



Wie gut verstehen wir den Klimawandel und seine Auswirkungen?

Helga Kromp-Kolb, Wien

Kurzfassung

Lange Zeit haben die Menschen die Augen vor dem sich anzeichnenden Klimawandel verschlossen. Jetzt sind die Beobachtungsdaten so eindeutig und das Verständnis für die dahinter liegenden Prozesse so weit gediehen, dass auch den errechneten Zukunftsszenarien Vertrauen entgegengebracht werden muss. Hinsichtlich der Abschätzung der Folgen des Klimawandels bleibt noch viel zu tun. Es gibt aber sehr gewichtige Gründe, warum man mit Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen nicht mehr zuwarten kann.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Unsicherheit, Klimapolitik

Abstract

For a long time people tried to ignore the signs of the evolving climate change. Meanwhile the observations have become so clear and the understanding of the underlying processes has progressed so far that model results for future climate scenarios can – in essence – be trusted. Regarding the assessment of possible impacts and consequences, much remains to be done. But there are good reasons why mitigation and adaptation measures can no longer be postponed.

Keywords: climate change, uncertainties, climate change policy

1. Einleitung

Das Klimasystem ist ein äußerst komplexes System, das Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre und Biosphäre, einschließlich der Anthroposphäre, und deren Wechselwirkungen umfasst. Die Betrachtung der Atmosphäre allein genügt nicht, das, was landläufig als „Klima“ bezeichnet wird, zu verstehen.

Das Klimasystem bezieht seine Energie primär von der Sonne. Der Strahlungsfluss von der Sonne zur Erde beträgt rund 174.000 TW [Smil 1991], und nahezu ebenso groß ist der Fluss von der Erde ins Weltall. Im globalen Jahresmittel stellt sich daher langfristig eine ziemlich konstante Temperatur der Erdoberfläche und der Atmosphäre ein. Konkret hängt der solare Input von der Strahlungsintensität der Sonne und Bahncharakteristika der Erde ab. Wieviel Sonnenenergie dem System Erde-Atmosphäre zur Verfügung steht, wird aber auch von der Zusammensetzung der Atmosphäre, der Wolkenbedeckung und der Albedo der Erdoberfläche bestimmt, da sie das Ausmaß der ins Weltall zurückgestrahlten Energie beeinflussen.

Während der Großteil der eingestrahlten Energie infolge der hohen Temperatur der Sonne über kurzwellige Strahlung zugeführt wird, strahlt die erwärmte Erde langwellige Strahlung in den Weltraum ab. Dreiatomige Gase, wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Lachgas,

Ozon oder die synthetischen Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe – sogenannte Treibhausgase – haben die Eigenschaft, die kurzwellige Strahlung der Sonne vergleichsweise ungehindert durchzulassen, die langwellige Ausstrahlung der Erde aber in bestimmten Wellenlängenbereichen zu absorbieren. Die ungleiche Durchlässigkeit für Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge führt zum sogenannten Treibhauseffekt. Der „natürliche“ Treibhauseffekt bedingt eine Erwärmung der Erde um rund 33° C, von –18° C (der Gleichgewichtstemperatur ohne Atmosphäre) auf +15° C.

Die Umsetzung der solaren Energie in Wärme und in atmosphärische und ozeanische Strömungen hängt von zahlreichen weiteren Faktoren, wie etwa der Land-Wasserverteilung und der Lage und Gestalt von Gebirgen ab. Charakteristisch für das Klimasystem sind positive und negative Rückkoppelungsprozesse. Beispiel für einen positiven Rückkoppelungsprozess ist die sogenannte Albedo-Rückkoppelung: Erwärmung führt zum Schmelzen von Teilen des Eises in den Polarregionen und in den Gebirgen und die geringere Albedo der eisfreien Zonen bedingt weitere Erwärmung. In der Natur greifen zahlreiche Rückkoppelungsprozesse ineinander, so dass eine Quantifizierung der Effekte nur durch Lösung komplexer mathematischer Gleichungen möglich ist.

