mit der jeweils angepassten Flora und Fauna vorfindet.

---

<sup>1</sup> Wie weit die Küstenzone landwärts oder seewärts reicht, ist nicht verbindlich festgelegt.

<sup>2</sup> Steil-, Flach-, Nehrungs-, Bodden, Ausgleichsküste, Flussdeltas, Fjorde, Ästuar, Kliffs...

<sup>3</sup> So liegen circa 80 % der Fläche heutiger Nationalparks (620200 ha) in Küstennähe (nach [7])

Man unterscheidet drei Funktionen des Küstenraumes (nach [3]):

Regulierungsfunktion:

Die Vegetation im Küstenraum erfüllt eine Filterfunktion für Nähr- und Schadstoffe für die jeweils nachfolgenden Bereiche. Im Zusammenspiel mit Sedimentformationen schützt sie zudem das Küstenhinterland vor seeseitigen Energieeinträgen.

Produktionsfunktion:

Küstengebiete dienen vielen Tieren als Lebensraum. Zudem vollzieht sich gerade in Küstennähe die Aufzucht von Jungtieren (sowohl bei marinen als auch bei terrestrischen Lebewesen).

Informationsfunktion:

Küstengebiete besitzen einen nicht quantifizierbaren aber dennoch existierenden ästhetischen und emotionalen Wert. Oftmals kommt es in der Küstenzone zu Ausprägungen von touristischen Zentren. Des Weiteren sind die Küstengebiete aufgrund ihrer besonderen ökologischen Produktions- und Regulierungsfunktion und der geophysikalischen Prozesse (Strömung, Erosion...) von wissenschaftlichem Interesse.

Die menschliche Nutzung erstreckt sich dabei über alle drei Funktionen, sie umfasst neben dem Bau von gewerblichen und privaten Bauwerken die Rohstoffgewinnung, den Fischfang, den Tourismus<sup>4</sup>, die Energieproduktion (Windparks), die Land- und Weidwirtschaft sowie den Transport und Handel von Gütern. Als allgemeine Tendenz der letzten Jahrhunderte ist festzuhalten, dass eine möglichst große menschliche Dynamik innerhalb unseres Lebensraumes mit einer möglichst geringen Dynamik der Natur verbunden sein soll (nach [9]). Neben dem Populationswachstum der letzten 200 Jahre ist dies als Ursache für den Rückgang an natürlichen Vegetationsräumen zu Gunsten von menschlichen Nutzungsflächen zu interpretieren.

---

<sup>4</sup> Wandern, Wassersport, Reiten, Lenkdrachenflug, Camping, Tierbeobachtungen...

Die an der Küste lebenden Menschen sind durch die Auswirkungen des Klimawandels<sup>5</sup>, besonders durch den Meeresspiegelanstieg insofern betroffen, als das sie mit einer Gefährdung von Leben und Lebensraum und Nutzungseinschränkungen für die Ökosysteme und Küstenzonen kalkulieren müssen.

Durch die sich wandelnden Umweltbedingungen und den erhöhten Nutzungsdruck sind die Küstengebiete einer höheren sozioökonomischen Gefährdung bei gleichzeitiger Abnahme der natürlichen Rezilienz der Ökosysteme ausgesetzt.

## **2. Meeresspiegelanstieg und Erderwärmung**

Die Erwärmung der Atmosphäre, bewirkt eine langsame Erwärmung der Hydrosphäre, genauer gesagt, der oberen Wasserschicht von Meeren und Seen und eine flächenmäßig geringere Eisbedeckung der Polargebiete. Der Anstieg der Atmosphärentemperatur wird bis zum Jahr 2100 mit 1-2 Kelvin prognostiziert, wobei der IPCC<sup>6</sup> einräumt dass die Daten im Zeitraum von 1993-2003 eher auf einen Anstieg von 2 Kelvin weisen (nach [12]). Im Jahrzehnt von 1993-2003 stieg die globale Ozeantemperatur um 0,1 Kelvin ((für eine Wassertiefe bis 700 Meter) nach [12]). Eine Temperaturnivellierung, so dass die Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Klimazonen abnehmen (absolut gesehen), wird vom IPCC nicht ausgeschlossen.

Falls diese Änderung des Wärmehaushaltes der Erde eintritt, würde eine Veränderung der Luftströmungsprozesse und daher auch Änderungen der Meeresströmungen und der regionalen Wasserhaushalte initialisiert werden. Bis jetzt liegen dafür jedoch keine Indizien vor. Durch die Erwärmung der Atmosphäre kommt es indirekt zu einem Meeresspiegelanstieg, der bis zum Jahr 2100 mit 15-95 cm prognostiziert wird (nach [4])

Während im 20. Jahrhundert die Rate des Meeresspiegelanstiegs bei durchschnittlich 1,2 - 2,2 mm pro Jahr lag, geht man bei der Rate für das 21. Jahrhundert von mehr als 2,4 - 3,8 mm pro Jahr aus (nach [12]).

In der Periode von 1961-2003 wird circa ein Viertel des beobachteten Meeresspiegelanstiegs auf die thermische Ausdehnung des Wassers zurückgeführt (siehe Tabelle 4 im Anhang).

---

<sup>5</sup> In welchem Ausmaße sich der momentan stattfindende Klimawandel vollzieht und wie groß der anthropogene Anteil ist, soll und kann im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht thematisiert werden, doch es sei dafür auf die Quellen im Literaturverzeichnis verwiesen. Dort werden die verschiedenen Theorien hinlänglich diskutiert.

<sup>6</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

Doch auch ein Anteil des Schmelzwassers von Gletschern, von Grönland, von der Antarktis, von *Permafrost*gebieten und von sonstigen Eisschilden, der vorher als Eis gebunden war und nun wieder in den globalen Wasserkreislauf eintritt, ist auf die Temperaturzunahme zurückzuführen und trägt somit ebenfalls zu einem Anstieg des Meeresspiegels bei. Die Temperaturzunahme betrug im Zeitraum von 1860 bis 1990 circa 0,5 Kelvin (nach [4]). Demnach bekommt man eine vage Vorstellung von dem Anstiegspotential welches einer Temperaturzunahme von 2 Kelvin entspricht.

Relativ zeitnah hätten die Erderwärmung und der Meeresspiegelanstieg einen Einfluss auf die Art und die Ausprägung der jeweiligen Küstenökosysteme. Es werden klare Einwirkungen auf die Produktions– und Regulationsfunktion der Küsten zu Verzeichnen sein.

## **2.1 Auswirkungen**

Bevor im folgendem die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels für eine Küstenzone und ein Küstenökosystem exemplarisch dargelegt werden, sollte man deutlich hervorheben, dass alle Auswirkungen die erwähnt und angesprochen werden, in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausprägung hoch variabel sind und dabei von den jeweiligen Eigenarten des Küstenraumes abhängen. Die Veränderungen werden keinen linear kausalen Charakter annehmen. Sie sind selbst Variationen unterworfen. Demnach kann man keine allgemeingültigen Folgerungen aufstellen und sich nur regionalspezifisch über mögliche Folgen und konkrete Präventionen Gedanken machen. Dennoch ist man natürlich an globalen Tendenzen und daraus ableitbaren Handlungsmöglichkeiten interessiert.

Die erwarteten Auswirkungen erstrecken sich auf den Lebens – und Wirtschaftsraum des Menschen, auf die Flora und Fauna und auf die jeweilige Küstenmorphologie. Im menschlichen Interesse stehen dabei speziell die Gefahren für die Landwirtschaft, Fischerei, Aquakultur, Industrie und für den Tourismus und den Verkehr.

Als relativ sicher wird angesehen, dass sich die Küstengebiete im Vergleich zu den Regionen im Inland nicht so schnell erwärmen werden. Dies ist in der spezifischen Wärmekapazität des Wassers begründet, die mit 4,19 kJ/(kg\*K) wesentlich höher als die von anderen Stoffen ist. (vergleiche Tabelle 2 im Anhang). Die Wärmekapazität der Ozeane ist ungefähr 1000-mal höher als die der Atmosphäre (nach [12]).

Ein geringerer Temperaturanstieg in Zusammenhang mit dem ohnehin für den Menschen vorteilhaften gesundheitlichen Bedingungen<sup>7</sup> könnte zu einem Ausgangspunkt für stärkere menschliche Migrationsbewegungen werden.

Neben der Temperaturerhöhung und dem Anstieg des Meeresspiegelniveaus gibt es noch weitere sich verändernde Umweltbedingungen. So gibt es ebenfalls Untersuchungen über einen sich verändernden pH-Wert der Ozeane<sup>8</sup>, über deren Sauerstoff und Nährstoffgehalte (vergleiche [12]). Über Auswirkungen, welche durch Veränderungen dieser Faktoren in Zukunft die Flora und Fauna, die Küstenmorphologie der Küstenzonen und somit die Menschen beeinträchtigen werden, gibt es kaum gesicherte Erkenntnisse, so dass ich mich im folgendem auf die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs und der Erderwärmung beschränke.

### **2.1.1 Flora und Fauna:**

Die Temperaturerhöhung bewirkt eine Veränderung und Verschiebung in der Größe und Lage von Habitaten mariner Lebewesen oder führt zu Fluktuationen in der Häufigkeit und Verteilung von Individuen. Dementsprechend hat die Temperatur Einfluss auf die Artenvielfalt und kann zu geografischen Verschiebungen beitragen.

Die Umweltfaktoren<sup>9</sup> von marinen Ökosystemen sind durch die Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Salzwasser kann weiter in Süßwassergebiete vorstoßen. Dies geschieht entweder über Flussmündungen oder über das Grundwasser. Überschwemmungen als Folge von Windereignissen begünstigen das Vordringen. Ein Problem welches dadurch hervorgerufen wird, ist die mangelnde Süßwasserversorgung für Pflanzen und Tiere im küstennahen Raum und besonders auf Inseln. Die dortige Trinkwasserlinse könnte zunehmend durch salzhaltiges Wasser gefährdet werden, die Böden könnten versalzen.

Feuchtbiotope in Meeresnähe, welche an einen bestimmten Salzgehalt angepasst sind, wären enorm gefährdet, so dass von einer Verkleinerung der Feuchtlandflächen auszugehen ist.

---

<sup>7</sup> frische bakterien- und keimarme Luft, wenig Insekten als potentielle Krankheitsüberträger und demnach ein geringeres Krankheitsrisiko

<sup>8</sup> Im Zeitraum zwischen 1750 und 1994 ist eine Abnahme des pH-Wertes der Oberflächenschicht der Ozeane um 0,1 beobachtet worden. Diese Veränderung wird auf den erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt der Atmosphäre zurückgeführt. Eine Verminderung des pH-Wertes um 0,1 bedeutet, dass sich die Konzentration der H<sup>+</sup> Ionen um 30% erhöht hat (nach [12])

<sup>9</sup> Strömung, Lichtverhältnisse, Sauerstoffgehalt, Salzgehalt, Temperatur

Die Lebensgemeinschaften der küstennahen Bereiche wie es Seegras- oder Salzgraswiesen, Mangrovenwälder oder Korallenriffe sind, haben sich meist an die vorherrschenden Lebensbedingungen angepasst und können nur bedingt auf eine sich ändernde Umwelt reagieren. Voraussetzung für das Überleben einer Art ist die Anpassung durch Habitatwechsel oder durch genetische Anpassung.

Letztere erfolgt meist über längere Zeiträume so dass sie hier als zeitnahe Reaktion auf die Auswirkungen des aktuell vorhergesagten Klimawandel nicht näher betrachtet wird. Die Erfolgsaussichten für einen Lebensraumwechsel werden von der Geschwindigkeit mit der die Organismen auf die sich verändernde Umwelt reagieren können, bestimmt. Dabei ist es essentiell, ob sich die Anpassung wirklich mit der gleichen Geschwindigkeit wie der stattfindende Anstieg des Meeresswassers und die Temperaturveränderung innerhalb der Küstenräume (sowohl Luft als auch Wassertemperatur) vollziehen kann. Besitzen die Organismen das natürliche Potential auf die Veränderungen in geeigneter Weise zu reagieren, so heißt das noch lange nicht, dass das Überleben gewährleistet ist, denn es muss außerdem der entsprechende Naturraum zur Verfügung stehen. Dies ist vielerorts das Hauptproblem, da der Küstenraum wie in Abschnitt 1 „Die Küstenzone“ beschrieben wurde, durch eine Vielzahl von menschlichen Aktivitäten genutzt wird. Der Verbauungsgrad entlang der Küstenlinie oder entlang der Flussmündungen wird die Tier – und Pflanzenwelt oft daran hindern, neue geeignete Lebensräume zu erschließen. Dies könnte zu einer ernstzunehmenden Bedrohung für die Funktionalität von Küstenökosystemen werden.

Auf Grund dessen kann es bis zum Jahre 2080 weltweit zu einem Verlust von 22% der Feuchtgebiete kommen (nach [2]). Für bestimmte *Mangrovenwälder* sehen die Prognosen noch ungünstiger aus. Dass einige Mangrovenwälder bereits im letzten Jahrhundert akut bedroht waren zeigen die Daten von Thailand. Zwischen 1968-1993 kam es dort zu einem Rückgang des Bestandes um 50% (nach [5]).

In Jamaika befürchtet man für dieses Jahrhundert den Zusammenbruch der kompletten Mangrovenwälder. Ein Großteil der globalen Mangrovenwälderr könnte sich dem vom IPCC prognostizierten Meeresspiegelanstieg wohl nicht anpassen, außer es gibt natürliche Rückzugsmöglichkeiten wie zum Beispiel entlang von unbebauten, natürlichen *Ästuaren* oder in Küstenbereiche mit geringen Höhenunterschieden zum aktuellen Lebensraum, die ebenfalls frei von Bebauung sein müssen.

Die eben angesprochene Entwicklung hätte Auswirkungen auf andere Vegetationsformen und Lebensformen, da Mangrovenwälder Schutz und Nahrung für Tiere bereitstellen, als

Nährstoffsенке fungieren, einen natürlichen Küstenschutz aufrechterhalten und Biomasse im Sinne von Holz produzieren.

Für die Überlebenschancen der meisten Tierarten wird es ebenfalls von Bedeutung sein, inwieweit diese mit einer Temperaturerhöhung umgehen können.

Zum einen erhöht sich durch die steigende Wassertemperatur die Wahrscheinlichkeit für Seuchen und Krankheiten<sup>10</sup> und zum anderen spielt die Temperatur auch eine Rolle für die Überlebensfähigkeit von Larven, welche die Nahrungsgrundlage für eine Vielzahl von marinen Tieren (darunter auch Jungfische diverser Fischarten) sind und demnach auch über eine erfolgreiche Entwicklung ihrer Räuber entscheidet.

Geht man wiederum von den Räubern als Beute für andere Tierarten aus, hätte die Einwirkung auf die Larven weitreichende Folgen entlang der Nahrungsketten und innerhalb des Nahrungsnetzes<sup>11</sup>.

Fasst man alle Auswirkungen zusammen, so ist deutlich, dass der Mensch, will er weiterhin die Küstengebiete als sicheren Nutz- und Lebensraum in Anspruch nehmen, entweder mit einem größeren Gefahrenpotential leben muss oder, sofern es den betroffenen Bevölkerungsgruppen möglich ist, sehr viel Arbeit und Geld für die Lebenssicherung aufzuwenden hat.

Es wird wohl zu teuren Standortverlegungen für Siedlungen, Industrie- und Gewerbeanlagen und von Verkehrsinfrastruktur kommen. Gerade auf kleineren Inseln, speziell im Pazifik, kam es in den letzten Jahren zu Umsiedlungsaktivitäten von kleineren zu größeren Inseln. Dieser Prozess führt auf den Hauptinseln zu einem erhöhten Nutzungsdruck und daher zu sozialen und teilweise auch kulturellen Spannungen. Die aktuelle Lage von Tonga und anderen Südpazifischen Inselstaaten könnte uns ein erstes Bild von zukünftigen gesellschaftlichen Problemen geben, die durch den Klimawandel ausgelöst werden könnten.

### **2.1.2 Küstenmorphologie:**

Wie im Abschnitt unter 2.1 „Auswirkungen“ angesprochen, können sich durch den Meeresspiegelanstieg und die globale Erwärmung langfristig globale Zirkulationsmuster und Meeresströmungen verändern. Auch regional in den jeweiligen Küstengebieten ist davon auszugehen, dass sich die Strömungsrichtungen- und Intensitäten verändern.

---

<sup>10</sup> Hauptgefahr besteht bei einem Nährstoffüberangebot wie zum Beispiel durch vermehrte Nährstoffeinträge der Landwirtschaft über Flussmündungen.

<sup>11</sup> So werden Änderungen in der Häufigkeit und Verteilung von Seevögeln als Indikatoren für Ökosystemveränderungen herangezogen [nach [5]]

Dieser Prozess ist jedoch sehr schwer prognostizierbar, da er kaum modellier- und berechenbar ist. Änderungen die sich lokal ergeben, bewirken einen immensen Wandel der dort stattfindenden geophysikalischen Prozesse und haben einen Einfluss auf das Erscheinungsbild, auf das Relief des Küstenraumes.

Der säkulare Meeresspiegelanstieg bewirkt, dass sich potentiell die Anzahl und die Intensität von Sturmfluten erhöht. Dadurch ist zu vermuten, dass es zu einer Zunahme von Abspül-, Fließ- und Rutschprozessen und zu vermehrten spontanen Massenbewegungen im Küstenraum kommen wird (nach [3]). Inseln, die bereits jetzt geomorphologische Schwachstellen aufzeigen sind gefährdet, dort vom Meerwasser überspült zu werden.

Allgemein erwartet man eine direkte Abrasionszunahme um 5%. Bei Sturmschäden könnte diese jedoch bis zu 20% zunehmen (nach [5]). Es besteht eine größere Verlustgefahr für die Ressourcen und Funktionen der Küsten.

Die folgenden Punkte sollen in logischer Weise den Meeresspiegelanstieg mit der zunehmenden Gefährdung des im Küstenraum lebenden Menschen in Verbindung setzen. Dabei fällt die positive Rückkopplung von Punkt „3.3.“ zu Punkt „3.0“ auf.

- 1) Je intensiver der Meeresspiegelanstieg, desto stärker die Seegangbelastung
- 2) Je stärker Seegangbelastung, desto stärker der in Küstenbereichen umgewandelte Energiebetrag
- 3.0) Je größer der umgewandelte Energiebetrag, desto stärker die Ausräumung des ufernahen Meeresbodens (desto größer ist die resultierende Abrasionskraft des Wassers)
- 3.1) Je stärker die Ausräumung des ufernahen Meeresbodens, desto größer ist der Höhenunterschied zwischen den land- und seeseitigen Sedimentschichten
- 3.2) Je steiler der ufernahe Meeresboden, desto schmaler die Brandungszone
- 3.3) Je schmaler die Brandungszone, desto größer der umgewandelte Energiebetrag
- 4) Je größer die Abrasionskraft des Wassers, desto mehr Sediment wird vom landseitigen zum seeseitigen Küstenbereich umverteilt
- 5) Je mehr Sediment umverteilt wird, desto geringer ist der Schutz vor dem bei Sturmfluten umgewandelten Energiebeträgen
- 6) Je geringer der Schutz vor Sturmfluten, desto weiter können Wellen in Festlandsbereiche vordringen
- 7) Je weiter die Wellen in Festlandsbereiche vordringen können, desto größer ist die Gefahr für den Lebens- und Wirtschaftsraum des Menschen

### **2.1.3 Bevölkerung:**

Neben der direkten Gefährdung von Menschenleben (oder der Gesundheit im Allgemeinen), besteht durch das erhöhte Überflutungsrisiko ein Bedrohungspotential für Sachwerte, Nutztiere, Bewirtschaftungsflächen und für die Infrastruktur von Tourismus (große Hotelkomplexe, große Parkplätze, Restaurants) und Verkehr (Straßennetz entlang den Küsten und Hafenanlagen für den Transport von Gütern), denn diese befindet sich ebenfalls in unmittelbarer Nähe zu den Gewässern. In Kiribati (nordöstlich von Indonesien) kommt es durch häufige Überflutungen der wenigen Straßen, durch Erosion der Küstenregionen und der Versalzung der wenigen landwirtschaftlich nutzbaren Böden immer wieder zu schwer zu kompensierenden Rückschlägen (nach [11]). So erweist sich der Klimawandel bereits jetzt zunehmend als ein Hindernis für die wirtschaftliche Entwicklung einiger tropischer Inselstaaten.

In der Landwirtschaft in küstennahen Gebieten muss im Allgemeinen mit Gebietseinbußen durch Überflutungen und demzufolge mit Nutzungseinschränkungen und mit Ertragsabnahmen durch eine zunehmende Versalzung der Böden gerechnet werden. Durch die Versalzung resultiert dann wiederum die bereits angesprochene Trinkwasserverknappung. Neben dem eigenen Leben ist bei Überflutungen auch das Leben von Nutztieren bedroht, wobei bei Extremwetterereignissen durch höhere Temperaturen und weniger Süßwasser ein höheres Seuchenrisiko zu befürchten ist.

So ist vom IPCC aufgeführt worden, dass es in Bangladesch eine Korrelation zwischen Cholera Epidemien und der Wasseroberflächentemperatur der küstennahen Gewässer des indischen Ozeans gibt (nach [5]).

Alles in allem ist der im Küstenraum lebende Mensch einer direkten Bedrohung ausgesetzt und versucht nicht erst seit dem 20. Jahrhundert seinen historisch gewachsenen Kulturraum vor Überschwemmungen und Ausräumungen zu bewahren.<sup>12</sup>

Im Laufe der Jahrhunderte wurden diverse Küstenschutzanlagen konzipiert und errichtet<sup>13</sup>. Die bestehenden Anlagen werden durch den Anstieg des Meeresspiegelniveaus ebenfalls beeinträchtigt und müssen verbessert und ausgebaut, repariert und an die jeweiligen Veränderungen sofern dies bautechnisch möglich und sinnvoll ist, angepasst werden.

---

<sup>12</sup> Der systematische (geplante) Küstenschutz begann in Europa vor circa 400 Jahren

<sup>13</sup> Eine Übersicht nach funktionellen Gesichtspunkten findet sich im Anhang in Tabelle 3

Durch die angesprochenen Gefahren und Probleme für die Überlebensfähigkeit von Jungfischen ist es auch Aufgabe der Fischerei möglichst sensibel auf Änderungen in der Häufigkeit von

Nutzfischen zu reagieren, da sonst eine akute Gefahr der Überfischung besteht. Von einer konstanten maximalen Fangrate sollte aufgrund der sich ändernden Umweltbedingungen Abstand genommen werden.

Falls wirklich eine erhöhte Seuchenintensität für Fische zu beobachten ist, würde dies wiederum Einfluss auf die Fischfarmen, auf den Sektor der Aquakultur besitzen.

Insgesamt gesehen, ist damit zu rechnen, dass die Verfügbarkeit von Fischmehl -und öl abnehmen wird (nach [5]). Der Umgang mit den Auswirkungen auf den Lebensraum des Menschen wird wohl gerade in großen Agglomerationsräume wie Tokio, Shanghai, Jarkata, Bombay, New York, New Orleans und in armen Regionen Afrikas und südpazifischen Inselstaaten zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts werden.

## **2.1.4 Ausgewählte Beispiele**

### **2.1.4.1 Korallenriffe**

Als Ökosystem weisen Korallenriffe eine enorm hohe Biodiversität auf und beherbergen 25% aller bekannten marinen Lebewesen (nach [5]). Ihr Verbreitungsgebiet erstreckt sich auf 255000 km<sup>2</sup> (nach [5]) in Regionen mit einer Temperatur von dauerhaft mindestens 20°Celsius (siehe Abbildung 2 im Anhang). Korallen benötigen klares salzreiches Wasser. Ihre Nahrungsgrundlage ist Plankton.

Korallenriffe besitzen eine Regulierungsfunktion für die landwärts dahinter gelegenen Strandküsten. Einerseits filtern sie Schadstoffe, andererseits reduzieren sie den seeseitigen Energieeintrag und dienen gleichzeitig als eine Sedimentquelle. Aufgrund der hohen Biodiversität, ihrer optischen Attraktivität und dem Faktum, dass Korallenriffe zu den ältesten Lebenssystemen unserer Erde gehören (Barriereriff bei Australien existiert seit über 5 Millionen Jahre) interessiert sich eine Vielzahl von Menschen für die Korallengebiete.

So ist die Wirtschaft einiger Staaten in tropischen und subtropischen Bereichen wie auf den Cookinseln (Pazifik) oder in Vanuatu (nordöstlich von Indonesien) stark auf die Einnahmen der Tourismusbranche angewiesen<sup>14</sup>.

Was geschieht jedoch mit den Korallenriffen unserer Erde und den dort lebenden Menschen, wenn die globale Temperatur wie vorhergesagt ansteigt?

---

<sup>14</sup> Neben der Fischerei und der Perlenzucht sind vor allem Tourismus und Finanzdienstleistungen wichtige Wirtschaftssektoren. (nach [11])

Die Auswirkungen dürften ziemlich verheerend sein, da Korallen meist nahe ihrer Temperaturtoleranz existieren und ein Temperaturanstieg auf jeden Fall eine Verschlechterung ihrer Vitalität bis hin zum Absterben und eine verminderte Produktivität und Reproduktionsfähigkeit bewirkt.

Korallen besitzen nur geringe Anpassungsmöglichkeiten (nach [12]), so dass bereits 58% aller lebenden Korallen durch menschliche Aktivitäten gefährdet sind (nach [5]). Vermehrt ist das Phänomen des Korallensterbens zu beobachten. Verantwortlich dafür sind meist episodische Naturereignisse wie Stürme. Doch auch die Einleitung von Abwasser (Industrie und Haushalte), Nährstoffeinträge der Landwirtschaft über Flussmündungen und die Verschmutzung und Störung durch den Tourismus begünstigen lebensfeindliche Bedingungen für die Korallen. Das massenhafte Absterben ist eine physiologische Reaktion auf starke Veränderungen der Umweltfaktoren (Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoffsättigungsgrad...). Beispielsweise tritt ein solches Ereignis bei einer Temperaturschwankung, welche die saisonale Maximaltemperatur um mehr als ein Kelvin übersteigt, auf. Als es 1998 im indischen Ozean zu solch einem Absterbeprozess gekommen ist (in einigen Atollen wurden Sterberaten bis zu 90 % beobachtet (nach [5])) wurden daraufhin auch Änderungen von Populationsdichten bei Fischen und negative Effekte für den Tourismus (fallende Besucherzahlen) verzeichnet. Im Pazifik steht das Korallensterben oftmals in Zusammenhang mit El-Nino Ereignissen, deren Anzahl und Intensität durch den Klimawandel zunehmen könnte (nach [5]). Zudem ist nach Angaben des IPCC auch mit einer Intensitätszunahme von tropischen Wirbelstürmen mit bis zu 20% zu rechnen (nach [5]). Für Regionen, wie zum Beispiel die Cookinseln, die oftmals sowohl vom Tourismus als auch vom Fischfang profitieren, oder in denen Subsistenzfischer auf die Ressource Meer angewiesen sind, kann es zu existenziellen Nutzungskonflikten kommen, sofern eine Nutzung durch eine zunehmende Lebensgefährdung in den entsprechenden Bereichen noch möglich ist.

#### **2.1.4.2 Küstenzonen in Permafrostgebieten**

Wie in Abschnitt 2.1.2 „Küstenmorphologie“ bereits dargelegt, ist in vielen Küstenzonen mit einer Abrasionszunahme und damit mit vermehrten Abspül- und Rutschprozessen aufgrund des Meeresspiegelanstiegs zu rechnen. Des Weiteren würde die Abrasion in *Permafrost*gebieten aufgrund einer kürzeren Frostperiode, die auf den Temperaturanstieg zurückzuführen ist, zunehmen. Wie vom IPCC erwähnt, wird die Mächtigkeit der Auftauschicht zunehmen. Der aufgetaute Boden ist durch die kürzere Frostperiode länger der Erosionswirkung des

Meerwassers ausgeliefert. Gerade im Winterhalbjahr treten in Permafrostgebieten starke Winde und Stürme auf, die diese noch intensivieren.

Der Temperaturanstieg hätte zudem folgende Auswirkungen. Durch die Schmelzvorgänge gelangt Methan, ein sehr wirksames Treibhausgas in die Atmosphäre. Es erhöht sich die Rutschgefahr, da größere Sedimentblöcke an den Küsten herabrutschen können. Wie in Tabelle 1 im Anhang zu sehen ist, besitzt der Schmelzvorgang Einfluss auf den Anstieg des Meeresspiegels.

### **3. Gefährdungsbestimmung**

Um das Gefährdungspotential einer Region zu bestimmen bedient man sich beim IPCC folgender Parameter („Common Methology“ (CM) nach [2]):

#### Betroffene Bevölkerung<sup>15</sup>:

Menschen welche bei einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter und innerhalb von 1000 Jahren mindestens einmal von einer Überschwemmung oder Abrasionsfolgen betroffen wären.

#### Gefährdete Bevölkerung:

Menschen, die jährlich ein Hochwasser erleben. Die Anzahl ergibt sich als Produkt aus der betroffenen Bevölkerung und der Wahrscheinlichkeit für eine jährliche Überflutung.

#### Sachwerte:

Wert der Landflächen und der Infrastruktur die bei einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter und innerhalb von 1000 Jahren aufgrund von Überschwemmungen verloren geht.

#### Flächen<sup>15</sup>:

Landflächen, welche bei einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter und innerhalb von 1000 Jahren aufgrund von Überschwemmungen verloren gehen.

---

<sup>15</sup> In Niedersachsen werden 12% der Fläche und 17 % der Menschen als betroffen eingestuft. In Schleswig-Holstein sind es zum Vergleich 32% der Fläche und 24 % der Menschen (nach [3]).

Feuchtgebiete:

Gebiete welche bei einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter und innerhalb von 1000 Jahren eine elementare Funktionsänderung erfahren oder aufgrund von Überschwemmungen verloren gehen.

Schutz und Anpassungskosten:

Kosten welche entstehen um auch bei sich verändernden Umweltbedingungen den heutigen Sicherheitsschutz zu gewähren.

Die Gefährdungsbestimmung mit der „Common Methology“ wurde für Studien für Polen, Estland, Ägypten, Gambia und für die Philippinen durchgeführt und im „Second Assessment Report“ vom IPCC von 1996 wurden bereits die Ergebnisse von 23 Fallstudien zusammengefasst. Einen Einblick in die Methodik kann Abbildung 3 geben.

Für die so genannten entwickelten Länder besteht meist ein hohes Verlustpotential an Sachwerten, wohingegen in den sich entwickelnden Ländern, gerade in Ostafrika oder in Inselstaaten ein hohes Gefährdungspotential für das Leben der Menschen besteht. Zum Großteil existieren in Ländern wie Tonga von Seiten der Politik wie auch von der Bevölkerung kaum Möglichkeiten präventiv oder adaptativ wirksam zu werden. Dementsprechend können Seuchen, Krankheiten und Todesfälle und der Verlust der materiellen Lebensgrundlage als Folge von Überschwemmungen kaum verhindert werden. Es fehlt an freiem zugänglichem Wissen, an Infrastruktur, an Fachpersonal und letzten Endes an Geld und dem Zugang zu den nötigen materiellen Ressourcen.

### **3.1 Zukünftige Gefährdungspotentiale für den Menschen**

Wie im Abschnitt 3 „Gefährdungsbestimmung“ bereits erwähnt, sind die Inseln im Pazifik besonders gefährdet. Zum einen liegt dies daran, dass die Inselgruppen meist aus sehr kleinen Inseln bestehen und zum anderen gehören sie zu den am weitesten vom Festland entferntesten Orten dieser Welt.

Vom IPCC wird für dieses Jahrhundert davon ausgegangen, dass es zu einer Verdopplung bis Verdreifachung der betroffenen Menschen kommen wird (Abbildung 1 im Anhang).

Weiter wird festgestellt, dass Armut direkt mit der Gefährdung durch Küstenunwetter korreliert (nach [4]). Möchte man die Zahl der gefährdeten Menschen minimieren, so bestehen zwei Optionen. Zum einen kann man die Zahl der betroffenen Bevölkerung minimieren oder aber versuchen, die Wahrscheinlichkeit für eine Überflutung zu reduzieren.

Welche Möglichkeiten es dazu gibt wird im Abschnitt 4 „Anpassungsmöglichkeiten“ erörtert. Über die Feststellung, dass der Schutz von Inseln und Festlandsregionen, welche nicht wesentlich oberhalb des aktuellen Meeresspiegelniveaus gelegen sind, ein sehr, sehr kostspieliges Unterfangen wird, besteht kaum Zweifel. Andererseits muss man sich bei den Auswirkungen die Sturmfluten und Tsunamies in der jüngster Vergangenheit besaßen, wirklich fragen, ob man die Kosten für lebenssichernde Maßnahmen wirklich mit dem Wert von Menschenleben, den man erst quantifizieren müsste, vergleichen kann.

In Bangladesch starben 1970 circa 225000 Menschen, 1991 starben dort wiederum 138000 Menschen. Durch den Tsunami vom 26 Dezember 2004 im indischen Ozean starben etwa 180000 Menschen und im Jahre 2005 kam es in New Orleans zu einer Sturmflut, wobei 80 Prozent der Stadt überflutet wurden und ungefähr 1800 Menschen ihr Leben verloren.

Mit der zu erwartenden Zunahme von Extremwetterereignissen (sowohl was ihre Häufigkeit als auch was ihre Intensität anbelangt) muss sich jeder einzelne Staat, müssen sich aber auch Staatengemeinschaften darüber einig werden, wie sie darauf bestmöglich reagieren können.

## **4. Anpassungsmöglichkeiten**

Generell wird zwischen autonomer Anpassung und geplanter Anpassung unterschieden. Wobei die autonome Anpassung als Reaktion auf die Veränderung zu verstehen ist und von dem jeweiligen Ökosystem oder den Einwohnern eigenständig vollzogen wird. Darunter würde dann die Migration von Lebewesen in Gebiete mit geeigneten Lebensbedingungen, oder der informelle Bau von Mauern oder sonstiger Schutzanlagen in Küstennähe zu verstehen sein.

Unter geplanter Anpassung werden alle Anpassungsvorgänge zusammengefasst, die aus administrativen Entscheidungsprozessen hervorgehen.

Momentan wird versucht, die Bereitstellung und den Verbrauch fossiler Energieträger und damit die Emission von umweltrelevanten Gasen zu kontrollieren, oder großflächig aufzuforsten um mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu binden.

Ein Beispiel einer geplanten Anpassung speziell im Küstenraum wäre die Aussetzung einer Korallenart in Riffe, in denen derzeit ein überproportionales Korallensterben beobachtet wird. Die ausgesetzte Spezies kann dabei besser mit einer Temperaturerhöhung umgehen. Notwendig aber nicht hinreichend für das Gelingen solch eines Projektes wären wissenschaftliche Untersuchungen und ein offizieller administrativer Beschluss.

Schon an diesem Beispiel wird deutlich, dass die geplante Anpassung nur auf der Grundlage von aktuellen und glaubwürdigen Forschungsergebnissen oder Prognosen bezüglich der sich verändernden küstendynamischen Prozesse oder bezüglich der klimatischen Bedingungen basieren sollte<sup>16</sup>.

Anstelle von kostenintensiven Anpassungsmaßnahmen, welche viel Zeit, Arbeit, Material und Geld erfordern, wäre es in Zukunft sinnvoll, Vorgehensweisen zu entwickeln, die auf die jeweiligen Veränderungen der Umweltbedingungen ausgerichtet sind und eher präventiven Charakter besitzen.

Zwar legen globale Strategien momentan mehr Gewicht auf die Anpassungs– als auf die Präventionsstrategie, da oft die Meinung vertreten wird, dass es für Präventionen mittlerweile ohnehin zu spät ist (nach [2]). Dennoch ist es für die Sicherheit von Menschenleben und für die Existenzgrundlage vieler Ökosysteme von Vorteil, sich nicht nur nach dem „Ist-Zustand“ zu orientieren sondern der Anpassung einen präventiven, vorrausschauenden Charakter zu geben. So könnte man beispielsweise schon jetzt über die Anpassung der Fischwirtschaft an die potentiell negativen Auswirkungen des Temperaturanstiegs auf die Populationsdynamik der Fische nachdenken. Langfristig erscheint es von Vorteil, die Nachfrage nach Fischprodukten zu senken und andere Proteinquellen und synthetische Öle als Ersatz für entsprechende Fischprodukte zu nutzen.

Weiter ist diesbezüglich auch über die Einrichtung und die Organisation von marinen Biosphärenreservaten zu überlegen, um somit Rückzugsmöglichkeiten für die marine Tier – und Pflanzenwelt zu eröffnen und zu verhindern, dass ihnen ihre Existenzgrundlage entzogen wird. Der Mensch ist in der Lage, natürliche Ökosysteme bei der Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen.

---

<sup>16</sup> Sofern kein Beobachtungszentrum für hydrologische, hydrochemische und hydrobiologische Prozesse besteht ist es notwendig eine geeignete Planungsgrundlage zu schaffen und bei der Entwicklung solch eines Zentrums mitzuwirken. Dies ist ein Grundstein für die Gewährleistung der Sicherung von Menschenleben unter Einbezug von Naturschutzbelangen.

## **4.1 Statische Anpassung**

Als statische Anpassung ist die Bewahrung des derzeitigen „Ist-Zustandes“ zu verstehen. Dazu muss man sich hauptsächlich einer Intensivierung des Küstenschutzes bedienen, falls er als administratives Mittel zu Verfügung steht. Dies würde dann die Wahrscheinlichkeit für eine Überflutung reduzieren.

Die Anlagen werden meist so dimensioniert, dass sie bisherigen Extremereignissen standgehalten hätten. In Deutschland orientiert man sich beispielsweise am Bemessungshochwasserstand, welcher die Summe des Scheitelwertes des größten gemessenen Hochwasserereignisses und des säkularen Meeresspiegelanstiegs bildet.

Bei aller planerischer Sorgfalt und Raffinesse sollten folgende Fragen erlaubt sein.

Ist eine statische Anpassung an die Dynamik im Küstenraum angepasst?

Sind Küstenschutzmaßnahmen beliebig intensivierbar? <sup>17</sup>

## **4.2 Dynamische Anpassung**

Unter dynamischer Anpassung versteht man die Inanspruchnahme des Landes mit einer sich verändernden angepassten Nutzung. Administrativ könnte man diese Anpassung folgendermaßen unterstützen: Falls Nutzungspläne für die entsprechenden Küstenregionen (in welcher Form auch immer) existieren sollten, wären diese insoweit anzupassen als das neue Überflutungsflächen ausgewiesen werden oder eine aktivere Rückzugsplanung (Siedlungsverlegung) stattfindet.

Es könnten Anreize geschaffen werden, so dass es attraktiver wird, sein Grund und Boden als potentielle Überflutungsgebiete ausweisen zu lassen und nicht auf einer anderweitigen Nutzung zu beharren. Mit dem Bau, Umbau oder Ausbau von bestehenden Entwässerungs- und Schutzanlagen im Sinne der Nutzungseinschränkung- oder aufgabe von Gebieten im direkten Küstenhinterland wäre die Chance für die Ausbildung natürlicher Migrationskorridore wie sie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben wurde, gegeben. Diese sollte dann weiter durch unterstützende Maßnahmen, welche auf die jeweiligen Tier und Pflanzenarten abgestimmt sind, begleitet werden. Die kontrollierte Steuerung der Siedlungsdynamik sollte Gegenstand von zukünftigen Untersuchungen sein.

---

<sup>17</sup> Dabei wird hier Bezug auf Ufermauern, Uferwände, Wellenbrecher, Buhnen, Deiche und Strandaufspülungen genommen.

Dabei kann man sich erst einmal mit der Bestimmung von Küstenbereichen beschäftigen, deren Sicherung überproportional aufwendig erscheint<sup>18</sup>.

Ebenfalls ist es Aufgabe der Administration sich über die Verteilung der Kosten die durch die Küstenschutzmaßnahmen entstehen, Gedanken zu machen. Sinnvoll könnte hierbei eine Aufteilung der Kosten zwischen Staat und Bevölkerung sein, wobei mit Bevölkerung alle Menschen und nicht nur die betroffene oder gefährdete Bevölkerung gemeint sind. Zudem wäre über eine staatliche Katastrophenhilfe nachzudenken.

Die Anpassungsprozesse könnten dabei nach folgendem Schema ablaufen (nach [5]):

1. Informationssammlung und Bewusstseinssteigerung
2. Planung und Design
3. Umsetzung
4. Evaluation und Beobachtung

Wenn es Ziel der Anpassung ist, eine Reduktion der gefährdeten Menschen, wie sie durch die CM definiert ist, zu erreichen, kann man dies einerseits durch eine Verminderung der betroffenen Bevölkerung tun (Siedlungsverlagerung ins Hinterland) oder eben eine Verminderung der Überflutungswahrscheinlichkeit durch eine Verbesserung und Intensivierung von Sicherungsmaßnahmen (Küstenschutzmaßnahmen) anstreben.

Dabei ist langfristig zu beachten, dass Bauwerke räumliche Grenzen besitzen und eine Intensivierung der Sicherungsmaßnahmen (Strandaufspülungen, Küstenschutzbauwerke) nicht beliebig durchführbar ist.

Das Thema Anpassungsstrategien bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels wurde in der Hausarbeit von Marcel Junker mit dem Titel „Adaptation an Klimawandel“ thematisiert. Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen.

---

<sup>18</sup> Eine Verminderung der Anwohner im direkten Küstenhinterland würde die Anzahl der betroffenen Bevölkerung reduzieren.

## **5. Kritik**

Alle momentan existierende Untersuchungen beschränken sich fast ausschließlich auf den Meeresspiegelanstieg und dessen Folgen.<sup>19</sup> Weiter ist und bleibt es fraglich, in wie weit es bei der Kosten- und Nutzenrechnung der Schutz- und Anpassungskosten möglich ist, den ökonomischen Wert eines Mangrovenwaldes, einer Seegrabwiese oder eines Korallenriffes zu quantifizieren und diesen mit den Ausgaben für Küstenschutzanlagen zu vergleichen oder den Wert der Naturräume und den Wert des von Menschen genutzten und bewirtschafteten Raumes gegenüberzustellen.

Eine Schätzung, die für den Wert der Nahrungsproduktion eines Hektars Mangrovenwald vorgenommen wurde, liegt bei 800-16000 US-Dollar (vergleiche [5]). Allein für diesen einen Bewertungsparameter schwankt der zugebilligte Wert recht deutlich. Im Zusammenspiel mit anderen Leistungen die ein Mangrovenwald indirekt für den Menschen erbringt (Luftfilterung, Sauerstoffproduktion, Produktion von Biomasse, Habitat für Tiere und Aufzuchtgebiet vieler Fischarten) die ebenso quantifiziert werden müssten, wird deutlich, dass man hier keine konkrete Vergleichsgrundlage finden kann und die Quantifizierung zu einem gewissen Grad subjektiven Charakter trägt.

## **6. Fazit**

Es besteht wenig Zweifel über die Tatsache, dass der Klimawandel real existiert. Selten ist man sich in der Wissenschaft über ein Themengebiet so einig gewesen wie über die Existenz des derzeitigen Klimawandels. Es gibt kaum wissenschaftliche Studien, welche positive Auswirkungen des Wandels zur Disposition stellen. Insbesondere gilt dies für Küstengebiete.

Wir befinden uns momentan nicht in einem klimatischen Gleichgewichtszustand<sup>20</sup>. Der Bedrohlichkeitscharakter des Wandels nimmt in den letzten Jahren zu und drängt sich in den Vordergrund der Debatte über die möglichen Auswirkungen.

---

<sup>19</sup> Welche Zweifel über die Vergleichbarkeit der Daten welche diesen Studien zu Grunde liegen bestehen, kann in der Ausarbeitung von Nils Kehrrein zum Thema „Klimatrendmodellierung“, welche ebenfalls im Rahmen dieses Seminars erstellt wurde, nachgelesen werden.

<sup>20</sup> sofern man im Kontext des Klimas je von solch einem Zustand reden kann

Bei jeglicher Prognose, bei jedem Szenario darf und sollte man jedoch nicht vergessen, über die getroffenen Annahmen und dessen Sinngehalt nachzudenken und sich zu erinnern, dass diese mit enormen Unsicherheiten behaftet sind und dass über regionale Auswirkungen des Klimawandels bisher kaum Aussagen getroffen wurden. Die Vorhersagen besitzen eher Tendenzcharakter und dienen bestenfalls als Orientierung. Gerade für die Modellierung von regionalen Auswirkungen wäre es wichtig, weiter an dem Aufbau von Beobachtungs- und Messstationen für Wetterereignisse zu arbeiten (vergleiche Abbildung 4), da für weite Teile der Welt, gerade in den sich „entwickelnden“ Ländern keine Datengrundlage existiert. Die vom Klimawandel stimulierten Prozesse beeinflussen sich in gegenseitiger Wechselwirkung (Synergie). Die Dauer unseres menschlichen Lebens reicht kaum aus, um klimarelevante Konsequenzen bewusst zu erkennen. Sie vollziehen sich eher stetig und über Zeiträume, die über unser momentanes Zeitempfinden hinausgehen. Dennoch können wir über die Aufnahme und den Vergleich von Daten eine Grundlage für Untersuchungen von Klimaveränderungen schaffen. Eine darauf basierende Anpassung, hat immer flexibel und im Sinne der Systemlogik zu erfolgen. Dies hat uns die Natur im Laufe der Evolution eindrucksvoll bewiesen.

Um einen sinnvollen Umgang mit den Klimaveränderungen gewährleisten zu können bedarf es definitiv einer politischen und institutionalen Stabilität innerhalb eines Staates sowie auch grenz- und regionsübergreifend.

Die Gefährdung durch den Klimawandel wird ebenfalls durch Faktoren wie Krieg, Verschmutzung und Verseuchung beeinflusst. Hier besteht gerade in afrikanischen Ländern wie im Sudan, in Liberia, in Somalia oder in Sierra Leone noch viel Handlungsbedarf.

Der Klimawandel ist ein globales Phänomen, welches weltweit verschiedene Anpassungsstrategien erfordert. Migrationsbewegungen die potentiell daraus erwachsen, besitzen ebenfalls überregionalen Charakter.

„Was alle angeht, können nur alle lösen“([9], Seite 92)

## **7. Anhang**

### **7.1 Worterklärungen**

#### Abrasion:

- abtragende Wirkung der Brandung des Meeres oder größerer Seen

#### Ästuar:

- gezeitenmündungen großer Flüsse beziehungsweise Meeresarme, die bis zur oberen Grenze der

Gezeitenauswirkung in Flusstäler hineinreichen

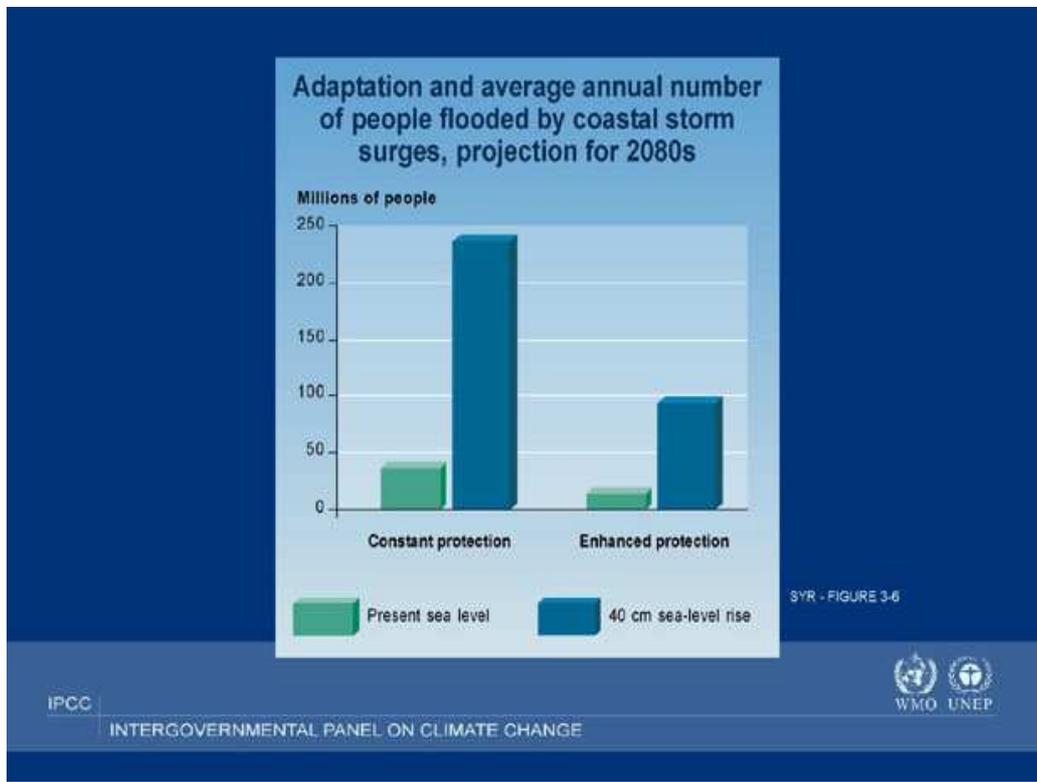
#### Mangrovenwälder:

- tropische Gezeitenwälder welche sich oftmals entlang von Flussmündungen (Ästuaren) entwickelt haben.

#### Permafrost:

- natürliches Substrat welches sich längerfristig im gefrorenem Zustand befindet, die äußeren Bedingungen sind durch ausreichend Feuchtigkeit und kontinuierliche Frosttemperaturen gekennzeichnet

## 7.2 Abbildungen



**Abbildung 1** (<http://www.ipcc.ch/present/graphics/2001syr/large/08.20.jpg>):

Risikogruppen leben in Afrika (südlich der Sahara), in Süd-, Ost- und Südostasien, in den Tropen Lateinamerikas und auf einigen Inseln im Pazifik (nach [5])

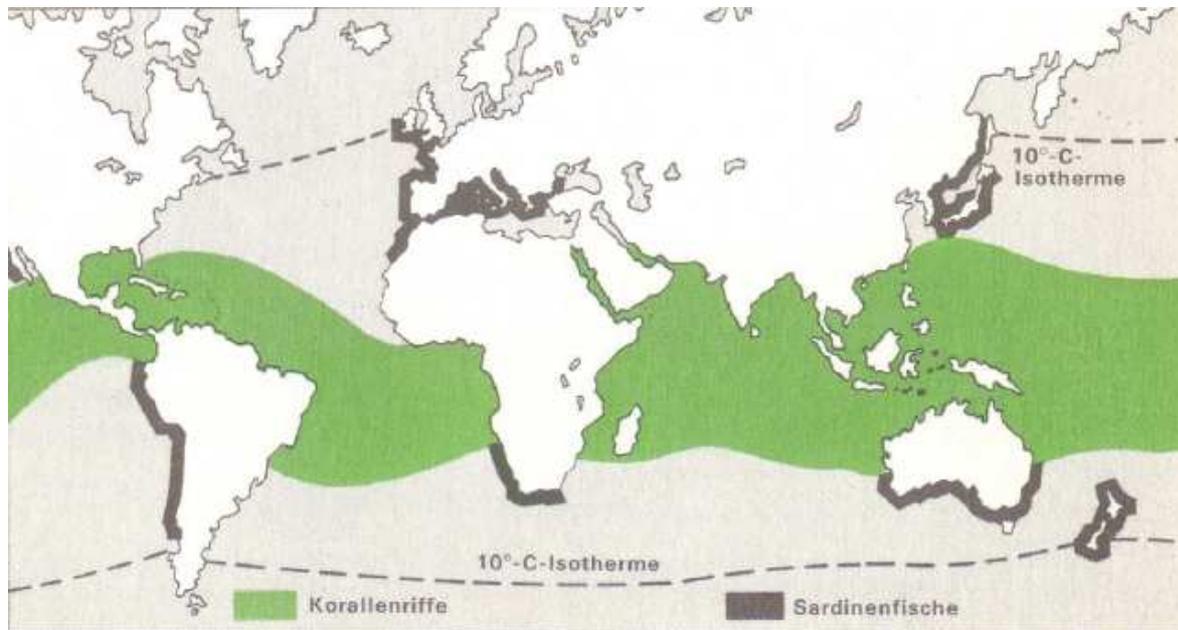
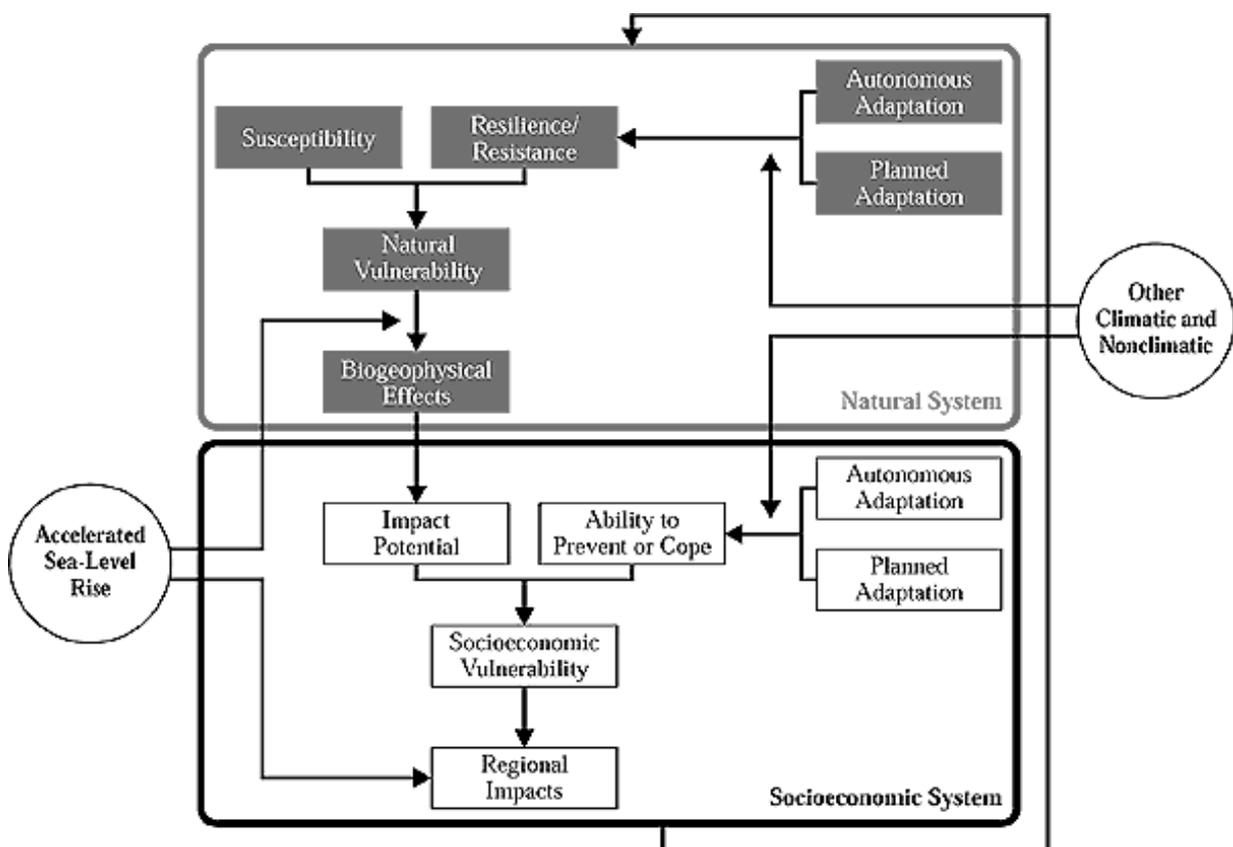
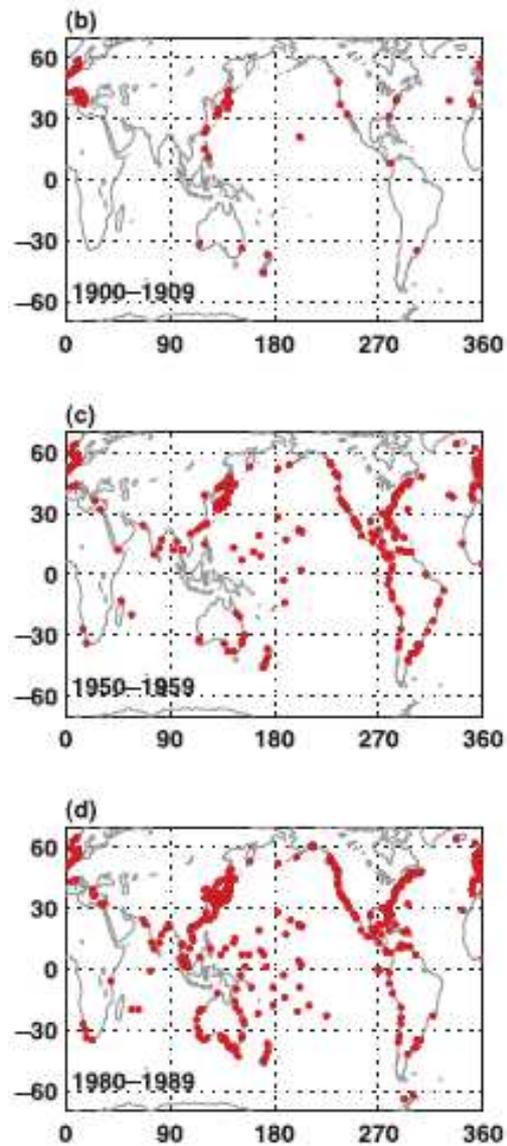


Abbildung 2: Verbreitungsgebiet von Korallenriffen auf unsere Erde (aus [10])



**Abbildung 3:** Konzeptionelle Gefährdungsbestimmung für Küstenzonen (aus [5])



**Abbildung 4:** Anzahl und Verteilung der Messstationen deren Daten für Studien bezüglich des Klimawandels genutzt wurden (aus [12])

### **7.3 Tabellen**

Schätzungen [cm]	niedrige	hohe	beste
Thermische Ausdehnung	2.4	5.6	4
Gletscher	1.6	3.2	2.4
Grönland (20. Jh.)	0.0	0.8	0.4
Antarktis (20. Jh.)	-1.6	0	-0.8
Eisschilde (seit letzter Eiszeit)	0.0	4	2
Grundwasser	-8.8	3.2	-2.8
Sedimente	0.0	0.4	0.2
Permafrost	0.0	0.4	0.2
Gesamt	-6.4	17.6	5.6
Beobachtungsdaten	8	16	12

**Tabelle 1:** Abschätzungen der Einzelbeiträge zum Meeresspiegelanstieg zwischen 1910 - 1990  
(nach [5])

Stoff (fest) zwischen 0°C und 100°C	c in kJ/(Kg*K)
Beton	0,9
Blei	0,13
Glas	0,86
Holz	2,39
Kupfer	0,39
Stahl	0,47
Stoff (flüssig) bei 20°C	
Ethanol	2,43
Methanol	2,40
Quecksilber	0,14
Wasser	4,19

**Tabelle 2:** Spezifische Wärmekapazität „c“ von festen Stoffen und Flüssigkeiten (aus Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II/ Paetec, Gesellschaft für Bildung und Technik, 1996, Seite 14)

Funktion	Element
Natürliche Regulierungsfunktion	Inseln/Halligen Wattflächen Dünen Riff
Hochwasserschutz	Deich Sperrwerk
Erosionsschutz	Längs- und Querwerke Strandaufspülungen Lahnungen
Binnenentwässerung	Siel Schöpfwerk

**Tabelle 3:** Einteilung der Elemente des Küstenschutzes entsprechend ihrer Funktion.

---

Ursache	1961-2003	1993-2003
Thermische Ausdehnung	0,3-0,54	1,1-2,1
Gletscher und Eiskappen	0,32-0,68	0,55-0,99
Grönländische Eisschild	-0,07-0,17	0,16-0,28
Antarktische Eisschild	-0,27 -0,55	-0,14 – 0,56
Summe	0,6-1,6	2,2-3,6
Beobachtet	1,1-2,1	2,4-3,8
Differenz	0 -1,4	-0,7-1,3

**Tabelle 4:** Meeresspiegelanstieg in mm pro Jahr (nach [12])

## **8. Literaturverzeichnis**

[1] R.J.T. Klein, R.J. Nicholls 1999, Assesment of coastel vulnerability to climate change, in Ambio 28: 182-187

[2] A. Daschkeit, H. Steer, Klimawandel und Küstenschutz: Hat Sylt eine Zukunft?, S267-293 im Band Küste, Ökologie, Mensch – Edition U`Humanökologie : Band 2

[3] T. Kohn, 2007, Auswirkungen des Klimawandels auf die schleswig-holsteinische Küsten, [http://www.sterr.geographie.uni-kiel.de/downloads/EXAMENSARBEIT\\_TOBIAS\\_KOHN.PDF](http://www.sterr.geographie.uni-kiel.de/downloads/EXAMENSARBEIT_TOBIAS_KOHN.PDF)

[4] U N. UNITAR. U N. UNEP. WMO. WHO. UN., R. Acosto, M. Allen, A.Churian, S. Granich, I. Mintzer, A. Suarez, D.v.Hippel, 1999, Informationsblätter zum. Klimawandel, [http://unfccc.int/resource/docs/publications/infokit\\_1999\\_ge.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/publications/infokit_1999_ge.pdf)

[5] IPCC, Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Working group II, 2001, Impacts, Adaptation and Vulnerability, [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg2/283.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/283.htm)

[6] F.Dürrenmatt, 1992, Die Physiker, Diogenes Verlag

[7] E.Umbach, 2004, Materialien zur Lehrveranstaltung „Umweltsysteme“

[8]A. Goudie, 2002, Physische Geographie – Eine Einführung, Spektrum Akademischer Verlag

[9] WWF Deutschland, N. v. Liebermann, A. v. Liebermann, 2003, Leitlinien für einen naturverträglichen Küstenschutz,

[http://www.tu-harburg.de/wb/mitarbeiter/lieberman/veroeffentlichungen/59\\_wwf\\_2003.pdf](http://www.tu-harburg.de/wb/mitarbeiter/lieberman/veroeffentlichungen/59_wwf_2003.pdf)

[10] G.Osche, 1972, Evolution. Grundlagen – Erkenntnisse – Entwicklungen der Abstammungslehre

[11] Auswärtiges Amt, 2007, Länder- und Reiseinformationen,

<http://www.auswaertiges-amt.de/diplo/de/LaenderReiseinformationen.jsp> ( sowie länderspezifische Unterseiten)

[12] Bindoff, N.L. J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quere, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Tally and A. Unnikrishnan, 2007, Observations; Oceanic Climate Change and Sea Level. In Climate Change 2007; The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



# Klimarekonstruktion

Matthias Kalkuhl

3. Juli 2007

Hauptseminar Systemwissenschaft "Der Klimawandel"

Prof. Dr. Michael Matthies

Angewandte Systemwissenschaft

Universität Osnabrück

## 1 Einleitung

In den aktuellen politischen Debatten haben die stattfindenden und noch bevorstehenden Auswirkungen des Klimawandels und deren Vermeidung wieder hohe Priorität gewonnen. Zunehmend werden auch ökonomische Aspekte (sowohl die finanziellen Schäden des Klimawandels als auch die Vermeidungskosten) diskutiert – dennoch sind noch längst nicht alle Mechanismen des Klimas erforscht und verstanden.

Da man am System Klima keine Versuche durchführen kann, um damit Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu isolieren und zu quantifizieren, bleibt nur der Blick in die Vergangenheit, der bei den jeweiligen Faktoren und Klimabedingungen Aufschluss über die Determinanten des Klimas geben kann. Dafür muss neben der Rekonstruktion der Temperatur auch die Konzentration der Treibhausgase in Ozean und Atmosphäre, die Albedo, vulkanische Aktivität, Vegetationsbedeckung, Verwitterung und die Strahlungsbilanz untersucht werden, um Zusammenhänge zwischen diesen Systemgrößen besser verstehen zu können. Aus diesem Verständnis ist erst die Entwicklung von Klimamodellen – die auch das Klima der Vergangenheit richtig berechnen sollten – möglich, mit denen dann Prognosen über die globale Erwärmung und deren Auswirkungen gemacht werden können. In diesem Punkt erfüllt die Klimageschichte den gleichen Zweck wie die Geschichtswissenschaft allgemein: aus der Geschichte für die Zukunft zu lernen.

Allerdings besitzt die Frage nach dem Klima auf unserer Erde neben der umweltpolitischen Brisanz noch eine ganz andere Dimension: die der Entstehung und Entwicklung des Lebens auf der Erde. Das Klima bestimmt die Rahmenbedingungen für die Existenz des Lebens; Lebewesen wiederum greifen etwa durch die Modifizierung des Kohlenstoffkreislaufes aktiv in das Klimageschehen ein. Die Frage nach dem Klima ist daher eng verbunden mit der Frage nach dem Leben, nach Artenvielfalt und Artensterben – und der Entstehung des Menschen. Dass der Mensch ausgerechnet vor 10.000 Jahren mit dem Ackerbau begann (und nicht früher oder später) hat auch etwas mit dem stabilen Klima des Holozäns zu tun.

4,5 Mrd. Jahre Erdgeschichte bedeuten auch 4,5 Mrd. Jahre Klimageschichte, die es zu entdecken, verstehen und erklären gilt. In dieser Arbeit werden neben grundlegenden Klimafaktoren (Abschnitt 2) die wichtigsten Methoden der Paläoklimatologie (Abschnitt 3) vorgestellt. Zuletzt gilt es, die Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Detektivarbeit vorzustellen und auf wesentliche Zusammenhänge zwischen Temperatur – Kohlendioxid – Leben – Mensch einzugehen (Abschnitt 4).

## 2 Klimafaktoren

Als Klima werden die charakteristischen Wetterverhältnisse an einem Ort bezeichnet, wie sie über einen längeren Zeitraum (einige Jahre oder Jahrzehnte) inklusive (regelmäßig) auftretender Extremereignisse herrschen (Ludwig 2006, S.10). Diese umfassen in erster Linie Temperatur, Wind, Niederschlagsmenge, Luftfeuchtigkeit und Wolkendecke, wobei die Temperatur bzw. ihre

räumliche und zeitliche Verteilung alle anderen Faktoren maßgeblich bestimmt. Daher soll zunächst auf Energiebilanz der Erde eingegangen werden, aus der die Temperatur als Maß für die thermische Energie resultiert.

## 2.1 Die globale Energiebilanz

Die mittlere (globale) Temperatur des Planeten Erde ergibt sich aus der Energiezufuhr durch die Sonne abzüglich des Energieverlustes durch Wärmestrahlung und Abgabe an das Weltall. Temperatur- und Klimaänderungen treten dann auf, wenn sich dieses Gleichgewicht zwischen Input und Output verschiebt und sich zugeführte oder abgegebene Energiemenge kurzfristige ändern. Dann findet eine Erwärmung bzw. Abkühlung statt, bis der neue *Steady State* wieder erreicht ist (Rahmstorf 2006, S. 12f).

Zunächst wird auf die Faktoren eingegangen, die die Energiezufuhr auf den Planeten Erde beeinflussen: Die Solarkonstante, die Milankovitchzyklen und die Sonnenflecken – allesamt rein astronomische Ursachen, die unabhängig von den Verhältnissen auf der Erde wirken. Für die Wärmestrahlung in das Weltall sind dagegen Parameter entscheidend, die durch die Prozesse auf der Erde bestimmt sind: Die Albedo und der Treibhauseffekt.

**Die Solarkonstante** beschreibt die Strahlungsenergie der Sonne, die auf die obere Atmosphärenschicht der Erde trifft. Die Leuchtkraft der Sonne betrug in der Entstehungsphase der Erde nur etwa 70 % des heutigen Wertes und ist seitdem ständig gestiegen (Rahmstorf, 2006, S. 14).

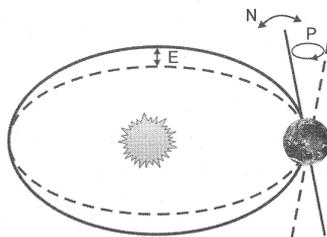


Abbildung 1: Schwankungen der Exzentrizität (E), der Schiefe (N) und der Präzession (P) (aus Huch 2001)

**Die Milankovitchzyklen** bezeichnen periodische Schwankungen in der Erdumlaufbahn, die auf drei unabhängigen Effekten basieren (Huch 2001, S. 17f.):

1. Die Exzentrizität (E) bewirkt eine Änderung des Kegelschnittes (also der Ellipsenform) der Umlaufbahn und besitzt eine Periode von 100.000 Jahren. Alle 400.000 Jahre wird die Erdumlaufbahn dabei nahezu kreisrund.
2. Die Schiefe (N) – der Neigungswinkel der Erdachse – schwankt mit einem Zyklus von 41.000 Jahren.
3. Die Präzession (P) (Lageveränderung der Erdachse) tritt in Perioden von 19.000 und 23.000 Jahren auf.

Mit den Milankovitchzyklen kann man ziemlich gut die letzten Eiszeitzyklen erklären, da die Strahlungsminima der Schwankungen (bis zu 5 %) dieser drei überlagerten Effekte mit den Eiszeitzyklen korrelieren. Allerdings ändert sich die gemittelte Strahlungsbilanz durch die

Milankovitchzyklen kaum – lediglich die zeitliche Verteilung wird stark beeinflusst, was durch Rückkopplungsprozesse zu größeren Klimaschwankungen führt (Rahmstorf 2006, S. 22f).

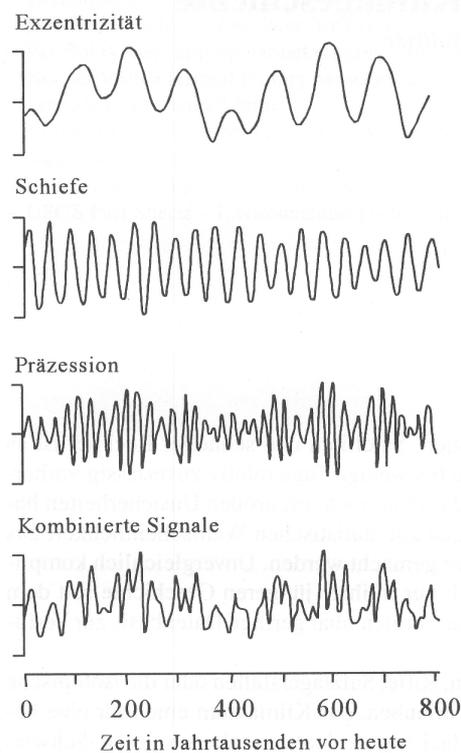


Abbildung 2: Überlagerung der Einzelprozesse der Milankovitchzyklen (aus Huch 2001)

**Der Sonnenfleckenzyklus** umfasst etwa 11 Jahre (bzw. 22 Jahre für den vollständigen Zyklus); Sonnenflecken wurden bereits um die Zeitenwende in China beobachtet und aufgezeichnet. Sie erhöhen die Strahlungskraft und damit die solare Energiezufuhr der Erde; die Schwankungen

liegen bei etwa 0,1 % und sind damit relativ gering im Vergleich zu den Milankovitchzyklen. Dennoch fällt in die kleine Eiszeit (15. bis 19. Jhd.) das Maunderminimum zwischen 1645 und 1715, in dem nahezu keine Sonnenflecken beobachtet wurden (Glaser 2001, S. 163f).

**Die Albedo** (der von der Erde zurückgespiegelte Anteil der Sonnenstrahlung) beträgt heute 30 % und ist abhängig von Bewölkung, Eisbedeckung, Landnutzung (Vegetation) und der Verteilung der Kontinente (Rahmstorf, 2006, S. 13; siehe auch Abb. 3). Viele dieser Faktoren sind wiederum abhängig von den Klimaverhältnissen auf der Erde, sodass hier zahlreiche Rückkopplungen auftreten. Ein starker positiver Rückkopplungseffekt tritt etwa bei der Vereisung der Erde auf, die eine erhöhte Albedo und damit einen weiteren Temperaturabfall bewirkt (Rahmstorf 2006, S. 14).

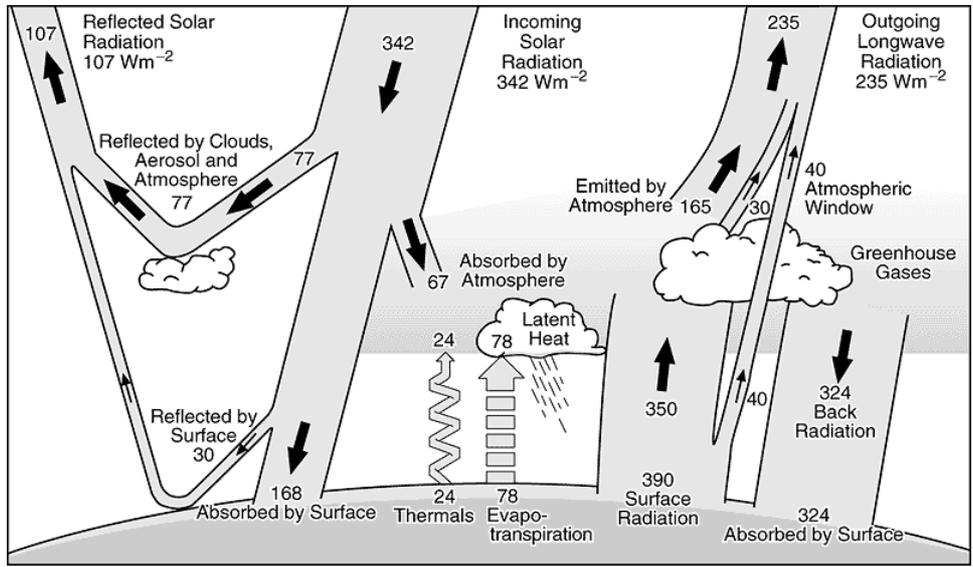


Abbildung 3: Der Treibhauseffekt (aus IPCC 2001)

**Der Treibhauseffekt** sorgt für eine globale mittlere Oberflächentemperatur von derzeit 15 °C, durch die ein Leben ermöglichendes Umfeld geschaffen wird. (Rahmstorf 2006, S. 31).<sup>4</sup> Treibhausgase reflektieren einen Teil der von der Erdoberfläche abgegebenen Wärmestrahlung zurück zur Erde und bewirken damit eine Speicherung der Wärme (Abb. 3). Die wichtigsten Treibhausgase sind Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan, deren Konzentrationen im Laufe der Erdgeschichte starken Schwankungen unterworfen waren (siehe Abschnitt 4).

Große Mengen an den Treibhausgasen Kohlendioxid und Methan werden v.a. bei Vulkanausbrüchen und hoher tektonischer Aktivität in der Erdkruste freigesetzt (Rahmstorf 2006, S. 15). Ein gegenläufiger Regelkreis entzieht der Atmosphäre durch Verwitterung von Gestein, das chemisch mit Kohlendioxid reagiert, und durch Sedimentation wieder in den Meeresboden bzw. die Erdkruste eingelagert wird. Da die Verwitterungsprozesse temperaturabhängig sind, bewirken hohe Temperaturen einen schnelleren Kohlendioxidentzug und damit eine Verringerung des Treibhauseffektes (negative Rückkopplung). Seit der Entstehung des Lebens

---

<sup>4</sup> Ohne den Treibhauseffekt betrüge diese Temperatur lediglich -18 °C.

(genauer: der photosynthetisch aktiven Cyanobakterien) wird durch Algen und Pflanzen ebenfalls Kohlendioxid der Atmosphäre entzogen und in die Biomasse lebender Pflanzen und Tiere eingebaut, wo es dann durch Atmung oder Verwesung toter Lebewesen wieder freigesetzt wird. Dennoch bleibt in diesem Kreislauf der gebundene Teil des Kohlendioxides klimaunwirksam; nicht zersetzte (also fossile) Pflanzenreste bilden sogar eine dauerhafte - Senke und werden in der Erdkruste (z.B. durch Sedimentation, Kohle- und Erdöllager) eingeschlossen.

An dieser Stelle seien noch die singulären Ereignisse der Meteoriteneinschläge erwähnt, welche durch Freisetzung von Methan und Kohlendioxid auf den Treibhauseffekt, durch Staubpartikel eher auf die Albedo einwirken und so zu starken, plötzlichen Klimaschwankungen führen können.

Seit dem Beginn der Industrialisierung greift der Mensch selbst durch Verbrennung fossiler Energieträger, intensive Landwirtschaft und Viehhaltung in die Konzentration der Treibhausgase, v.a. Kohlendioxid und Methan, ein. Der durch den Menschen verursachte, zusätzliche Treibhauseffekt wird als anthropogen bezeichnet (im Gegensatz dazu bezeichnet der „natürliche Treibhauseffekt“ den Teil des Treibhauseffektes, wie er vor der Industrialisierung war bzw. heute ohne den menschlichen Einfluss wäre). Dass der Mensch durch den anthropogenen Treibhauseffekt das Klima beeinflusst, ist nahezu unbestritten (IPCC 2007, S. 10); lediglich über die Frage nach dem genauen Einfluss der vom Menschen zusätzlich freigesetzten Treibhausgase auf das Klima gibt es kontroverse wissenschaftliche Untersuchungen, die nicht zuletzt mit den generellen Unsicherheiten des Einflusses der Treibhausgase auf das Klima zu tun haben (IPCC 2007, S. 31).

## 2.2 Regionale Klimafaktoren

Die oben genannten Faktoren bezogen sich auf den ganzen Globus. Dennoch besitzt die regionale und zeitliche Verteilung des Klimas einen wesentlichen Einfluss auf das globale Klima. Ozean- und Luftströmungen können Extremtemperaturen ausgleichen und damit die lokale Eisbedeckung verringern bzw. Vegetationswachstum fördern. Die Lage der Kontinente ist ebenfalls ein Faktor für Pflanzenwachstum und beeinflusst zudem die großen Strömungen. Ein glattes Oberflächenprofil der Erdkruste vergrößert die Wasseroberfläche und damit die Albedo. Auch sind Wolkendecke und Staubpartikel stark von lokalen Gegebenheiten abhängig. All diese eher regional aufgelösten Einflüsse wirken sich v.a. auf die Albedo und die Vegetation (und damit auf den Treibhauseffekt) aus.

## 3 Rekonstruktionsmethoden

Anhand der im vorigen Abschnitt skizzierten Wirkungsmechanismen ist es nun möglich, gewisse Grenzen für die Entwicklung des Klimas abzustecken. Während die Entwicklung der Energiezufuhr durch die Sonne seit der Entstehung der Erde weitgehend geklärt ist, wird bei der Frage nach Treibhauseffekt, Oberflächentemperatur und Albedo regelrechte Detektivarbeit nötig. Doch ist die Rekonstruktion des Klimas gerade deshalb so wichtig, um die Einflüsse der unterschiedlichsten Klimafaktoren im Hinblick auf eine exakte Klimamodellierung messen und beurteilen zu können. Da wir keine Experimente am Klima wegen der langen Wirkungszeiten und möglicherweise schwerwiegenden Konsequenzen durchführen können, bleibt uns nur, aus der Klimageschichte zu lernen, um die komplexen Wirkungsmechanismen aufzudecken.

Jede Rekonstruktion nutzt den Umstand aus, dass Klima und Temperatur Auswirkungen auf die Gestalt der Erde haben und diese Auswirkungen Spuren bis in unsere Zeit hinterlassen. Die Spuren von fließendem Wasser finden sich beispielsweise in geschliffenen Sandkörnern wieder, deren Form sich von windgeschliffenen Körnern unterscheidet. Eismassen und Gletscher hinterlassen wiederum ganz andere Schleif- und Geschiebespuren im Gestein. Die Aggregatzustände des Wassers ermöglichen eine grobe Rekonstruktion der Temperatur in die drei Intervalle der jeweiligen Phasen.

Einen weitaus sensibleren Temperaturzeiger stellt jedoch das Leben auf der Erde dar, dessen Entstehung, Aktivität und Ausprägung maßgeblich von der Temperatur bestimmt wird. Mit der Entstehung der Schalentiere in der Kambrischen Explosion vor etwa 550 Mio. Jahren beginnt auch eine neue „Temperaturaufzeichnung“, wie man sie aus Sedimenten der Kalkschalen rekonstruieren kann (Abschnitt 3.5). Auch das Vorkommen gewisser Tier- und Pflanzenarten erlaubt Rückschlüsse auf die Umweltbedingungen und damit auf das Klima (Abschnitt 3.3).

Die lokalen Indikatoren, die Rückschlüsse über Temperatur liefern, werden auch als *Proxies* bezeichnet. Für die Proxies muss darüberhinaus auch eine Altersdatierung möglich sein, da sonst keine Einordnung der Klimabedingungen in die Erdgeschichte möglich ist. In dem

Methodenkatalog zur Klimarekonstruktion dürfen daher auch Verfahren zur Altersbestimmung nicht fehlen.

### **3.1 Dendrochronologie**

Mit Baumringen lassen sich neben einer exakten Datierung (durch Abzählen der Ringe bzw. Einordnen in einen Jahrringkalender<sup>5</sup>) auch Rückschlüsse auf die Klimaverhältnisse ziehen. Mildes Klima äußert sich in dicken Ringbreiten (starkes Wachstum), kaltes, trockenes Klima in dünnen Ringen. Dabei müssen jedoch auch nichtklimatische Effekte berücksichtigt werden, die ebenfalls Einfluss auf das Wachstum haben (Bodenverhältnisse, Nährstoffversorgung etc.) und dann ggf. rausgerechnet werden müssen. Ein großer Stichprobenumfang vermindert den Einfluss lokaler klimatischer und nichtklimatischer Fluktuationen. Bäume in Höhenlagen

---

<sup>5</sup> Der Hohenheimer Jahrringkalender wurde aus zahlreichen fossilen wie archäologischen Holzfunden aus Mitteleuropa erstellt und ermöglicht durch Einordnung in die Ringmuster eine exakte Altersbestimmung für Holzfunde, Bauwerke und Instrumente aus dieser Region bis 10.500 v. Chr.

reagieren stärker auf Klimaverhältnisse, da die Temperatur oft als begrenzender Faktor wirkt, und sind daher besser zur Klimarekonstruktion geeignet. Zahlreiche Studien zur Temperaturermittlung der letzten Jahrhunderte verwendeten dendrochronologische Verfahren (IPCC 2001, Sec. 2.3.2.1).

### **3.2 Warvenchronologie**

In baumfreien Regionen (in ariden Gebieten oder auch jenseits der polaren Baumgrenze) dienen Seesedimente als hochauflösende Proxies. Jährliche organische wie inorganische Ablagerungen (sogen. Warven) sind nach IPCC (2001, Sec. 2.3.2.1) durch folgende klimatische Faktoren bestimmt:

- Sommertemperatur (Schneesmelze)
- Schneefall (im Winter)
- Niederschlag (im Sommer)

Alle drei Faktoren haben einen direkten Einfluss auf die Warvendicke und ermöglichen damit eine präzise Bestimmung der Temperatur- bzw. Niederschlagsverhältnisse.

### **3.3 Pollen- und Vegetationsanalyse; Fossilienfunde**

Zahlreiche Pollen zeugen in Seesedimenten von der Verbreitung bestimmter Vegetation in der jeweiligen Fundregion (Huch 2001, S. 117ff). Doch nicht nur die Verbreitung einer Baumart ermöglicht Rückschlüsse auf die Klimabedingungen, auch der Umfang an Pollen ist – ähnlich der Dicke von Baumringen – ein Indiz für die Wachstumsverhältnisse.

Korallen sind polystenotherme Organismen und reagieren empfindlich auf Temperaturschwankungen, die sich mit unterschiedlichem Korallenwachstum (Skelettdichte) und anderen geochemischen Verfahren (Isotopenmethoden, siehe Abschnitt 3.4) nachweisen lassen (IPCC 2001, Sec. 2.3.2.1). Skelettfunde von Warmblütern (z.B. Dinosaurien auf Spitzbergen (Rahmstorf 2001, S. 18)) zeugen ebenfalls wie zahlreiche andere Fossilienfunde von Klimabedingungen, die zu Lebzeiten dieser Tiere vorherrschend gewesen sein müssen.

Die Verbreitung von Pflanzen und Tieren ergibt somit ein weiteres wichtiges Indiz zur Rekonstruktion der Umweltfaktoren, die jedoch in ihrer zeitlichen Reichweite stark beschränkt ist.

### **3.4 Isotopenmethoden**

Als Isotopen bezeichnet man verschiedene Formen eines Atoms, bei dem die Anzahl der Neutronen variiert. Da jedoch Elektronen- und Protonenzahl konstant bleiben, besitzen alle Isotopen eines Atoms gleiche chemische Eigenschaften; lediglich die Masse unterscheidet sich, was sich in einigen physikalischen Prozesse niederschlägt. Die Isotopenverhältnisse sind abhängig von äußeren Einflüssen wie Strahlung und Temperatur. Instabile Isotope zerfallen mit einer bestimmten Rate, die über die Halbwertszeit (die Zeit, in der die Hälfte aller Isotope zerfallen ist) errechnet werden kann.

Die Isotopenmethoden nutzen entweder den radioaktiven Zerfall zur Altersbestimmung (z.B. in Gesteinen oder Biomasse) oder die konservierten Isotopenverhältnisse zur Rekonstruktion der vorherrschenden Umweltbedingungen.

### 3.4.1 Radiokarbonmethode

Zur Altersbestimmung organischer Reste von Lebewesen wird der Anteil der radioaktiven C-14-Isotope gemessen. Diese Isotope entstehen in der oberen Atmosphäre beim Zerfall von N-14-Isotopen durch die hochenergetische Sonnenstrahlung. Da die instabilen C-14-Isotope mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren zerfallen, in der Atmosphäre aber ständig neue Isotope gebildet werden, geht man von einem Gleichgewichtsverhältnis aus, das jedoch geringen Schwankungen unterliegt. Dieses Verhältnis findet sich auch in lebenden Organismen wieder, welche die Kohlenstoffisotope durch Photosynthese aus der Luft zu gleichen Anteilen eingebaut haben. Stirbt nun ein Organismus, findet kein Austausch mit der Atmosphäre und damit keine Aufrechterhaltung des C-14-Anteils statt. Der seit dem Tod zerfallene Anteil der C-14-Isotope kann in den organischen Überresten gemessen werden und wird zur Berechnung der vergangenen Zeitspanne als Endwert in die exponentielle Zerfallsgleichung eingesetzt (Ludwig 2006, S. 115).

Aufgrund des kleinen Anteils der C-14-Isotope (1 ppt C-12 Isotope) und des relativ schnellen Zerfalls ist eine Altersbestimmung nur bis etwa 60.000 Jahre in die Vergangenheit möglich.

### **3.4.2 Sauerstoffisotopenmethode**

Die Fraktionierung der Sauerstoffisotope O-16 und O-18 bei biologischen, physikalischen und chemischen Prozessen dient v.a. in Sediment- und Eisbohrkernen zur Temperaturrekonstruktion. Die schnellere Verdunstung der O-16-Isotope bewirkt eine temperaturabhängige Verschiebung des Isotopenverhältnisses im Schnee, der sich in den Eisbohrkernen abgelagert hat. Somit lässt sich aus dem Isotopenverhältnis die Niederschlagstemperatur ermitteln (Rahmstorf 2006, S. 11).

Ähnlich ist das Isotopenverhältnis bei der Kalkausfällung in Ozeanen stark temperaturabhängig, während es durch biologische Prozesse kaum beeinflusst wird. Die Isotopenzusammensetzung der im Sediment vorhandenen Kalkschalen (v.a. von Schalentieren) liefert damit Rückschlüsse auf die Ozeantemperatur in der oberen Wasserschicht (Huch 2001, S. 35).

### **3.4.3 Kohlenstoffisotopenmethode**

Während biologische Prozesse das Sauerstoffisotopenverhältnis kaum verändern, wird bei der Photosynthese vermehrt das C-12-Isotop dem schwereren C-13-Isotop für den Einbau in die Biomasse vorgezogen. Die Wasseroberfläche reichert sich dadurch relativ mit C-13-Isotopen an, was sich wiederum in den im Oberflächenwasser gebildeten Kalkschalen niederschlägt und im

Ozeansediment nachweisbar ist. Ein hoher C-13-Anteil ist auf eine hohe Bioproduktion bzw. Photosyntheseleistung zurückzuführen, die wiederum Rückschlüsse auf den Kohlendioxidanteil erlaubt (Huch 2001; S. 35).

### **3.5 Sedimentbohrkerne**

Bohrkerne aus Sedimenten in Ozeanböden dienen zur Rekonstruktion der Temperatur und des Kohlendioxidgehaltes seit etwa 550 Mio. Jahren (Entstehung der Kalkschalentierte im Ozean). Die Altersdatierung geschieht über die Tiefe der Bohrschicht, da von einer annähernd gleichbleibenden Sedimentationsrate ausgegangen wird<sup>6</sup>. In den Schichten werden v.a. mittels Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopenverfahren in Kalkschalen Ozeantemperatur und Biomasseaktivität ermittelt.