2. Skalen, Unsicherheiten, Attribution

2.1 Zeitskala

Die externen Einflussgrößen des Klimas unterliegen zeitlichen Schwankungen, die teils zyklischen Charakter haben: Eiszeiten entstehen und vergehen in Zeiträumen von etwa 100.000 Jahren, entsprechend dem Pulsieren der Exzentrizität der elliptischen Erdbahn um die Sonne. Die Änderung der Neigung der Erdachse hat eine Zyklusdauer von etwa 41.000 Jahren, die Präzessionsbewegung der Erdachse eine von rund 26.000 Jahren. Deutlich kürzer sind die Perioden des Umlaufs um die Sonne (1° Jahr) und der Erdrotation (24° Std). Auch die Zahl der Sonnenflecken weist mit dem rund 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus eine gewisse Periodizität auf. Diese zyklischen Einflüsse sind in den meteorologischen Datenreihen deutlich zu erkennen. Daneben gibt es eine Vielzahl externer, nicht-zyklischer Einflüsse, wie etwa die Zunahme der Sonnenintensität, die Kontinentaldrift, die Gebirgsbildung und Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre oder Landnutzungsänderungen. Selbst bei konstanten externen Randbedingungen treten, bedingt durch interne Schwingungen des Klimasystems, Schwankungen auf.

Die öffentliche Diskussion um den Klimawandel bezieht sich auf die Klimaänderungen der letzten etwa 150 Jahre, aus wissenschaftlicher Sicht aber insbesondere auf die starken Veränderungen der letzten Jahrzehnte.

Im Gegensatz zum Wetter, das einen Momentzustand der Atmosphäre darstellt, beschreibt Klima definitionsgemäß statistische Charakteristika des Wetters über eine größere Zeitspanne. In der Meteorologie werden zur Beschreibung des Klimas 30-jährige Perioden herangezogen (z.B. Klimanormalperiode 1961 – 1990). Demnach sind z.B. tageszeitliche und jahreszeitliche Unterschiede, ebenso wie z.B. Temperaturänderungen durch Vulkanausbrüche Bestandteile der Variabilität innerhalb des jeweiligen Klimas, während längerfristige Einflüsse Klimaänderungen verursachen.

Zurückblickend befasst man sich mit der Klimaentwicklung über Jahrtausende, Jahrhunderttausenden und im Zuge der Diskussion um den Klimawandel natürlich auch mit den letzten 1000, 100 und 50 Jahren. Vorausschauend ist das Zeitfenster wesentlich kürzer: die Globalen Klimamodelle (GCM) errechnen in der Regel Entwicklungen für die nächsten hundert Jahre, wenn der Ozean oder die Kryosphäre im Vordergrund

des Interesses stehen auch bis zu 1000 Jahren. Betrachtungen, die drüber hinaus gehen, gelten in der Regel einer bestimmten Fragestellung – etwa ob und wann die klimatischen Randbedingungen Photosynthese nicht mehr zulassen. Derartig lange Zeiträume können nur mit stark vereinfachten Modellen untersucht werden. Bei Betrachtung im Jahrhundertmaßstab dominieren die Signale der sich ändernden externen Faktoren (Treibhausgase, Landnutzung), so dass ein klarer Temperaturtrend zu erkennen ist, während im Dekadenmaßstab die interne Variabilität des Klimas das längerfristige Signal übertönen kann. Die Wissenschaft beginnt gerade, sich dennoch mit dieser Zeitskala zu befassen, weil sie dem Planungshorizont unserer Gesellschaft viel näher ist, und interdisziplinäre Studien, insbesondere mit sozio-ökonomischen Fragestellungen häufig an der Skalenkluff scheitern.

2.2 Räumliche Skala

Das Klima kann auf globaler Ebene beschrieben werden, es kann aber auch sehr kleinräumig betrachtet werden – etwa innerhalb eines Maisfeldes, wenn es um die Klimabedingungen für Maisschädlinge geht – und auf jeder Skala dazwischen. Die Prozesse, die sich auf den einzelnen Skalen abspielen, interagieren: die großräumigeren stellen für die kleinräumigeren Randbedingungen dar, die aber ihrerseits die großräumigeren beeinflussen können. Das breite Skalenspektrum stellt sowohl bei Messungen (für welchen Umkreis sind sie repräsentativ?) als auch bei Modellentwicklungen ein Problem dar. Globale Modelle können kleinräumige Prozesse nicht erfassen, weil es an Ausgangsdaten fehlt, vielmehr aber noch, weil die Leistungsfähigkeit der Computer, und damit die Zahl der verarbeitbaren Gitterpunkte beschränkt ist.

Aufgrund der groben räumlichen Auflösung (Gitterpunktsweiten von einigen 100 km) sind die derzeitigen Globalen Klimamodelle (GCMs) in der Lage, Phänomene auf globaler bis kontinentaler Ebene und einer zeitlichen Periode von mindestens 30 Jahren sowohl in ihrem mittleren Zustand als auch in ihrer Variabilität zu reproduzieren [Stott et al. 1999]. Diese Größenordnung wird auch als „skillful scale“ eines GCM's bezeichnet. In dem topographisch sehr stark gegliederten Gelände der Alpen ist diese räumliche Auflösung unzureichend, da alle orographisch verursachten oder verstärkten Wettererscheinungen (z. B. Lee-Zyklogenese, konvektiver Niederschlag), nur grob parametrisiert oder gar nicht berücksichtigt werden können [Giorgi et al., 1991]. Um dennoch zu regionalen Aus-

sagen aus den GCM - Szenarien zu gelangen, wurden und werden seit Beginn der 90er Jahre verschiedene Regionalisierungs- (Downscaling-) Verfahren entwickelt. Sie beruhen teilweise auf statistischen Methoden, teilweise auf regionalen Klimamodellen, die in die Globalen eingebettet („genestet“) werden.

Bei statistischen Regionalisierungsverfahren werden GCM-Ergebnisse mit regionaler Information (z. B. Stationsmessungen, Seehöhe oder Landnutzung) statistisch konsistent verknüpft. Bei dynamischen Regionalisierungsverfahren werden „regionale Klimamodelle“ (RCM) auf ein begrenztes Gebiet angewendet. Die Ozeantemperaturen und die atmosphärischen Bedingungen an den Rändern des berechneten Gebiets werden dabei von einem GCM übernommen. Dies reduziert den Rechenbedarf und man kann – bei gleichem Computereinsatz – mit einer höheren räumlichen Auflösung rechnen. Die feinsten RCMs rechnen derzeit mit einer Auflösung von 10 x 10 km, die Tendenz geht zu noch höheren Auflösungen. Damit können zum Beispiel die Einflüsse der Alpen und der deutschen Mittelgebirge wesentlich realistischer abgebildet werden, als mit den GCMs.

2.3 Unsicherheiten

Unsicherheiten in Klimaaussagen können von verschiedenen Quellen herrühren. Bei der Rekonstruktion des vergangenen Klimas werden Mess- und Beobachtungsdaten mit statistischen Modellen kombiniert. Direkte Messungen von meteorologischen Größen in einer normierten Form, die Vergleiche zwischen verschiedenen Messstellen zu unterschiedlichen Zeiten ermöglichen, liegen erst seit etwa 150 Jahren, für die meisten Stationen erst seit einigen Jahrzehnten vor. Will man etwas über das Klima in früheren Zeiten wissen, muss man sich mit indirekten Informationen – sogenannten Proxidaten – begnügen. Einschlüsse von Fossilien in Sedimenten, die Zusammensetzung der in Gletschereis eingeschlossenen Luftbläschen, die Dicke und Abfolge von Baumringen, alte Felszeichnungen und Gemälde, Chroniken von Klöstern, alte Inschriften und Hochwassermarken können Aufschluss über vergangenes Klima geben, allerdings praktisch nie flächendeckend, d.h. im globalen Maßstab und immer mit großer Unschärfe und Unsicherheit. Je weiter man zurückblickt, desto geringer wird die erzielbare zeitliche Auflösung und desto größer wird die Unsicherheit. Demnach sind die Kenntnisse des Weltklimas der letzten 150 Jahre gut, wiewohl es selbstverständlich Unsicherheiten gibt; die letzten 1000 – 2000 Jahre können