Sedimentbohrkerne liefern sehr lange Zeitreihen, die allerdings zeitlich keine gute Auflösung besitzen. Bodenorganismen durchwühlen die obere Bodenschicht und bringen dadurch die

---

<sup>6</sup> Tatsächlich besteht in der Bestimmung der Sedimentationsrate ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor zur Altersbestimmung der einzelnen Sedimentschichte (IPCC 2001).

zeitliche Schichtung mehrerer Jahrhunderte bis Jahrtausende durcheinander. Auch ist die Aussagekraft über das Klima sehr auf den Ort der Probe beschränkt; für globale Aussagen sind großräumige Messungen nötig (Rahmstorf 2006, S. 12).

### **3.6 Eisbohrkerne**

Eisbohrkerne werden großen Gletschern oder vergletscherten Landmassen (Grönland, Antarktis) entnommen, wobei diese Bohrungen am „Scheitel“ durchgeführt werden müssen, an dem kaum vertikale Driftbewegungen stattfinden<sup>7</sup>. Durch den Jahresgang der Niederschläge ist eine exakte Datierung durch Abzählen der Schichten möglich. In den Schichten geben Staubpartikel Hinweise auf Vulkanausbrüche oder andere Extremereignisse. Die in Bläschen eingeschlossene Luft kann ebenfalls analysiert werden, woraus sich die Konzentration einiger klimarelevanter Spurengase wie Methan oder Kohlendioxid in der Atmosphäre messen lässt. Zuletzt kann mit der Sauerstoffisotopenmethode wiederum die Temperatur beim Niederschlagsfall rekonstruiert

---

<sup>7</sup> Diese Entstehen durch den ständigen Neuschneefall, der zu einem Anwachsen des Gletschers führt, aber auch zu einem seitlichen Wegdrücken der unteren Eisschichten.

werden. Bohrkerne liefern damit relativ genaue, zeitlich hochaufgelöste und umfassende Informationen über das vergangene Klima (Rahmstorf 2006, S. 10f).

Die ältesten Bohrkerne finden sich in der Antarktis und beinhalten mit einer Tiefe über 3.000 m etwa 800.000 Jahre altes Eis, die Bohrungen auf Grönland reichen bis zu 120.000 Jahre zurück. Am bekanntesten ist der Vostok-Bohrkern in der Antarktis, der Informationen über den Temperatur- und Kohlendioxidverlauf der letzten 420.000 Jahre liefert. Auch hier gilt, dass ein einzelner Bohrkern allein natürlich nicht das ganze Klima auf der ganzen Erde erklärt, allerdings bedeutende Trends, sowie Kalt- und Warmzeiten mit globalem Ausmaß anzeigen kann.

### 3.7 Weitere Methoden

Es gibt eine Fülle weiterer Indizien und Proxies (Abb. 4). So deuten Evaporite und Salzvorkommen auf wechselfeuchtes, heißes Klima. Ebenso geschieht die Verwitterung bestimmter Tonminerale wie Smektine und Kaolinite nur unter feucht-warmen Bedingungen (Huch 2001, S. 10).

geochemische und biogeochemische Proxy-Daten	mineralogische Proxy-Daten	physikalische Proxy-Daten	biologische und sedimentologische Proxy-Daten
stabile Isotope von O und C TOC (Gehalt an organischem Kohlenstoff) biogenes Si S-, N-, Karbonat-Gehalte biogenes Ba organische Thermometer (Biomarker) Gaseinschlüsse in Eis Spuren- und Nebenelement-Konzentrationen	Anteile klimatypischer Minerale (z.B. Salze, Bauxit)	Paläomagnetismus, Gesteinsmagnetismus gesteinsphysikalische Daten	Makro- und Mikrofossilgehalt von Sedimenten Abfolgen und Verteilungen von Mikrofossilien (Foraminiferen, Diatomeen, Ostracoden) Pflanzen- bzw. Pollengesellschaften Zusammensetzung und Dicke von Warven in limnischen und evaporitischen Sedimenten Baumringdicken und -abfolgen

Abbildung 4: Proxy-Daten für die Paläoklimatologie (aus Huch 2001)

Während der etwa letzten 10.000 Jahre gibt es eine zusätzliche Quelle für die Klimaentwicklung: Den Menschen. Die historische Klimatologie berücksichtigt neben den oben genannten physikalischen, chemischen und biologischen Proxies auch anthropogene Quellen, wie Mythen, Malereien, Aufzeichnungen zur Kirschblüte, Getreidepreisen oder Hungersnöten bis hin zu gegenwärtigen (lokalen) Temperaturaufzeichnungen (Ludwig 2006, S. 118f).

Die Rekonstruktion der vergangenen Jahrhunderte und Jahrtausende ist von einer Fülle von Informationen geprägt, die räumlich und zeitlich sehr hoch aufgelöst gesammelt werden können, wodurch wiederum aufwändige statistische Verfahren zur Handhabung dieser Daten notwendig werden (sogenannte Multi-Proxy-Verfahren (IPCC 2001)). Allein die Klimageschichte Mitteleuropas der letzten 1.000 Jahre kann somit ein ganzes Buch füllen, wie das von Glaser (2001), in dem etwa auf Pegelstände, Erntestatistiken, Weinqualität uvm. eingegangen wird.

### 3.8 Bewertung

In diesem Abschnitt wurden einige wichtige Verfahren der Paläoklimatologie vorgestellt, deren Umfang hier bei weitem nicht vollständig dargelegt werden konnte. Aus zahlreichen

Plausibilitätsüberlegungen, Proxies, Indizien und Spuren entsteht dabei ein Bild, wie das Klima der vergangenen Jahrtausende ausgesehen haben muss. Die überzeugende und relativ sichere Rekonstruktion des Klimas beruht gerade auf dieser breiten Palette an Verfahren und den daraus gewonnenen Informationen – ein einzelner Proxy, ein einzelner Bohrkern allein besitzt dabei wenig Aussagekraft.

## **4 Klimageschichte**

Im folgenden Abschnitt geht es nun um die Ergebnisse der mit den oben genannten Methoden der Paläoklimatologie gewonnenen Rekonstruktionsarbeit.

### **4.1 Frühgeschichte (Präkambrium)**

Als vor etwa 4,5 Mrd. Jahren die Erde entstand, lag die Strahlungsleistung der Sonne (Solarkonstante) nur bei 70 % des heutigen Wertes, was eine Abkühlung der Erde um 20 °C im

Vergleich zu heute bewirkt haben müsste. Dennoch sind aus der frühen Phase der Erdgeschichte geologische Spuren von Wasser vorhanden<sup>8</sup> (Rahmstorf 2006, S. 14), die auf eine deutlich wärmere Erde als in der Gegenwart hindeuten. Das Paradoxon der schwachen Sonne (oder „faint young sun paradox“) (Rahmstorf 2006, S. 14) lässt sich nur über einen starken Treibhauseffekt durch Kohlendioxid oder Methan erklären. Während Huch (Abb. 5) einen hohen Kohlendioxidanteil annimmt, gehen andere Autoren von einer deutlich höheren Methankonzentration aus, die neben den anderen Treibhausgasen wie Wasserdampf und Kohlendioxid, hauptverantwortlich für die hohen Temperaturen war.

---

<sup>8</sup> Bei den damaligen Druckverhältnissen von etwa 5 bar beträgt das Temperaturintervall für flüssiges Wasser -5 °C bis 160 °C (Ludwig 2006, S. 17).

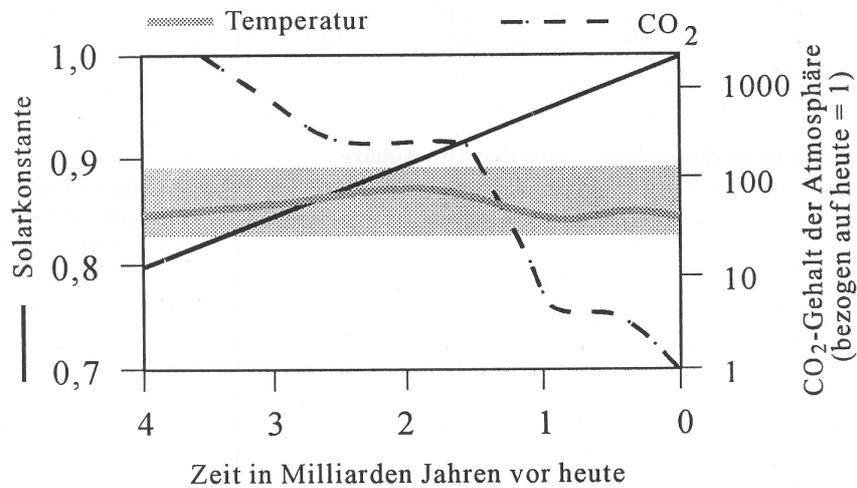


Abbildung 5: Präkambrium (aus Huch 2001)

Als vor etwa 3,8 Mrd. Jahren erste Lebewesen (Chemobakterien) entstanden, war Sauerstoff noch ein Zellgift, das die lebenswichtigen Aminosäuren zerstörte. Die ersten Bakterien wie z.B. die Archaeobakterien (3,2 Mrd. Jahre alt) gewannen ihre Energie durch Chemosynthese, womöglich in der Tiefsee (Schutz vor gefährlichen UV-Strahlen bei fehlender Ozonschicht) in der Nähe von heißen Schwefelquellen und ganz ohne Licht. Bis zur Entstehung der photosynthesebetreibenden Cyanobakterien sorgten v.a. Verwitterungsprozesse für ein Absinken des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes (siehe Abschnitt 2.1), indem kohlenstoffhaltige Verbindungen in die Ozeane und schließlich in die Sedimente eingetragen wurden. Die Cyanobakterien begannen vor 2,5 Mrd. Jahren mithilfe des Sonnenlichtes mit der Umwandlung von Kohlendioxid in Zellstrukturen und energiereiche Kohlenhydrate. Als Abfallprodukt entstand dabei der Sauerstoff, der sich langsam in der Atmosphäre ansammelte. Spezielle Enzyme neutralisierten schließlich dessen toxische Wirkung und in den oberen Atmosphärenschichten bildete sich durch den Sauerstoff langsam eine Ozonschicht (Ludwig 2006, S. 28f). Die hohe photosynthetische Bioproduktion in den Ozeanen mit dem darauf folgenden sinkenden Kohlendioxidanteil in der Atmosphäre war wahrscheinlich ein Auslöser für die erste große Vereisung der Erde vor 2,3 Mrd. Jahren. Seitdem wuchs der Sauerstoffanteil von 0,2 % (vor 1,4 Mrd. Jahren) auf das heutige Niveau von 21 %, das vor 400 Mio. Jahren bereits erreicht wurde (Ludwig 2006, S. 29).

Die nächste große Vereisung begann vor 900 Mio. Jahren und endete vor etwa 600 Mio. Jahren; bis in die Äquatorbreiten war die Erde mit Eis bedeckt und glich damit einem großen Schneeball („Snowball Earth“) (Rahmstorf 2006, S. 16). Allerdings muss es auch eisfreie Zonen gegeben haben, da sonst die Urorganismen nicht hätten überleben können (Ludwig 2006, S.29). Die anschließend hohen Vulkanaktivitäten führten zu einer enormen Erhöhung des Treibhauseffektes und der globalen Mitteltemperatur auf bis zu 50 °C, der dann die Evolution mit der Ausdifferenzierung der Urorganismen in zahlreiche, uns heute noch bekannte Arten folgte (Rahmstorf 2006, S. 16f).

## 4.2 Kambrium bis Kreide

In der sogenannten Kambrischen Explosion vor rund 540 Mio. Jahren entstanden in einem relativ kurzen Zeitraum (das Kambrium dauerte von 540 Mio. Jahre bis 500 Mio. Jahre vor heute) sämtliche Baupläne der heute lebenden Tiere (Ludwig 2006, S. 31f). In den Ozeanen bildeten sich womöglich wegen des hohen Gehaltes an Kalziumkarbonat die Schalentiere, in deren Kalkschalen die heutige Paläoklimatologie im Ozeansediment Temperatur und Kohlendioxidgehalt zu rekonstruieren versucht (siehe Abschnitt 3.5).

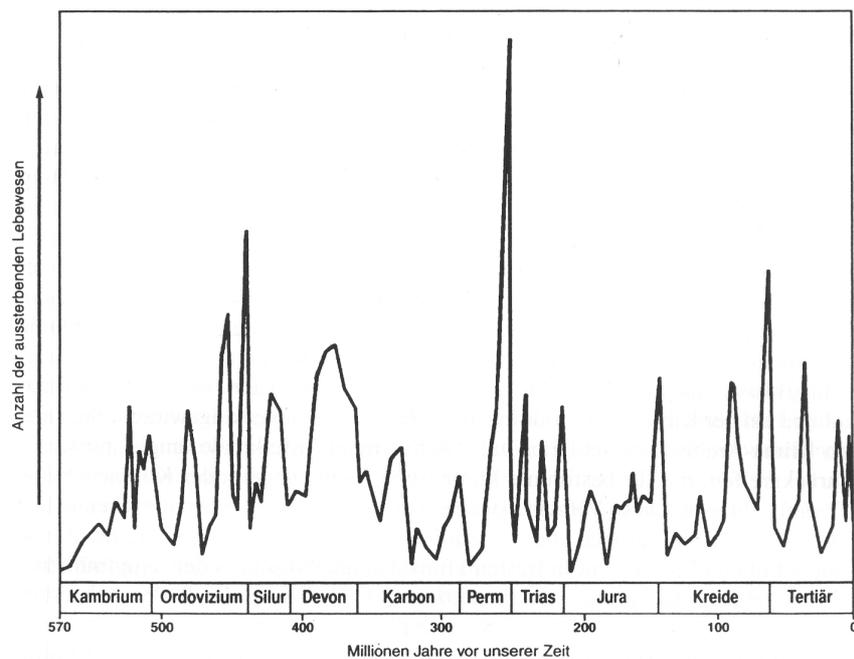


Abbildung 6: Artensterben (aus Huch 2001)

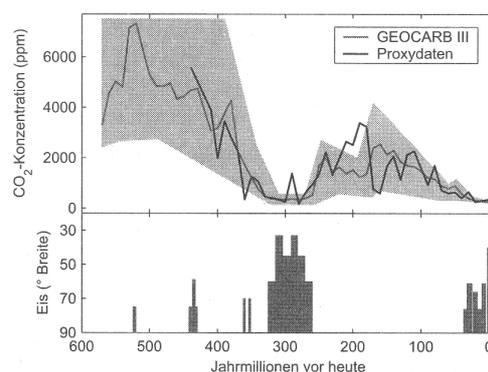


Abbildung 7: Kambrium bis heute (aus Rahmstorf 2006)

Der große geologische Zeitraum vom Kambrium (540 Mio. Jahre) bis zur Kreide (65 Mio. Jahre) ist geprägt von Vereisungsperioden (Rahmstorf 2006, S. 17) und Wellen von Massenaussterben (Abb. 6). Abbildung 7 zeigt das Vordringen der polaren Eisschilde sowie den

Kohlendioxidverlauf, wie er aus vier unabhängigen Proxydaten und einer Modellsimulation ermittelt wurde. Vereisungsphasen fallen mit Zeitenräumen geringeren Kohlendioxidanteils zusammen. Die genauen Ursachen der Klimaereignisse sind noch nicht geklärt; sie müssen sich jedoch durch das Zusammenwirken der Klimafaktoren Vulkanismus, Verwitterung, Kontinentaldrift, Photosynthese und möglicherweise Meteoriteneinschläge ergeben haben. Auch gibt es enge Wechselwirkungen von Klima und Vegetation – schnelle Klimaänderungen ziehen oft das Aussterben unangepasster Arten nach sich, was wiederum Auswirkungen auf das Klima haben kann. Allerdings können bei hohem Selektionsdruck zahlreiche neue Arten entstehen, die sich vorher gegen die etablierten nicht hätten durchsetzen können. Für die unterschiedlich starken Massenaussterben sind folgende Ursachen denkbar (Ludwig 2006, S. 37 u. S. 42):

- Temperaturschwankungen
- Sauerstoffschwankungen (v.a. im Ozeanwasser)
- Kohlendioxidschwankungen (Atmosphäre und Ozean)
- Wasserspiegeländerungen
- Vulkanismus und dadurch ausgelöste Schwefelvergiftungen
- Meteoriten (und ausgelöste Staubwolken und Tsunamis)
- Ozonschichtschwankungen (durch Vulkangase)

Nach dem Landgang der Pflanzen vor rund 440 Mio. Jahren (Ludwig 2006, S. 34) entstanden im Karbon und in der Perm (350 - 225 Mio. Jahre) riesige Braun- und Steinkohlelager (Ludwig 2006, S. 40). Das größte Massenaussterben in der Erdgeschichte ereignete sich zeitgleich mit dem Beginn einer neuen Warmphase vor 240 Mio. Jahren: 95 % aller marinen Lebewesen und 75 % aller Landorganismen starben damals aus – wahrscheinlich durch eine oder mehrere der oben genannten Ursachen.

In der eisfreien Kreidezeit breiteten sich die Dinosaurier schließlich bis nach Spitzbergen aus. Seit jener Warmzeit ist der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre (langfristig) beständig gesunken, bis auf der Erde vor 2-3 Mio. Jahren das letzte und heute noch herrschende Eiszeitalter einbrach (Ramhstorf 2006, S. 18). Das Absinken des Kohlendioxidgehaltes könnte auch durch die Entstehung der Kieselalgen (vor 180 Mio. Jahren) verursacht bzw. verstärkt worden sein, die durch Silikatverwitterung eingebauten Kohlenstoff binden und mit ihrem Tod in die tiefen Ozeansedimente verfrachten (Ludwig 2006, S. 61).

### 4.3 Das PETM

Ein Ereignis, das besonderes Interesse in Bezug auf seine Analogie zum heutigen Klimawandel verdient, ist das *Paleocene-Eocene Thermal Maximum*, kurz PETM, welches vor 55 Mio. Jahren stattfand. Innerhalb eines kurzen Zeitraumes – wenige tausend oder zehntausend Jahre – gelangte eine große Menge Kohlenstoff in die Atmosphäre; gleichzeitig kam es zu einem Temperaturanstieg um 5-6°C (in höheren Breiten um bis zu 10°C) (Ludwig 2006, S. 57f.). Die Kohlenstoffzunahme lässt sich aus dem (relativen) Absinken der C-13-Konzentration im Sediment schließen (siehe Abb. 8), das bei einem zusätzlichen Kohlenstoffeintrag aus einer anderen Quelle (mit geringerem C-13-Anteil) auftritt. Da die Isotopenzusammensetzung der drei diskutierten Quellen – Methan-Eis, Vulkanausbrüche oder Meteoriten – jeweils unterschiedlich

ist, kann die genaue Menge an freigesetztem Kohlenstoff nicht rekonstruiert werden. An diesem Ereignis zeigen sich mögliche Auswirkungen großer Kohlendioxidemissionen in die Atmosphäre; für genauere und quantitative Schlüsse reicht der bisherige Wissensstand noch nicht aus (Rahmstorf 2006, S. 19).

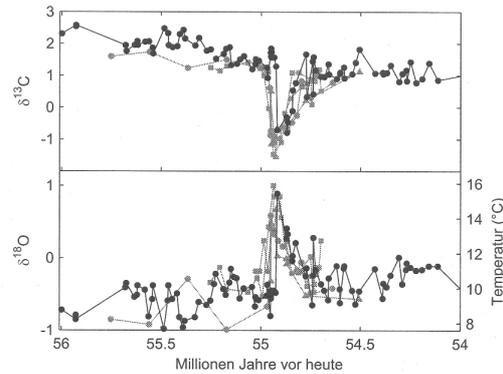


Abbildung 8: PETM (aus Rahmstorf 2006)

#### 4.4 Das aktuelle Eiszeitalter

Am Beginn des jetzigen Eiszeitalters vor etwa 2 Mio. Jahren befinden sich die Kontinente in etwa in der heutigen Position; auch entspricht die damalige Flora und Faune weitgehend der unseren (Rahmstorf 2006, S. 20). Die ersten Primaten entstanden zwar schon vor 55 Mio. Jahren (Ludwig 2006, S. 68), der erste Mensch (*homo habilis*, der geschickte Mensch) tritt aber erst vor etwa 2,5 Mio. Jahren in Erscheinung und wird vor 1,6 Mio. Jahren vom *homo erectus* (aufrechter Mensch) abgelöst (Ludwig 2006, 86ff.). Vor 400.000 Jahren lebten schließlich die Neanderthaler und andere Hominiden, die bereits mit dem Feuer umgehen konnten (Ludwig 2006, S. 102).

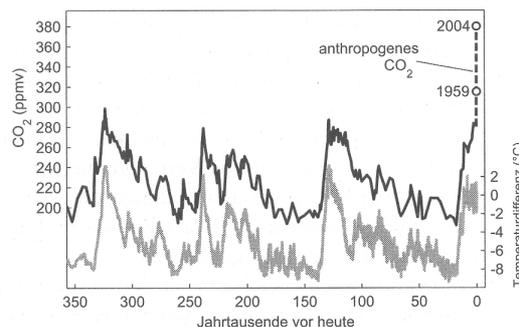


Abbildung 9: Vostok Eisbohrkern (aus Rahmstorf 2006)

Die letzte Eiszeit ist nicht nur geprägt von einer dauernden Vergletscherung der Antarktis, sondern von zahlreichen zyklisch und azyklischen Warm- und Kaltzeiten. Die Milankovitch-Zyklen sind in den Temperaturverläufen aus den Eisbohrkernen erkennbar (Abb. 9). Allerdings gibt es auch starke Korrelationen zwischen dem Temperatur- und dem Kohlendioxidverlauf (auch anderen Treibhausgasen wie Methan). Nach dem bisherigen Stand der Forschung kam es erst 200-1000 Jahre *nach* dem Temperaturanstieg zum Anstieg der Treibhausgaskonzentration (IPCC 2001 sowie IPCC 2007, S. 435 u. S. 444). Dieser Zusammenhang wirft noch viele Fragen

auf und bedarf weiterer Untersuchungen; wahrscheinlich spielen jedoch die temperaturabhängige Kohlendioxidkapazität der Ozeane sowie einige verstärkende Rückkopplungsprozesse (bzgl. der Albedo) eine wichtige Rolle (Rahmstorf 2006, S. 23).

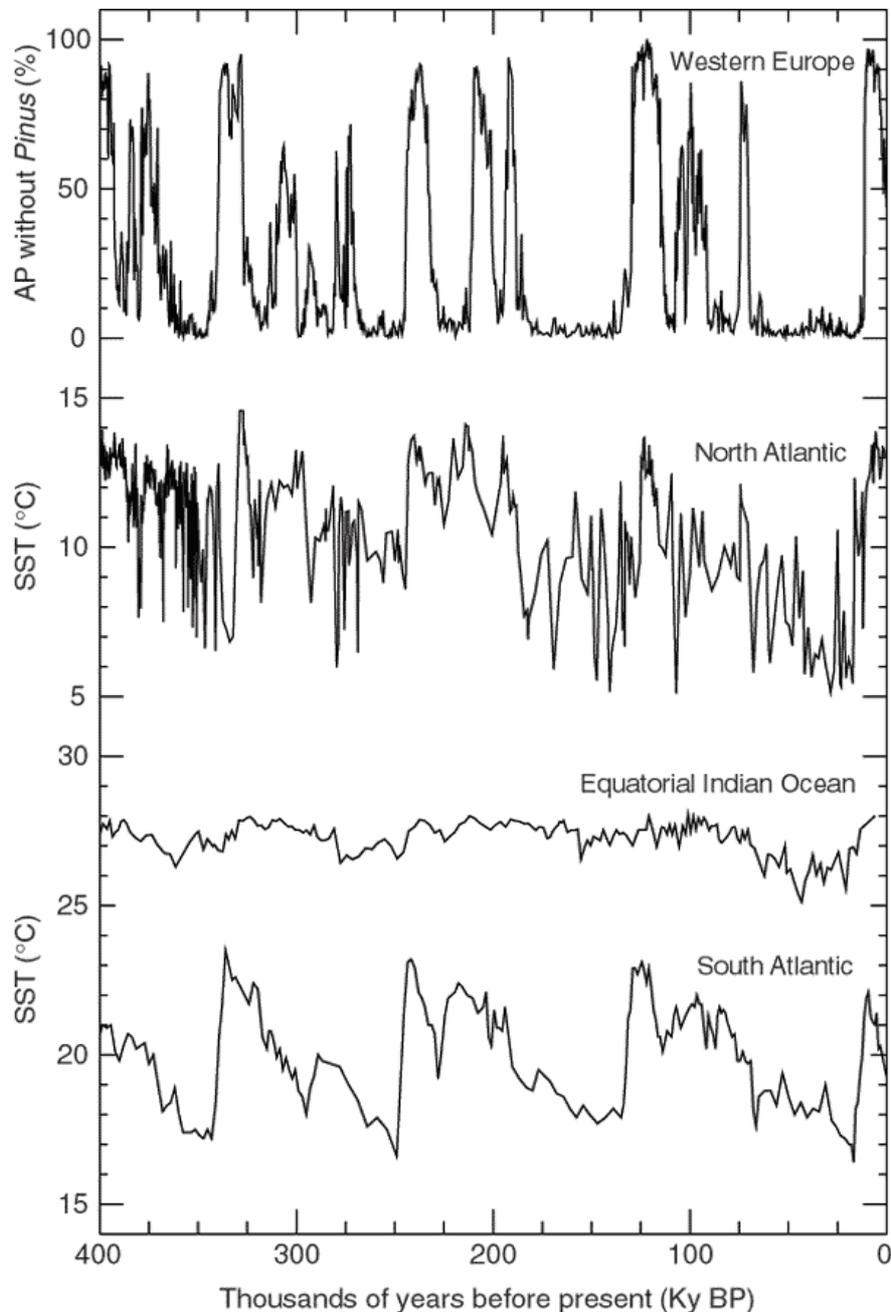


Abbildung 10: Temperaturentwicklung und Pollenvergleich (aus IPCC 2001)

Die rekonstruierten Temperaturen für die letzten 400.000 Jahre können als relativ gesichert angesehen werden. Die Ergebnisse durch die Eisbohrkerne (Abb. 9), Korallen, Sedimente und Pollen (Abb. 10) sowie die Meeresspiegeländerungen (Abb. 11) zeigen alle parallele

Entwicklungen an verschiedenen Orten der Erde. Lediglich im äquatornahen Ozeanwasser (Abb. 11, dritte Kurve) fallen die Temperaturschwankungen geringer aus.

Infolge des durch Vereisung gefallenem Meeresspiegels erfolgte während der Würm-Kaltzeit (150.000 - 10.000 Jahre vor heute) die Besiedlung Amerikas von Asien aus über die Behringstraße (Ludwig 2006, S. 108). In dieser Zeit starben durch schlechte Klimatische Bedingungen und zusätzliche Belastung durch menschliche Jagd in Europa das Mammut, in Nordamerika Riesenbüffel, Pferde und Kamele aus. Auch könnte die Kälte mit ein Grund für das Aussterben des (im Vergleich zum *homo sapiens*) robusteren Neandertalers vor 35.000 Jahren sein, während die frühsteinzeitlichen Menschen schon vor 32.000 Jahren die ersten Kunstwerke (eine Gesichtsmaske in La Roche-Cotard, Frankreich) geschaffen haben (Ludwig 2006, S. 105).

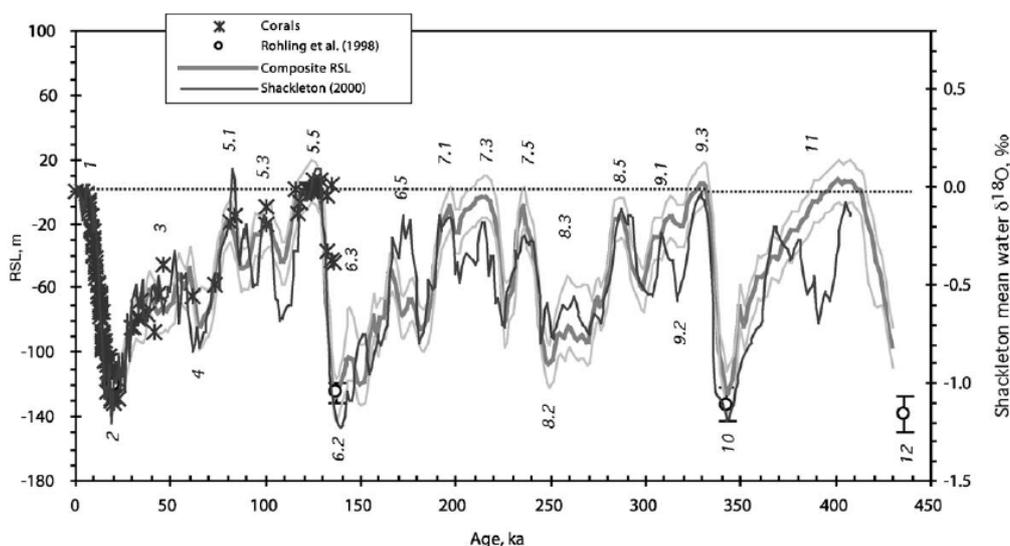


Abbildung 11: Meeresspiegeländerungen (aus Waelbroeck 2002)

Aber auch während der letzten 50.000 Jahre kam es innerhalb der Kältezeit zu zahlreichen abrupten Klimawechseln (Abb. 12). Sogenannte Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (*DO-events*) konnten an 183 Orten nachgewiesen werden, an denen sich das Klima synchron änderte. Als Ursache vermutet man sprunghafte Änderungen der nordatlantischen Meeresströme, die wiederum durch minimale Auslöser bewirkt werden könnten (Rahmstorf, S. 24f).

Am Ende der letzten Eiszeit tritt ein weiterer starker Temperatursturz auf: Das Jüngere-Dryas-Ereignis (in Abb. 12 mit YD gekennzeichnet). Von 12.700 bis 10.500 Jahre vor heute verringerte sich die Temperatur in der Norhemisphäre um bis zu 10°C, was durch die Ausbreitung des Silberwurz (*dryas*), einer arktischen Charakterpflanze, diesem Ereignis seinen Namen gab (Ludwig 2006, S. 108). Ursache hierfür war wahrscheinlich ebenfalls ein Versiegen oder Abschwächen des Nordatlantikstromes, verursacht durch den Zufluss gewaltiger Süßwassermengen aus Nordamerika. Das dort anfangs durch umgebende Gletscher aufgestaute Schmelzwasser bahnte sich schließlich seinen Weg in den Nordatlantik, dessen haline Schichtung – maßgeblicher Motor der Nordatlantikströmung – durcheinander gebracht wurde (Ludwig 2006, S. 108f).

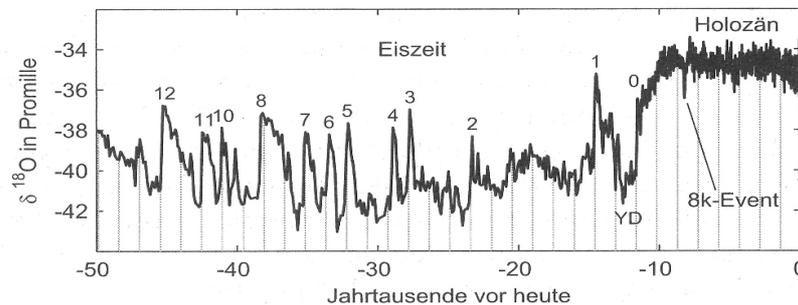


Abbildung 12: Die letzten 50.000 Jahre (aus Rahmstorf 2006)

## 4.5 Holozän

Die aktuelle Warmphase im andauernden Eiszeitalter ist geprägt durch relativ stabiles Klima, was sicher ein Grund dafür ist, dass die kulturelle Entwicklung des Menschen mit der neolithischen Revolution vor 10.000 Jahren begann. In drei unterschiedlichen Kulturkreisen (China, fruchtbarer Halbmond, Zentralamerika) wurde der Mensch sesshaft und betrieb Ackerbau und Viehzucht. Dieser Schritt setzte ein hohes Planungsverständnis voraus, bewirkte andererseits aber auch eine größere Unabhängigkeit von der Natur. Die gestiegenen Erträge dürften einerseits die Entstehung von Hochkulturen mit verschiedenen nicht primär landwirtschaftlichen Berufen gefördert haben, andererseits auch Grundlage für ein leichtes, aber stetiges Bevölkerungswachstum gewesen sein (Ludwig 2006, 112ff).

Natürlich traten auch im Holozän regional bedeutsame Klimaschwankungen auf. Vor 5.000 Jahren war die Sahara eine Savanne mit grünen Oasen und Seen (dies ist auch auf Malereien ersichtlich) bis sie sich aufgrund einer Änderung der Monsunzirkulation in eine lebensfeindliche Wüste verwandelte (Rahmstorf 2006, S. 26). Ebenso gab es mehrere Klimaänderungen auf Grönland, die sich an einer 982 gegründeten und schließlich im 14. Jhd. wieder aufgegebenen Wikingersiedlung manifestieren (Rahmstorf 2006, S. 26). Doch sind diese regionalen Trends nicht immer für die ganze Erde verallgemeinerbar.

Am besten zeigt sich die Datenlage für den geografischen Raum der Norhemisphäre; aber selbst für den Zeitraum der letzten 1.300 Jahre gibt es unter den verschiedenen Rekonstruktionen Abweichungen um bis zu 1 °C (siehe Abb. 13). Dennoch lässt sich ein Trend erkennen, wenn die Überlappung der Kurven grafisch hervorgehoben wird (Abb. 14): Neben einem Temperaturoptimum von 900 bis 1350 (die mittelalterliche Warmzeit) ist besonders der rapide Temperaturanstieg der letzten 150 Jahre sichtbar, der mit dem Beginn regelmäßiger Temperaturaufzeichnungen die geringsten Unsicherheiten aufweist.

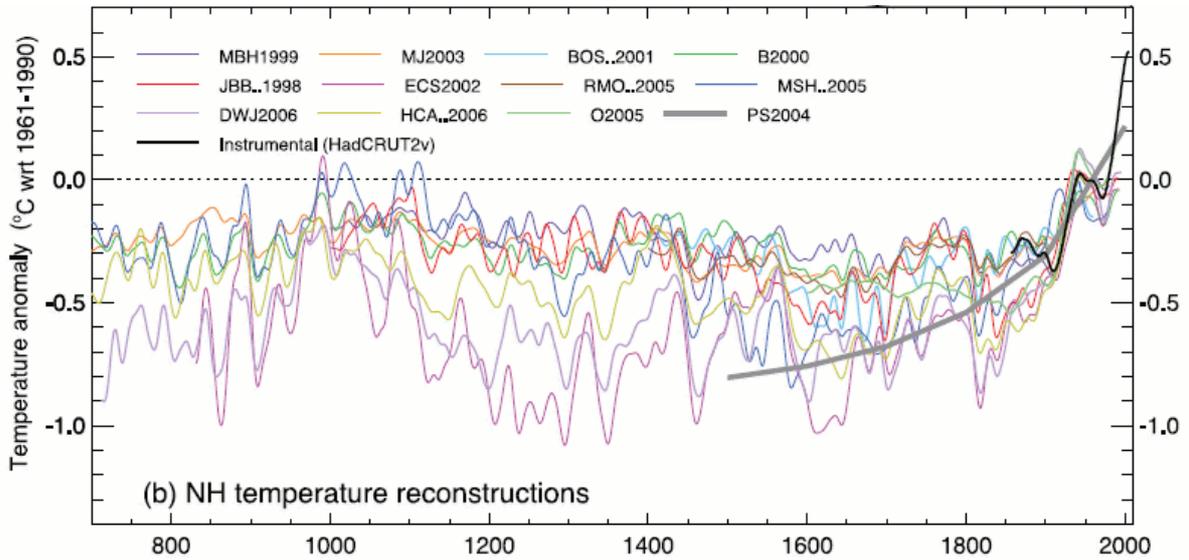


Abbildung 13: Temperaturentwicklung der Nordhemisphäre (aus IPCC 2007)

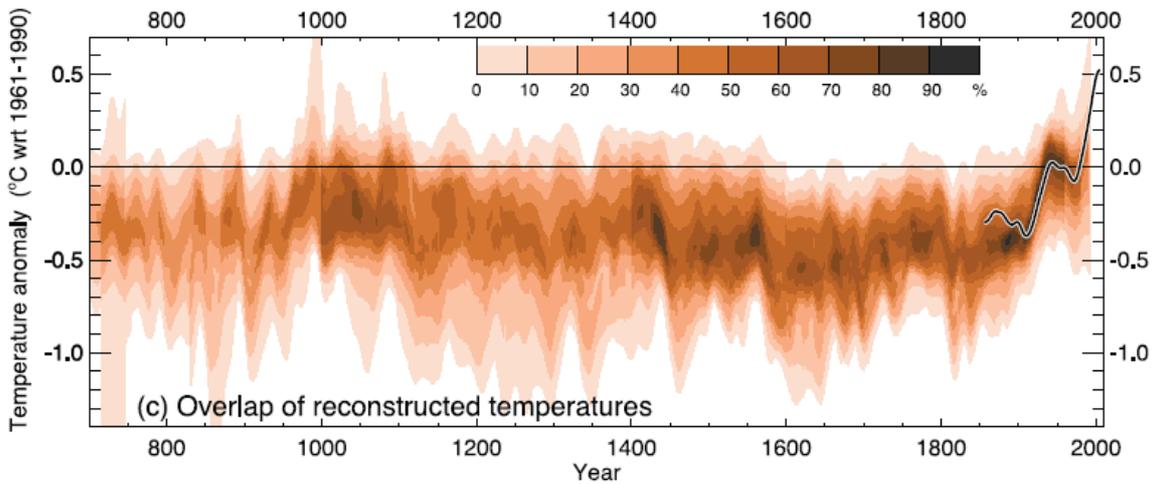


Abbildung 14: Temperaturentwicklung der Nordhemisphäre (aus IPCC 2007)

## 5 Ausblick

Was können wir aus der Klimageschichte lernen? In welchem Licht lässt sie uns den heutigen Klimawandel erscheinen? Relativ sicher ist der starke Zusammenhang zwischen Temperatur und Treibhausgasen, der in beide Richtungen wirkt; allerdings sind exakte quantitative

Aussagen über die Temperaturerhöhung bei zunehmenden Kohlendioxidemissionen noch nicht möglich.

In Bezug auf die Geschwindigkeit des Klimawandels stellt der IPCC-Bericht (2007, S. 465) einen drastischen und außergewöhnlich schnellen gegenwärtigen Anstieg fest, der so in den paläoklimatischen Daten kein zweites Mal zu finden ist. Aussagen über die Temperaturentwicklung sind allerdings weitaus schwieriger zu treffen, da sich die Temperatur regional sehr uneinheitlich entwickelt. In Bezug auf die letzten 3 Mio. Jahre befinden wir uns in einem Temperaturoptimum – für weiter zurückliegende Zeiträume jedoch sind die aktuellen Temperaturwerte nicht besonders hoch (schließlich leben wir ja auch in einer Eiszeit). Ein rapider Temperaturanstieg von etwa 5°C innerhalb eines Jahrhunderts (wie derzeit für das 21. Jhd. prognostiziert) konnte in den letzten 50 Mio. Jahren nicht nachgewiesen werden, allerdings besitzen die Proxies dafür auch eine zu geringe zeitliche Auflösung (IPCC 2007, S. 465).

Allerdings betrifft der Klimawandel heute über 6 Mrd. Menschen, die große Teile der weltweit nutzbaren Flächen bewirtschaften und bewohnen und in sensibler Weise von Klimaschwankungen betroffen wären.

Aus einer naturalistischen Sicht ist der Klimawandel nichts „Schlimmes“. Das Klima war immer hoch dynamisch, es hat Leben ermöglicht und Massenaussterben bewirkt, es war Motor für die Entstehung neuer Arten und legte die Rahmenbedingung für die biologische und kulturelle Evolution des Menschen. Jeder Tod einer Art oder eines Individuums bewirkt schließlich neues, verändertes Leben. Die Evolution schuf letztlich einen Menschen, der kaum ein Ökosystem dieses Planeten nicht beeinflusst oder gar dominiert. Doch hat der Mensch neben seiner Herrschaft über die Natur auch Normen und Werte entwickelt, die seiner Macht des Machbaren Grenzen setzen. Die ethische Evolution – mag sie der technischen auch hinterherhinken – fordert einen sorgfältigen Umgang mit der Natur; mindestens um der zwischenmenschlichen und intergenerationellen Gerechtigkeit wegen. Vielleicht aber auch um der Natur selbst willen.

## Literatur

- [1] Glaser, Rüdiger: Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. 2001.
- [2] Huch, Monika; Warnecke, Günter; Germann, Klaus (Hrsg.): Klimazeugnisse der Erdgeschichte. Perspektiven für die Zukunft. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 2001.
- [3] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge. 2001.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge. 2007.
- [5] Ludwig, Karl-Heinz: Eine kurze Geschichte des Klimas. Von der Entstehung der Erde bis heute. Verlag C. H. Beck, München. 2006.

- 
- [6] Rahmstorf, Stefan; Schellnhuber, Hans Joachim. Der Klimawandel. Verlag C. H. Beck, München. 2006.
- [7] Waelbroeck, Labeyrie, Michela, Duplessy, McManus, Lambeck, Balbona, Labracherie: Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. Quaternary Science Reviews 21 (2002) 295-305. 2002.





**Ausarbeitung Hauptseminar 2007**

**im Studiengang**

**Angewandte Systemwissenschaft**

**Adaption an den Klimawandel**

Marcel Junker

## **1. Einleitung**

Seit spätestens diesem Sommer hält der Klimawandel unübersehbar Einzug in unsere Medienlandschaft. Inzwischen wird über kaum ein Klimaereignis, seien es nun Überschwemmungen, Tornados oder Feuersbrünste, ohne Bezug auf den Klimawandel berichtet. Al Gore brachte mit seiner (oskarprämierten) Dokumentation „Eine unbequeme Wahrheit“ einen mahnenden Kassenschlager in die Kinos und über 150 weltbekannte Künstler ließen sich in Großveranstaltungen auf allen sieben Kontinenten für „Live Earth“ einspannen, um die Aufmerksamkeit für und die Kampfbereitschaft gegen das Problem zu erhöhen. Der Klimawandel nimmt unterdessen in Umfragen zu den Zukunftsängsten des Ottonormalbürgers regelmäßig einen der oberen Plätze ein und auch die Politiker aller Parteien ordnen das Thema laut eigenem Bekunden auf ihrer Prioritätenliste weit oben ein, was nicht nur beim G8-Gipfel in Heiligendamm zum Ausdruck kam. Wissenschaftlich gestützt wird diese gesamtgesellschaftliche Alarmierung durch den 4. Bericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) [a], einer Gründung durch die „World Meteorological Organization“ (WMO) [b] und das „United Nations Environment Programme“ (UNEP) [c]. Der „Fourth Assessment Report: Climate Change 2007“ [1] wurde von den Medien interessiert erwartet und nach seinem Erscheinen wurde ausführlich über ihn berichtet, wobei man natürlich besonderes Augenmerk auf die spektakulären Elemente richtete und teilweise etwas „pointierte“: Anstieg des Meeresspiegels, Schmelzen von Gletschern und Polen, Naturkatastrophen, abreißende Meeresströmungen, Verwüstung des Mittelmeerraums und Mittelmeerklima in Deutschland. Tatsächlich lässt die erste Arbeitsgruppe der IPCC keinen Platz für Zweifel, dass der Klimawandel stattfindet und die Stimme der „Klimawandel-Leugner“ ist inzwischen (zumindest in den Medien) weitestgehend verstummt. Die Debatte um die Ursachen für den Klimawandel wird derzeit noch etwas lebendiger geführt, aber auch hier hat der IPCC-Bericht den Verfechtern einer anthropogenen Hauptursache gewichtige Munition in die Hand gegeben und die breite Öffentlichkeit scheint davon ebenfalls überzeugt. So streiten Politiker und Wissenschaftler nun überall auf der Welt in internationalen und nationalen Gremien auf dem nächste rhetorische Schlachtfeld: „Was tun gegen den Klimawandel?“. Die meisten Ansätze, beschäftigen sich mit der mutmaßlichen Ursache des Problems: den Treibhausgasen. So gibt es derzeit viele Vorschläge, wie deren

Emission bzw. die Konzentration in der Atmosphäre reduziert werden könnte, um die globale Erwärmung zu stoppen und die potentiell katastrophalen Auswirkungen für den Menschen und seine Umwelt noch abzuwenden. Auch über die monetären und/oder gesellschaftlichen Kosten solcher, den Klimawandel mildernden, Unternehmungen findet man einige Informationen. Viel weniger in den Medien präsent ist hingegen die simple Tatsache, dass man den Klimawandel auch bei den stärksten Anstrengungen nicht ganz verhindern können, denn er findet schon derzeit statt und auch die kraftvollsten mitigativen (in diesem Kontext also den Klimawandel verhindernde) Schritte werden einige Zeit brauchen um umgesetzt zu werden und ihre Wirkung zu tun. Daher sollte parallel zu der Debatte um die Mitigation auch eine Debatte um die Adaption stattfinden, also was getan werden muss, um die negativen Auswirkungen des nicht zu vermeidenden Klimawandels auf den Menschen und seine Umwelt abzuschwächen. Das IPCC hat dazu eine eigenständige (nach der Nomenklatur die zweite) Arbeitsgruppe gegründet, die eben dieser Frage nach der möglichen und nötigen Adaption nachgeht. Ihr Bericht wurde zeitgleich mit dem der ersten Arbeitsgruppe veröffentlicht, fand jedoch wesentlich weniger Beachtung in der Öffentlichkeit. Ebenso ist die Arbeit von zahlreichen anderen Organisationen zu diesem Thema kaum in der öffentlichen Wahrnehmung präsent. Über die Gründe kann man spekulieren: vielleicht ist es weniger spektakulär über Anpassungsmaßnahmen zu berichten, als über Wetterchaos und den steigenden Meeresspiegel. Vielleicht liegt auch eine psychologische Kausalität vor und der Mensch fühlt sich unwohler, wenn er darüber nachdenken muss, wie er vergleichsweise ohnmächtig mit unvermeidbaren Auswirkungen umgehen kann. Darüber zu rasonieren wie man den Klimawandel verhindern kann, bedeutet schließlich einen höheren Grad der Kontrolle – der Mensch regelt das Klima und wird nicht durch das Klima zur Reaktion gezwungen. Aber gerade eine Verdrängung oder ein Hintanstellen der notwendigen Adaption, die alle Gesellschaften der Welt vor eine Herausforderung stellt, wäre ein Fehler. Ich werde daher versuchen im Folgenden eine Einführung in und Übersicht über diesen Themenkomplexes zu liefern.

## **2. Begriffe**

Die folgenden Erläuterungen zu einigen, in der Diskussion um die Adaption gebräuchlichen, Begriffen, habe ich dem Kapitel 5 des UNEP-Handbook [2], sowie den Quellen [3] und [4] entnommen.

**Adaption** (oder **Adaptation**) im Kontext des Klimawandels beschreibt alle Prozesse, die natürliche oder anthropogene Systeme an bestehende oder erwartete klimatische Verhältnisse und deren Auswirkungen anpassen. Dies umfasst sowohl Anpassungen, die der Vermeidung bzw. Verringerung möglicher Schäden dienen (also die Schadensanfälligkeit reduzieren), als auch Anpassungen, die Nutzen aus den veränderten Bedingungen ziehen.

Man kann Adaptionsprozesse weiter unterteilen in

1. **autonome** Adaption, die selbstständig, spontan (also ohne Planung) und unter Umständen sogar „unbewusst“ passiert
2. **reaktive** Adaption, die eine überlegte Reaktion auf Einwirkungen durch die Klimaveränderung darstellt, um das System wiederherzustellen und/oder eine erneute Schädigung zu vermeiden
3. **antizipatorische** Adaption, welche schließlich geplante und vorrausschauende Maßnahmen beinhaltet, die mögliche schädliche Auswirkungen durch den Klimawandel minimieren sollen.

Der Begriff **Schadensanfälligkeit** (engl. **vulnerability**) berücksichtigt dabei die Fähigkeit eines Systems Belastungen und Einwirkungen zu absorbieren oder zu verarbeiten und sich anzupassen oder zu erholen.

In diesem Zusammenhang spielt die „**adaptive Kapazität**“ (engl. **adaptive capacity**) eines Systems eine große Rolle, die das Potential beschreibt sich auf Effekte des Klimawandels einzustellen und sich an die veränderten Bedingungen anzupassen.

**Maladaption** bezeichnet Aktionen, die die Schadensanfälligkeit durch

den Klimawandel erhöhen. Dies kann leicht geschehen, wenn der Faktor Klimawandel gar nicht erst in bestimmte Entscheidungsfindungen mit einbezogen wird. Maladaptation beinhaltet aber auch Maßnahmen, die die Schadensanfälligkeit durch derzeitige klimatische Verhältnisse erhöhen. Der erste Schritt von Adaptionsprozessen ist häufig der Stopp von maladaptiven Aktionen.

**Mitigation** wiederum ist der Versuch das Ausmaß des Klimawandels selbst zu verringern. Mitigation kann dabei auch als eine spezielle Form der Adaption angesehen werden.

### **3. Analysen**

Wenn sich eine Akteur (sei es nun ein Staat, eine Region, ein Unternehmen) entschieden hat sich vorzubereiten und seine eigene Schadensanfälligkeit gegenüber Klima und Klimawandel zu verringern, stehen am Anfang verschiedene Schritte der Informationssammlung und –bewertung (engl. assessment) , die es ihm ermöglichen sollen, die für ihn am besten geeigneten Maßnahmen auszuwählen. Für die Einteilung dieser Schritte gibt es verschiedene Modelle – ich werde mich im Folgenden hauptsächlich an die von Klein und Füssel (2002) [5] (zitiert aus Klein und Füssel (2004) [6]) vorgeschlagene Klassifizierung halten.

#### **1. “Climate Impact Assessment”**

Der größte Teil der wissenschaftlichen und öffentlichen Aufmerksamkeit hat sich bisher diesem Teilaspekt zugewendet, der sich mit einer Langzeitabschätzung des Klimawandels beschäftigt und einen quasi ausschließlich naturwissenschaftlichen Ansatz darstellt:

Wie wird sich das Klima verändern? (Temperatur, Wetterereignisse, etc.)

Welche großräumigen Auswirkungen wird dies auf die anderen „physikalischen Systeme“ der Erde habe? (Anstieg des Meeresspiegels, Ausbreitung von Wüsten, Abschmelzen der Gletscher, Auswirkungen Meeresströmungen, etc.)

Aber auch die Rolle des Menschen steht explizit im Mittelpunkt dieser Beurteilungsstufe: In wie weit trägt der Mensch Verantwortung für den Klimawandel – was hat er also mit der Emission von Treibhausgasen, großräumigen Veränderung von Landschaften und Ökosystemen zur Erwärmung der Atmosphäre und zur sonstigen Störung des Systems Klima beigetragen? Zusätzlich wird hierbei auch das Potential für mitigative Schritte ermittelt – also zum Beispiel welche Auswirkung eine Drosselung der CO<sub>2</sub>-Emission auf die weitere Klimaentwicklung hätte. Schlussendlich fällt auch die Ermittlung weiteren Forschungsbedarfs in die Zuständigkeit des „Climate Impact Assessment“. Die wichtigste Studie zu diesem gesamten Themenkomplex ist derzeit der „Fourth Assessment Report: Climate Change 2007“ IPCC [1], insbesondere die Arbeiten der ersten und der dritten Arbeitsgruppe.

## **2. „Climate Vulnerability Assessment“**

Die zweite Generation von Studien im Vorfeld der eigentlichen Adaption dient der Identifizierung von durch Auswirkungen des Klimas bzw. des Klimawandels besonders gefährdeten Gruppen oder Regionen. Auf dieser Ebene erfolgt auch eine explizite Einbeziehung von soziologischen und ökonomischen Aspekten zu den (an die spezielle Region angepassten) biophysikalischen, die Umwelt beschreibenden Modellen. Es wird ermittelt welche Einflüsse es durch das *derzeitige* Klima gibt und wo und wie (stark) es zu Belastungen für den Menschen durch *zu erwartende* Klimaverhältnisse kommen wird. Beispielsweise ist leicht ersichtlich, dass der Klimawandel für die IT-Branche eine geringere Gefahr darstellt als für die Agrarwirtschaft. Für die bewerteten Gruppen werden auch weitere Stressoren durch Gesellschafts-, Wirtschafts- oder Umweltprozesse, die parallel zu denen des Klimawandels möglicherweise auftreten, untersucht, um das Ausmaß der Gesamtbelastung abschätzen zu können. Dem gegenübergestellt wird die kalkulierte Adaptionfähigkeit, um daraus ein Gefährdungsprofil erstellen zu können, das geeignet ist eine Prioritätenliste für Adaptionmaßnahmen zu erstellen. Wichtige Faktoren für die Adaptionfähigkeit einer Gesellschaft sind beispielsweise der vorhandene Reichtum, Zugang zu Informationen, Verfügbarkeit und Verteilung von relevanten Technologien und die Stärke von Regierung und Privatsektor. Beim „Climate Vulnerability Assessment“ ist auch eine direkte

Einbeziehung der nicht-wissenschaftlichen Akteure sinnvoll, um ein vollständigeres Bild der Situation mit Ihren Gefahren und Möglichkeiten zu erhalten und das Verhalten der Akteure besser einschätzen zu können. Dies ist speziell deshalb wichtig, weil auch die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen von autonomen Adaptionen in dieser Stufe des Beurteilungsprozesses prognostiziert werden sollen, wozu auch bereits stattfindende Adaptionen ermittelt werden.

### **3. „Adaptation Policy Assessment“**

Nach den beiden ersten Stufen, die eher auf eine vorbereitende Informationsbeschaffung zielen, dient diese letzte Stufe des Assessment-Prozesses direkt der Identifizierung und dem Design von Adaptionstrategien, die die Gefährdung durch den Klimawandel reduzieren sollen. Dabei steht die individuelle Anpassung für die spezifische Region und/oder den Sektor im Vordergrund – es wird also nach Lösungen gesucht, die für die Gefährdungssituation und die vorhandenen Mittel maßgeschneidert sind. Bewertet wird hierbei wie effektiv die zur Verfügung stehenden Strategien sind, welche Ressourcen benötigt werden und welche Akteure in den Prozess integriert werden müssen. Die Integration kann hierbei von Aufklärungs- und Informationskampagnen bis hin zu einer bewussten (unter Umständen sogar zwangsweisen?) Mobilisierung von „humanen Ressourcen“ gehen. Auch die Flexibilität der Maßnahmen (besonders im Umgang mit nicht zu vermeidenden Unsicherheiten) wird bewertet und schließlich der zeitliche Horizont dieser Maßnahmen abgesteckt. Hierbei kann es zu erheblichen Unterschieden geben – so kann zum Beispiel ein Agrarunternehmen im günstigen Fall vielleicht innerhalb eines Jahres die Zusammenstellung seiner Feldfrüchte wechseln, während eine Anpassung des Baustils unter Umständen Jahrzehnte oder ganze Generationen in Anspruch nehmen kann. Weiterhin wird versucht, noch offenen Informations- und Forschungsbedarf zu ermitteln. Da die Unsicherheit bei solchen komplexen und langwierigen Projekten nicht gänzlich behoben werden kann, spielen bei der letztendlichen Auswahl für die Agenda auch normative Kriterien eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Eine andere Einteilung dieses Assessment-Prozesses (neben noch zahlreichen anderen in der Literatur vorhandenen) wird von Klein and Nicholls (1999) [7] (zitiert aus Klein und Füssel (2004) [6]) durchgeführt, die zwischen „Screening-“, „Vulnerability-“ und „Planning-Assessment“

unterscheiden. Im Gegensatz zu Klein und Füssel (2002) [5] wird hier keine globale Klimatrendanalyse betrieben, dafür wird das „Climate Vulnerability Assessment“ hier noch mal gegliedert in ein rein biophysikalisches „Screening Assessment“ und ein auch soziökonomische und sonstige Faktoren berücksichtigendes „Vulnerability Assessment“.

Letztlich bleibt zu sagen, dass die konkrete Durchführung dieser Assessments sich sehr voneinander unterscheiden kann und auch hierfür gibt es diverse Evaluationen, die Stärken und Schwächen verschiedener Ansätze miteinander vergleichen, worauf ich aber im Folgenden nicht eingehen möchte.

## **4. Frameworks**

In diesem Kapitel werde ich kurz einige konkretere Ausarbeitungen der in Kapitel 3 erläuterten, für eine erfolgreiche Adaption notwendigen, Schritte vorstellen. Die meisten dieser für eine direkte Nutzung durch die Akteure geschriebenen Systeme sind nur mehr oder weniger grobe Orientierungshilfen oder „Rahmen“ (engl. frameworks). Sie sollen neben dem Aufzeigen von gangbaren Strategien auch für eine strukturierte Herangehensweise des Akteurs und eine Konzentrierung auf wesentliche Aspekte sorgen, um eine unnötige Ressourcen- und Zeitverschwendung zu vermeiden. Die meisten Informationen für diese Übersicht stammen aus Füssel und Klein (2004) [6], einem Kompendium [8] (bzw. [d]) des United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) [e] und aus den beschriebenen Frameworks.

### **1. IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations**

Carter et al. (1994) [9]

Dieses Framework stellt den ersten umfassenden Versuch dar, den Prozess, der sich über die verschiedenen Assessment-Stufen vollzieht, zu strukturieren. Es soll den Akteuren einen Überblick über das Spektrum adäquater Strategien geben und ihnen so dabei zu helfen die Verpflichtungen, die ihnen aus Artikel 4 und 12 des „Rahmenübereinkommen der Vereinten

Nationen über Klimaänderungen“ [f] der UNFCCC entstehen, zu erfüllen. Es soll anwendbar sein auf alle Sektoren, Regionen und bei jedem Entwicklungsstand und konzentriert sich mehr auf das Impact als auf das Adaption Assessment. Der Prozess ist in 7 Schritte gegliedert: (1) Formulierung der Problemstellung (2) Auswahl der Methoden (3) Überprüfung der Methoden (4) Auswahl der Szenarios (5) Assessment der biophysikalischen und sozioökonomischen Auswirkungen (6) Assessment autonomer Anpassungen (7) Evaluation von Adaptions-Strategien. Der letzte Schritt, der sich mit der eigentlichen Adaptions-Planung beschäftigt ist wiederum aufgegliedert in 7 Schritte: (1) Definition der Ziele (2) Spezifizierung wichtiger klimatischer Einwirkungen (3) Identifizierung von Adpations-Optionen (4) Begutachtung der Einschränkungen (5) Quantifizierung des Nutzens der Strategien und Formulierung alternativer Strategien (6) Gewichtung der Ziele und Bewertung der Strategien aufgrund ihrer erwarteten Auswirkungen nach diesem Schlüssel (7) Auswahl und Empfehlung einer Strategie. Wie man an den verschiedenen Schritten leicht sehen kann, sollen bei diesem Framework eine Vielzahl von Strategien identifiziert und bewertet werden, was den Akteuren mehr Übersicht und Flexibilität bietet. Die IPCC Technical Guidelines dienen in der Realität wohl als Orientierung für einige Projekte, aber eine 1:1-Umsetzung scheint es nicht zu geben. Dies liegt wohl nicht zuletzt an den relativ hohen Ansprüchen an die Datenbasis, was einer der Hauptkritikpunkte in der Literatur ist, unter anderem auch, weil es dadurch gerade für die Entwicklungsländer wenig geeignet ist. Darüber hinaus wird bemängelt, dass sich nur auf die zukünftigen und nicht auf die aktuellen Herausforderungen des Klimas konzentriert wird. Zu wenig Berücksichtigung finden auch nicht-Klima Faktoren, sowie Variabilität und Unsicherheit. Es ist zudem keine Einbeziehung der Interessengruppen vorgesehen.

## **2. UNEP Handbook on Methods for Impact Assessment and Adaptation Strategies**

Feenstra et al. (1998) [2]

Das UNEP Handbook stellt eine Weiterentwicklung der IPCC Technical Guidelines dar und soll nach eigener Aussage auch dem noch nicht sehr tiefgehend informierten Akteur Antworten auf die Fragen liefern: „Was bedeutet der Klimawandel für uns?“ und „Wie können wir damit umgehen?“. Es besteht aus zwei Teilen, von denen der erste dem Leser Informationen gibt über notwendigen Vorbereitungen, Aufbau und Entwicklung sozioökonomischer und biophysikalischer Szenarien, die Zusammenführung und Bewertung verschiedener möglicher Klimateinwirkungen

und sonstiger zu erwartender Veränderungen in einem „Integrated Assessment“ Prozess und zuletzt über Adaption im allgemeinen. Der zweite Teil beschäftigt sich dann genauer mit dem Impact und Adaption Assessment für neun vom Klimawandel betroffenen Sektoren: Wasser, Küstenzonen, Agrarwirtschaft, Weidewirtschaft, Gesundheit, Energie, Wald, Biodiversität und Fischerei. Gerade der zweite Teil führt die Vorgaben der IPCC Guidelines weiter aus und macht für jeden der behandelten Sektoren konkrete Vorschläge für das genauere Vorgehen, wobei stets mehrere Handlungsoptionen aufgezeigt werden und dem Benutzer die Auswahl zwischen diesen überlassen wird. Das Handbook hat Anwendung gefunden in den so genannten „Country Case Studies on Climate Change Impacts and Adaptations Assessment“ einem vom GEF (Global Environmental Facility) [g] finanzierten UNEP [c] Projekt, das in Kamerun, Antigua und Barbuda, Estland, Pakistan, Kuba, Grenada, Guyana und Barbados stattfand. Allerdings wird in dem Cicero-Abschlußbericht [10] betont, dass in einigen der Länder größere Anpassungen an die spezifischen Bedürfnisse erfolgen mussten. Generell wurden am Handbook ähnliche Punkte bemängelt, die auch schon ein Problem der Guidelines waren, vorneweg die beachtlichen Anforderungen an Daten und Modelle, die eigentlich nur von wenigen entwickelten Ländern und auch da nur mit erheblichem Aufwand erfüllt werden können.

### **3. US Country Studies Program Guidebook**

Benioff et al. (1996) [11] (stand dem Autor nicht zur Verfügung), [h]

Das Primäre Ziel des USCSP Guidebook war die Unterstützung von Entwicklungsländern bei der Feststellung von Gefährdungspotential und (in beschränktem Maße) bei der Planung von sinnvollen Adaptionen, um sie letztlich zu befähigen ihre Verpflichtungen gegenüber dem UNFCCC zu erfüllen. Es ist vor allem als Ergänzung zum IPCC Guidebook gedacht und konkretisiert hier viele Aspekte wesentlich. Der generelle Ablauf ist daher auch sehr ähnlich, wobei hier nur in sechs statt in sieben Schritte unterteilt wird und der letzte sich speziell mit der Dokumentation und Präsentation der Ergebnisse befasst (entsprechend Artikel 4 des „Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen“ [f] des UNFCCC). Der Schwerpunkt des Frameworks liegt allerdings auf der Einschätzung direkter biophysikalischer Einwirkungen des Klimawandels, durch die die an den Studien teilnehmenden Länder betroffen sind – die Integration anderer potentiell problematischer Entwicklungen oder mittelbarer Belastungen durch das Klima wird kaum behandelt. Dafür werden auch aktuelle Prozesse

hinsichtlich ihrer Effektivität im Klimafolgenkontext bewertet und es wird die Wichtigkeit betont, die verschiedenen Interessengruppen mit in den Adaptions-Prozess einzubeziehen (vor allem auch die Entscheidungsträger, damit die politische Machbarkeit nicht unberücksichtigt bleibt). Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Frameworks kommt das USCSP auch mit relativ geringen Mengen an Input-Daten aus, das Problem der Unsicherheit kann es aber nicht lösen. Das (inzwischen eingestellte) USCSP fand inklusive technischer und finanzieller Unterstützung Anwendung in 49 Staaten, von denen zwölf sich auch detailliert mit Planungen für adaptive Schritte befassten. In einer zweiten Phase wurden die Länder durch das „Supporting National Action Plan Program“ bei der Ausarbeitung nationaler Aktionspläne unterstützt.

#### **4. UNDP–GEF Adaptation Policy Framework**

Lim et al. (2004) [12] (zusätzlich [13] und [14])

Das APF des United Nations Development Programme (UNDP) und der Global Environment Facility (GEF) wählt einen sehr pragmatischen Ansatz für die Entwicklung von Adaptionsstrategien: ob sich eine Gesellschaft vernünftig an gegenwärtige und zukünftige Klimaentwicklungen adaptiert hängt zu einem großen Teil von der Politik ab, also steht die politische Machbarkeit von Adaptionsmaßnahmen im Vordergrund – ihr wird alles untergeordnet. Auch dieses Framework ist speziell für die Bedürfnisse von noch nicht entwickelten Ländern gestaltet und so liegt ein Schwerpunkt auf der Bewertung der aktuellen Gefährdungs- und Belastungssituation durch Klimavariabilität und –extreme, sowie andere Faktoren. Dies hat den Reiz, dass zeitnah positive Resultate erzielt werden können und so der Druck, der Bevölkerung auf der Bevölkerung liegt, reduziert wird, auch um sie für die nächsten Adaptionsschritte zu stärken. Zudem ist für eine solche „ad hoc-Adaption“ nur eine vergleichsweise geringe Informationsmenge nötig. Weiterhin wird bei jedem Adaptionsprogramm geprüft, ob es sich in einen übergeordneten Plan für eine nachhaltige Entwicklung der Region integrieren lässt, so dass die Adaption nicht mehr weiterhin als von der übrigen Politik gelöster Monolith wahrgenommen wird. Das APF legt viel Wert auf die Berücksichtigung von „Bottom-up“-Adaption, bei der die lokale Ebene nicht vergessen und sämtliche Interessengruppen mit einbezogen werden sollen. Formal gliedert sich das framework in fünf Schritte, von denen aber je nach Start- und Zielpunkt des Projekts, sowie zur Verfügung stehenden Informationen, auch nur eine Auswahl verwendet werden kann: (1) Definition des Projektrahmens und –designs; (2)

Bewertung der aktuellen Belastungs- und Gefährdungssituation; (3) Charakterisierung zukünftiger Klimarisiken; (4) Entwicklung einer Adaptionstrategie; (5) Fortführung des Adaptionprozesses. Die Nachteile des APF sind die teilweise Ausblendung zukünftiger Klimaentwicklung, die für eine adäquate Adaption neben der Anpassung an aktuelle Herausforderung zwingend erforderlich ist. Außerdem könnte durch die starke Anbindung des APF an die Realpolitik dazu führen, dass „unbequeme“ Adaptionswege nicht oder zu spät gegangen werden. Getestet wird das APF in der Studie „Capacity Building for Stage II Adaptation in Central America, Cuba and Mexico“ („Stage II“ bezieht sich dabei auf ein dreistufiges finanzielles Förderprogramm des UNFCCC für Adaption an den Klimawandel in Entwicklungsländern. Die zweite Stufe ist für Strategien, um sich auf eine Adaption vorzubereiten).

## **5. United Kingdom Climate Impacts Programme - Framework for Climate Adaptation**

Willows, Connell (2003) [15], [i]

Dieses eigens für Großbritannien geschriebene, aber weltweit anwendbare Framework, konzentriert sich auf die Faktoren Risiko und Unsicherheit, mit denen Entscheidungsträger im Kontext des Klimawandels umgehen müssen und soll helfen adäquate Adaptionstrategien zu finden, die die negativen Folgen reduzieren und eventuelle Chancen ausnutzen. Es ist in acht Schritten organisiert: (1) Identifizierung der Problemstellung und der Ziele; (2) Etablierung von Kriterien für die Entscheidungsfindung; (3) Abschätzung des Risikos; (4) Identifizierung der Optionen; (5) Abwägen der Optionen; (6) Auswahl der Adaptionstrategie; (7) Implementation der gewählten Strategie; (8) Überwachung, Auswertung und Überprüfung. Dabei sieht das UKCIP einen zirkulären Prozess vor, der eine ständige Kontrolle und Justierung ermöglicht und benötigt. Das iterative Design erlaubt zudem eine Aktualisierung von Zielen, Kriterien und Daten. Bei diesem Framework handelt es sich um ein vollständiges und sehr gründliches Werkzeug für alle vom Klimawandel betroffenen Sektoren. Allerdings sind für die Anwendung und Umsetzung nicht unwesentliche Mengen an ökonomischen Ressourcen, wissenschaftlichem Know-how und zur Verfügung stehenden Daten erforderlich. Zudem ist es zugeschnitten auf eine Gesellschaft mit einer westlichen Entscheidungskultur. Insgesamt wird also die Anwendung auf einige industrialisierte und demokratische Staaten beschränkt bleiben. Zudem wird es nur dort helfen können, wo man sich den Gefahren des Klimawandels bereits bewusst ist, es taugt nicht zur

Bewusstmachung des Problemkomplexes. Das UKCIP findet derzeit in Großbritannien Anwendung bei (teilweise sehr speziellen) Adaptionsprojekten in einer Vielzahl von Sektoren, vor allem jedoch bei der Landnutzungsplanung, der Konstruktion und dem Betrieb von Gebäuden und Infrastruktur, Wassernutzungsmanagement und bei Naturschutzprojekten.

## **6. Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change in Multiple Regions and Sectors**

(keine aggregierte Dokumentation; Quellen: [j], [16])

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Frameworks, konzentriert sich das AIACC auf die Verbesserung des wissenschaftlichen Verständnisses der Gefährdung und der Möglichkeiten durch den Klimawandel. Es stellt mehr eine Sammlung von Werkzeugen dar, als ein ausgearbeitetes Programm mit festgelegten Schritten, wobei vor allem die Einbindung von bereits bestehenden Modellen im Vordergrund steht. Das von der Global Environment Facility [g] finanzierte Gemeinschaftsprojekt von START [k], der Third World Academy of Sciences [l], dem United Nations Environment Programme (UNEP) [c] und dem IPCC [a], findet weltweit Anwendung in den AIACC Regional Studies, die sich sehr in Zielsetzung, wissenschaftlicher Herangehensweise und zu adaptierenden Sektoren unterscheiden. Aber bei allen steht das Einbinden der Akteure, das Verstehen der Gefährdungsmomente und die Erweiterung der Datenbasis für Adaptionsstrategien im Fokus. Wie man sieht, gibt es einige wesentliche Unterschiede zwischen existierenden Frameworks, die als Leitfaden für erfolgreiche Adaptionsprozesse dienen sollen. Große Differenzen gibt es zum einen in der Frage für wen sie gemacht sind, ob für Entwicklungsländern oder Industrienationen, was zu gänzlich anderen Ansprüchen an monetäre und gesellschaftliche Ressourcen, Datenlage und wissenschaftliches Know-how führt. Und zum anderen ob die Studie ihren Schwerpunktsetzung auf Climate Impact, Climate Vulnerability, Adaption Policy Assessment oder eine beliebige Kombination aus diesen setzt. Eine weitere Klasse von Frameworks ist zudem eigens für bestimmte Sektoren geschrieben, was zu weiteren Unterscheidungen führt. Generell kann man sagen, dass sich in der Geschichte der Klima-Adaptions-Frameworks bisher einiges getan hat und man aus den Erfahrungen früher Frameworks und Projekte viele Verbesserungen verwirklichen konnte, aber dieser Prozess ist auch sehr sicher noch nicht am Ende. Vermutlich werden gerade die IPCC-

Berichte von 2007 zu einer neuen Generation von Arbeiten über den Umgang mit dem Klimawandel - oder genereller über Adaption in Zeiten des Klimawandels - führen.

## **5. Basiskonzepte der Adaption**

Um sich auf eine veränderte oder sich verändernde Situation einzustellen, kann ein Akteur im Allgemeinen zwischen einigen verschiedenen Optionen wählen, die jeweils ihre Vor- und Nachteile haben. Da es aber nicht einen Akteur aus einem Sektor mit einem Gefährdungsprofil und einer Hierarchie von Zielen gibt, ist die Gesamtzahl an möglichen Adaptionsstrategien nahezu unüberschaubar. Daher macht es Sinn sie in Basiskonzepte zu klassifizieren. Weit verbreitet ist hierbei die Einteilung von Burton et al (1993) [17], die auch im UNEP Handbook [2] und den IPCC Guidelines [9] Anwendung findet, welche ich im Folgenden als Quelle benutze. Unterschieden werden acht Gruppen von Lösungsansätzen:

### **1. Negative Einwirkungen ertragen**

Diese Strategie ist ihrem Wesen nach rein passiv und besteht aus dem tatenlosen Ertragen von positiven wie negativen Auswirkungen, die aus dem Klimawandel erwachsen. Dies mag sich jetzt nach einer „Anti-Strategie“ in einer sich verändernden Umwelt anhören, aber sie kann zumindest als Vergleichsbasis mit anderen Ansätzen dienen, an Hand derer man die Effizienz der Alternativoptionen bewerten kann. Zudem kann sie eine gute Wahl im Vergleich zu blindem und eventuell maladaptiven Aktionismus sein. In der Realität findet diese Methode meist „Verwendung“, wenn (a) kein Bewusstsein existiert, dass eine Adaption notwendig ist; (b) die Akteure keine Ressourcen für einen Adaptionsprozess haben (also z.B. in extrem armen Ländern); oder (c) das Kosten-Nutzen-Verhältnis der anderen Optionen so schlecht ist, dass Nichtstun die beste Alternative ist.

### **2. Belastungen verteilen**

Eine andere rein passive Strategie ist es auftretende, ungleiche Belastungen gerecht und gleichmäßig auf viele Schultern zu verteilen, um den Einzelnen zu schützen. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn nur wenige Mitglieder einer Gemeinschaft betroffen sind und es überhaupt möglich ist den Schaden zu teilen – zum Beispiel durch Geld-, Naturalien- oder Arbeitskrafttransfer. Diese Art der Adaption findet sich in unterschiedlicher Ausprägung und Realisierung zum einen in traditionellen Gesellschaften, in denen es enge soziale Strukturen wie Sippen oder Stammesgemeinschaften gibt und zum anderen in vielen der modernen Gesellschaften. Was in Sippen und Stämmen oft autonom als Ergebnis gegenseitiger Hilfsbereitschaft passiert, ist in den entwickelten Ländern meist über ein komplexes Netz von Abgaben und Steuern auf der einen Seite und Subventionen und direkter staatlicher Intervention auf der anderen Seite sichergestellt. Aber auch in den modernen Gesellschaften können private Hilfsprojekte zu einer autonomen Umverteilung führen. Zu guter Letzt tragen auch Werkzeuge, wie Privatversicherung zu eben diesem Zweck bei.

### **3. Bedrohung selbst abändern/mildern**

Bei dieser Methode, reagiert man nur auf diejenigen Aspekte des Klimawandels bzw. des Klimas, die eine direkte Bedrohung darstellen und versucht das Ausmaß möglicher Schädigungen zu reduzieren. Als Beispiel kann man auf Überflutungen mit dem Bau von Dämmen, Deichen und Überlaufbecken reagieren und so die Gefährdung von Wirtschaft und Bevölkerung reduzieren. Im weiteren Sinn könnte man aber auch die übergeordnete Bedrohung Klimawandel mit in dieses Konzept integrieren. Dann wäre das Ziel die Erwärmung des Klimas zu verlangsamen, womit wir bei der klassischen mitigativen Problemstellung wären. Mitigation stellt so gesehen also eine besondere Form der Adaption dar. In dieser Arbeit wollen wir aber der Einteilung des IPCC folgen und diesen Bereich nicht tiefergehend behandeln.

### **4. Auswirkungen mildern**

Dieser Punkt hört sich zunächst sehr ähnlich zu dem Vorrangehenden an, aber bei dieser Strategie setzt man nicht zwangsläufig bei der Bedrohung selbst an, sondern versucht nur die Auswirkungen dieser Bedrohung zu reduzieren. Als Beispiel könnte man einen Fall aus der Landwirtschaft nehmen: Trockenheit führt zu Ernteausfällen. Wenn man jetzt versucht etwas gegen die Ursache „Es fällt zu wenig Regen“ für das Problem „Ernteerträge sind zu gering“ zu tun (zum Beispiel durch künstlichen Regen), wäre es eine Antwort nach dem Prinzip „Bedrohung

mildern“. Wenn der Feldbesitzer jetzt aber stattdessen versucht die Trockenmonate bei der Planung für Einsaat und Ernte zu berücksichtigen und/oder die Ernteerträge durch Dünger, etc. steigert, hätte man sich nur mit der Korrektur der Auswirkungen befasst. Künstliche Bewässerung wäre nach meinem Verständnis jetzt eine Mischform aus beiden Strategien, woran man sieht, dass es bei dieser Klassifizierung durchaus Überschneidungen geben kann und die Einordnung nicht immer eindeutig ist. Ein weiterer Fall wäre wahrscheinlich, wenn der Landwirt aus dem obigen Beispiel sich nun für eine andere, trockenheitsresistentere Feldfrucht entscheidet. Das wäre dann erneut ein Mix aus dem Versuch die Auswirkungen zu mildern und der folgenden Strategie.

### **5. Anpassung der Nutzung**

Wenn die Fortsetzung der bisherigen Nutzungen nicht mehr, oder nur unter extremen Kosten und/oder Risiken, möglich ist, dann besteht eine Option darin über eine geänderte Nutzung der Region oder der Ressource nachzudenken. So könnte, wie bereits oben erwähnt, ein von Dürre betroffener Landwirt auf andere Feldfrüchte umsatteln – was eine eher graduelle Anpassung der Landnutzung bedeuten würde. Eine größere Anpassung wäre eine Aufforstung der Felder zu einem Waldgebiet, was die Möglichkeit der wirtschaftlichen Nutzung erhält oder noch radikaler die Umwidmung zu einem Wohn- oder Naherholungsgebiet. Solche Nutzungsanpassungen müssen in der Regel von dem Besitzer entschieden oder umgesetzt werden, es ist aber auch möglich, dass der Staat in bestimmten Fällen und/oder als Teil einer übergeordneten regionalen Strategie auch solche Anpassungen forciert oder erzwingt – zum Beispiel, wenn Grundstücke in der Überschwemmungszone eines Staudamms liegen.

### **6. Räumliche Verlagerung**

Die Verlagerung von wirtschaftlichen Aktivitäten oder gesellschaftlichen Strukturen, stellt eine andere Klasse von relativ massiven Anpassungsmaßnahmen dar. So gibt es derzeit Spekulationen, ob es zukünftig eine Verlagerung der Hauptproduktionsgebiete von Getreideprodukten und anderen Hauptnahrungsmitteln geben muss, um die Versorgung der Bevölkerung zu gewährleisten. Man denke da zum Beispiel an eine Verlagerung des so genannten „wheat belt“ der USA ein paar Breitengrade nach Norden. Ein anderes Szenario ist

die mehr oder weniger geplante Evakuierung von durch den Anstieg des Meeresspiegels gefährdeten Regionen. Wie man an diesen Beispielen sieht, können bei dieser Adaptionsstrategie extreme Mengen an Ressourcen und auch nicht unwesentliche an Zeit und Planung benötigt werden. Zudem ist der Mensch oft nicht gewillt sich „verlagern zu lassen“, was solche Vorhaben auch politisch zu einem heiklen Thema werden lässt.

## **7. Forschung**

Diese Art der Anpassung an eine unsichere Umwelt hat sich beim Menschen über Jahrtausende bewährt. Wenn die Forschung dazu beitragen kann mithilfe neuer Technologien und Techniken die Bedrohung direkt zu verringern, die Adaptionsmöglichkeiten zu erweitern oder ganz neue Adaptionsstrategien zu entwickeln, kann sie wesentlich dazu beitragen die Anfälligkeit der Gesellschaft für Gefahren in Folge des Klimawandels zu reduzieren.

## **8. Bildung und Information**

Ein weiterer Ansatzpunkt kann eine Anpassung der Bildung sein, so dass die Menschen lernen vernünftig mit dem Problem des Klimawandels und eines variablen Klimas überhaupt umzugehen. Dies muss aber nicht auf die Schulbildung beschränkt sein, sondern kann auch durch Maßnahmen zur Erwachsenenbildung und Informationskampagnen für die gesamte Gesellschaft ergänzt werden. Ziel dieser Maßnahmen kann zum einen eine Änderung im Verhalten der Menschen sein, was sich unter Umständen dann in verschiedenen „quasi-autonomen“ (da nur durch die Informationen angestoßenen) Anpassungen äußern kann. Es könnte aber auch nur Absicht sein, die Bereitschaft der Bevölkerung für zentral

geplante und durchgeführte Adaptionsprojekte zu erhöhen.

Die IPCC Technical Guidelines führen auch noch die Option „Restoration“ auf, deren Ziel es ist ein von negativen Einwirkungen betroffenes System wieder auf seinen vorherigen Zustand zu bringen. Man kann aber darüber streiten, ob es sich hierbei wirklich um eine Adaption im klassischen Sinne handelt, da nichts getan wird um die Schadensanfälligkeit der betroffenen Region bzw. des betroffenen Sektors zu Verringern. Man könnte es daher sogar als Maladaptation einordnen.

Wie man bereits gesehen hat, gibt es bei dieser Klassifizierung das gleiche Problem, wie bei vielen Klassifizierungsversuchen, die auf eine bereits bestehende, unübersichtliche, inhomogene und aus Elementen mit vielen Merkmale bestehende Menge angewendet werden: die Klassifizierung ist nicht immer eindeutig. Aber die Einteilung nach Burton et al (1993), dürfte trotzdem einen guten Überblick über die generellen Möglichkeiten geben, die der Mensch hat, wenn er sich den Herausforderungen der globalen Erwärmung und des Klimas allgemein stellen will.

## **6. Adaption in einzelnen Sektoren**

Dieses Kapitel soll einen generellen Überblick über die tatsächliche Problemstellung für eine Adaption in einzelnen, für den Menschen wichtigen, Sektoren geben. Es soll zum einen anhand der neusten Ergebnisse des IPCC-Berichts [1] beleuchtet werden, welchem Adaptionsbedarf Akteure auf diesen Gebieten gegenüberstehen. Zum anderen sollen für die einzelnen Bereiche konkrete Adaptionsstrategien vorgestellt werden, die eine Vorstellung des menschlichen Handlungsspektrums vermitteln sollen (hauptsächlich aus [1] und [2]).

### **1. Wasser**

Schon seit jeher, steht und fällt die Besiedelung eines Lebensraums durch den Menschen mit der Frage, ob er Zugang zu ausreichend Frischwasserressourcen erlangen kann. In vielen Regionen der Welt wird man bei der Sicherstellung der Wasserversorgung vor ein Problem gestellt – entweder dann, wenn quasi kein sauberes Wasser vorhanden ist, oder wenn dieses räumlich und/oder zeitlich ungünstig verteilt ist. Der Mensch kann in diesem essentiellen Sektor aus einem reichen Schatz an Erfahrung schöpfen, wie man sich an bestimmte Wasserverhältnisse adaptiert und nach den jüngst veröffentlichten, neuen Einschätzungen der Experten des IPCC wird es auch notwendig sein auf dieses Wissen zurückzugreifen. So wird es vermutlich in den niedrigen Breitengraden und vor allem in den bereits von Trockenheit gefährdeten Gebieten zu einer Zunahme und Verstärkung von Dürreereignissen kommen. Da der weltweite Wasserbedarf aufgrund von Bevölkerungswachstum und Industrialisierung

höchstwahrscheinlich stark ansteigen wird, ist zudem mit einer Verschärfung des in vielen Regionen herrschenden Mangels zu rechnen. In den höheren Breitengraden und einigen Tropengebieten, könnten hingegen die Pegelstände der Flüsse ansteigen, was ein erhöhtes Überflutungsrisiko nach sich zieht. Letzt genannte Entwicklung ist zum einen durch die prognostizierte Erhöhung der durchschnittlichen Regenmenge fernab des Äquators bedingt und zum anderen durch das fortschreitende Abschmelzen der Gletscher in den Hochgebirgsregionen. Generell wird eine Zunahme von Extremwetter- bzw. Extremklimalagen vorausgesagt, was die Planung der Wasserversorgung erschweren dürfte, da es die Unsicherheits- und Risikofaktoren erhöht.

Die Maßnahmen gegen Unsicherheiten bei der Bereitstellung von Wasser für menschliche Aktivitäten werden vom UNEP-Handbook in zwei Oberklassen unterteilt: Anpassung der Wasserversorgung und Anpassung des Wasserverbrauchs. In der ersten Kategorie findet man sowohl Anpassungen der existierenden Infrastruktur (zum Beispiel Verwendung von geschlossenen Leitungen statt von offenen Kanälen, Einbau zusätzlicher Turbinen oder Erhöhung der Dämme), als auch Bau neuer Infrastruktur (Reservoirs, Wasserwerke, Leitungen, etc.) oder ein alternatives Management der Wasserverteilung (etwa eine Änderung der Wasservergabeprioritäten und -regeln oder eine Koordinierung von Bereitstellung und Verbrauch). In der zweiten Gruppe von Werkzeugen findet man als erstes Methoden, die der Bewahrung oder dem effizienten Einsatz der Ressource Wasser dienen (von Sparwasser-Toiletten, über Nachtbewässerung in der Landwirtschaft bis hin zu Recycling von Wasser in Industriebetrieben), zum zweiten die Entwicklung von wassersparenden Technologien und als letztes Strategien, deren Ziel die Steuerung des Wasserverbrauchs über Preise oder andere Marktprinzipien ist.

## **2. Küstenzonen**

Ein auch in den Medien sehr präserter Knackpunkt des Klimawandels ist die Bedrohung der Küstenzonen: Durch das Aufheizen der Atmosphäre schmelzen die Eiskappen der Pole, sowie die Gletscher der Hochgebirge, was die Wassermenge in den Ozeanen erhöht. Zudem sorgt die Erwärmung auch für eine Ausdehnung des Wassers, was ebenfalls den Meeresspiegel steigen lässt. Weltweit sind Abermillionen Menschen von dieser Entwicklung betroffen, da gerade in Küstenregionen die Siedlungsdichte oftmals besonders hoch ist – man denke nur an die

Megaflussdeltas in Afrika oder Asien. Noch Brisanter ist das Thema für Inselstaaten, von denen einige regelrecht im Meer zu versinken drohen. Die erste Arbeitsgruppe des IPCC schätzt das „Normal Null“ bis zum Jahr 2100 um einen viertel bis einen halben Meter höher liegen könnte, als noch 1990 – und weiter steigen würde. Was das konkret heißen kann, ist bei Nicholls und Mimura (1998) [18] (zitiert aus Nichols und de la Vega-Leinert (2000) [19]) nachzulesen. Demnach wären allein in Deutschland etwa 3,2 Millionen Menschen von einem Meeresspiegelanstieg um einen Meter betroffen und 309 Tausend durch Sturmfluten gefährdet, weiterhin würden 13.900 km<sup>2</sup> Land verloren gehen und volkswirtschaftliche Schäden in Höhe von 7,5 Milliarden US\$ entstehen. Vor welches Problem man gestellt wird, wenn es darum geht eine Küstenregion an den Meeresanstieg „zu adaptieren“, sieht man, wenn man dies mit den Kosten vergleicht, die Nicholls und Mimura für einen adäquaten Schutz dieser Gebiete angeben: 23,5 Milliarden US\$. Volkswirtschaftlich würde sich demnach eine Evakuierung der Gebiete lohnen. Anders sieht es hingegen für Holland aus. Hier stehen Erhaltungskosten in Höhe von 12,3 Milliarden US\$ mögliche Verluste von exorbitanten 186 Milliarden US\$ gegenüber – da rentiert sich der Küstenschutz. Aber steigende Meere hätten neben großflächigen Überflutungen und erhöhter Bedrohung durch Sturmfluten noch andere Auswirkungen, wie zum Beispiel steigende Grundwasserspiegel und Versalzung der Gebiete hinter den Deichen aufgrund von eindruckendem Meerwasser.

Die Frage, was der Mensch gegen diese Bedrohung unternehmen kann, führt im Wesentlichen zu drei Antworten. Wie man bereits am Beispiel von Deutschland in der Untersuchung von Nicholls und Mimura gesehen hat, kann es unter bestimmten Umständen das vernünftigste sein die betroffenen Landstriche in einer Aktion geordneten Rückzugs zu verlassen – wenn es Rückzugsräume gibt. Das genaue Gegenteil dieses ersten Ansatzes ist die Verteidigung der Landmasse durch den Bau von entsprechenden Anlagen bzw. der Aufrüstung der bereits bestehenden. Der Erhalt der Küstenlinie um jeden Preis kann jedoch schwerwiegende Folgen für die maritimen Ökosysteme haben, da in die natürlichen Verhältnisse massiv eingegriffen wird. Einen Kompromiss besteht in Möglichkeit Nummer drei, der alternativen Nutzung der Regionen. Hierbei ist der Mensch wahrscheinlich ebenfalls auf Areale zum Ausweichen angewiesen, aber der „verlorene“ Boden kann in anderer Form weiter genutzt werden und zum Wohlergehen des Staates beitragen - eine sinnvolle alternative Nutzung wird aber wohl nur in einigen Fällen möglich sein.

### **3. Gesundheit**

Auch die menschliche Gesundheit ist in vielerlei Hinsicht vom Klima abhängig, wodurch die Auswirkungen eines Klimawandels auf die Gesundheit nur schwer genau einzuschätzen sind und auch die Adaption zu einer höchstkomplexen Aufgabe wird. Die Experten rechnen mit einer Zunahme von direkt hitzebedingten Sterbefällen und mit Schäden an Leib und Leben zahlreicher Menschen durch extreme Wetterereignisse, wie Tornados und Sturmfluten. Dies sind die unmittelbarsten Folgen der Erderwärmung. Etwas indirekter machen sich Mangel- und Fehlernährung bemerkbar, die sich aber auch aufgrund von klimatischen Veränderungen und den daraus resultierenden schlechteren Landwirtschaftsbedingungen ausbreiten werden. Genauso verhält es sich mit Krankheiten, die sich durch den Gebrauch verunreinigten Trinkwassers verbreiten. Vor allem die Menschen in den Städten werden vor ein weiteres Problem gestellt, denn es ist hier mit einer Zunahme von Atemwegserkrankungen in Folge steigender Ozonkonzentrationen zu rechnen. Noch eine andere Bedrohung rührt von der Ausbreitung verschiedener Krankheitsüberträger her. So wird unter anderem mit der Ausbreitung von Malaria gerechnet, wenn die Überträger der Krankheit, die Anopheles-Mücken, auch in momentan noch zu kühlen Gegenden der Erde heimisch werden könnten. Aber auch zahlreiche andere Krankheiten, deren Vektoren momentan auf die tropischen und subtropischen Regionen beschränkt sind, könnten in die zurzeit noch gemäßigten Klimate vordringen. Auf der positiven Seite des Klimawandels dürfte der Rückgang von kältebedingten Erkrankungen zu finden sein – diese Tatsache wird aber die Gesamtbilanz wohl nicht retten können. Dem breiten Spektrum von Problemen steht zum Glück auch eine Palette von Adaptionsmaßnahmen gegenüber. Diese fängt an bei der Aufklärung der Bevölkerung über den richtigen Umgang mit Hitzewellen und möglichen Krankheitsüberträgern, reicht über technologische und infrastrukturelle Anpassungen (an Klima angepasste Wohnräume, Moskitonetze, Wasserfilter, Kläranlagen) und verbesserte Kontrollen der gesundheitssensiblen Bereiche bis hin zu Eingriffen in die Ökosysteme (grüne Lungen in Städten, angepasste Landnutzung, Bekämpfung von Krankheitsüberträgern) und natürlich letztlich auch medizinische Interventionen. Wenn diese Methoden zum Einsatz kommen, lassen sich wahrscheinlich einige der negativen Folgen des Klimaumbruchs mildern, aber da dies nicht zuletzt eine Frage der zur Verfügung stehenden Finanzmittel ist, werden auch in diesem Bereich vor allem die ärmeren Länder Nachteile erfahren.

### **4. Nahrungsmittel- und Forstwirtschaft**

Die Ernährung der Weltbevölkerung in der Zukunft ist ein weiterer Punkt, der auch ohne ein Aufheizen der Atmosphäre - inklusive dem Verschieben von Klimazonen - schon kompliziert genug wäre. Aber auch hier wird sich der Mensch massiven Veränderungen gegenübersehen. Der IPCC-Bericht rechnet für die mittleren und höheren Breiten mit einem leichten Anstieg der landwirtschaftlichen Produktivität – jedenfalls so lange, wie sich der Temperaturanstieg in diesen Gebieten in einem gewissen Rahmen bewegt. Jenseits dieses Toleranzbereichs ist mit einer Abnahme zu rechnen. In den niedrigen Breiten werden sich die Bedingungen für Ackerbau und Viehzucht wahrscheinlich in Folge von Trockenheit, Hitze, Überflutungen, Erosion und der Ausbreitung von Schädlingen verschlechtern. Die derzeitigen Szenarios sehen derzeit insgesamt einen leichten Anstieg der weltweiten Produktivität voraus, solange sich der mittlere Temperaturanstieg zwischen 1 und 3°C bewegt. Auch für die Primärproduktivität der Wälder wird ein leichter Anstieg prognostiziert, wobei es von Region zu Region zu starken Schwankungen kommen kann. Die Fischfangindustrie wird sich auf eine andere Verteilung der Fischvorkommen einstellen müssen und auch die Menge einzelner Fischarten wird sich unterschiedlich entwickeln – wie sich das Ökosystem Meer aber genauer verhält und was das für Auswirkungen auf seine Flora und Fauna hat, ist noch nicht zu beantworten.

Der Bereich der Nahrungsmittelproduktion ist sehr groß und uneinheitlich, was auch zu einer großen Diversität bei den Adaptionskonzepten führt. Ich werde im Folgenden daher nur beispielhaft einige der Möglichkeiten im Bereich des Ackerbaus vorstellen, doch hierbei kann man sehr schön auch gleich die verschiedenen möglichen Hierarchiestufen der Intervention zeigen. Auf der ersten Stufe stehen die Anpassungen direkt auf den Farmen. Hier bestehen als wesentlichen Optionen die Anpassung der Feldfrüchte an das Klima (höhere Resistenz gegen Trockenheit oder Schädlinge, schnellere Reife, etc.), die Anpassung der Feldbestellung und des Managements (Anbau auf Terrassen, bodenschonendes Pflügen, Variation der Pflanz und Erntezeiten, etc.) und die Anpassung der Bewässerung, Düngung und des sonstigen Eintrags von Stoffen. Die zweite Hierarchieebene wird durch kommunale Dorf- oder Sippenstrukturen gebildet. In diesen Systemen kann die Schadensanfälligkeit durch eine Mischung von technologischen, ökonomischen und sozialen Komponenten reduziert werden. So kann ein Zusammenschluss von mehreren landwirtschaftlichen Kleinbetrieben durch eine gemeinsame Strategie zu einer Aufgaben und Risikoverteilung kommen, die für alle von Vorteil ist. Dies geht von Arbeits- und Werkzeugpools über die Zusammenstellung eines optimalen Anbaumixes (die einen produzieren für die Versorgung der Kommune mit Nahrungsmitteln, die anderen Cash Crops für den Verkauf – je nach Eignung der Felder) bis hin zur Schaffung gemeinschaftlicher

Bildungs- und Versorgungseinrichtungen. Die dritte und letzte Hierarchieebene stellt der Staat dar – er kann Einfluss auf die Forschung nehmen und versuchen so gezielt die Entwicklung neuer Strategien, Techniken und Saatgutsorten voranzutreiben. Er kann mithilfe von Bildung und Erwachsenentraining das Bewusstsein für Probleme und Lösungen für die Landwirtschaft in Zeiten der Erderwärmung schaffen. Er kann mithilfe von Lebensmittelprogrammen und anderen sozialen Sicherungen das Gefährdungspotential reduzieren und durch Subventionen versuchen eine nachhaltige Bewirtschaftung attraktiv zu machen. Zu guter Letzt trägt er Verantwortung für die Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur – sprich überregionale Bewässerungsstrategien, sowie Einrichtungen für Transport, Verteilung und Marktintegration der Agrarerzeugnisse. Ähnliche Möglichkeiten zur Subsidiarisierung bieten sich auch in der Weidewirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei und anderen ähnlichen Sektoren, die, wenn sie genutzt werden, den Adaptionsprozess wesentlich effizienter gestalten können.

## **5. Biodiversität**

Biodiversität beschreibt die Mannigfaltigkeit biologischen Lebens und ist in jedem Ökosystem wichtig für die Stabilisierung gegenüber Störungen und damit zur Aufrechterhaltung der biologischen Funktionen des Systems. Damit ist sie auch bedeutend für den Menschen, denn die Ökosysteme dieser Erde bieten neben dem Bereitstellen von Sauerstoff auch Erholungsmöglichkeiten, wirtschaftlich interessante Ressourcen und Forschungsquellen für die Genetik, Chemie und andere Wissenschaftsbereiche. Gerade in nicht industrialisierten Gesellschaften, sind auch die Beiträge für die Selbstversorgung oft lebenswichtig. Da Ökosysteme extrem komplexe Strukturen und Verhalten aufweisen, sind die Folgen des Klimawandels für sie nur sehr schwer abzuschätzen, aber Erfahrungswerte aus anderen Stresssituationen zeigen, dass sie oft eine relativ hohe Toleranz gegen schädliche Einflüsse aufweisen, dass aber nach dem Überschreiten eines gewissen Grenzwertes ein Zusammenbruch der Systemaktivität auftritt. Die Resilienz eines Systems wird auch durch die Redundanz, die mit einer großen Biodiversität einhergeht, bestimmt. Es werden aber nicht nur direkte Auswirkungen der Erderwärmung als Belastungen für die Naturräume auftreten, sondern auch assoziierte Störungen (Überflutungen, Feuer, Dürren, Übersäuerung der Ozeane) und die Verlagerung und Ausweitung menschlicher Aktivitäten. Die Lebewesen in den Ökosystemen

werden in gewissem Maße autonom auf diesen Stress reagieren, jedoch sehr unterschiedlich gut – abhängig davon, ob sie fähig sind sich anzupassen und ob es ihnen möglich ist sich der Erwärmung und sonstigen Belastung ihrer Lebensräume durch Migration zu entziehen. Gerade diese Migration könnte allerdings weitere Störungen für Ökosysteme nach sich ziehen, die bis dahin keine starken negativen Folgen erleiden mussten. Ökosysteme, für die eine Verlagerung nicht möglich ist (Pol- und Hochgebirgsregionen oder Regionen, die durch Meere begrenzt sind), könnten ganz verloren gehen. Daher sollte der Mensch in seinem eigenen Interesse versuchen die Natur bei der Adaption zu unterstützen, vor allem indem er versucht den anthropogenen Stress zu reduzieren, Habitatfragmentierung und –reduzierung vermeidet und die funktionale Konnektivität zwischen Habitaten erhöht. Zum Erhalt der Biodiversität sind in gewissen Maße zwar auch Naturschutzgebiete, Zoos und (als absolute Minimallösung) auch Samen und Genbanken geeignet, aber dem Schutz der Natur als Ganzem sollte der Vorrang gebühren.

## **7 Projekte**

In diesem Abschnitt möchte ich kurz und beispielhaft zwei Programme vorstellen, die sich auf überstaatlicher Ebene mit dem Klimawandel befassen. Das erste, das NAPA-Projekt (National Adaptation Programme of Action) [m], ist eine Gründung der UNO [n], das im Rahmen des UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change; Inkrafttreten 1994; Ratifizierung durch 189 Länder) [e] gestartet wurde. Ziel des Abkommens ist die Beschaffung und Verbreitung von Informationen über Treibhausgasemissionen, nationale Strategien und erfolgreiche Programme, sowie der Start und die Unterstützung von nationalen Klimaschutz- und Adaptionsprogrammen. Hierbei wurde ein besonderer Schwerpunkt zum einen auf die internationale Kooperation insgesamt und zum anderen auf die Einbindung der am wenigsten entwickelten Länder speziell gelegt. Das UNFCCC hat bisher eine frei zugängliche Sammlung von Frameworks und Tools [o], sowie einen Pool für Projekt- und Erfahrungsbereiche ins Leben gerufen [p] und 15 NAPAs gestartet (in Bangladesh, Bhutan, Burundi, Cambodia, Comoros, Djibouti, Haïti, Kiribati, Madagascar, Malawi, Mauritania, Niger, Rwanda, Samoa und Sénégal). Die NAPAs konzentrieren sich auf die größten und dringendsten Probleme, die zu einer Erhöhung der Schadensanfälligkeit führen könnten, wenn sie auf die lange Bank geschoben

werden und versuchen von diesen Problemen ausgehend eine effiziente, flexible und spezifische Adaption der teilnehmenden Länder zu fördern. Dabei werden auch bewusst derzeitige autonome Adaptionen miteinbezogen und „Graswurzelprojekte“ unterstützt, weswegen auch der transparenten Darstellung des Projekts einige Bedeutung zukommt. Schließlich sollen die Aktionsprogramme mit der vorhandenen Datenbasis auskommen und keinen weiteren Forschungsbedarf induzieren. Der grobe Ablauf der NAPAs sieht eine Synthese der verfügbaren Informationen, eine Erfassung der Interessengruppen und eine Bewertung der Gefährdungssituation und der Adaptionkapazität sowohl der Gesellschaft und des Staates, als auch einzelner Gruppen und Regionen vor. Davon ausgehend sollen dann adäquate Strategien identifiziert werden und eine Ordnung der Priorität verschiedener Aktivitäten stattfinden. Über den ganzen Prozess soll fortwährend eine detaillierte Dokumentation angefertigt werden, die als wertvolle Information für andere Länder dienen soll.

AMICA (Adaptation and Mitigation - an Integrated Climate Policy Approach ) [q], das zweite Projekt, das ich kurz erwähnen möchte, ist eine Zusammenarbeit auf Ebene der EU. Hierbei steht die Entwicklung lokaler und regionaler Strategien, die den Klimawandel umfassend angehen, im Fokus. Um dies zu erreichen, soll eine enge Einbindung in kommunale oder regionale Wirtschafts- und Sozialkonzepte stattfinden. Beispiele für Maßnahmen, die von AMICA unterstützt werden sind das „Grüne Dächer“-Projekt in Stuttgart, die Reduzierung von Ölheizungen in Überschwemmungsgebieten in Oberösterreich und Anpassung in den Niederlanden, die ein „Leben mit Wasser“ ermöglichen sollen.

## **8 Konklusion**

Der Klimawandel wird höchstwahrscheinlich eine der größten Herausforderungen für die Menschheit in den nächsten Jahrzehnten sein – welche Belastungen dabei genau auf uns zukommen ist noch nicht absehbar, wird aber derzeit mit Hochdruck erforscht. So wie es aussieht, werden die Zumutungen für den einzelnen Menschen sehr unterschiedlich sein - abhängig von der geographischen Lage, der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung sein Heimatlandes und seiner eigenen Position in diesem Staat. In jüngster Zeit wurden viele Ansätze geschaffen um die Belastungen genauer einschätzen zu können und um – als nächsten

Schritt – Maßnahmen zur Reduktion dieser Bürde zu planen. Diese Projekte sind so divers, wie die Probleme, die die Klimaveränderungen nach sich ziehen. Viele von ihnen müssen sich erst in der Realität bewähren und die Entwicklung die auf diesem Gebiet stattgefunden hat, wird sich auch noch in der Zukunft fortsetzen. Auch die Adaptionstrategien als solche sind zum jetzigen Zeitpunkt oft noch in der Testphase und ihre Langzeitauswirkungen werden teilweise erst Jahre oder Jahrzehnte später absehbar sein. Trotzdem sollte der Mensch die Adaption schon jetzt umfassend beginnen, damit die unvermeidlichen und unter Umständen schmerzhaften Anpassungsprozesse später nicht zu heftig einsetzen. Denn der Klimawandel wird nicht auf uns warten.

## **Literatur**

### **Artikel, Bücher und Vorträge:**

- [1] Die Synthese des „Fourth Assessment Report: Climate Change 2007“ lag bei der Erstellung dieser Ausarbeitung noch nicht vor. Die Berichte der einzelnen Arbeitsgruppen sind aber schon wie folgt veröffentlicht.

- Working Group I Report "The Physical Science Basis":

<http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>

(ISBN 978 0521 88009-1 Hardback; 978 0521 70596-7 Paperback)

- Working Group II Report "Impacts, Adaptation and Vulnerability"

<http://www.ipcc-wg2.org/>

(ISBN 978 0521 88010-7 Hardback; 978 0521 70597-4 Paperback)

- Working Group III Report "Mitigation of Climate Change"

[http://www.mnp.nl/ipcc/pages\\_media/AR4-chapters.html](http://www.mnp.nl/ipcc/pages_media/AR4-chapters.html)

(ISBN 978 0521 88011-4 Hardback; 978 0521 70598-1 Paperback)

- [2] J. Feenstra, I. Burton, J. Smith, and R. Tol (eds.) (1998). "Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies". United Nations Environment Programme, Nairobi, and Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam.

[http://www.falw.vu.nl/images\\_upload/151E6515-C473-459C-85C59441A0F3FB49.pdf](http://www.falw.vu.nl/images_upload/151E6515-C473-459C-85C59441A0F3FB49.pdf)

- [3] J. Abramovitz, T. Banuri, P.O. Girot, B. Orlando, N. Schneider, E. Spanger-Siegfried, J. Switzer, A. Hammill (2002). "Adapting to Climate Change: Natural Resource Management and Vulnerability Reduction" – "Background Paper to the Task Force on Climate Change, Adaptation and Vulnerable Communities"

[http://www.iisd.org/pdf/2002/envsec\\_cc\\_bkqd\\_paper.pdf](http://www.iisd.org/pdf/2002/envsec_cc_bkqd_paper.pdf)

- [4] *Vortrag*: UNDP (2005). "Adaptation to Climate Change Guidance to Programming Opportunities" – Vortrag im Rahmen des "Energy and Environment Practice Meeting" 27-28 September 2005 in Bratislava

[http://europeandcis.undp.org/files/uploads/Milada/CoPmtg0509/Adaptation\\_practice\\_meeting.ppt](http://europeandcis.undp.org/files/uploads/Milada/CoPmtg0509/Adaptation_practice_meeting.ppt)

- [5] H.-M. Füssel, R.J.T. Klein (2002). „Vulnerability and adaptation assessments to climate change: An evolution of conceptual thinking". In UNDP Expert Group Meeting "Integrating Disaster Reduction and Adaptation to Climate Change", Havana, Cuba.

- [6] H.-M. Füssel, R.J.T. Klein (2004). "Conceptual frameworks of adaptation to climate change and their applicability to human health". PIK-Report No. 91, des Potsdam Institute for Climate Impact Research.

<http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr91.pdf>

- [7] R.J.T. Klein, R.J. Nicholls (1999). „Assessment of coastal vulnerability to climate change". *Ambio*, 28:182–187.

- [8] UNFCCC Secretariat (2005). „Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change“.

[http://unfccc.int/files/adaptation/methodologies\\_for/vulnerability\\_and\\_adaptation/application/pdf/consolidated\\_version\\_updated\\_021204.pdf](http://unfccc.int/files/adaptation/methodologies_for/vulnerability_and_adaptation/application/pdf/consolidated_version_updated_021204.pdf)

- [9] T.R. Carter, M.L. Parry, H. Harasawa, S. Nishioka (1994). "IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations". London: Department of Geography, University College London

<http://www-cger.nies.go.jp/publication/I015/I015.zip>

- [10] K. O'Brien (ed.) (2000). "Developing Strategies for Climate Change: The UNEP Country Studies on Climate Change Impacts and Adaptations Assessment". Center for International Climate and Environmental Research (Cicero), Oslo.

<http://www.cicero.uio.no/media/314.pdf>

- [11] T. Benioff, S. Guill, J. Lee (eds.) (1996). "Vulnerability and Adaptation Assessments: An International Guidebook". Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

- [12] B. Lim, E. Spanger-Siegfried (eds.) (2004). "Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures". UNDP. Cambridge University Press.

[http://www.undp.org/gef/undp-gef\\_publications/undp-gef\\_publications.html](http://www.undp.org/gef/undp-gef_publications/undp-gef_publications.html)

- [13] *Vortrag*: Bill Dougherty (2004). "The Adaptation Policy Framework - An overview of the new UNDP-GEF product". Stockholm Environment Institute – Boston Center.

Manila, April 2004.

[http://unfccc.int/files/meetings/workshops/other\\_meetings/application/vnd.ms-powerpoint/bd\\_apf.ppt](http://unfccc.int/files/meetings/workshops/other_meetings/application/vnd.ms-powerpoint/bd_apf.ppt)

- [14] *Vortrag*: M. Mwangi (2006). "UNDP-GEF Climate Change Adaptation".

Ghana, 22 September 2006

[http://unfccc.int/files/adaptation/adverse\\_effects\\_and\\_response\\_measures\\_art\\_48/application/pdf/200609\\_undp\\_support.pdf](http://unfccc.int/files/adaptation/adverse_effects_and_response_measures_art_48/application/pdf/200609_undp_support.pdf)

- [15] R.I. Willows, R.K. Connell (eds.)(2003). "Climate Adaptation: Risk, Uncertainty and Decision-Making". UKCIP Technical Report. UKCIP, Oxford.
- <http://data.ukcip.org.uk/resources/publications/documents/4.pdf> (Registrierung erforderlich)
- [16] *Editorial Article*: Neil Leary (Erscheinen unbekannt). "AIACC: Contributing to a Second Generation of Climate Change Assessments".
- zu finden unter: [http://www.aiaccproject.org/publications\\_reports/Pub\\_Reports.html](http://www.aiaccproject.org/publications_reports/Pub_Reports.html)
- [17] I. Burton, R.W. Kates, G.F. White (1993). "The Environment as Hazard". Second Edition. Guilford Press, New York.
- [18] R.J. Nicholls, N. Mimura (1998). „Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications". Climate Research, 11, 5-18
- [19] R.J. Nicholls, A.C. de la Vega-Leinert (2000). "Synthesis and Upscaling of Sea-level Rise Vulnerability Assessment Studies (SURVAS): SURVAS Methodology". Flood Hazard Research Centre, Middlesex University.

### **Internetquellen:**

[a] <http://www.ipcc.ch/>

[b] <http://www.wmo.ch>

[c] <http://www.unep.org/>

[d]

[http://unfccc.int/adaptation/methodologies\\_for/vulnerability\\_and\\_adaptation/items/2674.php](http://unfccc.int/adaptation/methodologies_for/vulnerability_and_adaptation/items/2674.php)

[e] <http://unfccc.int>

[f] <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convger.pdf>

[g] <http://www.thegef.org/>

[h] <http://www.gcrio.org/CSP/uscsp.html>

[i] <http://www.ukcip.org.uk/>

[j] <http://www.aiaccproject.org/>

[k] <http://www.start-org.com>

[l] <http://www.twas.org/>

[m] <http://unfccc.int/adaptation/napas/items/2679.php>

[n] <http://www.un.org/>

[o]

[http://unfccc.int/adaptation/methodologies for/vulnerability and adaptation/items/2674.php](http://unfccc.int/adaptation/methodologies_for/vulnerability_and_adaptation/items/2674.php)

[p] <http://maindb.unfccc.int/public/adaptation>

[q] <http://www.amica-climate.net>





# Klimatrendanalyse

Hauptseminar Systemwissenschaft

Sommersemester 2007

Eingereicht von	Nils Kehrein
Studiengang	Angewandte Systemwissenschaft
E-Mail	nkehrein@uos.de
Dozent	Prof. Dr. Michael Matthies

**1**

Klimatrendanalyse.....	165
Einleitung .....	167
Datenquellen .....	167
Neoklimatologie .....	167
Bodennahe Temperatur .....	168
Radiosonden .....	169
Satelliten .....	170
Paläoklimatologie.....	170
Eisbohrkerne.....	171
Jahresringe.....	171
Trendanalyse.....	173
Methodik.....	173
Signifikanz.....	175
Beobachtete Veränderung.....	177
Temperatur .....	177
Kohlendioxid .....	182
. Ökologie.....	182
Fazit .....	184
Literatur.....	185

## Einleitung

Das Thema Klimawandel wird derzeit vielfältig in den Medien aufgegriffen und thematisiert. Neben den Folgen für Mensch und Umwelt liegt dabei vor allem das Augenmerk auf dem anthropogenen Anteil des Klimawandels. Also jener Teil, den der Mensch wahrscheinlich selbst verursacht hat bzw. beeinflusst. Klimamodelle sagen eine Veränderung der Lebensumstände auf der Erde voraus und sehen das menschliche Handeln dabei als wichtige Antriebsfeder. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu klären, inwieweit sich das Klima wirklich verändert und wie wir dies beobachten können. Kann ein allgemeiner Anstieg der Temperaturen auf der Erde beobachtet werden, wie es die Modelle voraussagen? Wenn eine Erwärmung vorhanden ist, ist es eine ungewöhnliche Erwärmung oder gab es vergleichbare Entwicklungen bereits in der Vergangenheit? Wie schnell verändert sich das Klima? Hat sich die Klimavariabilität verändert? usw. usf.

Einige dieser Fragen sollen in dieser Arbeit nach aktuellem Wissensstand beantwortet werden. Grundlage dafür sind vor allem der dritte und vierte Bericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) [1-4]. Zuerst soll dabei beleuchtet werden, welche Daten bisher zur Verfügung stehen und welche Unsicherheiten mit ihnen verbunden sind. Danach gibt es eine allgemeine Einführung in die Trendanalyse, wie sie sich in der Klimatologie durchgesetzt hat, sowie welche Trends und Veränderungen man derzeit beobachten kann.

## 2 Datenquellen

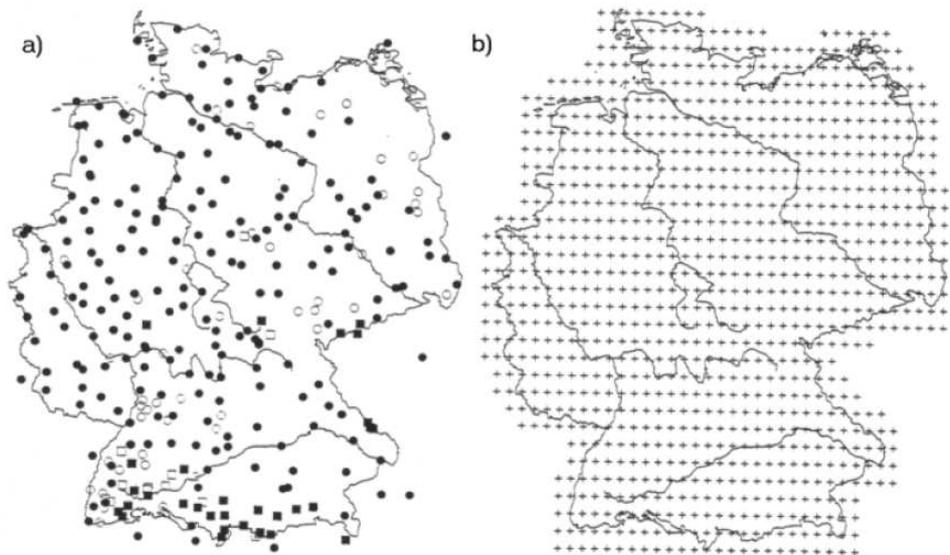
In diesem Kapitel sollen einige wichtige Datenquellen für die Klimatrendanalyse vorgestellt werden. Man unterscheidet dabei zwischen direkt gemessenen Temperaturen aus der Neuzeit (Neoklimatologie) und rekonstruierten Temperaturwerten aus sog. *Proxy*-Daten (Paläoklimatologie). Mit den Methoden sind jeweils spezifische Unsicherheiten und Probleme verbunden, die hier ebenfalls angesprochen werden sollen.

### Neoklimatologie

Die Neoklimatologie befasst sich mit direkt messbaren meteorologischen Größen. Von Interesse bei der Klimatrendanalyse ist dabei vor allem die Temperatur, die zumeist direkt mit Instrumenten in der Atmosphäre gemessen wird.

## Bodennahe Temperatur

Direkte Messungen der bodennahen Temperaturen sind, mit Hinblick auf die Größe klimarelevanter Zeiträume, erst sehr kurz verfügbar. Die ersten, bis heute durchgehenden Messreihen gehen auf das Jahr 1659 zurück ([6], S.1). In ausreichender globaler Abdeckung stehen Daten seit ungefähr 1850/1860 zur Verfügung. Dabei ist die Anzahl der Messstationen von 500 im Jahre 1850, auf heute über 10.000 angewachsen. Die Verteilung der Stationen ist sehr heterogen und konzentriert sich auf die nördliche Hemisphäre ([6], S.10). Sofern globale Mittelwerte der Temperaturen betrachtet werden, stellt die regional sehr unterschiedliche Verteilung aber kaum eine Rolle, da bereits mit 200 Stationen global gute Ergebnisse erzielt werden können. Bei der Betrachtung von Dekadentrends werden global sogar nur noch 21 Stationen benötigt ([6], S.10).



**Abbildung 1:** a) Maximale Datendichte (Stationen) und b) Gitterpunktsystem der Klimatrendanalyse bodennaher Daten Deutschlands, nach Schönwiese [5]

Für die Aufschlüsselung regionaler Veränderungen ist allerdings eine höhere Auflösung der Daten notwendig. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die räumliche Verteilung von Niederschlagsmessstationen in Deutschland, sowie ein uniformes Gitter, auf das die

gemessenen Daten umgerechnet werden. Man erkennt die regional sehr unterschiedliche Dichte und Verteilung von Messstationen. Die Umrechnung auf ein Gitterpunktsystem ist für die Trendanalyse nötig und wird z.B. auch für Temperaturdaten vorgenommen. Sowohl durch die Umrechnung selbst, als auch durch eine u.U. notwendige Interpolation fehlender Messdaten entstehen Fehler in der Trendanalyse. Dieser wird in den vorliegenden Quellen allerdings nicht quantifiziert.

### **Radiosonden**

Radiosonden werden benutzt, um Temperaturdaten aus der Troposphäre und unteren Stratosphäre zu sammeln. Sondendaten stehen seit etwa 1960 zur Verfügung und zurzeit gibt es etwa 800 Startpunkte weltweit, an denen zweimal täglich eine Sonde gestartet werden soll. Durch eine räumlich sehr ungleichmäßige Verteilung der Startpunkte (vor allem in Ländern des Nordens) und durch die technischen Eigenschaften einer Radiosonde ergibt sich

nur ein lückenhaftes Bild der Atmosphärentemperaturen. So haben z.B. nur 74 von 180 Stationen des *Global Climate Observing System Upper Air Network* (GUAN) genügend Datensätze seit 1960, um sie für die Klimaanalyse der Troposphäre verwenden zu können. Für die untere Stratosphäre können sogar nur Daten von 22 GUAN-Stationen verwendet werden ([2], S.120).

Neben fehlenden Daten, stellt auch die Technik selbst eine Herausforderung an die Analyse der gemessenen Daten. So kann es vorkommen, dass durch den Einsatz anderer Messtechnik an den Radiosonden, veränderter Datenverarbeitung oder räumlicher Mittelwertberechnung es zu Trendwechsell in den Daten kommt. Da der Wechsel solcher Eigenschaften nicht für alle Stationen dokumentiert ist, können die daraus resultierenden Effekte mitunter auch nicht korrigierend herausgerechnet werden. So mussten die gemessenen Temperaturen der Stratosphäre von Messstationen in Australien und Neuseeland nach einem Abgleich mit Satellitendaten um bis zu 3°C korrigiert werden, nachdem die Radiosonden mit neuen Messinstrumenten versehen worden waren ([2], S.119).

In einer anderen Studie wurden die gemeldeten Mittelwerte der Stationen mit neu berechneten Mittelwerten aus denselben Daten verglichen. Es ergab sich eine Veränderung der ermittelten Trends von bis zu 0,1°C/Dekade ([2], S.119) -- dies entspricht der Größenordnung der vom IPCC angegebenen Erwärmungstrends der Erde in den letzten Einhundert Jahren ([3], S.243).

Auch durch Erhitzung und Abkühlung der Sonden während des Fluges kann es zu entscheidenden Verfälschungen in den Messwerten kommen. Insgesamt bleiben erhebliche Unsicherheiten bezüglich der gemessenen Werte ([3], S.266ff).

### **Satelliten**

Globale Temperaturdaten mittels Satellitenmessung sind seit etwa 1979 verfügbar. Satelliten gewähren eine gleichmäßige räumliche Abdeckung und sind nicht wie Radiosonden vom aktuell herrschenden Wetter abhängig. Gemessen werden die von der Atmosphäre abgestrahlten Mikrowellen, die dann jeweiligen Temperaturen und Atmosphärenschichten zugeordnet werden können.

Ähnlich wie Radiosonden besitzen auch Satelliten spezielle Probleme bei der Temperaturmessung, die z.T. zu erheblichen Unsicherheiten in den Messwerten führen. So messen Satelliten z.B. durch einen fallenden Orbit geringere Temperaturen, als tatsächlich vorhanden sind. Dies führte in einer Studie zu einem Trendfehler von  $-0,11\text{ °C/Dekade}$ . Des Weiteren konnte verändertes Instrumentenverhalten im All einem Fehler von  $+0,04\text{ °C/Dekade}$

zugeordnet werden. Auch die Erhitzung und Abkühlung des Satelliten im Orbit, das zeitliche

und räumliche Zusammenführen von Datensätzen sowie die Schwierigkeit, die Temperatursignale verschiedener Atmosphärenschichten auseinander zu halten, beeinflussen die Qualität der Daten ([2], S.120). Allerdings gibt es seit dem dritten IPCC-Bericht einige wichtige Fortschritte bei der Auswertung von Satellitendaten. Es wurden weitere Fehlerquellen gefunden, es konnten einige Fehlerquellen durch sorgfältige Auswahl von Messreihen minimiert werden und es gibt eine bessere Einsicht in die Unsicherheit

der Messdaten ([3], S.267ff).

### **Paläoklimatologie**

Die Paläoklimatologie versucht die Bedingungen auf der Erde vor Beginn der Instrumentenmessung zu rekonstruieren. Dazu werden mediumabhängig unterschiedliche *Proxies* (engl. für *Stellvertreter*) benutzt, die Rückschlüsse auf das bei der Entstehung des

Mediums vorherrschende Klima erlauben sollen. Neben bekannten Datenquellen wie Eisbohrkernen werden u.a. auch See- und Meeressedimente, Korallen und Erdbohrkerne zur Datengewinnung benutzt. Dabei werden die im Medium eingeschlossenen Stoffe, wie z.B. spezielle Isotope oder Pollen, quantifiziert und einem Klimazustand zugeordnet.

### **Eisbohrkerne**

Eisbohrkerne werden vor allem in Kanada, Island, Grönland und der Antarktis gewonnen, wobei die Proben aus Grönland und der Antarktis die höchste zeitliche Auflösung und Reichweite aufweisen. Kerne aus der Antarktis erlauben zum Teil die Unterscheidung von Jahreszeiten und reichen bisher 650k Jahre zurück. Durch kommende Bohrungen hofft man auf eine Erweiterung der Daten auf die vergangenen 900k Jahre. In den Proben wird meist der Gehalt eingeschlossener Gase gemessen, die ein Rückschluss auf die Zusammensetzung der Atmosphäre und damit auf das Klima in der Vergangenheit erlauben soll. Abbildung 8 zeigt exemplarisch den zeitlichen Konzentrationsverlauf verschiedener Gase, wie sie aus Eiskernen rekonstruiert worden sind. Neben CO<sub>2</sub> sind vor allem das Wasserstoffisotop Deuterium ( $\delta D$ ) und das Sauerstoffisotop <sup>18</sup>O von Interesse.

Sie erlauben einen direkten Rückschluss auf die vorherrschenden Temperaturen zum Zeitpunkt der Einlagerung. Aber auch der Anteil eingelagerter Pollen enthält Informationen über das vergangene Klima und der Bioaktivität allgemein.

Die größte Herausforderung bei der Verwendung der Eiskerndaten stellt die Datierung der Eisschichten dar. Da die Radiokarbonmethode für die betrachteten Zeiträume nicht verwendet werden kann, müssen z.B. die Spuren von Ereignissen mit globaler Auswirkung benutzt werden. So können eingelagerte Aschen und Säuren von Vulkanausbrüchen, deren Zeitpunkt bekannt ist, Informationen über das Alter des Eises liefern. Darüber hinaus kann das Eis regional sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein, was den Vergleich und Analyse der Eiskerne erschwert.

### **Jahresringe**

Jahresringe von Bäumen erlauben Aussagen über die klimatischen Umstände zum Zeitpunkt des Baumwachstums. Durch die Analyse der Jahresringdicke versucht man Informationen über die vorherrschende Temperatur zu erlangen. Der Vorteil bei der Verwendung von Jahresringen ist die sehr genaue Datierung der Ringe, die zeitliche Auflösung und die meist mögliche

Kalibrierung der Proben gegen andere Datenquellen. Die umfangreichsten Jahresringtabellen reichen lückenlos bis zu 14k Jahre zurück.

Der Nachteil von Jahresringen ist die mangelnde räumliche Verfügbarkeit der Daten. Die meist aus bestimmten Regionen stammenden Proben erlauben damit nur bedingt Aussagen über das globale Klima. Das Baumwachstum ist eine komplexe Reaktion auf die herrschenden Umwelteinflüsse, somit müssen nicht-klimatische Wachstumsfaktoren aus den Jahresringdaten entfernt werden. Außerdem wurde in Studien gezeigt, dass sich die Wachstumsreaktion von Bäumen auf einen Temperaturanstieg über die Zeit verändern kann ([2], S.131). Es hat sich gezeigt, dass Jahresringdaten sich am besten in Kombination mit anderen Proxies verwenden lassen, um Temperaturveränderungen in der Vergangenheit zu bestimmen.

### 3 Trendanalyse

#### Methodik

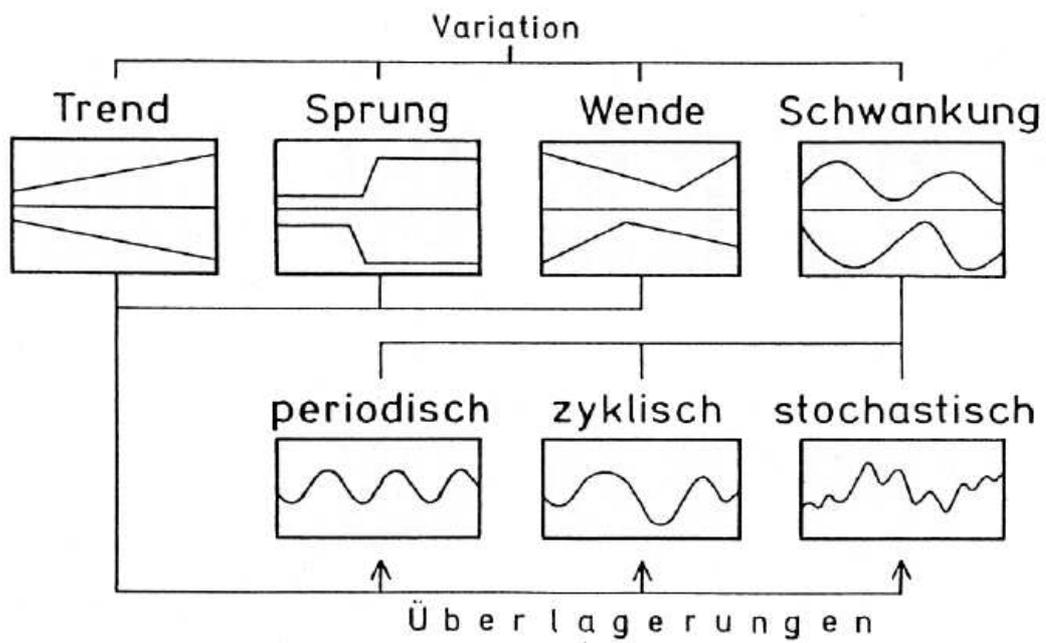
Bei der klimatologischen Trendanalyse betrachtet man die Messreihe eines Klimaelements, in unserem Fall der Temperatur, als Funktion der Zeit. Von Interesse ist für uns dabei der Punkt, wie sich die beobachtete Größe über die Zeit verändert. Abbildung 2 zeigt mögliche Dynamiken einer Zeitreihe. Ein Trend beschreibt eine gleichmäßige Veränderung, ein Sprung ist eine abrupte Änderung, die sich bei höherer zeitlicher Auflösung u.U. auch als Trend äußern kann. Eine Wende beschreibt eine Veränderung im Trendverhalten, die Schwankung beschreibt eine Abfolge von Minima und Maxima mit zyklischen/rhythmischen/stochastischem oder periodischem Verhalten. Letzteres kommt in der Klimatologie kaum vor ([6], S.1).

Abbildung 3 zeigt verschiedene Alternativen zur Trendberechnung anhand einer imaginären Zeitreihe auf. Die Berechnung eines Trendwertes ist wichtig, um einen Vergleich zwischen verschiedenen Trends herstellen zu können oder um allgemein eine durch einen Trend dargestellte Veränderung quantifizieren zu können. Abbildung 3a zeigt die Verwendung eines linearen Trends, sprich einer linearen Regression. Der Trend  $T$  berechnet sich dabei als Differenz der Endpunkte der Regressionsgeraden. Bei einem quadratischen Trend wird ein Polynom vom Grade 2 durch die Zeitreihendaten gelegt (vgl. Abb. 3b). Der Trend berechnet sich wieder aus der Differenz der Endpunkt der Regressionskurve -- quadratische und andere nicht-lineare Trends haben sich nicht durchgesetzt, da sie nur selten besser mit den Daten korrelieren als lineare Trends. Daneben gibt es noch eine ganze Reihe von Techniken, die hier im Detail nicht erläutert werden sollen (siehe [6]). Allgemein werden alle Abweichungen vom Mittelwert der Zeitreihe als Anomalie bezeichnet, dies ist eine rein technische und nicht bewertende Bezeichnung.

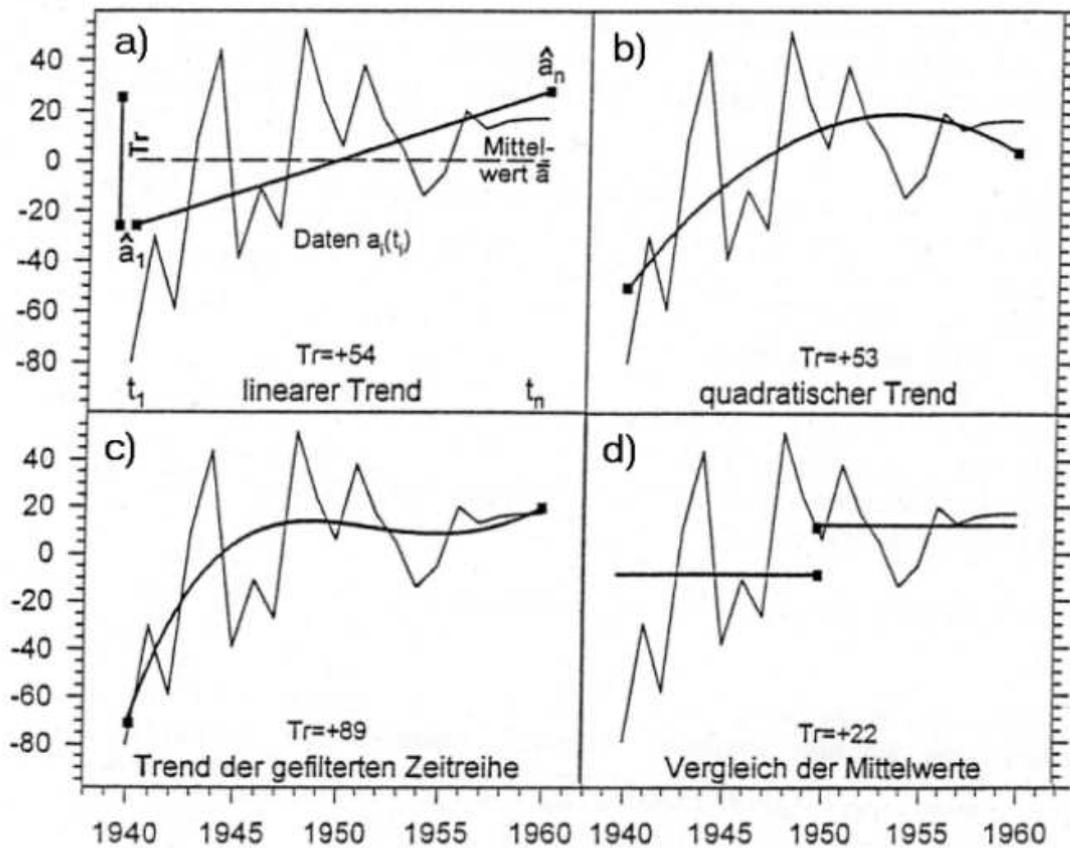
Bei der Trendanalyse hat sich die lineare Regression als die am häufigsten verwendete Technik durchgesetzt. Lineare Trends haben die Form

$$\hat{a}_i = A + Bt_i \quad \text{für } i = 1, \dots, n$$

wobei die Koeffizienten  $A$  und  $B$  aus den Daten der Zeitreihe bestimmt werden. Der Trend  $T$  ist definiert als  $T = \hat{a}_n - \hat{a}_1$  d.h. die Differenz der Funktionswerte der Regressionsgeraden zu Anfang und Ende des betrachteten Zeitraums (vgl. Abb. 3a).



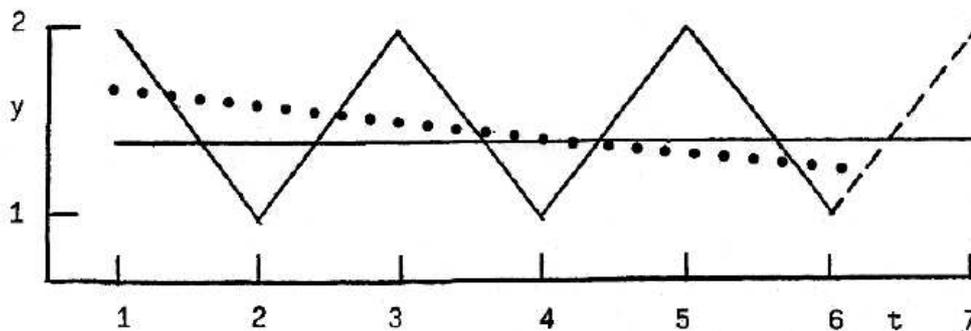
**Abbildung 2:** Unterscheidung der verschiedenen Strukturkomponenten klimatologischer Zeitreihen, nach Schönwiese [6]



**Abbildung 3:** Verschiedene Möglichkeiten der Trendberechnung, nach Schönwiese [6]

### Signifikanz

Bei der Bestimmung von Trends muss auch darauf geachtet, wie aussagekräftig der ermittelte Wert ist. Abbildung 4 zeigt einen zeitlichen Ausschnitt einer Kippschwingung, die klar erkennbar keinen Trend besitzt. Wird eine Regressionsgerade durch das gesamte Intervall gelegt, so würde sich eine parallele zur X-Achse ergeben -- somit kein beobachtbarer Trend. Wird allerdings die letzte Aufwärtskante entfernt und durch die verbleibenden Werte eine Regressionsgerade gelegt wird, kann ein  $T \neq 0$  Trend bestimmt werden (vgl. gepunktete Linie).



**Abbildung 4:** Skizze zur Problematik der statistischen Signifikanz von Trends; die fiktive Zeitreihe besitzt keinen Trend, dieser kann aber durch passende Wahl der Endpunkte vorgetäuscht werden, nach Schönwiese [6]

Dieses Beispiel zeigt, dass lineare Regression anfällig für Fehler durch Auswahl ungeeigneter Endpunkte der Zeitreihe ist. Um diese Fehlerquellen zu reduzieren, sollte bei der Bestimmung von linearen Trends ein möglichst langes Zeitintervall betrachtet werden. In unserem Beispiel aus Abbildung 4 würde dies dazu führen, dass die Steigung der Trendgeraden immer kleiner werden würde. Für die Klimaanalyse hat sich herausgestellt, dass man ab einer Intervalllänge von 30 Jahren robuste Ergebnisse erwarten kann ([6], vgl. S.6ff).

Ein Maß für die Güte eines ermittelten Trends ist die Signifikanz, die als  $T/s$  definiert ist, mit  $s$  als der empirischen Standardabweichung. Unter der Annahme, dass die Streuung um die Gerade normalverteilt ist, ergibt sich für  $T/s > 2$  die Wahrscheinlichkeit von 95% (zum Irrtumsniveau  $\alpha = 0.05$ ), dass der Trend real ist. Für nicht-normalverteilte Abweichungen gibt es Alternativen wie z.B. den Mann-Kendall-Trendtest. Die Signifikanz  $T/s$  wird zum Teil auch als Trend-/Rauschverhältnis  $T/R$  bezeichnet, bei dem der Trend  $T$  durch eine zufällige Variabilität überlagert wird ([6], S.6).

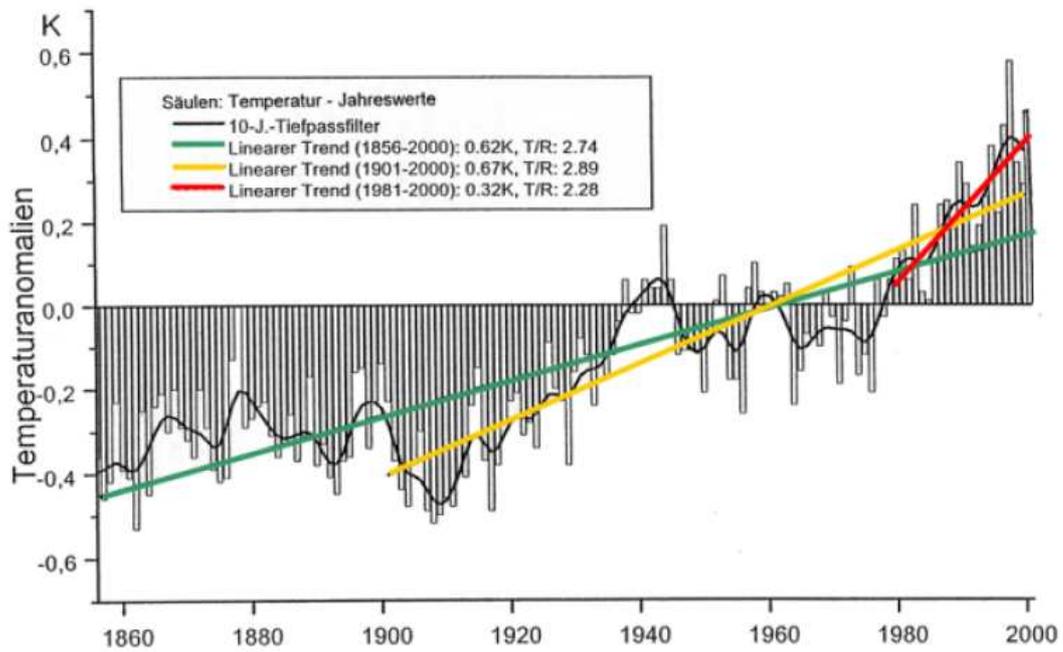
## 4 Beobachtete Veränderung

Eine Veränderung des Klimas lässt sich an verschiedenen Faktoren festmachen. Zum einen lassen sich positive Temperaturtrends aus den genannten Datenquellen bestimmen, die hier im Weiteren erläutert werden sollen. Zum anderen lassen sich auch Veränderung in der Umwelt erkennen, die auf steigende Temperaturen hindeuten.

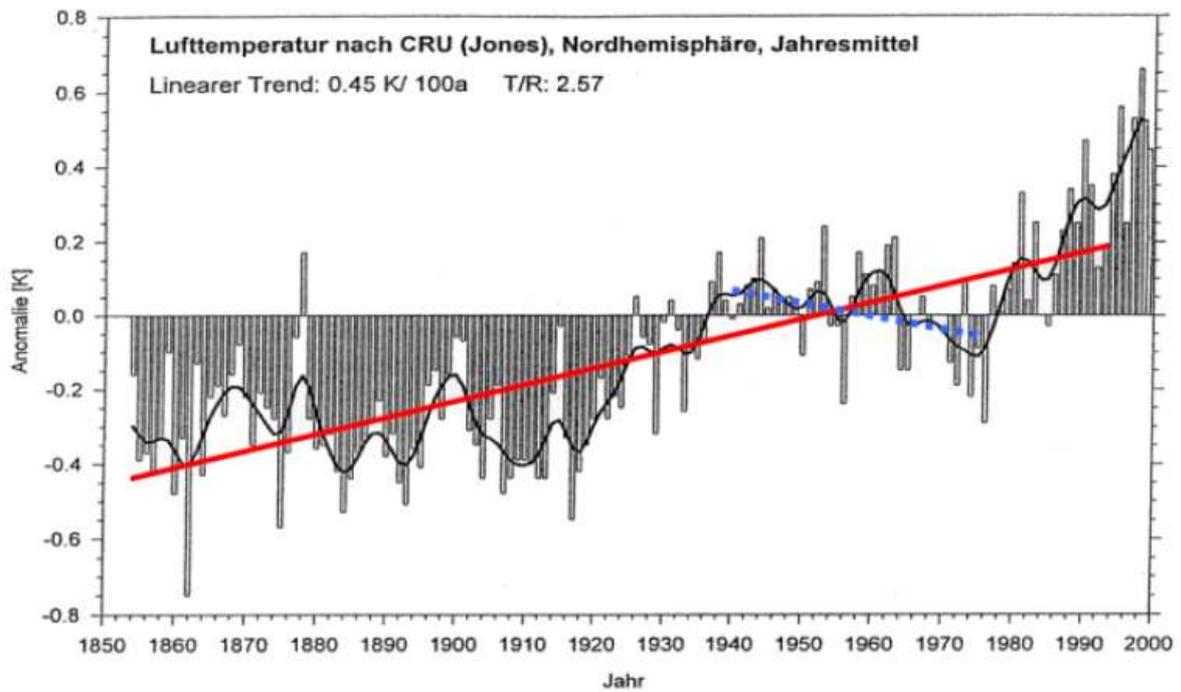
### Temperatur

Abbildung 5 zeigt die Jahresanomalien der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in dem Zeitraum 1856 bis 2001. An den Jahresanomalien ist ein Aufwärtstrend zu erkennen, der aber im Detail analysiert werden muss. Für den Zeitraum vor 1900 ist kein Trend zu erkennen, eine Veränderung der Jahresmittelwerte ist erst danach zu beobachten. Dies führt bei einer linearen Trendanalyse zu einem Trend von  $0,6^{\circ}\text{C}$  mit einem T/R-Verhältnis von ca. 2,7, was einer Signifikanz von  $> 99\%$  entspricht. Die Erwärmung fällt noch stärker aus, wenn man den kürzeren Zeitraum von 1901 bis 2000 betrachtet. Dekadisch normiert entspricht dies Trends von  $0,044^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  für den Zeitraum 1856-2000 bzw.  $0,067^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  für 1901-2000 -- man erkennt an den relativen Angaben einen gestiegenen Trend, wie dies aus den absoluten Werten nicht direkt ersichtlich ist. Für den Zeitraum 1981 bis 2000 ergibt sich ein noch stärkerer Dekadentrend, der mit  $0,16^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  mehr als doppelt so groß ausfällt, als die aus den vorherigen Intervallen. Die Signifikanz ist mit 2,25 geringer als bei den vorigen Trends, liegt aber immer noch bei  $> 95\%$ . Es ist also in der Neuzeit eine Beschleunigung des Erwärmungstrends zu erkennen, obwohl Vorsicht bei der Interpretation von Trends geboten ist, die sich nur auf den vergleichsweise kurzen Zeitraum von 20 Jahren beziehen (vgl. Kapitel *Signifikanz*).

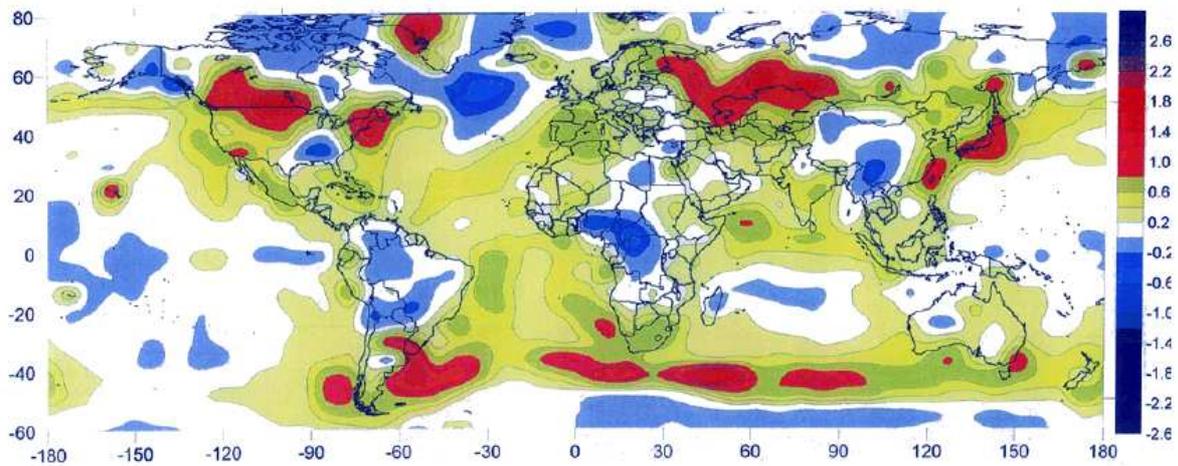
Dass der Erwärmungstrend regional keineswegs einheitlich ist, kann an Abbildung 6 gesehen werden. Zu sehen ist dort die gemittelte bodennahe Lufttemperatur der Nordhemisphäre. Man erkennt einen allgemeinen Erwärmungstrend, allerdings wird dieser im Zeitraum von 1941 bis 1980 durch einen leichten Abkühlungstrend überlagert. Diese Beobachtung kann für die Südhemisphäre im gleichen Zeitraum nicht gemacht werden -- dort kann lediglich ein konstanter Erwärmungstrend ermittelt werden. In diesem Zusammenhang kann erwähnt werden, dass im Gegensatz zu der Erwärmung der bodennahen Luft, in den großen Höhen der Stratosphäre eine starke Abkühlung beobachtet wird. Diese fällt mit  $-0,54^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  im Zeitraum von 1965 bis 2000 bei einer Signifikanz von  $> 99\%$  wesentlich stärker aus, als die Erwärmung in Bodennähe.



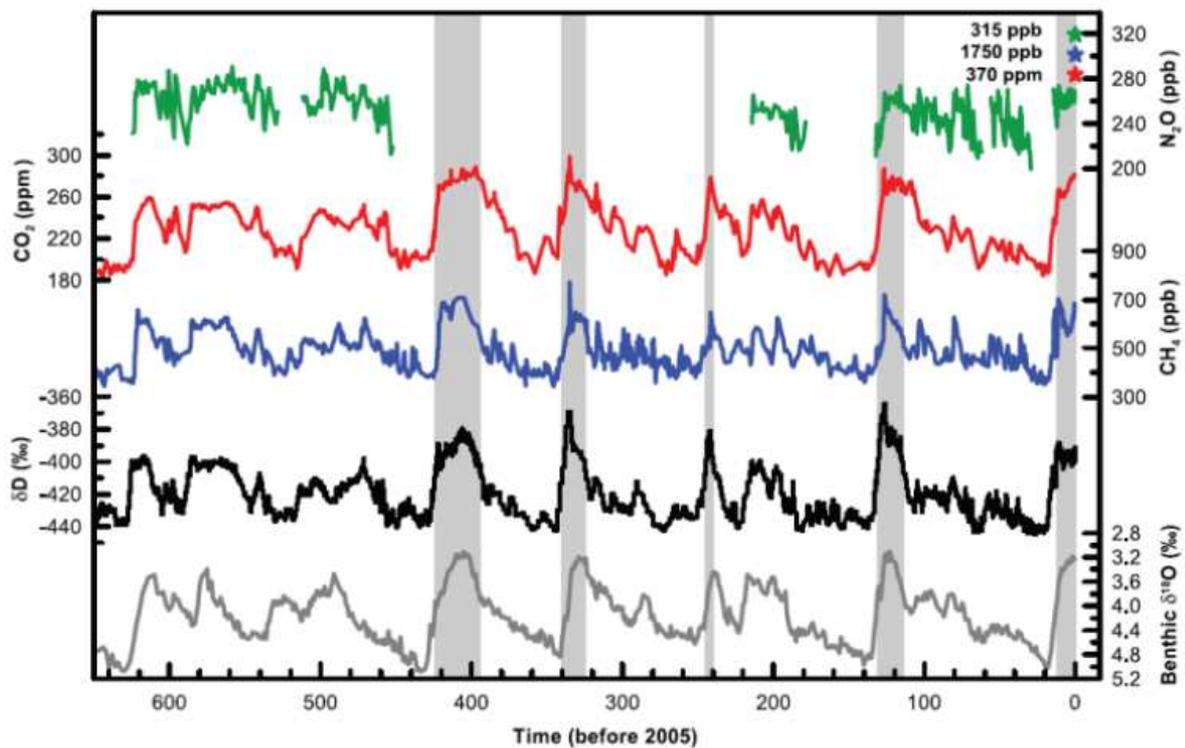
**Abbildung 5:** Jahresanomalien 1856-2001 (Referenzintervall 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur mit linearen Trends, nach Schönwiese [6]



**Abbildung 6:** jedoch Nordhemisphäre (1854-2000), zeitweiser Abwärtstrend qualitativ vom Autor eingefügt, nach Schönwiese [6]



**Abbildung 7:** Lineare Trends 1891-1990 der Jahresmittelwerte der bodennahen Lufttemperatur, regionale Trendstrukturanalyse, nach Schönwiese [6]



**Abbildung 8:** Variationen verschiedener Stoffe (Proxies) in Eiskernen aus der Antarktis in

den letzten 650k Jahren; es lassen sich Warm- und Kaltzeitzyklen mit einer Länge von 100k Jahren erkennen, nach IPCC 2007 [4]

Auch hier ist wieder zu erkennen, dass sich die Temperaturen in der Südhemisphäre stärker verändern, als in der Nordhemisphäre. So entsprach der Abkühlungstrend im Norden  $-1,28^{\circ}\text{C}$  (1958-1999), verglichen mit  $-2,71^{\circ}\text{C}$  im Süden (1964-1999).

Die Komplexität der regionalen Trendstrukturen ist in Abbildung 7 zu erkennen. Eine Erwärmung der globalen gemittelten bodennahen Lufttemperatur führt mitnichten zu einer Erwärmung in allen Regionen der Erde. Vielmehr kommt es bei einer räumlichen Aufschlüsselung zu Erwärmungs- und Abkühlungstrends. Im Besonderen kam es mehr zu einer Erhöhung der Wintertemperaturen, als zu einer der Sommertemperaturen. Die steigende bodennahe Temperatur ist demnach zu einem großen Teil auf gestiegene Mindesttemperaturen (z.B. im Winter) zurückzuführen.

### **Kohlendioxid**

Die im vorherigen Kapitel festgestellte Erwärmung des Klimas ist allgemein nichts ungewöhnliches, da es in der Geschichte der Erde immer wieder Warm- und Kaltzeiten gegeben hat. Abbildung 8 zeigt u.a. die Variation verschiedener Temperaturproxies in den letzten 650k Jahren. Es ist eine wiederkehrende Erwärmung der Erde mit anschließender Abkühlung mit einer Periode von ungefähr 100k Jahren zu beobachten. Allerdings scheint es unwahrscheinlich, dass der jetzige Erwärmungstrend allein auf natürliche Prozesse zurückzuführen ist

So zeigt Abbildung 9 den rekonstruierten Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre; es ist zu sehen, dass die Konzentration in der Neuzeit weit über der natürlichen Varianz in der Vergangenheit (grauer Balken) liegt. Diese Tendenz wird sowohl durch atmosphärische Messungen, als auch durch neuere Eisproben bestätigt. Dies unterscheidet die aktuelle Klimaveränderung von vorherigen Ereignissen dieser Art.

### **.Ökologie**

Ein weiteres Indiz für den Erwärmungstrend des Klimas, neben den mit Unsicherheiten behafteten Temperaturdaten, ist das veränderte Verhalten der Flora und Fauna. So kann in den letzten 30 Jahren ein klarer Trend z.B. Vögeln beobachtet werden, dass diese früher aus den Winterquartieren zurückkehren, früher anfangen zu brüten und im Herbst später wegziehen [6,7]. Neben Vögeln kann ähnliches Verhalten auch bei Insekten und Fischen beobachtet werden, die unter anderem ihre Lebensräume weiter nach Norden verlagern. Des Weiteren konnte ein

Vorkommen von exotischen Warmwasserspezies bei Zooplankton und Fischarten in den Gewässern vor Kalifornien, USA festgestellt werden.

Auch ein Verschiebung der Baumwachstumsgrenze in den Alpen von 1 bis 4 Metern pro Dekade kann als Hinweis für einen aktuellen Klimawandel gewertet werden.

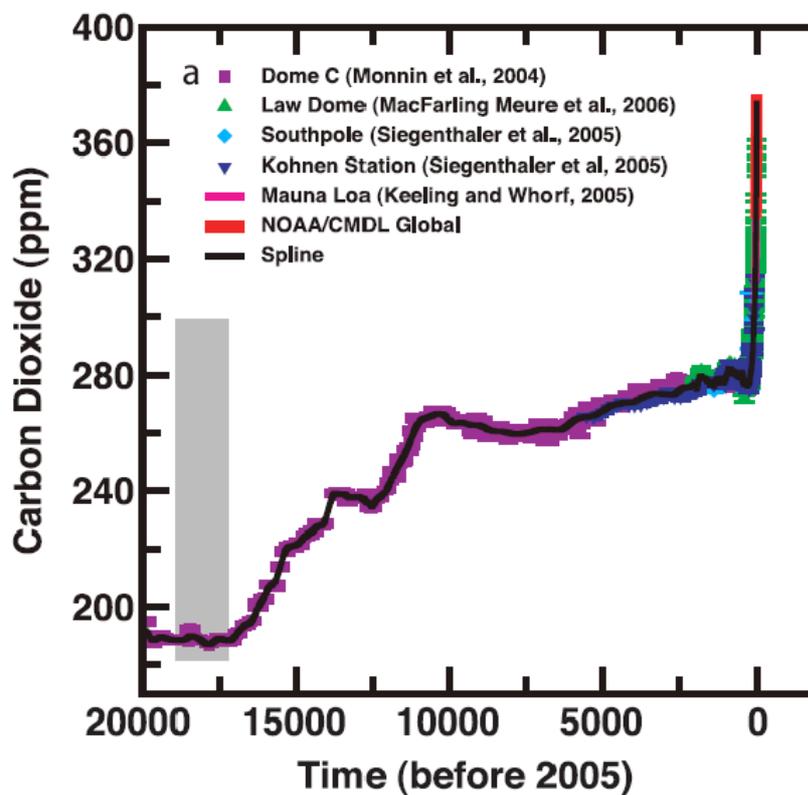


Abbildung 9: CO<sub>2</sub>-Konzentration aus Grönland- und Antarktikeis (Symbole) und atmosphärischer Messungen (Rot und Magenta), der graue Balken zeigt die rekonstruierte natürliche Varianz von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre in den letzten 650k Jahren, nach

IPCC 2007 [4]

## 5 Fazit

Trotz der vorhandenen Unsicherheiten und Ungenauigkeiten in den gesammelten Temperaturdaten, kann ein Erwärmungstrend des Klimas als sicher angenommen werden. Die Kombination von Instrumentenmessungen mit rekonstruierten Klimadaten erlaubt einen Einblick in die Klimageschichte der Erde. Es ist zu erkennen, dass der gegenwärtige Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre einzigartig ist und als Treibhausgas wahrscheinlich Einfluss auf das Klima haben wird. Das Erdklima war für einen scheinbar ungewöhnlich langen Zeitraum sehr stabil und erlaubte das Entstehen der jetzigen Hochkultur.

Inwieweit der Mensch und sein Handeln Grund dafür sind, dass sich das Klima auf der Erde verändert, bleibt fraglich. Dass er zumindest einen Anteil der Veränderung zu verantworten hat, scheint sicher.

## 6 Literatur

[1] Baede, A.P.M. et al.: 2001, *The Climate System: An Overview*, in *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. et al.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[2] Folland, C.K. und Karl, T.R. et al.: 2001, *Observed Climate Variability and Change*, in *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. et al.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[3] Trenberth, K.E. et al.: 2007, *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S. et al.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[4] Jansen, E. et al.: 2007, *Palaeoclimate*, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S. et al.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[5] Schönwiese, C.D. et al.: 1998, *Statistische Analyse der Klimavariabilität und anthropogenen Klimasignale in globaler und regionaler Betrachtung*, Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main, Nr. 102

[6] Schönwiese, C.D.: 2002, *Beobachtete Klimatrends im Industriezeitalter. Ein Überblick global/Europa/Deutschland*, Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main, Nr. 106

[7] Walther, G.R.: 2002, *Ecological responses to recent climate change*, Nature, Vol. 416,

pp. 389 - 395



# CCS – Carbon Capture and Storage

-

*Timofej Woyzichovski*

Universität Osnabrück

Fachbereich: Mathematik/Informatik

Dozent: Prof. Michael Matthies

**LV:** Hauptseminar 2007

22.09.2007, Osnabrück

## Zusammenfassung

Eine im Kampf gegen den Klimawandel verstärkt diskutierte Möglichkeit der steigenden Erderwärmung entgegenzuwirken ist in weiten Kreisen von Klimaschutz-Experten und verantwortlicher Entscheidungsträger unter dem Kürzel CCS – Carbon Capture and Storage bekannt. Vor allem in den USA spricht man dieser Strategie in Form der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung ein großes Zukunftspotential zu. Noch ist der Weg zum breiten Einsatz der benötigten Technologie lang und der Forschungsbedarf hoch, denn entscheidende Fragen sind ungeklärt: Existieren für die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung benötigten Lagerstätten hinreichende Kapazitäten um einen spürbaren und negativen Effekt auf die globale Klimaerwärmung zu erzielen? Ist deren Persistenz für sehr lange Zeiträume gesichert? Welche Gefahren für Mensch und Natur können durch den Einsatz von CCS entstehen? Sind der finanzielle Aufwand für Forschung und Anwendung gegenüber anderen, konkurrierenden Ansätzen wie der Energieeffizienzsteigerung und der Verfügbarmachung regenerativer Energiequellen gerechtfertigt? Auf diese Fragen Antworten suchend werden im Folgenden unterschiedliche Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung vorgestellt. Um die gegenwärtigen Nebenbedingungen der Erwärmung und der daraus resultierenden Dringlichkeit passender Gegenmaßnahmen anzumahnen, wird zuvor auf die Motivation von CCS und anderer Klimaschutzstrategien eingegangen.

## Gliederung

0. Einführung	191
1. Motivation – Aspekte, die CCS nahe legen	193
1.1 Wechselwirkungen mit der Ozeanosphäre	193
1.2 Wechselwirkungen mit Phedosphäre	195
1.3 Wechselwirkungen mit Biosphäre	197
1.4 Wechselwirkungen mit Kryosphäre	199
2.1 Rein chemische Verfahren - Abtrennung	201
2.2 Rein chemische Verfahren – Weiterverwendung	203
2.3 Rein chemische Verfahren – Transport	203
2.4 Rein chemische Verfahren – Speicherung	204
2.5 Rein chemische Verfahren – Kosten	207
3. Alternativen zum CCS	208
3.1 Ozean-Düngung	209
3.2 Aufforstung und veränderter Landbau	210
3.3 Aufforstung und veränderter Landbau - Advanced	213
Schlussatz	217
Literaturverzeichnis	218

## 0. Einführung

Seit der vorindustriellen Zeit hat sich der Gehalt an Kohlenstoff in der Atmosphäre von ca. 540 Gt auf heute 730 Gt Kohlenstoff<sup>9</sup> (C) um 30 % erhöht [Zimov,2006]. Den größten Anteil daran hat die Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Öl und Gas. Aber auch die über die Jahrhunderte veränderte und sich ausbreitende Landwirtschaft hat große Mengen Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid freigesetzt. So sind derzeit noch schätzungsweise 2400 Gt C in den Weltböden gespeichert, 3,3-mal soviel wie in der Atmosphäre und etwa 4,5-mal soviel wie in der Vegetation. Ansätze, die durch angepassten Landbau einen Teil dieses freigewordenen Kohlenstoffs wieder in die Böden einbringt ist eine mögliche Option der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung. Ein anderer ergibt sich durch die Karbonisierung und Lösung von Kohlenstoffdioxid in Wasser.

---

<sup>9</sup> *Kohlenstoff* und *Kohlenstoffdioxid* werden im Folgenden synonym verwendet; grob entspricht 1 Tonne Kohlenstoff in etwa 6 Tonnen Kohlenstoffdioxid

Schätzungsweise befinden sich ca. 40000 Gt C in den Ozeanen wovon 2500 Gt in ozeanischer Vegetation gebunden sind. Hier steckt mithin das größte CCS-Potential.

Nicht zuletzt wegen aufkeimender Volkswirtschaften in den Entwicklungsländern, genannt seien hier vor allem China und Indien, nimmt der Ausstoß an Kohlenstoffdioxid stetig zu. Gegenwärtig werden jährlich 6,5 Gt Kohlenstoff durch Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Dem gegenüber steht die natürliche, also nicht durch menschliches zutun hervorgerufene Kohlenstoff-Sequestrierungsrate von ca.  $2,8 \pm 0,9$  Gt C (für das Jahr 1990) [Heat,2005]. Da die herkömmliche Idee der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung auf der Abtrennung von Kohlenstoffdioxid aus dem Abgasstrom konservativer Kohle-, Öl- oder Gaskraftwerke bzw. dem Auffangen des bei der Förderung von Öl und Gas anfallenden CO<sub>2</sub> und dem Abtransport zu den dafür vorgesehene Lagerstätten beruht, stellt die Steigerung der natürlichen Sequestrierungsrate durch geeignete Maßnahmen eine bisher weniger prominente Alternative dar, diese werden in dem hinteren Teil dieser Arbeit vorgestellt.

## **7 1.Motivation – Aspekte, die CCS nahe legen**

Im Frühjahr 2007 hat der UN-Weltklimarat durch die Veröffentlichung seines vierten Klimaberichtes weltweit für Aufsehen gesorgt. Danach sind die Konzentration von Treibhausgasen wie Methan, Lachgas und Kohlenstoffdioxid die höchsten seit mindestens 650.000 Jahren. Seit 20.000 Jahren hat es noch nie so einen raschen Temperaturanstieg gegeben. Die für das Jahr 2100 prognostizierte Steigerung wird vom IPCC mit 2 - 4,5 Grad Celsius angegeben. Was das komplette Abschmelzen des grönländischen und arktischen Eises zur Folge hätte. Darüber hinaus würden bis zum Jahre 2100 der größte Teil der Permafrostböden oberflächlich auftauen und zusätzliches Kohlenstoffdioxid und vor allem Methan freisetzen [Zimov,2006]. Im Folgenden sollen nun einige dieser sich gegenseitig beschleunigenden Effekte erwähnt werden.

### **1.1 Wechselwirkungen mit der Ozeanosphäre**

Ozeanströmungen sorgen weltweit für einen Wärme und „Frischwasser“-Transport. Der Golfstrom zum Beispiel sorgt in West- und Nordeuropa für ein milderes Klima als es die geographische Breite vermuten lässt, so ist auch die Westküste Norwegens selbst im Winter durchgehend eisfrei. Durch ihre Zirkulation sorgen sie zudem zu einer stetigen Durchmischung der Ozeane. Angetrieben durch Dichteunterschiede, Temperatur und Salzgehalt sowie Tiefenkonvektion gelangen große Mengen sauerstoffreichen Oberflächenwassers in große Tiefen [Visbeck,2007].

Auch hier sorgt der Klimawandel durch den stärker werdenden Einfluss verdünnenden Süßwassers aus der Arktis zu einer Schwächung. In der gegenwärtigen Diskussion ist sogar das mögliche komplette Abbrechen der Zirkulationen [PIK,2007]. Nach Visbeck et al. lässt damit auch die CO<sub>2</sub>-Sequestrierungsrate der Ozeane aufgrund fehlender Wassermwälzungen und zusätzlicher Versauerung des Oberflächenwassers stark nach. Die Empfindlichkeit des ozeanischen Planktons gegenüber kohlen-sauren Lösungen führt zu einer Störung der Gleichgewichtszusammensetzung hin zu einer Abnahme des Photosynthese betreibenden Phytoplanktons, das den größten Anteil an der natürlichen Sequestrierung durch Vegetation hat. Hiermit ist also eine zweifachwirksame positive Rückkopplung beschrieben, die einmal in Gang gesetzt nur mit wachsender Anstrengung wieder zu stoppen ist.



## 1.2 Wechselwirkungen mit Phedosphäre

Angesichts steigender weltweiter Nachfrage nach Öl und Gas bei konstantem und in nicht allzu ferner Zukunft knapper werdender fossiler Rohstoffe ist so genanntes Methan-Eis, genauer Methanhydrat als Energielieferant ins Gerede gekommen. Methanhydrat ist ein Klathrat (Einschlussverbindung) bei dem das Methan in die Gitterstruktur gefrorenen Wassers vollständig eingeschlossen ist. Fördert man das unter hohem Druck, sprich bei Tiefen ab 800 m und niedriger Temperatur stabile Methanhydrat zu Tage kommt das Methan wieder frei und kann, im besten Falle, einem Energiegewinnungsprozess zugeführt werden. Methan hat einen um den Faktor 21 größeren Wärmeantrieb als Kohlenstoffdioxid und ist damit ein viel wirksameres Treibhausgas. Das in (Permafrost-)Böden und an Kontinentalhängen vorkommende Methanhydrat bindet Schätzungen zufolge etwa doppelt soviel Kohlenstoff wie alle übrigen fossilen Energieträger und hat damit auch bei seiner vollständigen Verbrennung ein enormes Treibhauspotential. Steigende Meerestemperaturen könnten in näherer Zukunft vermehrt zur Destabilisierung großer Vorkommen beitragen, wobei Methan ungehindert in die Atmosphäre entweichen könnte [GEOMAR]. Auch hierbei handelt es sich um eine positive Rückkopplung.

Eine weitere ergibt sich durch die Tatsache, dass Kohlenstoff in organischer Form in Permafrostböden (sogenannter „Yedoma“) gespeichert ist. Unter dem Begriff „Yedoma“ versteht man eisreiche Permafrostböden mit einem hohen Gehalt labilen Kohlenstoffs aus dem Pleistozän von vor etwa 1,8 Millionen Jahren bis vor 11.000 Jahren. Diese Epoche war geprägt von sich abwechselnden Warm- und Kaltzeiten, sodass in ihrer Folge nach und nach Vegetation in die gefrierenden Böden der Tundra eingeschlossen wurde und sich so über die Jahrtausende eine Kohlenstoffkonzentration von 2-5 % anreicherte [Zimov,2006]. Normale Böden haben einen Kohlenstoffgehalt der um den Faktor 10 bis 30 geringer ist. Die durch die globale Erwärmung nun großflächig auftauende Yedoma lässt den Zerfall Jahrtausende alter Pflanzenteile beginnen wobei es zu Methan- und Kohlenstoffdioxidfreisetzung kommt. Zimov et al. schätzt den Kohlenstoffgehalt dieser Böden weltweit auf 900 Gt, das dem 2,4 fachen der seit der Industrialisierung freigesetzten Kohlenstoffs entspricht. Auch hier wieder ein sich beschleunigender Prozess.

Der typische Landschaftsgestehungsprozess, die Bildung so genannter *Thermokarst*-Seen in der Tundra trägt in Verbindung mit der Klimaänderung zu einer weiteren Verstärkung der Erwärmung bei.

[EX] Mit *Thermokarst* bezeichnet man einen Landformungsprozess der durch das Tauen des in Permafrostböden enthaltenen Grundeises bedingt wird. Der Volumenverlust lässt durch das Absinken des Bodens charakteristische Furchen und Senken entstehen, die sich rasch mit Wasser füllen. Hat der Vorgang einmal begonnen ist er unumkehrbar, denn die gegenüber der Luft höhere Wärmekapazität des Wassers lässt diese Gewässer sich immer weiter in die Landschaft

„fressen“:



Abbildung 1 - Thermokarst - [Zimov,2005]

Schon heute sind 30 % der Tundra mit Seen bedeckt. Mit ihnen finden Methanogene gute Bedingungen vor. Über ihren Stoffwechsel bilden diese den durch den tauenden Boden freigewordenen Kohlenstoff unter Sauerstoffausschluss in Methan um. So gelten diese Thermokarst-Seen weltweit auch als die Methan-Hauptemittenten. Zimov et. al. kommentierte diesen Sachverhalt in einem in der Science veröffentlichten Artikel mit: „*Factors inducing high-latitude climate warming should be mitigated to minimize the risk of a potentially large carbon release that would further increase climate warming.*“ [Zimov,2006].

### 1.3 Wechselwirkungen mit Biosphäre

Root-Derived Soil Carbon (Bodenkohlenstoff) ist biochemisch stabil und kann mehrere Jahrhunderte der Atmosphäre entzogen bleiben [Heat,2005]. Durch den Stoffwechsel einiger im Boden lebender Bakterien kann es aber unter bestimmten Umständen doch zu einer Freisetzung des Bodenkohlenstoffs kommen. Heterotrophe Atmung war neben anderer Aspekte Bestandteil der Beobachtungen eines zweieinhalb Jahre währenden Experimentes, bei dem die Kohlenstoffbilanz ausgewählter Baumarten unter steigender Kohlenstoffdioxidkonzentration der Luft ermittelt wurde. So nimmt zwar die Photosynthese mit zunehmender CO<sub>2</sub>-Konzentration zu, jedoch auch die Aktivität bestimmter Bodenbakterien.

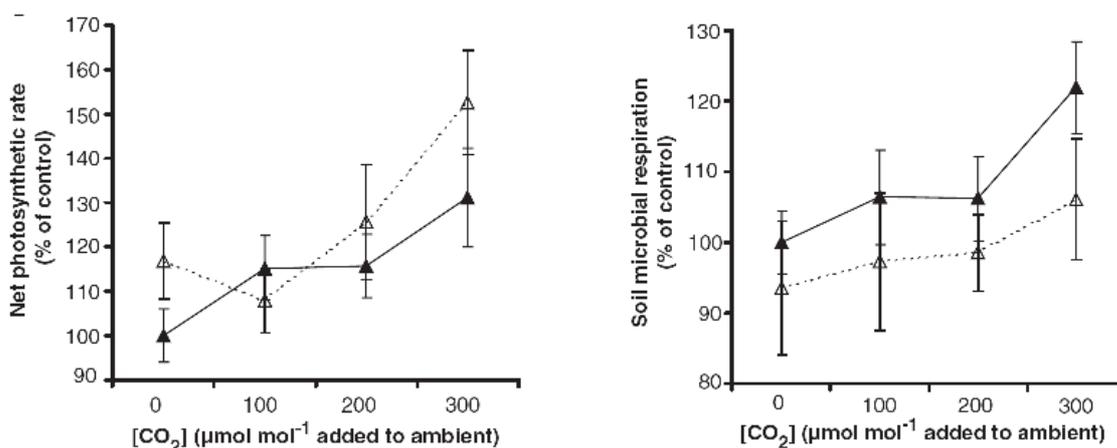
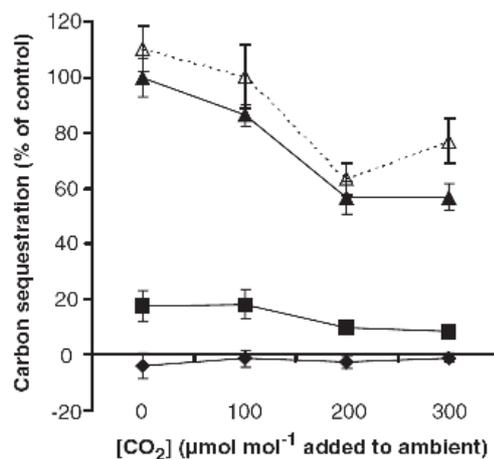


Abbildung 2 - [Heat,2005]

Das Ergebnis ist eine, um bis zu 40 % geschmälerte CO<sub>2</sub>-Sequestrierung gegenüber der Kontrollgruppe, die keiner erhöhten Konzentration ausgesetzt wurde. Heat et al. vermutet in seinem Artikel „*Rising Atmospheric CO<sub>2</sub> Reduces Sequestration of Root-Derived Soil Carbon*“ die Ursache für die verstärkte Bakterienatmung in einer Veränderung des Nährstoffeintrags der Pflanzen in den Boden. Vorangegangene Studien zeigten ein verändertes Feinwurzelwachstum und eine erhöhte Sterblichkeit bei gestiegenem CO<sub>2</sub>-Gehalt. Damit assoziiert ist eine Veränderung der mikrobakteriellen Gemeinschaft, das sich in deren Atmung äußert. Am auffälligsten zeichnet sich



hierbei der Bereich bis +200  $\mu\text{mol/mol}$  zusätzlichem Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre ab. Schon geringe Veränderungen in der Kohlenstoffbalance könnten demnach große negative Effekte zeigen, die bis zu 10-mal so groß ausfallen **Abbildung 3 – [Heat,2005]**

wie die der bisherigen Emission durch die Verbrennung fossile Energieträger [Heat,2005].

### 1.4 Wechselwirkungen mit Kryosphäre

Schnee und Eis haben einen sehr viel höheren Albedo als etwa Böden, Wiesen und Wasser. Reflektiert Schnee, je nach Alter, zwischen 40 und 85 % der Strahlung so sind es bei Böden zwischen 5 und 35 %.

Wasser absorbiert den größten Teil der aufgetroffenen Strahlung und hat einen Albedo von lediglich 5-8 %. Unter diesem Hintergrund gilt es die Prognose zu betrachten, die in dem im Februar 2007 veröffentlichten Klimabericht des UN-Weltklimarates (Intergovernmental Panel On Climate Change – IPCC) veröffentlicht wurde. In ihm heisst es, dass Aufgrund fortschreitender Eisschmelze in der Nordpolarregion für das Jahr 2014 mit einer komplett eisfreien Arktis zu rechnen ist. Neben der ökologischen Katastrophe, dass Arktisbewohnern wie Eisbären und

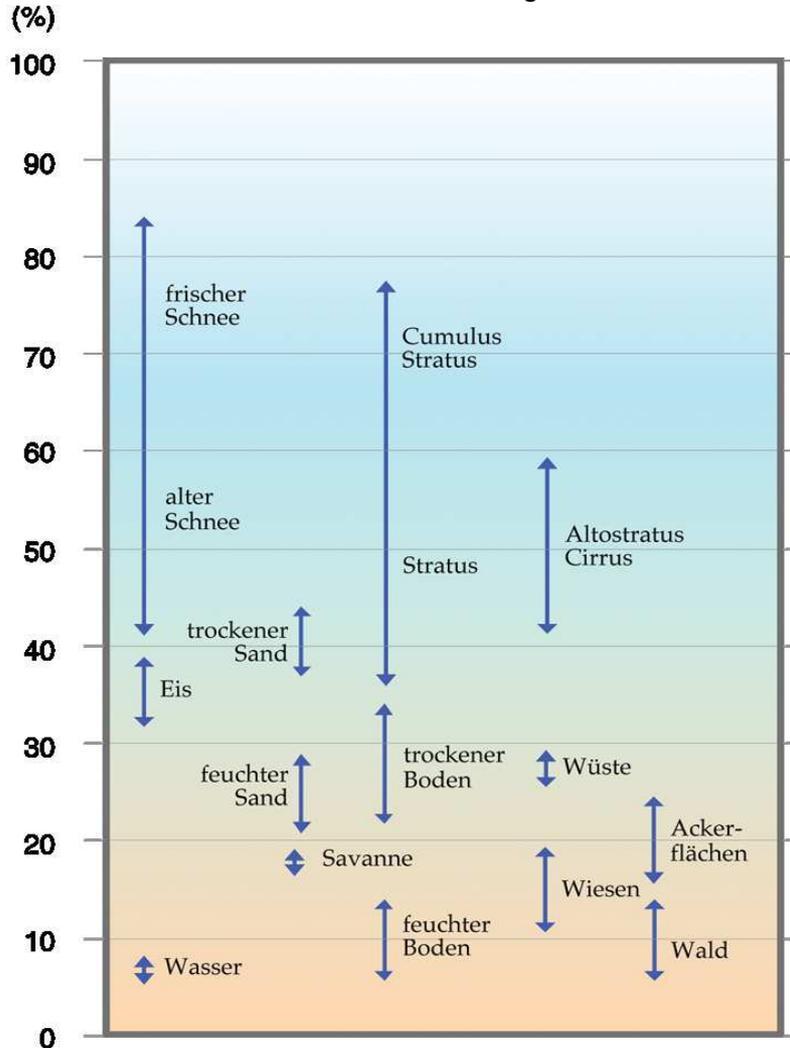


Abbildung 4 - [wikipedia]

Polarfuchs ihre Jagdreviere und der Lebensraum entzogen wird, kann es wegen des wechselnden Albedo zu einer weiteren Erwärmung kommen.

## 2.Methoden des CCS

Wie es das Stichwort „Carbon Capture and Storage“ erahnen lässt, sind für die erfolgreiche CO<sub>2</sub>-Sequestrierung drei Schritte notwendig. Denn ehe das Kohlenstoffdioxid endgelagert werden kann, muss es zur Lagerstätte gebracht werden. Der Transport großer Mengen dieses Gases ist keine triviale Aufgabe und erfordert die Einhaltung bestimmter sicherheitsrelevanter Kriterien. Dem Vorgelagert ist die Abtrennung des Dioxids aus dem Abgasstrom konventioneller Kraftwerke. Für das Durchlaufen dieser Prozesskette stehen grundsätzlich zwei unterschiedliche Vorgehen zu Auswahl. Man trennt das CO<sub>2</sub> entweder vor, pre-combustion, oder nach dem Verbrennen, post-combustion, ab. Hintergrund hierbei ist die stark unterschiedlich ausfallende Effizienz möglicher Abtrenntechnologien, die evtl. hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Prozess-Gas erfordern um hohe Abtrennraten zu erzielen (s.u.). Bei sog. IGCC-Kraftwerken findet die Abtrennung vor der Verbrennung bei der Kohlevergasung statt. Hierbei wird Kohlenstaub zusammen mit Wasserdampf, Sauerstoff und Hitze (600 – 2000 °C) zu einem Synthesegas verarbeitet, das einen Kohlenstoffdioxidanteil von etwa 15 - 40 % hat. Dieses kann nun Abgeschieden werden, sodass lediglich der Wasserstoff der Verbrennung zugeführt wird.

Nachteil hierbei ist, dass bestehende Kraftwerke von diesem Verfahren ausgeschlossen sind, da eine Umrüstung einen zu hohen Aufwand bedeuten würde. Um den existierenden Kraftwerkspark ökologisch tragbar zu machen, ist eine günstige, nachrüstbare Technologie notwendig. Hierbei kommt die zweite gehbare Variante, das postcombustion zum Tragen das allerdings höhere Ansprüche an die Abtrennung stellt. Der verhältnismäßig geringe CO<sub>2</sub>-Gehalt gewöhnlicher Abgase aus Kohle-(15-20%), Öl- und Gaskraftwerken (3-6%) macht ein sehr effizientes Abtrennverfahren erforderlich, da sonst der aufgebrauchte Energieaufwand nicht im Verhältnis zum Nutzen stände. Zudem muss die angewandte Technologie robust gegenüber anderer Abgasbestandteile sein.

Einen Zwischenweg beschreibt das gegenwärtig in einem Pilotprojekt von Vattenfall betriebene OxyFuel-Verfahren. Kohle wird unter reinem Sauerstoff verbrannt, sodass die nachgelagerte Abtrennung aufgrund der hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 80 % effizienter ablaufen kann. Es bleibt allerdings zu zeigen, ob dieses Verfahren nicht die Nachteile der beiden zuvor beschriebenen vereint, wenn bereits gebaute Kraftwerke nicht ohne erhebliche Investitionen auf die OxyFuel-Verbrennung umgestellt werden können und die Abtrennung dennoch unempfindlich gegenüber anderer Abgasbestandteile konstruiert sein muss. Sicher hingegen

sind der derzeit enorme Energieaufwand für die Sauerstoffherstellung und die Anfälligkeit von Kraftwertteilen hinsichtlich Korrosion ( $O_2$ ) [Donner,2006].

Im Folgenden soll näher auf die einzelnen Schritte der  $CO_2$ -Sequestreung eingegangen werden.

## 2.1 Rein chemische Verfahren - Abtrennung

Um sich des Kohlenstoffdioxids habhaft zu werden stehen unterschiedliche Mechanismen zur Verfügung.

Bei der *Absorption* wird das  $CO_2$  an einer im Abgasstrom zerstäubten Flüssigkeit chemisch gebunden. Unter Hitze wird die Verbindung wieder getrennt, sodass der Absorber, hierzu eignen sich Monoethanolamine (MEA), dem Prozess aufs Neue zugeführt werden kann. Das  $CO_2$  bleibt zurück und kann daraufhin verdichtet oder zu Trockeneis gefroren abtransportiert werden. Der Vorteil hierbei ist der unter optimalen Bedingungen hohe erzielbare Wirkungsgrad. Demgegenüber stehen eine Reihe von Nachteilen, die sich aus der Empfindlichkeit der eingesetzten Amine hinsichtlich Verunreinigungen im Abgas ergeben. So könnte ein energieintensiver Wiederaufbereitungsschritt notwendig sein, um den Verbrauch an Absorber gering zu halten. Zudem ist der großskalige und langfristige Einsatz noch weitestgehend unerprobt, denn MEA sind ätzende Flüssigkeiten und könnten der Kraftwerkssubstanz im laufenden Betrieb stark zusetzen. Im Fokus aktueller Forschung steht daher das Auffinden anderer Absorber, wie anorganische Salze, Ammoniak oder Methanol. Die Einsatzreife für große  $CO_2$ -Emittenten steht demnach noch aus [Donner,2006].

Presst man Abgas aus der Verbrennung fossiler Energieträger in bestimmte *Adsorber*, wie Ton oder Kohle wird das  $CO_2$  in deren Poren eingelagert. Verringert sich daraufhin der Druck oder erhöht sich die Temperatur kommt es wieder frei. Dieses ist in der Erdgasförderung bereits erprobte Technik allerdings noch nicht in der für Kraftwerke erforderlichen Dimension verfügbar. Nachteile sind darüber hinaus der hohe Bedarf an Adsorber, sowie die nötige Energie zu deren Erhitzung.

Seit den 80er Jahren werden in der Erdgas/-ölfördernden Industrie *Membranen* aus speziellen Kunststoffen und Keramiken eingesetzt, die lediglich  $CO_2$  passieren lassen. Einmal

installiert sind solche Verfahren sehr genügsam was Energie- und Materialverbrauch betrifft und damit für großskalige Vorhaben denkbar. Leider fällt die Effizienz im Vergleich eher gering aus, sodass hohe Abtrennraten nur bei hohen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen erzielt werden können. Das macht das precombustion unumgänglich, was den Kreis möglicher Anwendungen stark einengt, denn der bestehende Kraftwerkspark wäre damit derzeit nicht ausrüstbar. Erfahrungen mit Applikationen an Kohlekraftwerken, deren starke Verunreinigungen im Abgas Membranen dieser Art verkleben und damit undurchlässig machen könnten gibt es bisher keine. Auch hier ist der Forschungsbedarf noch hoch. [Donner,2006]

Ein sehr energieaufwändiger Weg ist der über das komplette *Gefrieren* des Abgasstromes. Das CO<sub>2</sub> resublimiert unter normalem Umgebungsdruck bei -78,5 °C zu Trockeneis. Sinnvoll ist dieses Vorgehen wegen des hohen Energieaufwandes aber nur bei precombustion-Anwendungen. Vorteilhaft sind die hohe Abscheidungsrate und der transportfreundliche Aggregatzustand des so abgetrennten CO<sub>2</sub> [Donner,2006].

Durch den Energieaufwand der CO<sub>2</sub> -Abscheidung wird in Kraftwerken der Wirkungsgrad verringert. Je nach Verfahren verringert er sich in Abhängigkeit zum Anlagentyp um 7 bis 14 %. Diese Einbußen müssen durch zusätzlichen Energieeinsatz kompensiert werden. Bei einem Kraftwerk mit einem niedrigen Wirkungsgrad von 35 % fällt er mit 20 bis 40 % bei modernen Kraftwerken mit 45 % Wirkungsgrad immer noch mit 15 bis 30 % aus. Konsequenzen wären höhere Strom- und Heizkosten sowie ein schnelleres Aufbrauchen der begrenzter Erdgas- und Erdölvorkommen [Goerne,2004].

Ist man soweit die Hauptursache der globalen Erwärmung in konzentrierter Form vorliegen zu haben, muss sichergestellt werden, dass es der Atmosphäre für große Zeiträume entzogen bleibt. Neben der Möglichkeit des Endlagerns wäre hier die Weiterverwendung des CO<sub>2</sub> für die Herstellung höherwertiger Chemikalien genannt.

## 2.2 Rein chemische Verfahren – Weiterverwendung

Eine erfolgreiche CCS-Infrastruktur erzeugt enorme Mengen an Kohlenstoffdioxid, die in der chemischen Industrie für die Herstellung von Methanol und zahlreicher Düngemittel verwandt werden können. Laut S. Donner et al. wäre es damit dauerhaft gebunden. Der weltweite Verbrauch wird auf 650 Mt C/yr, das entspräche 2,6 % der Emission, geschätzt. Größere Umwandlungsraten durch veränderte Herstellungsverfahren, die CO<sub>2</sub> statt eines anderen Stoffes benötigen, es also ersetzen, sind Gegenstand aktueller Forschung.

## 2.3 Rein chemische Verfahren – Transport

Für den Transport stehen unterschiedliche Modelle zur Verfügung die je nach zurückzulegender Entfernung und Menge unterschiedlich teuer sind. Für kurze Strecken und großen Mengen eignen sich Pipelines in den das Gas im überkritischen (komprimierten aber noch gasförmigen) Zustand fließt. Es handelt sich um etablierte Technik, die in den USA schon seit den 70er Jahren für das sogenannte Enhanced Oil/Gas Recovery (EOR / EGR) im Einsatz ist. Hierbei wird CO<sub>2</sub> unter hohem Druck in die Lagerstätte gepresst um eine höhere Förderrate und Ausförderung zu erreichen. Bei längeren Wegen bis zur Endlagerstätte muss das CO<sub>2</sub> regelmäßig neu komprimiert werden, was enorme Energiemengen verschlingt und zu einer zusätzlichen Kraftwerkseffizienzminderung von 3 – 4 % zu Folge hätte.

Transporte per Schiff gelten als machbar und sind bei kleineren Mengen aber großen Entfernungen kostengünstiger. LKW und Bahn sind hingegen nur für Kurzstreckentransporte und kleine Mengen im flüssigen oder festen Zustand sinnvoll.

Von großer Bedeutung für den Transport von Kohlenstoffdioxid, das bei einer Konzentration von 5 – 8 % in der Luft zum Tode durch ersticken führt und schwerer als Luft sich am Boden und in Senken hält, ist, dass entsprechende Schutzmechanismen entwickelt werden. Das IPCC weist darauf, dass bestehende Sicherheitsbestimmungen von Erdgas- und Erdölpipeline nicht ausreichen. Da insbesondere Verbraucher und Energieerzeuger aus technischen Gründen häufig nahe beieinander liegen, sind Pipelineführungen durch bewohntes Gebiet kaum auszuschließen und daher besonderes Augenmerk auf deren Überwachung zu lenken. So muss

hinsichtlich möglicher Verunreinigungen und Feuchtigkeit (kohlenstoffsaure Verbindungen), die Korrosion beschleunigen, strenger kontrolliert werden. Auch der Verbau kostentreibender Rohre aus kunststoffbeschichtetem Edelstahl könnte notwendig sein. [Donner,2006]

## 2.4 Rein chemische Verfahren – Speicherung

Der Erfolg des CCS hängt stark davon ab, ob und wie lange das erzeugte Kohlenstoffdioxid der Umwelt entzogen werden kann. Der betriebene Aufwand, vor allem der Einsatz zusätzlicher Energie würden den Sinn aller Unternehmen dieser Art in Frage stellen sollte es nicht gelingen große Mengen des Treibhausgases sicher über Zeiträume > 1000 Jahre zu speichern. Gegenstand aktueller Diskussion sind das Einlagern unter Gesteinsschichten und salinen Aquiferen, in ausgeförderten Erdöl- und Erdgaslagerstätten, in tiefen Kohleflözen, durch Deponierung in den Weltmeeren und in Form stabiler Minerale (Karbonate) über Tage auf Mülldeponien:

Undurchlässige und *wasserführende Gesteinsschichten (Aquifer)* scheinen aufgrund ihrer weiten und großflächigen Verbreitung sehr geeignet zu sein, Transportwege zu Speicher dieser Art werden auf max. 300 km geschätzt. Die Kapazität bewertet das IPCC weltweit auf max. 2000 Gt und damit auf eine Reichweite von mehr als 150 Jahre bei gleich bleibender CO<sub>2</sub> - Emission, wobei hier noch große Unsicherheiten vorliegen. Bei Injektion in wasserhaltige geologische Formationen unter 800 m Tiefe können zudem aggressive, kohlenstoffsaure Lösungen Bohrverschlüsse und umliegendes Gestein angreifen. Die Persistenz dieser Speicher, vor allem aufgrund ihrer dynamischen Eigenschaften – Aquifer führen sich bewegendes Wasser – sind daher noch offen stehende Fragen, die Gegenstand eines gegenwärtig am Sleipner-Gasfeld vor der Westküste Norwegens von Statoil durchgeführten Versuches sind (siehe [StOil,2007]). Ferner könnte ein Konflikt mit der in Zukunft genutzten Geothermie entstehen, da diese durch verstärkte Korrosion nur eingeschränkt anwendbar wären [Donner,2006].

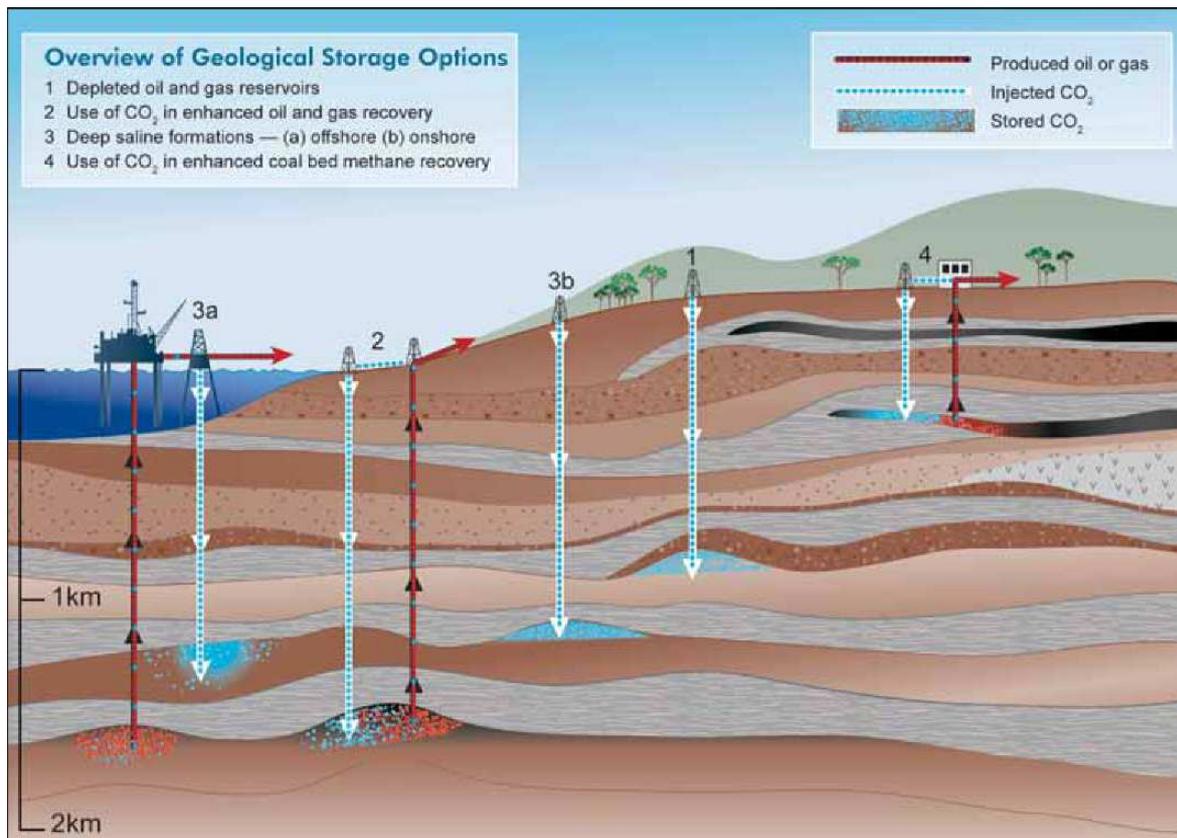


Abbildung 5 – [IPCC,2005]

Das Enhanced Oil/Gas Recovery Verfahren [EOR / EGR] bei dem verdichtetes CO<sub>2</sub> in versiegende Erdölvorkommen gepumpt wird um Förderrate und Förderdauer zu steigern, legt die Nutzung endgültig *ausgeförderter Lagerstätten* nahe. Beim kanadischen Weyburn-Projekt werden seit 2001 jährlich 2 Mt CO<sub>2</sub> in Erdölfelder gepresst. Zweidrittel verbleiben demnach unter der Erde, das andere Drittel kommt mit dem geförderten Öl zutage, das nach einer Trennung erneut eingepresst wird. Das CO<sub>2</sub> wird dabei 320 km weit von einer Vergasungsanlage ausgehend über Pipelines zum Feld transportiert. In den USA sind bereits 40 Mt CO<sub>2</sub> durch EO/GR in ehemalige Erdölvorkommen sequestriert worden. Das weltweite Potential von 675 – 900 Gt CO<sub>2</sub>, Reichweite ca. 30 Jahre, ist im Gegensatz zu obigem Speicher nicht gleichmäßig verteilt. So beläuft sich die Kapazität in Deutschland ausgeförderter Felder auf gerademal 2,7 Gt CO<sub>2</sub>. Sollten bestehende Unsicherheiten in Bezug auf langfristige Dichtigkeit, sprich Robustheit der Bohrverschlüsse gegenüber sauren Lösungen, die sich durch Feuchtigkeit im Boden bilden können, ausgeräumt werden, gelten ehemalige Erdgaslagerstätten als sehr geeignet für das CCS, da sie über Jahrtausende ihre Fähigkeit Gase vor dem Austreten zu hindern bereits unter Beweis gestellt haben [Donner,2006].

Beim der ECBM-Förderung (Enhanced Coal Bed Methane) wird ausgenutzt, dass Kohlenstoffdioxid eine höhere Bindungsaffinität zu Kohle hat als Methan. Das in *Kohleflözen* gebundene Grubengas (bei Kohlevorkommen handelt es sich vorwiegend um Methan) kann durch das Einbringen von CO<sub>2</sub> entnommen, also gefördert werden. Naheliegender scheint daher, Kohleflöze die sich in zu großer Tiefe befinden um wirtschaftlich genutzt werden zu können für das Einlagern von Kohlenstoffdioxid zu verwenden. Ist CO<sub>2</sub> in großer Tiefe an Kohle sorbiert, ist es für lange Zeit fixiert und kann nicht wieder entweichen. Offensichtlicher Nachteil hierbei ist allerdings das mögliche Freiwerden des Treibhausgases Methan, das wie oben angesprochen einen um Faktor 21 höheren Wärmeantrieb hat. Kann dies nicht sicher ausgeschlossen werden, nicht alle Kohlevorkommen binden notwendigerweise Methan, wäre der Beitrag am Treibhauseffekt möglicherweise sogar positiv, gelänge es in Folge in die Atmosphäre. Diese praktischen Schwierigkeiten konnten in einem Deponierungsversuch, das im Rahmen des EU-Projekts RECOPOL im Jahre 2005 in Polen stattfand bestätigt werden. Dort pumpte man CO<sub>2</sub> in ein Kohleflöz und entnahm an anderer Stelle Methan, welches aufgrund seiner starken CO<sub>2</sub> Verunreinigung auf eine unvollständige Bindung des CO<sub>2</sub> an die Kohle schließen ließ. Zudem stellte man kurz nach Projektbeginn ein starkes aufquellen der Kohle fest, sodass deren Durchlässigkeit für CO<sub>2</sub> rasch abnahm. Statt der angestrebten 20 t /d CO<sub>2</sub> erreichte man tatsächlich nur 1 t /d. Erst durch Sprengen kleiner Risse rundum das Bohrloch steigerte sich die Rate auf 12 – 15 t/d. Weiterer Nachteil ist der entstehende Nutzungskonflikt, falls die Kohle dieser Flöze später doch gebraucht werden sollte, deren sorbiertes Gas bei einer Förderung wieder frei werden würde. Die Kapazität dieser Speicher wird auf weltweit ca. 40 Gt C geschätzt [Donner,2006].

(Abbildung 6) zeigt unterschiedliche Möglichkeiten Kohlenstoffdioxid in Ozeane zu injizieren. Je nach Tiefe der Injektion nimmt das CO<sub>2</sub> durch den Druck der darüberliegenden Wassersäule unterschiedliche Wege. Bei einer Injektion oberhalb des kritischen Druckes von ca. 73,7 bar, steigt das noch gasförmige CO<sub>2</sub> in Wolken auf und löst sich im Wasser ehe es die Oberfläche erreicht. Unterhalb von 800 m und einer Temperatur von weniger als 31 °C geht das Treibhausgas in flüssiger Form in das Wasser über. Dort mischt es sich mit dem Wasser und wird von der Schwerkraft angetrieben in die Tiefe gezogen. Wird flüssiges CO<sub>2</sub> in Senken hoher Tiefe gepumpt kann es dort zur Bildung von CO<sub>2</sub>-Seen kommen. Von der ökologischen Katastrophe, die bei einer solch gezielten Versauerung der Weltmeere

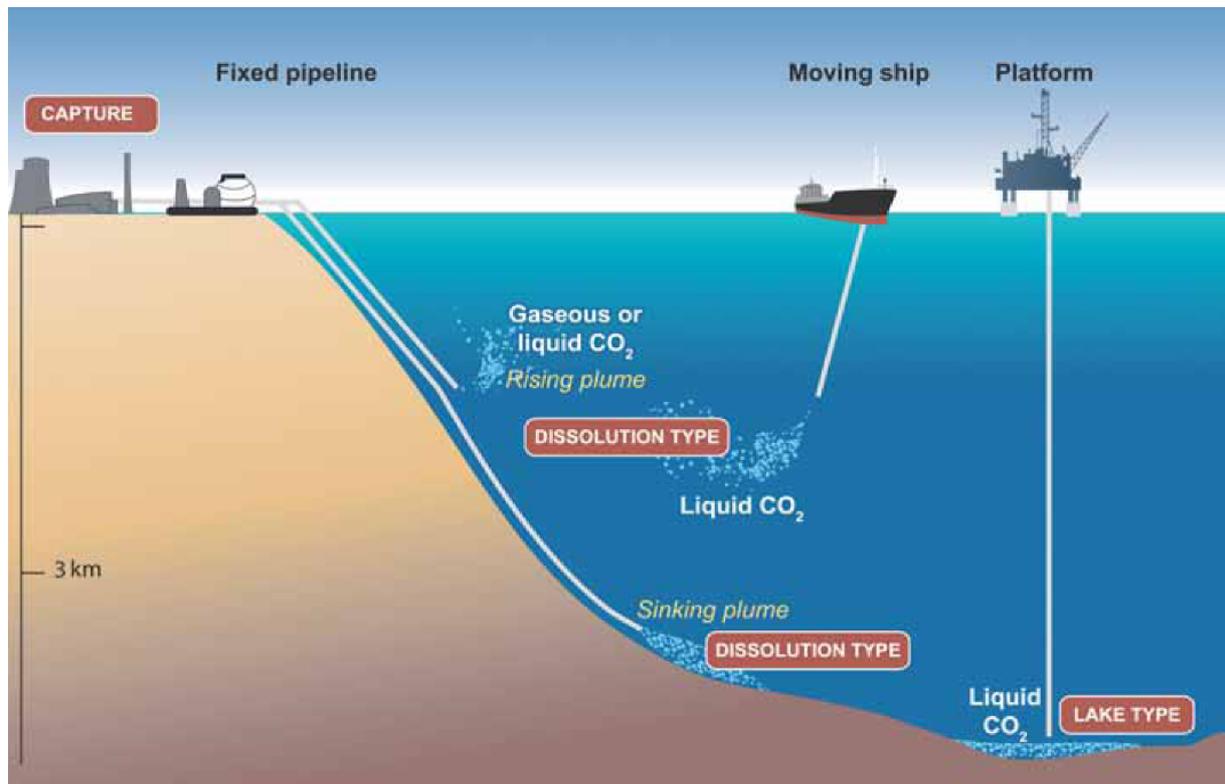


Abbildung 6 – [IPCC,2005]

heraufbeschworen wird abgesehen, ist unklar wie lange das CO<sub>2</sub> in den Meeren verbleibt. Meeresströmungen, tektonische und vulkanische Aktivität, sowie Nekton könnten dazu beitragen, dass CO<sub>2</sub>-Seen instabil werden und weite Teile des Meeresbodens überschwemmen was den Tod allen Lebens bedeuten würde. Das Speicherpotenzial wäre gleichwohl das größte aller bisher genannten. Vom IPCC wird es auf 1000 Gt C geschätzt

[Donner,2006].

## 2.5 Rein chemische Verfahren – Kosten

Die zusätzlichen Kosten der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung summieren sich über die Kosten der Abtrenntechnologie, dem Transport, dem Aufwand der Speicherung und dessen langjähriges Monitoring. Das IPCC rechnet mit einer Preiserhöhung zwischen 3,5 und 5,0 Cent /kWh Strom [IPCC,2005]. Weitere unvorhersehbare Kosten bergen die Notwendigkeit des Aufbaus entsprechender Kontrollmechanismen die über die Einhaltung von Sicherheitsauflagen

(Rücklagen für den Katastrophenfall, etc) wachen und bei Störungen über das Instrumentarium einer funktionierenden Sanktionierung verfügen. Vorallem der Aspekt schwerabschätzbarer Kosten ziehen den Nutzen des CCS gegenüber nachhaltiger Technologien in Zweifel. Aktuell wird zwar daran gearbeitet die Kosten für Speicherung, Transport und vor allem der Abtrennung durch Entwicklung in dem Bereich zu senken, doch ist nicht mit Sicherheit davon auszugehen, dass in Zukunft Strom aus erneuerbarer Energieerzeugung grundsätzlich teurer ist, als Strom aus Kraftwerken mit CCS-Anbau [Goerne,2004].

Technologie	Stromgestehungskosten / kWh	Vermeidungskosten / tCO <sub>2</sub> (2004)
Wind	6 – 8 Cent	87 €
Solar	40 - 60 Cent	687 €
Wasser	5 - 6 Cent	69 €
Geothermie	10 - 15 Cent	150 €
Biomasse	5 - 9 Cent	125 €
Braunkohle	4 - 5,5 Cent	0 - ?
Braunkohle + CCS	- 10,2 Cent	35 - 90 €
Steinkohle	4 - 5,5 Cent	0 - ?
Steinkohle + CCS	- 9,2 Cent	35 - 90 €
Erdgas	4 - 4,5 Cent	0 - ?
Erdgas + CCS	- 6,1 Cent	35 - 90 €

Abbildung 6 - [Goerne,2004]

## 8 3.Alternativen zum CCS

Mit „Alternativen zum CCS“ ist nicht gemeint, dass es sich dabei nicht um Carbon Capture and Storage handelt. Nur kommt in den folgenden beschriebenen Wegen der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung kein industrielles Verfahren vor in dessen Folge Kohlenstoffdioxid in Reinform vorliegt. Auch fällt in allen Fällen der Transport weg und die Speicher lassen sich nicht ohne weiteres scharf abgrenzen. Ein grundlegendes Prinzip trennt diese Verfahren zudem von den oben genannten ab – man bemüht sich um eine Steigerung der *natürlichen* statt der Schaffung einer *künstlich* noch zu schaffenden CO<sub>2</sub>-Sequestrierung.

### 3.1 Ozean-Düngung

Der größte Teil des biologisch gebundenen Kohlenstoffs von 2500 Gt entfällt auf das Plankton. Große Mengen Kohlenstoffdioxid wird durch Photosynthese betreibendes Phytoplankton der Luft und dem Wasser entzogen. Phytoplankton kommt in weiten Teilen der Weltmeere vor, dort, wo das Wasser nährstoffreich ist. Wichtig für das Wachstum sind neben Kohlenstoff, vor allem Eisen, Stickstoff und Kieselsäure. In früheren Untersuchungen hat man festgestellt, dass die Abwesenheit dieser Algen in bestimmten Regionen mit dem schlechten Angebot dieser Stoffe zusammenfällt. Die Idee der Ozeandüngung ist daher, eben jene Gebiete mit Nährstoffen (vor allem Eisen) zu versorgen, in denen naturgemäß keine Algen dieser Art vorkommen. Zielstellung ist es, kontrolliert Planktonblüten hervorzurufen.

Experimente mit mesoskaligen Ausdehnungen (wenige km<sup>2</sup>) zeigten, dass zwar durch Zusatz von Eisen Planktonblüten auf einfache Weise induzierbar sind, jedoch nicht notwendigerweise auch ein Kohlenstoffexport messbar sein muss [Boyd,2007]. Beobachtungen einer großen, natürlichen und jährlich wiederkehrenden Planktonblüte mit einer Ausdehnung von 45000 km<sup>2</sup> vor dem Kerguelen-Archipel zeigten, dass die Ursachen für

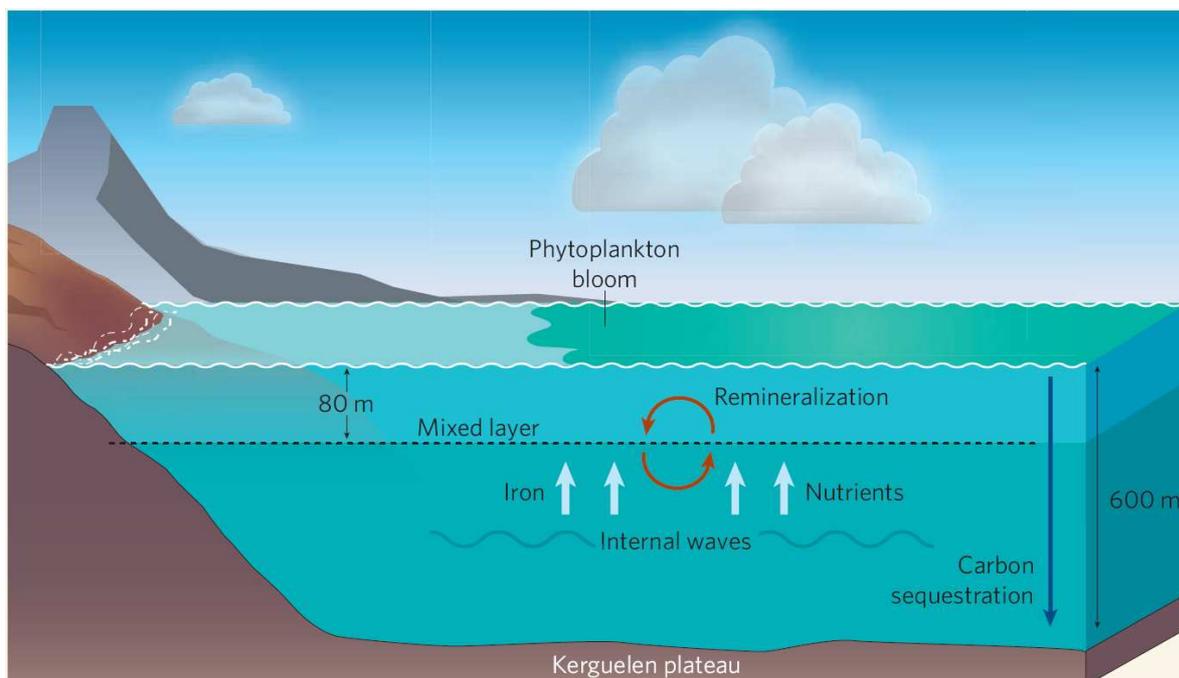


Abbildung 7 – [Boyd,2007]

diese langwährende Blüte in der *beständigen*, nährstoffreichen Aufwärtsströmung aus der Tiefe zu liegen scheint. Der gemessene Kohlenstoffexport je Einheit Eisen ist um eine bis zwei Größenordnungen höher als im Vergleich zu den in Laboren durchgeführten

Experimenten. Die Gründe für die starken Unterschiede werden u.a beim Absinken des Eisens in größere Tiefen, das bei statischer Düngen auftritt, vermutet. Außerdem glaubt man, dass es mit dem Düngen von Eisen alleine nicht getan ist, Stickstoff und Kieselerde scheinen ebenso wichtig zu sein. Neben Phytoplankton beobachtete man darüber hinaus ein vermehrtes Vorkommen demineralisierender Planktonarten wie zum Beispiel Zooplankton. Durch zusätzlichen Nährstoff werden demnach nicht nur die CO<sub>2</sub>-bindende sondern auch die freisetzende Komponente gestärkt [Boyd,2007]. Große Unsicherheiten in der Bewertung der Kohlenstoffbilanz von Eingriffen in den Nahrungshaushalt der Meere sind zudem nur sehr schwer bis nicht kalkulierbar. Experimente und dazu abgeleitete Modelle sind wegen im Labor schlecht simulierbarer Meeresströmungen, die in situ großen Einfluss auf die Verteilung der Nährstoffe haben, nur mit großer Vorsicht zu genießen. So kann das Risiko einer schwerwiegenden Gleichgewichtsstörung der marinen Vegetation und Tierwelt und einem auf langer Sicht positiven Kohlenstoffbeitrag nicht ausgeschlossen werden.

### **3.2 Aufforstung und veränderter Landbau**

Die Landwirtschaft ist zu 15 % an der globalen CO<sub>2</sub>-Emission beteiligt. Weitere 15 % entfallen auf dessen weitere Ausbreitung durch Brandrodung, seit ~1850 wurden so 140 Gt Kohlenstoff durch Landschaftskultivierung frei. Je Hektar Boden werden in Abhängigkeit der Bodenbeschaffenheit zwischen 20 und 80 t Kohlenstoff in die Atmosphäre entlassen, wenn er für den Landbau verfügbar gemacht wird. Akkumuliert über die Jahr seit 1950 sind es insgesamt  $78 \pm 12$  Gt C [Lal,2004]. Das Kohlenstoff-Sequestrierungspotential, das durch ein geeignetes Anbaumanagement genutzt werden soll, wird mit 50-66 % des entzogenen Kohlenstoffs beziffert. Die Idee beruht also auf der Umkehr des vor allem in trockenen und heißen Breiten auftretenden „SOC-Minings“ [Lal,2004]. Beschleunigte Erosion und Degradation können die Folge falscher und kurzsichtiger Anbaumethoden sein, das zu weiterem Verlust von Bodenkohlenstoff führt. Trockene Böden sind besonders gefährdet, weil sie in aller Regel einen viel geringen Gehalt an Kohlenstoff haben (~ 30 t/ha), als etwa Böden in feuchten Regionen (bis

zu 800 t/ha, 1m Tiefe). R.Lal macht folgende Vorschläge, um den SOC-Gehalt dieser Böden zu steigern:

- Waldfeldbau
- conservation/no-till farming
- angepasstes Nährstoffmanagement / Kompostwirtschaft z.B. Einbringung pyrogenen Kohlenstoffs
- gezielte Bodenrestoration (Bsp.: „Pleistocene Park“ nach Zimov et al.)

Beim *Waldfeldbau* oder Waldregeneration handelt es sich um eine landwirtschaftliche Zwischennutzung minderwertiger Waldböden. Ziel ist häufig eine Bodenverbesserung herbeizuführen, die der Anpflanzung anspruchsvoller Baumarten dienen soll. Die Pflanzen speichern bei ihrem Wachstum Kohlenstoff in ihrer Biomasse, dass sie zuvor der Atmosphäre entzogen haben. Die Bepflanzung verringert die weitere Degradation des Bodens und führt zu einem steigenden Kohlenstoffgehalt in der Erde.

Der Kohlenstoffgehalt in landwirtschaftlich genutzten Böden ist im Allgemeinen geringer wo zu es Auswaschungen durch starkes künstliches Bewässern und tiefes Pflügen kommt. Ein Versuch dies zu mindern ist die Modifizierung üblicher Methoden der Bestellung und Ernte, das sich im „*conservation farming*“ äußert. Durch effizienteres Bewässern und vermindertes Umgraben soll Erosion und Degradation verringert werden.

Kohlenstoff ist ein wesentlicher Bestandteil von Humus. Bei der *Kompostwirtschaft* soll verstärkt auf die Nutzung dieses Vorkommens zurückgegriffen werden. R.Lal rechnet in [Lal,2005] vor, dass für dessen Sequestrierung von 1 Gt etwas 80 Mt Natrium, 20 Mt Phosphor und 15 Mt Kalium notwendig sind. Zum Vergleich betrug im Jahre 2000 der globale Düngerverbrauch etwa 136 Mt. Zudem weist er auf die jedes Jahr in der Agrarwirtschaft anfallenden 3 Gt Pflanzenreste hin, welche in vorm von Kompost recycelt statt verbrannt, die Bodenbeschaffenheit verbessert und die Kohlenstoffsequestrierung erhöhen könnte. Jedoch äußert er gleichzeitig Zweifel, ob dieses Vorgehen, also dem Verzicht auf die Verbrennung dieser Reststoffe und die resultierende fehlende Substitution fossiler Energieträger, tatsächlich einen Vorteil bietet.

Beobachtete Raten der C-Sequestrierung in landwirtschaftlich genutzten und wiederhergestellten Ökosystemen hängen von der Bodenbeschaffenheit und den klimatischen Bedingungen ab. In trockenen und warmen Regionen beziffert R.Lal sie mit 0 – 150 kg/ha/yr, in gemäßigten Regionen mit 100 – 1000 kg /ha/yr. Durch die oben beschriebenen Maßnahmen sollen sich diese Raten 20 – 50 Jahre aufrechterhalten lassen. Nachteil dieser sehr kosteneffektiven und zugleich umweltfreundlichen Form des CCS ist die Gefahr des Wiederfreiwerdens des SOC bei Rückfall auf alte Methoden der Feldbestellung. Die Bestreitung dieses Weges zur Minderung der Klimaerwärmung ist also eher als eine Möglichkeit des Überbrückens von Zeit zu verstehen, die gebraucht wird um andere nachhaltige Alternativen zur Verbrennung fossiler Energieträger auf den Weg zu bringen. Dass sich deren Einschlagen aber trotz der Unsicherheiten über die Kohlenstoffbilanz lohnt begründet R.Lal mit dem erzielen höherer Ernteerträge bei hohem Bodenkohlenstoffgehalt. So bewirkt eine Tonne mehr Kohlenstoff in einem Hektar Boden (1 m) eine Erntesteigerung von 20 – 40 kg Weizen /ha bzw. 10 – 20 kg Mais / ha. Auf diese Weise ließen sich zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen, zum einen mindert man den Kohlenstoffdioxidgehalt in der Atmosphäre zum anderen kann zur Nahrungsversorgungssicherheit für die wachsende Weltbevölkerung beigetragen werden.

Zimov et al. beschrieb 2005 in einem Science-Artikel mit der Schaffung eines „*Pleistozän Parks*“ ein Szenario bei dem die vor mehr als 11.000 Jahren vorherrschende Vegetation in weiten Teilen der Tundra wiederhergestellt ist. Damals gediehen in den Gegenden, wo in den nächsten Jahren ein 16.000 Hektar großer Park entstehen soll, dichte Gräser und Büsche, die biologisch produktiver sind als die gegenwärtig auf dem kargen Boden wachsenden Moose. Hintergrund seiner Idee ist, dass die Flora einer Region maßgeblich durch ihre Fauna bedingt ist und nicht umgekehrt. Ziel seines Experimentes ist daher die reiche Tierwelt der vergangenen Epoche aus

Grasfressern wie z.B. Bisons, Pferden, Rentieren, Moschus-



**Abbildung 8 – [Zimov,2006]**

ochsen sowie einigen Räubern wiederherzustellen indem sie in einem nach und nach größer werdenden und geschützten Teilgebiet der Tundra ausgesetzt werden. Er hofft, dass sie das Tundra-Moos wegfressen und durch ihre Wanderungen "zerstampfen" und somit zur Trockenlegung der Böden beitragen und sie mit Nährstoffen bereichern können. Die Wiederherstellung dieses vergangenen Ökosystems soll neben der Möglichkeit der Ergründung für dessen Untergang vor etwa 11.000 Jahren das Kohlenstoffsequestrierungspotential riesiger Flächen ausgezehrter Böden aktivieren und so auf umweltschonende Weise der Klimaerwärmung begegnen helfen [Zimov,2005].

### **3.3 Aufforstung und veränderter Landbau - Advanced**

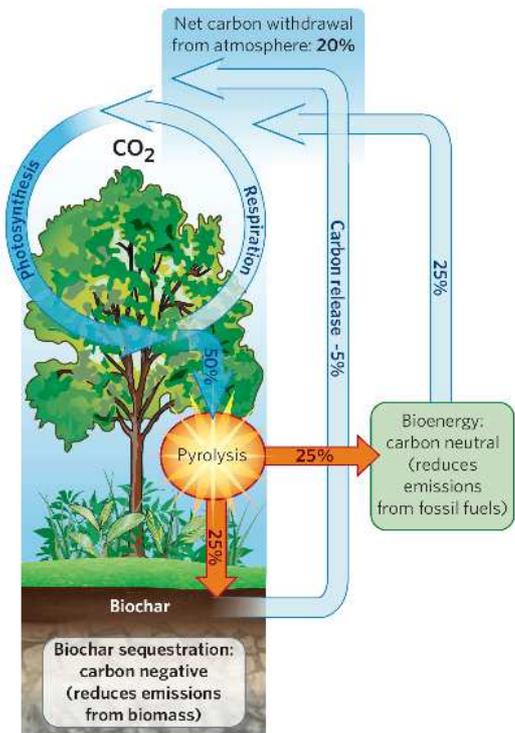
Obwohl die Verminderung der Nutzung fossiler Energieträger höchste Priorität in Kampf gegen den globalen Klimawandel hat, sind einige Emissionen auch im optimalen Fall nicht vermeidbar. Das macht einen aktiven und gezielten Entzug von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre notwendig. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an die verwendete Technologie. Der Nettoentzug muss langfristig und nachhaltig sein, der Prozess in Gänze verantwortbar, sprich ein geringes Risiko bzgl. (plötzlicher) Freisetzung größerer Mengen CO<sub>2</sub> bergen. Eine *kurzfristige* Möglichkeit, die diese Bedingungen erfüllt ist die Biokohle-Sequestrierung. Kombiniert mit der Nutzung dieses Energieträgers zur Bioenergieproduktion handelt es sich um eine saubere und zu der Vielzahl oben beschriebener Sequestrierungs-methoden vergleichbare Option. Ein im Kyoto-Protokoll anerkanntes Verfahren ist die Sequestrierung über Biomasse per Aufforstung. In einer weiterentwickelten Form des Klimabaus wird beliebige Biomasse zuvor einem Pyrolyse-Prozess zugeführt.

[EX] *Pyrolyse* ist ein exothermer Verschmelzungsprozess bei dem Holzkohle (Biokohle) entsteht. Als Nebenprodukte fallen brennbares Gas und Teer an. Die Kohle besteht fast komplett aus pyrogenem Kohlenstoff.

Der dabei entstehende *pyrogene Kohlenstoff* ist wichtiger Bestandteil von Humus und zu 40 % in Schwarzerde, sogenannter Terra preta enthalten. Schwarzerde kommt vor allem in Amazonien vor und war schon den Indios als sehr fruchtbarer Boden bekannt. So beweisen archäologische Grabungsstätten, dass Biokohle ein sehr langlebiger Stoff ist, er gilt als mehrere Größenordnungen stabiler, bindet doppelt soviel Kohlenstoff als gewöhnliche Biomasse und birgt damit ein viel sichereres und größeres Potential als das Unterpflügen unbehandelter Pflanzenreste, wie es bei der Kompostlandwirtschaft betrieben wird. Es kann folglich zu keinem nachträglichen und unerwarteten Entweichen von Kohlenstoffdioxid kommen, wie es bei Leckagen geologischer Speicher oder dem Beenden des conservation farmings möglich wäre.

Auf diese Weise lassen sich ca. 50 % der jährlichen Biomassenzirkulation entziehen und in einen weitaus langsameren Zyklus überführen. Bei diesem Entzug von organischem Kohlenstoff aus dem Wachstums-Zersetzungs-Kreislauf wird der Atmosphäre aktiv CO<sub>2</sub> entzo-

**Abbildung 9 – [Lehmann,2007]**



gen. Die Kosten der Pyrolyse sind durch die nötige Infrastruktur (einfache Köhler-Ofen, Logistik, etc.), dem Heizaufwand und dem Biomassenpreis bestimmt. Da alle Kostenfaktoren aufgrund ihrer massenhaften Verfügbarkeit sehr gering ausfallen ließe sich das Pyrolyse-Verfahren lokal aber auch global sehr schnell realisieren. Weltweit wäre so in verhältnismäßig kurzer Zeit die Etablierung einer kohlenstoffdioxidneutralen Energiewirtschaft möglich. Nutzt man jedoch einen Teil der Kohle um es landwirtschaftlich genutztem Boden beizumengen statt es zu verbrennen kann künstlich Schwarzerde hergestellt werden. Die in der Schwarzerde enthaltene Kohle steigert die Fähigkeit des Bodens, Nährstoffe, die durch Düngung und Bepflanzung hinzubegeben werden, zu speichern, sprich vor dem Auswaschen durch Regen etc. zurückzuhalten, wovon auch die Wasserqualität direkt profitiert. J. Lehman sagt in [Lehmann,2007], dass diese Form der Energiewirtschaft aus der teilweisen Nutzung der gewonnenen Biotreibstoffe zur Energiegewinnung als auch zur Besserung der lokalen Bodenbeschaffenheit eine zusätzliche Emissionsreduktion von 12 – 84 % gegenüber der vollständigen Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse erreichen kann.



Abbildung 10 – [Lehmann,2007]

Dies eröffnet die Chance, eine negativ bilanzierte Energiewirtschaft bzgl. Kohlenstoffdioxidemission aufzubauen. J. Lehman rechnet dies für drei mögliche Szenarien vor; *[genutzte Fläche für den Anbau | Ertrag je Hektar | Art der Nutzung]* :

- [200 Mha | 3,5 t / ha | Nutzwald]
- [30 Mha | 20 t / ha | Klimabau]
- [120 Mha | 5,5 t / ha | Agrarwirt]

→ Energiegewinnung mit jeweils einer Sequestrierung von 10 % der im Jahr 2005 in den USA emittierten Kohlenstoffdioxidmenge

Im Vergleich dazu die Bilanz gewöhnlicher Biomassensequestrierungsverfahren:

3,6 %

Solange Pflanzenreste in Massen günstig verfügbar sind ist das Bertreiben dieser klimaschonenden Art der Energiegewinnung wirtschaftlich und unter Umständen sogar finanziell reizvoll, wenn die auf dem Chicago Climate-Exchange gehandelten Verschmutzungsrechte auf über 37 US\$ je Tonne CO<sub>2</sub> steigen sollten, derzeit sind es 4 US\$ je Tonne CO<sub>2</sub> [Lehmann,2007].

Die Voraussetzung der Trockenheit der für die Pyrolyse verwendeten Pflanzenreste ist ein großer Nachteil des Verfahrens. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Kohlenstoffeffizienz (CE)

der Holzkohleherstellung. Unter dem CE-Wert versteht man das Verhältnis aus dem Kohlenstoffgehalt der zu Beginn zugeführten Biomasse und dem Endprodukt. Ist der CE-Wert  $< 1$ , ist zumeist Kohlenstoffdioxid oder Methan entstanden, das einen Teil des Kohlenstoffs davonträgt. Bei der Pyrolyse entsteht Synthesegase ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) und Nebenprodukte, die nicht in allen Fällen sinnvoll weiterverwendet werden können, bei der Kompostierung entweichen große Mengen Kohlenstoff durch Methan- und  $\text{CO}_2$ -Freisetzung, der CE-Wert ist demnach teilweise weit unter  $\text{CE} = 1$ . Anders verhält es sich bei dem vom Direktor des Potsdam Max-Planck-Institutes für Kolloid- und Grenzflächenforschung vorgestellten Verfahrens der hydrothermalen Karbonisierung.

[EX] *hydrothermalen Karbonisierung*, d.h. wässrige Verkohlung bei erhöhter Temperatur ist ein chemisches Verfahren zur *hocheffizienten* Herstellung von Biokohle. Bei ihr wird der in der Natur über Jahrmillion stattfindende Prozess der Inkohlung von Biomasse stark beschleunigt. Da diese Form der Karbonisierung unter völligem Abschluss stattfindet, sprich die Biomasse unter Sauerstoffentzug „gekocht“ wird, liegt die Kohlenstoffeffizienz bei nahezu  $\text{CE} \approx 1$ . Zudem lässt sich durch Modifikation der Kochzeit das Endprodukt beeinflussen. Je länger der Vorgang andauert desto weiter durchlaufen die Pflanzenreste die Entwicklung zur Schwarzkohle. Mutterboden erhält man durch kurzes, Braun- und Schwarzkohle durch langes Erhitzen. Nach etwa 12 h bei  $180\text{ °C}$  kann dem „Kochtopf“ Schwarzkohle in Form eines Nanopartikel-Pulvers entnommen werden, das in Zukunft eventuell ohne Trocknung direkt für die Energiegewinnung durch Kohlenstoff-Brennstoffzellen bei Wirkungsgraden von  $n = 0,6$  und höher genutzt werden könnte [MPG,2006].

Beiden Inkohlungsprozessen gemeinsam sind ihre Einfachheit und damit die Möglichkeit sie in kurzer Zeit weltweit einsatzfähig zu machen. Die eingesetzten Technologien sind bereits seit Jahrzehnten und Jahrhunderten bekannt. Zudem unterstützt das *bestehende* Kyoto-Protokoll diese Form der  $\text{CO}_2$ -Sequestrierung, schließlich sind deren Kohlenstoffumsatz leicht zu ermitteln und damit vom Kyoto-Klimamarkt erfassbar, was bei no-tillage farming u.ä. nicht der Fall ist. In diesem Falle ist es also eher eine Frage politischer Entscheidungen, ob und in welchem Umfang der Verantwortung der Menschheit gegenüber der Umwelt Rechnung getragen werden soll und nicht etwa eine Frage technischer Möglichkeiten und Kosten.

## 9 Schlusssatz

Die globalen Reserven fossiler Energieträger binden heute noch etwas 5000 Gt Kohlenstoff. Folglich ist ein hinreichend großes Potential an Energie aber auch Treibhausgasemission für die nächsten Jahrzehnte vorhanden. Um aber, wie unter anderem vom IPCC immer wieder gefordert wird, bis Mitte dieses Jahrhunderts eine Stabilisierung der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre auf ein niedriges Niveau zu erreichen ohne die Weltwirtschaft dabei ernsthaft zu gefährden muss für eine entsprechend leistungsfähige Energiegewinnung gesorgt werden. Die Senkung der globalen Emission von 6 auf 2 Gt C /yr entspricht bei angenommenen 10 Milliarden Erdbewohnern einer pro Kopf Emission von 3 % der heutigen pro Kopf Emission in den USA [Lackner,2003]. Diese Herausforderung zu meistern kann sicher nicht das alleinige Setzen auf End-Of-Pipe Technologien, wie die Errichtung kohlenstofffreier Kohle-, Erdöl- oder Gaskraftwerke mithilfe des CCS bedeuten. Das Abtrennen, Transportieren und Speichern klimawirksamer Mengen Kohlenstoffdioxids würde den Aufbau einer multiterawattskaligen CCS-Infrastruktur notwendig machen, welches den weltweiten Verbrauch fossiler Energieträger erheblich steigern würde. Die beschriebenen Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung sollten demnach eher als Brücke zur Überwindung der Zeit unausgereifter regenerativer Energiequellen verstanden werden. Denn nur mit ihnen wäre man in der Lage eine umweltfreundliche und sichere Energiegewinnung ohne Entstehung von Altlasten, deren Langzeitverhalten in geologischen oder marinen Speichern unbekannt sind, zu errichten.

## 10 Literaturverzeichnis

- [Boyd,2007] Philip W. Boyd, *Iron findings*, Nature **446**, 2007
- [Donner,2006] S. Donner, D. Lübbert, *Kohlendioxidarme Kraftwerke – CO<sub>2</sub>-Sequestrierung: Stand der Technik, ökonomische und ökologische Diskussion*, Info-Brief WF VIII G, Wiss.Dienste des deutschen Bundestages, 2006
- [Goerne,2004] V.i.S.d.P. Gabriela von Goerne, *Fünf Argumente gegen CO<sub>2</sub>-freie Kohlekraftwerke*, Greenpeace e.V 05/2004
- [Heat,2005] Heat et al., *Rising Atmospheric CO<sub>2</sub> Reduces Sequestration of Root-Derived Soil Carbon*, Science **309**, 2005
- [GEOMAR] IFM-GEOMAR [http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=gh\\_klima](http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=gh_klima)
- [IPCC,2005] IPCC , *Special Report on Carbon Capture an Storage*, 2005
- [Lackner,2003] Klaus S. Lackner, *A Guide to CO<sub>2</sub> Sequestration*, Science **300**, 2003
- [Lal,2004] R.Lal, *Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security*, Science **304**, 2004
- [Lehmann,2007] Johannes Lehmann, *A handful of carbon*, Nature **447**, 2007
- [MPG,2006] Brigitte Röthlein, *Zauberkohle aus dem Dampfkochtopf*, MaxPlankForschung 02/2006
- [PIK,2007] <http://www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/risiko-fur-abschwachung-der-atlantischen-ozeanzirkulation-im-21-jahrhundert>
- [StOil,2007] <http://www.stoil.com/> , Statoil Magazine August 2007
- [Visbeck,2007] Martin Visbeck, *Power of Pull*, Nature **447**, 2007
- [wikipedia] [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Albedo-d\\_hg.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Albedo-d_hg.png)
- [Zimov,2006] S.A.Zimov, *Permafrost and the Global Carbon Budget*, Science **312**, 2006
- [Zimov,2005] S.A.Zimov, *Pleistocene Park: Return of the Mammoth's Ecosystem*, Science **308**, 2005





# Hauptseminar Angewandte Systemwissenschaft

## Der Preis des Klimaschutzes

Betreuer: Prof. Dr. Michael Matthies

Autor: Arnim Bleier

Abgabe: 30.09.2007

### Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	223
2	Das Marktversagen.....	223

---

2.1	Die Externalisierung von Kosten.....	223
2.2	Die Auswirkungen der Pareto-Superiorität.....	225
3	Die Klimakonferenzen der Vereinten Nationen .....	227
3.1	Die Konferenz über Umwelt und Entwicklung .....	228
3.2	Drei Gruppen des Rahmenabkommens.....	230
3.3	Jährliche Treffen der Unterzeichner Staaten.....	230
3.4	Das Kyoto-Protokoll.....	231
4	Die Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen .....	233
4.1	Theorie des Handels mit Emissionsrechten.....	234
4.2	Die Umsetzung des Handels mit Emissionsrechten.....	235
4.3	Rezeption der Maßnahmen .....	236
5	Post-Kyoto .....	238
	Literatur.....	240

## **1 Einleitung**

Der Schutz des Klimas der Erde ist nicht nur ein in den Massenmedien immer populärer werdendes Thema, sondern ist eine Voraussetzung für jegliche weitere menschliche Entwicklung. Aus diesem Grund beschäftigt sich dieses Papier mit dem Zusammenspiel aus wissenschaftlichen Fakten, ökonomischen Notwendigkeiten und politischen Entscheidungsprozessen.

Der erste Abschnitt stellt die bestehende Marktsituation und das Marktversagen dar. Den zweiten Abschnitt bildet den Aufgriff dieses Marktversagens durch die Politik und die erarbeiteten Lösungsversuche ab. Im Anschluss daran werden die politisch gesetzten Lösungsmöglichkeiten in Theorie und Umsetzung behandelt. Im letzten Abschnitt wird auf die weitere Entwicklung nach dem Kyoto-Abkommen eingegangen.

## **2 Das Marktversagen**

Da sich diese Arbeit mit der Klimapolitik beschäftigt, wird erst erörtert, weshalb eine Notwendigkeit für ein weltweites Umdenken auf diesem Gebiet besteht. Der erste Paragraph dieses Abschnitts geht deshalb auf das Versagen des Verursacherprinzips ein, der zweite spricht Gründe an, warum dieses Versagen auftritt und mit welchen Konsequenzen zu rechnen ist.

### **2.1 Die Externalisierung von Kosten**

Die natürliche Umwelt stellt den Menschen Rohstoffe zur Verfügung. Werden diese Rohstoffe verbraucht, ohne dass der Verbraucher für die dadurch entstehenden Kosten aufkommt, so spricht man von einer Externalisierung. Weichen die Produktionskosten von den tatsächlichen entstehenden Kosten ab, führt dies zu einer Verzerrung der Preisstruktur. Die Folge ist eine Fehlallokation von Gütern aufgrund falscher Marktsignale (Oberender 2004 S. 226). Eine nahe liegende Strategie wäre es, den Markt für von der Umwelt bereitgestellte Güter auszuweiten. Doch handelt es sich dabei oft, wie beispielsweise bei der Luft, um freie Güter, von deren Nutzung niemand ausgeschlossen

werden kann. Ist aber kein Nutzungsausschluss möglich, so kann sich auch kein Preis bilden (Oberender 2004 S. 64).

Eine andere Sichtweise auf das Problem der Externalisierung von Kosten, also des Auseinanderfallens von Handlung und Haftung, ist das Gefangenendilemma. So könnte das Emittieren von klimaschädlichen Gasen als defektierendes und das Unterlassen als kooperatives Verhalten idealisiert interpretiert werden (Stephen 2005). Doch legt auch dieser theoretische Ansatz nahe, dass individuell rationales Verhalten zu global suboptimalen Ergebnissen führt. Robert Axelrod konnte mit Hilfe von Computersimulationen zeigen, dass dies

nicht nur für einzelne Spiele, sondern auch für iterierte Interaktionen mit unterschiedlichsten Superspielstrategien gilt.<sup>10</sup>

## 2.2 *Die Auswirkungen der Pareto-Superiorität*

Dass sich das Klima der Erde langfristig aufgrund menschlicher Eingriffe verändern wird, ist weitläufig anerkannt (Change 2001, Abschnitt 2.3.5). Dies ist laut Nicholas Stern zurückzuführen auf ein Marktversagen. Jedoch unterscheidet sich das Marktversagen, welches bei der nicht kostenpflichtigen Emission von klimaschädlichen Gasen auftritt, deutlich von anderen bekannten Erscheinungsformen von Marktversagen. Zum einen ist es global, was bedeutet, dass selbst

---

<sup>10</sup> Tatsächlich kann nicht immer davon ausgegangen werden dass sich keine Kooperation unter den Beteiligten einstellt. Vielmehr hängt dies von der Zusammensetzung des Strategiepools, der Menge der verbleibenden Interaktionen und der Beobachtbarkeit des Verhaltens der Mitspieler ab (Axelrod 1984).

erhebliche Verunreinigungen durch einen Marktteilnehmern nur schwer feststellbare Folgen nach sich ziehen. Zum anderen wirft dieses Marktversagen auch Fragen der Diskontierung von Nutzen und der Generationengerechtigkeit auf, da Ursachen und Wirkungen zeitlich weit getrennt sind. Wie sich das Klima der Erde ändern wird, ist hingegen Gegenstand breiter Diskussionen, da nur schwer abschätzbare Unsicherheiten mit in Betracht gezogen werden müssen (Stern 2007). Nur dass die Änderungen des Klimas kaum rückgängig gemacht werden können, scheint fest zu stehen.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Eine ausführliche Behandlung der möglichen Folgen einer Klimaveränderung kann im Stern Report gefunden werden (Stern 2006).

### **3 Die Klimakonferenzen der Vereinten Nationen**

Eine der Hauptaufgaben der Vereinten Nationen ist es, einen Rahmen für Lösung von Problemen bereitzustellen, die auf staatlicher Ebene nicht zufrieden stellend gelöst werden können. So ist der Gegenstand des ersten Paragraphen dieses Abschnittes die Konferenz über Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen von 1992. Der darauf folgende Paragraph legt die auf der Konferenz beschlossene Aufteilung der Lasten des Klimaschutzes dar. Der dritte Paragraph beschreibt den Weg von vereinbarten Zielen hin zu deren rechtsverbindlichen Verankerung, welche dann im letzten Paragraphen dieses Abschnittes behandelt wird.

### 3.1 Die Konferenz über Umwelt und Entwicklung

Die 1992 stattgefundenene Konferenz der Vereinten Nationen, in Rio de Janeiro über Umwelt und Entwicklung war seit der Konferenz der Vereinten Nationen über die Umwelt des Menschen von 1972 in Stockholm, die erste Umweltkonferenz die Fragen international diskutierte.<sup>12,13</sup> An der Konferenz von Rio nahmen offizielle Vertreter aus über 178 Staaten sowie mit beratenden Funktion cirka 2400 Vertreter von Nichtregierungsorganisationen (Schneider 1992). Auf der Tagesordnung standen Themen wie Produktionstechniken, alternative Energiequellen, Städteentwicklung und Gesundheitsfürsorge (Earth 1992). Die Konferenz beeinflusste nachfolgende UN-Konferenzen, welche sich mit der Beziehung von Menschenrechten,

---

<sup>12</sup> Aus dem Englischen von: „United Nations Conference on Environment and Development“.

<sup>13</sup> Aus dem Englischen von: „United Nations Conference on the Human Environment“.

Bevölkerungsentwicklung und der umweltverträglichen Entwicklung beschäftigten.<sup>14</sup> Die Abschlussdokumente sind eine Erklärung zu Umwelt und Entwicklung, die Agenda 21, die Übereinkunft zu Fragen der Biodiversität, eine Vereinbarung zur Waldnutzung und die Klimarahmenkonvention.<sup>15,16</sup>

---

<sup>14</sup> Beispielsweise wurde auf der UN-Konferenz in Wien von 1993 das Recht der Menschen auf eine gesunde Umwelt und das Recht auf Entwicklung thematisiert (Earth Summit 1992 und Konferenz On Human Rights 1993).

<sup>15</sup> Aus dem Englischen von: „Rio Declaration on Environment and Development“, „Convention on Biological Diversity“, „Non-Legally Binding Authoritative Statement of Principles for a Global Consensus on the Management, Conservation and Sustainable Development of All Types of Forests“, „United Nations Framework Convention on Climate Change“.

<sup>16</sup> Die Abschlussdokumente traten jedoch nicht sofort in kraft. Vielmehr handelte es sich hierbei um einen Prozess. Im Fall des Rahmenabkommens zum Klimaschutz begann dieser auf der Konferenz von Rio de Janeiro und dauerte bis zum 24 März 1994, da bis zu diesem Zeitpunkt mehr als 50 Staaten unterzeichnet hatten.

Besonders ist die Klimarahmenkonvention hervorzuheben, da sie den Grundstein für das spätere Kyoto-Protokoll bildet. Diese hat das Ziel, die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren, um der globalen Erwärmung entgegenzutreten. Sie setzt jedoch keine verbindlichen Obergrenzen für den Ausstoß und enthält auch keine Zwangsmassnahmen zur Durchsetzung, so dass sie als nicht rechtlich bindend angesehen werden kann.

### **3.2 Drei Gruppen des Rahmenabkommens**

Die Unterzeichnerstaaten der Rahmenvereinbarung sind in drei Gruppen eingeteilt:

Anhang I Länder, welche Industrieländer sind, haben sich verpflichtet, ihre Emissionen unter das Niveau von 1990 zu reduzieren. Falls dies ihnen nicht gelingt, müssen sie Emissionsrechte erwerben. Die Länder, die in Anhang II aufgeführt sind, sind eine Untergruppe von Anhang I. Anhang II enthält OECD Mitgliedstaaten, die keine Schwellenländer sind (Earth 1992 Artikel 4). Entwicklungsländer bilden die dritte Gruppe, für welche die wirtschaftliche und soziale Entwicklung Vorrang gegenüber den Zielen zur Reduktion von Emissionen hat. Es steht diesen Ländern jedoch offen, sich in den Anhang I aufnehmen zu lassen, wenn sie sich hinreichend weiterentwickelt haben.

Diese Dreiteilung erfolgte aus mehreren Gründen. Es wurde versucht, auf die wirtschaftliche Situation in den einzelnen Ländern Rücksicht zu nehmen, da die wirtschaftliche Entwicklung eng verbunden ist mit der Emission von Treibhausgasen. Auch soll die Ungleichbehandlung den Transfer von Geld und Technologien von entwickelten hin zu weniger entwickelten Staaten unterstützen (Earth 1992 S. 2).

### **3.3 Jährliche Treffen der Unterzeichner Staaten**

Die Rahmenkonvention sieht Erweiterungen vor, die verbindlicher sind (Earth 1992 Artikel 7). Um diese Erweiterungen haben sich seit dem Inkrafttreten des Rahmenabkommens die Unterzeichnerstaaten im Jahresrhythmus bemüht. Das erste dieser Folgetreffen fand im Frühjahr 1995 in Berlin statt. Das auf diesem Treffen verabschiedete, so genannte Berliner Mandat war Ausdruck von Bedenken, ob die Staatengemeinschaft in der Lage ist, die Ziele der Rahmenvereinbarung zu erreichen. Ein zweijähriger Beratungsprozess begann mit dem Ziel, Mittel für den Klimaschutz zu finden, die aus wirtschaftlicher Sicht geeignet sind (Sprinz 1998 S.29). Des Weiteren wurden Länder, die nicht in Anhang I aufgeführt sind, von zusätzlichen Verpflichtungen befreit, obwohl zu erwarten war, dass große Schwellenländer zu den stärksten

Emittenten von Treibhausgasen in Zukunft werden würden. Das zweite Folgetreffen brachte keine größeren Veränderungen und war bestimmt durch die zögerliche Haltung der USA.<sup>17</sup>

### **3.4 Das Kyoto-Protokoll**

Auf dem dritten Treffen in Kyoto 1997 wurde dann das sehr bekannt gewordene gleichnamige Protokoll verabschiedet.<sup>18</sup> Dieses Zusatzprotokoll brachte die rechtliche Bindung, innerhalb der Jahre 2008 bis 2012 die Emission von Treibhausgasen um 5.2% unter das Niveau von 1990 zu

---

<sup>17</sup> Stellvertretend für Andere seien hier Äußerungen eines Vertreters der USA, Timothy Wirth, zum Aufruf zur Anerkennung der Ergebnisse des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) genannt, die jedoch einhergingen mit der Zurückweisung einer gemeinschaftlichen Vorgehensweise (Wirth 1996).

<sup>18</sup> Auch dieses Zusatzprotokoll trat nicht sofort rechtswirksam, sondern musste von mindestens 55% der Staaten die zusammen mehr als 55% des Kohlendioxidausstoßes, von 1990, verursachten unterzeichnet werden. Das Protokoll trat dann im Februar 2005 in Kraft (Ratification 2005).

senken.<sup>19</sup> Falls es einem in Anhang I aufgeführten Land nicht gelingt, seinen Verpflichtungen nachzukommen, ist es gebunden, die Verschmutzung zu unterlassen und zusätzlich weitere 30% der über die Menge der erlaubten Verschmutzung hinausgehenden Emissionen einzusparen. Des Weiteren wird dieses Land vom Emissionshandel (siehe unten) ausgeschlossen (Kyoto 1997).<sup>20</sup>

---

<sup>19</sup> Die tatsächliche Senkung der Emission, im Vergleich zu den Emissionen die in diesem Zeitraum ohne Protokoll zu erwarten wären, beläuft sich jedoch auf 29% (Williams 1998).

<sup>20</sup> Als Treibhausgase gelten im Kyoto-Protokoll Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid, Schwefelhexafluorid, Halogenkohlenwasserstoffe und Perfluorcarbone.

Um diese Ziele zu erreichen, sieht das Protokoll mehrere, so genannte flexible Maßnahmen vor. Als solche flexiblen Maßnahmen werden dabei die gemeinsame Umsetzung, der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung und die Lastenteilung aufgeführt.<sup>21</sup>

#### **4 Die Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen**

Der letzte größere Abschnitt dieser Arbeit setzt sich mit den Maßnahmen, die im Kyoto-Protokoll beschlossen wurden, auseinander. Begonnen wird mit einer theoretischen Behandlung des

---

<sup>21</sup> Aus dem Englischen von: „Joint Implementation“, „Clean Development Mechanism“, „Burden Sharing“.

Internalisierung der Kosten, die aus der Belastung der Umwelt entstehen. Der zweite Paragraph legt die Umsetzung des Handels mit Emissionsrechten dar. Den Schluss bildet eine Aufnahme der Reaktionen seitens der Umweltverbände und der Wirtschaft.

#### **4.1 Theorie des Handels mit Emissionsrechten**

Ziel des Emissionshandels ist die Reduktion der Emission von Treibhausgasen. Deshalb wird ein Markt für das Recht, Luft zu verunreinigen, geschaffen. Das zur Verfügung stehende Volumen an Emissionsrechten wird dabei in einem politischen Prozess schrittweise herabgesetzt. Im Rahmen der allgemeinen, einzelwirtschaftlichen Gewinnmaximierung werden dann die Unternehmen als Reaktion auf die entstehenden Preise für die Emission von Treibhausgasen deren Ausstoß reduzieren. Da der Emissionshandel die Bestimmung darüber, wieviel für Verschmutzung tatsächlich zu zahlen ist, den Märkten überlässt, wird er häufig auch als ein mögliches Beispiel für die Einführung von Märkten genannt (Rothbard 1982).

Das System des Handels mit Emissionsrechten ist ein Mengeninstrument, da es die globale Menge an Emissionen festlegt. Im Gegensatz dazu sind Steuern ein Preisinstrument. Die Menge der emittierten Gase kann schwanken und nur der dafür zu entrichtende Preis ist fixiert (Oberender 2004 S. 103). Ein Problem mit dem Emissionshandel ist, dass Unsicherheiten für Unternehmen entstehen, da die Preise für Zertifikate ex ante nicht bekannt sind. Der Nachteil von Preisinstrumenten ist, dass die Menge der emittierten Gase nicht im Voraus bestimmt werden kann (Weitzman 1974).

Ein dritter, hybrider Weg als eine Mischung aus Preis und Mengeninstrumenten wäre ebenfalls denkbar. Hierbei könnten die Unternehmen mit Emissionsrechten handeln. Zusätzlich bestünde aber auch die Möglichkeit, zu einem politisch festgelegten Preis, welcher über die Zeit hinweg verändert werden kann, weitere Emissionszertifikate von einer zentralen Instanz zu erwerben. Jacoby und Ellerman haben gezeigt, dass wenn entweder der Kaufpreis der Zertifikate von Behörden hoch genug ist oder die Anzahl der Zertifikate niedrig genug ist, dieses Verfahren entweder Ergebnisse wie die eines Mengenverfahrens oder wie die eines Preisverfahrens entstehen lässt (Jacoby 2004).

Da jedoch schon früh Wissenschaftler vor einem Schwellenwert in der Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre gewarnt haben, nach dessen Überschreiten es zu drastischen Veränderungen im Klima kommen kann, ist ein Instrument, welches die Menge an emittierten

Treibhausgasen festlegt, eine besser geeignete Wahl aufgrund der einfacheren Bestimmbarkeit des gesamten Volumens der zu erwartenden Emission (Stern 2006, S.60 ff.).

#### **4.2 Die Umsetzung des Handels mit Emissionsrechten**

Das Kyoto-Protokoll legt nationale Obergrenzen für den Ausstoß von Treibhausgasen für Länder, die in Anhang I des Klimarahmenabkommens gelistet sind, fest. Obwohl sich die Staaten verpflichtet haben, die Höhe der Verschmutzung herab zu setzen, werden diese Rechtsverbindlichkeiten meist an einzelne Wirtschaftssektoren, wie die Energiewirtschaft oder den Verkehrssektor, in Form von Verknappungen an Emissionsrechten weitergegeben (Kyoto 2006). Dies bedeutet, dass einzelne Unternehmen eine bestimmte Menge an Zertifikaten erhalten und bei Bedarf zusätzliche Zertifikate bei einer Börse an- oder verkaufen können.

Doch nicht nur die Wirtschaftssubjekte innerhalb eines Staates sind zum Handel mit Emissionszertifikaten untereinander berechtigt, sondern auch der Handel zwischen Ländern ist möglich. Zwei Varianten sind hier zu betrachten, die gemeinsame Implementierung und der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung. Die gemeinsame Implementierung erlaubt es Staaten, die in Anhang I aufgeführt sind, in Projekte zur Emissionsreduktion in anderen Industrieländern zu investieren. Als Ausgleich erhält das investierende Land Emissionsreduktionseinheiten (ERUs).

Der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung ermöglicht die Unterstützung von Projekten zur Reduktion von Treibhausgasen in Ländern, die nicht in Anhang I aufgeführt sind, um zertifizierte Emissionsreduktionen (CERs) zu erwerben (Cop 2002 S.32). Die so entstandenen zertifizierten Emissionsreduktionen sind dann geeignet, um die Emissionsrechte eines Staates oder auch einer Staatengemeinschaft wie der EU zu erhöhen, die dann die Emissionsrechte dem Binnenmarkt in Form von Zertifikaten zur Verfügung stellt (Q&A 2006). Emissionsreduktionseinheiten stehen auch Staaten zur Verfügung, um ihre Emissionsrechte zu erhöhen, jedoch sind sie erst ab 2008 für den Handel innerhalb des europäischen Emissionshandels zugelassen.

### 4.3 Rezeption der Maßnahmen

Die Reaktionen auf die im Kyoto-Protokoll beschlossenen Maßnahmen können unterteilt werden in die der Nichtregierungsorganisationen und die der Wirtschaftsvertreter. Nichtregierungsorganisationen wiesen darauf hin, dass der durch den Emissionshandel mögliche Zukauf von Verschmutzungsrechten zu überproportional starken lokalen Belastungen für Mensch und Umwelt führen kann. Auch wird angeführt, dass der Emissionshandel möglicherweise gar nicht in der Lage ist, den globalen Ausstoß von treibhauschädlichen Gasen zu reduzieren, da mit dem Rückgang an Emissionen in einigen Volkswirtschaften auch global die wirtschaftlichen Anreize zur Emissionsreduktion ausbleiben (Lohmann 2006).<sup>22</sup> Ferner wird auch das so genannte „Grandfathering“ kritisiert, wobei die Zuteilung der Zertifikate an Unternehmen sich an dem bisherigen Ausstoß von Treibhausgasen orientiert. Durch die Praxis

---

<sup>22</sup> Hier sei beispielsweise auf die wirtschaftliche Entwicklung in den Sowjet-Nachfolgestaaten sowie der im Rahmen der deutschen Wiedervereinigung neu hinzugekommenen Bundesländer verwiesen.

des „Grandfathering“ werden laut einigen Nichtregierungsorganisationen in der Vergangenheit umweltschädliche Produktionsanlagen sogar weiterhin gefördert (Can 2004). Auch wird darauf hingewiesen, dass möglicherweise zu viele Emissionszertifikate ausgegeben wurden.<sup>23</sup>

Seitens der Wirtschaft ist die Neuausrichtung der Finanzintermediäre European Energy Exchange und Londoner Börse sowie das Interesse am Handel mit Emissionsrechten der New York Stock Exchange und der Chicago Stock Exchange zu nennen (Observer 2005). Auch entstand beispielsweise ein „G8 Climate Change Roundtable“ auf dem Weltwirtschaftsforum als Zusammenschluss von 25 multinationalen Unternehmen mit dem Ziel, den Handel von Zertifikaten zum Zwecke des Klimaschutzes zu fördern und Markttransparenz zu sichern (Roundtable 2005). Auf dem Strommarkt kam es teilweise zu deutlichen Preissteigerungen, was

---

<sup>23</sup> Ein Zeichen hierfür könnte der 96% Rückgang der Preise für Emissionszertifikate, von Juni 2006 bis Mai 2007, im Handel an der European Energy Exchange sein (Eex 2007).

mit der Weitergabe von gestiegenen Kosten begründet wurde; dies ist aber nur bedingt richtig, da durch das „Grandfathering“ Energieerzeuger weitgehend von höheren Produktionskosten ausgenommen wurden (Sijm 2006).

## 5 Post-Kyoto

Die nach der Kyoto-Konferenz von 1996 stattgefundenen jährlichen Treffen der Unterzeichnerstaaten der Klimarahmenkonvention brachten keine weiteren Fortschritte bezüglich der Ziele. Lediglich Fragen der Umsetzung und Ausgestaltung der im Kyoto-Protokoll beschlossenen Maßnahmen wurden entschieden. So wurde auf der Konferenz in Bonn im Jahr 2001 festgelegt, dass Staaten ihre eingegangenen Reduktionsverpflichtungen nicht ausschließlich durch Maßnahmen der sauberen Entwicklung und der gemeinsamen Umsetzung erreichen können. Ebenfalls wurde eine bedingte Anrechnung der auf einem Staatsgebiet vorhandenen Kohlendioxid-Senken beschlossen (Cop 2001 S. 53). Das Treffen der Unterzeichnerstaaten in Marrakesch brachte dann die Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens zum Handel mit Emissionszertifikaten sowie der Sanktionierungsmechanismen für dessen Verletzung (Cop 2002 S. 32 ff.). Da keine Ratifizierung des Kyoto-Protokolls durch die USA und Australien erfolgte, nahmen diese Staaten lediglich als Beobachter an diesen Treffen teil.

Obwohl das Kyoto-Protokoll eine Laufzeit bis 2012 hat, begannen offizielle Verhandlungen über mögliche Nachfolgeregelungen schon 2007 im Rahmen der G8+5 Gespräche in Washington D.C. Der dreiunddreißigste G8 Gipfel führte dann zu einem nicht bindenden Kommuniqué, welches das Ziel zum Ausdruck bringt, die Kohlendioxidemissionen bis 2050 zu halbieren. Die Verhandlungen über dieses Ziel sollen im Rahmen der UN-Klimarahmenkonvention stattfinden (Breakthrough 2007).

Der Meinung des Autors nach ist eine stärkere Einbeziehung von Fragen der Bevölkerungsentwicklung und der Armutsbekämpfung in die Verhandlungen über den Klimaschutz, trotz der bereits bestehenden Komplexität, unvermeidlich. Weite Teile der Weltbevölkerung wachsen immer noch bis an die Grenze des wirtschaftlich Möglichen. Ist dies auch in Zukunft der Fall, so wird jede Rücknahme der Ausbeute von Ressourcen auch den möglichen Ertrag aus natürlichen Ressourcen wieder steigern und damit die Grundlage für ein

weiteres Anwachsen der Bevölkerung, also wieder steigenden Kohlendioxidemissionen, bilden. Nur wenn es gelingt, den Kreislauf aus wirtschaftlicher Armut und Reichtum an Kindern zu durchbrechen, kann auch ein globales Bewusstsein für Themen, die über das tägliche Überleben hinaus in die Zukunft reichen, geschaffen werden.

## Literatur

Axelrod Robert (1984). The Evolution of Cooperation, New York: Basic Books.

Breakthrough (2007). "Breakthrough on climate protection", The Press and Information Office of the Federal Government.

URL: [http://www.g-8.de/nn\\_92160/Content/EN/Artikel/\\_\\_\\_g8-summit/2007-06-07-g8-klimaschutz\\_\\_en.html](http://www.g-8.de/nn_92160/Content/EN/Artikel/___g8-summit/2007-06-07-g8-klimaschutz__en.html)

Can (2004). „National Allocation Plans“, Climate Action Network Europe, Brussels.

URL: <http://www.climnet.org/EUenergy/NAPs.htm>

Change (2001). „Climate Change 2001: The Scientific Basis“, Intergovernmental Panel on Climate Change.

URL: [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm)

Conferenze On Human Rights (1993). „Vienna Declaraton And Programme Of Action“, United Nations.

URL: [http://www.unhchr.ch/huridocda/huridoca.nsf/\(Symbol\)/A.CONF.157.23.En?OpenDocument](http://www.unhchr.ch/huridocda/huridoca.nsf/(Symbol)/A.CONF.157.23.En?OpenDocument)

Cop (2001). „Report of the converence of the parties on the secound parth of its sixt session“.

URL: <http://unfccc.int/resource/docs/cop6secpart/05.pdf>

Cop (2002). „Report of the convergence of the parties on its seventh session“.

URL: <http://unfccc.int/resource/docs/cop7/13.pdf>

Earth Summit (1992). United Nations Conference on Environment and Development, United Nations.

URL: <http://www.un.org/geninfo/bp/enviro.html>

Eex (2007). European Energy Exchange.

URL: <http://www.eex.com>

Jacoby, D. E. (2004). „The safety valve and climate policy“, Energy Policy 32, 481–490.

Keith Schneider (1992). “THE EARTH SUMMIT; WHITE HOUSE SNUBS U.S. ENVOY’S PLEA TO SIGN RIO TREATY”, New York Times, 15 June 1992.

URL: <http://query.nytimes.com/gst/fullpage.html?res=9E0CE6DC163FF936A35755C0A964958260&n=Top%2FReference%2FTimes%20Topics%2FOrganizations%2FU%2FUnited%20Nations%20>

Kyoto (1997). The United Nations Framework Convention on Climate Change,  
United Nations.

URL: <http://unfccc.int/kyotoprotocol/items/2830.php>

Kyoto (2006). An Introduction to the Kyoto Protocol Compliance Mechanism, United Nations.

URL: [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/compliance/introduction/items/3024.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/compliance/introduction/items/3024.php)

Lohmann Larry (2006). „Carry on polluting“, New Scientist.

URL: <http://www.thecornerhouse.org.uk/item.shtml?x=546606>

Oberender, Peter; Fehl, Ulrich (2004). Grundlagen der Mikroökonomie: eine Einführung in die Produktions-, Nachfrage- und Markttheorie. München: Vahlen.

Observer, The (2005). „How high-pressure politics threatens action on climate“.

URL: <http://observer.guardian.co.uk/focus/story/0,,1509761,00.html>

Q&A (2006). Europe's carbon trading scheme.

URL: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4114921.stm>

Ratification (2005), „Ratification Calendar, Climate Action Network Europe“.

URL: <http://www.climnet.org/EUenergy/ratification/calendar.htm>

Rothbard, M. N. (1982). „Law, property rights, and air pollution“, Cato Journal

2(1), 55–100.

URL: <http://www.cato.org/pubs/journal/cj2n1/cj2n1-2.pdf>

Roundtable (2005). „STATEMENT OF G8 CLIMATE CHANGE ROUNDTABLE, Convened by the world economic forum: In collaboration with her Majesties’s government“, United Kingdom.

URL: [http://www.weforum.org/pdf/g8\\_climatechange.pdf](http://www.weforum.org/pdf/g8_climatechange.pdf)

Sijm J., Neuhoff K., Chen Y. (2006). „CO2 cost pass-through and windfall profits in the power sector“, Climate Policy, vol. 6, 47-70.

Sprinz Detlef (1998). „Internationale Klimapolitik“, Friedens-Warte. 73(1),25-44.

Stephen J. Majeski (2005). „Do Exploitive Agents Benefit from Asymmetric Power in International Politics?“ ,British Journal of Political Science 35, 745-755.

Stern, N. H. (2006). The economics of climate change : the Stern review, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Stern, N. H. (2007). Ask the Expert: Sir Nicholas Stern Answers Your Questions on the Economics of Climate Change, British Embassy, Washington D.C.

URL:[http://www.britainusa.com/sections/articles\\_show\\_nt1.asp?d=0&i=41029&L1=0&L2=0&a=47081](http://www.britainusa.com/sections/articles_show_nt1.asp?d=0&i=41029&L1=0&L2=0&a=47081)

Weitzman, M. L. (1974). „Prices vs. quantities“, *The Review of Economic Studies*. 41(4), 477–491.

Williams Michael (1998). Industrialized countries to cut greenhouse gas emissions by 5.2%, United Nations.

URL: <http://unfccc.int/cop3/fccc/info/indust.htm>

Wirth Timothy 1996. „U.S. POLICY ON CLIMATE CHANGE“, *USIA Electronic Journal* 2.

URL: <http://usinfo.state.gov/journals/itgic/0497/ijge/gj-1.htm>

## **Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück**

1. Eberhard Umbach: Umweltverträgliches Wirtschaftssystem in den Bereichen Abfall und Emissionen. März 1997.
2. Stefan Trapp, Bernhard Reiter, Michael Matthies: Überprüfung und Fortentwicklung der Bodenwerte für den Boden-Pflanze-Pfad - Teilprojekt Transferfaktoren Boden-Pflanze. August 1997.
3. Michael Matthies (Hrsg.): Stoffstromanalyse und Bewertung. September 1997.
4. Dirk Melcher: Quantifizierung, Klassifizierung und Modellierung der Phytotoxizität organischer Chemikalien. Oktober 1997.
5. Stefan Schwartz: Organische Schadstoffe in der Nahrungskette - Vorstudie zur Validierung von Expositionsmodellen. November 1997.
6. Volker Berding: Private Hausbrunnen - Vergleichende Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Trinkwasserqualität. Oktober 1997.
7. Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften I. Januar 1998.
8. Birgit Radtke: Bifurkationen in einem Modell mariner Planktodynamik. Januar 1998.
9. Werner Berens: Konzeption eines Umweltinformationssystems für die Universität Osnabrück. Juni 1998.
10. Michael Matthies (Hrsg.): Studienprojekte 1998. September 1998.
11. Michael Matthies (Hrsg.): Globaler Wandel. September 1998.
12. Klaus Brauer (Hrsg.): Institutsbericht. September 1998.
13. Klaus Brauer, Horst Malchow, Michael Matthies, Eberhard Umbach (Hrsg.): Materialien des Arbeitstreffens Systemwissenschaft in der Lehre, Universität Osnabrück, 29./30.9.1998. Dezember 1998.
14. Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften II. Dezember 1998.
15. Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften III. August 1999.
16. Michael Matthies (Hrsg.): Regionale Nachhaltigkeit. September 2000.
17. Markus Klein: Langjähriger Wasserhaushalt von Gras- und Waldbeständen. Entwicklung, Kalibrierung und Anwendung des Modells LYFE am Groß-Lysimeter St. Arnold. Juni 2000.
18. Markus Brune: Multimediale Umweltmodellierung mit Fuzzy-Mengen. Juli 2000.
19. Michael Matthies (Hrsg.): Fraktale in Hydrologie und Biologie. Oktober 2000.
20. Stefan Fuest (Dissertation): Regionale Grundwassergefährdung durch Nitrat. Dezember 2000.
21. Carsten Schulze (Dissertation): Modelling and evaluating the aquatic fate of detergents. Januar 2001.

Die Beiträge können gegen einen Selbstkostenpreis (ca. 10 EUR pro Exemplar) beim Institut für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück, 49069 Osnabrück bestellt werden.

-

Alle folgenden Beiträge sind herunterzuladen unter <http://www.usf.uos.de/usf/beitraege/>.

22. Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften IV. Januar 2001.
23. Horst Malchow (Hrsg.): Modellbildung und -anwendung in den Wissenschaften V. August 2001.
24. Kai Leßmann (Diplomarbeit): Probabilistic Exposure Assessment. Parameter Uncertainties and their Effects on Model Output. November 2002.
25. Frank M. Hilker (Diplomarbeit): Parametrisierung von Metapopulationsmodellen. März 2003.
26. Nadja Rüger (Diplomarbeit): Habitat suitability for *Populus euphratica* in the Northern Amudarya delta - a fuzzy approach. Juni 2003.
27. Claudia Pahl-Wostl, Eva Ebenhöf (Hrsg.): Komplexe Adaptive Systeme. Juli 2003.
28. Horst Malchow (Hrsg.): Chaos und Ordnung in Natur und Gesellschaft. Dezember 2004.
29. Andreas Focks (Diplomarbeit): Modeling the transfer of antibiotic drug resistance genes between *E. coli* strains. Juni 2005.
30. Christiane Zarfl (Diplomarbeit): Modellierung von Arsen in der Mulde. Juni 2005.
31. Sven Lautenbach (Dissertation): Modellintegration zur Entscheidungsunterstützung für die Gewässergütebewirtschaftung im Einzugsgebiet der Elbe. November 2005.
32. Frank M. Hilker and Frank H. Westerhoff: Control of chaotic population dynamics: Ecological and economic considerations. November 2005.
33. Harold Fellermann (Diplomarbeit): Micelles as containers for protocells. Dezember 2005.
34. Jens Newig, Oliver Fritsch (Hrsg.): Effektivität von Beteiligungsprozessen. Mai 2006.
35. Ba Kien Tran (Diplomarbeit): Modellierung biologischer Invasionen mit Reaktions-Diffusionsgleichungen. Juli 2006.
36. Ivo Siekmann (Diplomarbeit): Agentenbasierte Modellierung von Persönlichkeitsunterschieden auf der Grundlage der PSI-Theorie. Juli 2006.
37. Tobias Ceglarek (Diplomarbeit): Irreguläre Oszillationen in drei- und vierkomponentigen populationsdynamischen Modellen. September 2006.
38. Horst Malchow (Hrsg.): Komplexe Systeme und nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Dezember 2006.
39. Jens Newig, Veronika Gaube, Karin Berkhoff, Kai Kaldrack, Britta Kastens, Juliana Lutz, Bianca Schlußmeier, Heide Adensam, Helmut Haberl, Claudia Pahl-Wostl, Armand Colard, Bettina Aigner, Rudolf Maier, Wolfgang Punz: Partizipative Modellbildung, Akteurs- und Ökosystemanalyse in Agrarintensivgebieten. Juli 2007.
40. Bert Wecker, Bakhtiyor Karimov, Bakhtiyar Kamilov, Uwe Waller, Michael Matthies, Helmut Lieth: Sustainable Aquaculture in Recirculating Systems – Feasibility Study for the Catchment Area of the Aral Sea. März 2007.
41. Michael Matthies (Hrsg.): Klimawandel. Oktober 2007.