für die Nordhemisphäre verhältnismäßig gut rekonstruiert werden, die Ergebnisse der verschiedenen damit befassten Gruppen unterscheiden sich in Details, nicht jedoch hinsichtlich der Einmaligkeit des extremen Temperaturanstieges der letzten Jahrzehnte. Der als Hokey Stick bekannte, vom IPCC 3. Sachstandsbericht 2001 als Leitabbildung verwendete Verlauf der Temperatur, war zwar eine Zeitlang mit dem Argument unter Beschuss geraten, dass die relativ geringe Variation der Temperatur während der 1000-jährigen Periode eine Folge des von den Autoren gewählten statistischen Modells zur Zusammenführung der für verschiedenen Orte zu verschiedenen Zeiten und mit sehr unterschiedlicher Unschärfe behafteten Proxidaten sei, doch hat diese Diskussion die Tatsache, dass der Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte frühere Schwankungen übertrifft, nicht in Frage gestellt, zumal alle anderen wissenschaftlich haltbaren Rekonstruktionen sich innerhalb der deklarierten Unsicherheit des ursprünglichen Hokey Sticks bewegen [Rutherford et al. 2005].

Bis zu 600.000 Jahre zurück führen die immer noch vergleichsweise verlässlichen Auswertungen von Eisbohrkernen – allerdings nur in extremen Regionen der Erde. Zeugen noch weiter zurück liegenden Klimas sind in erster Linie in der festen Erde zu suchen. Sie weisen auf erdgeschichtliche Perioden mit Klimaten hin, die teilweise auch wärmer waren, als unser derzeitiges Klima.

Bei diesen paläoklimatischen Betrachtungen verlieren 30-jährige Referenzzeiträume natürlich ihre Relevanz und der Klima-Zeitraum ergibt sich in der Regel aus der zeitlichen Auflösung, welche die jeweiligen Proxidaten ermöglichen. Die statistischen Kennwerte reduzieren sich auf Mittel- oder Extremwerte meist nur weniger Parameter.

Eine besondere Herausforderung stellen die klimatologische Betrachtungen zu Extremereignissen dar. Aufgrund der Seltenheit dieser Ereignisse ist es naturgemäß schwierig, statistisch signifikante Trends hinsichtlich der Häufigkeit oder Intensität in Datenreihen festzustellen. Man kann sich dem Problem annähern indem man die Schwellenwerte in der Definition der Ereignisse herabsetzt oder das betrachtete Gebiet erweitert, um eine größere Stichprobe zu gewinnen, man kann statistische Überlegungen allgemeiner Art anstellen, man kann Detailanalysen einzelner Fälle durchführen oder physikalische Plausibilitätsüberlegungen heranziehen. Die Tendaussagen extremer Ereignisse bleiben aber

mit größerer Unsicherheit behaftet, als Trends mittlerer Verhältnisse.

Die zur Beschreibung des rezenten Klimas, vor allem aber für die Berechnung künftiger Klimaszenarien eingesetzten Klimamodelle weisen ebenfalls zum Teil erhebliche Unsicherheiten auf: Das Verständnis vieler Prozesse im Klimasystem ist noch mangelhaft, die Datenlage für viele Zwecke zu dürftig, und die räumliche und zeitliche Auflösung, die unsere Computer erlauben, zu gering um alle Prozesse und deren Wechselwirkungen darstellen zu können. Ein besonderes Problem stellen Rückkoppelungen dar, die häufig von den Modellen noch nicht erfasst sind. So wird erst die kommende Generation von Modellen routinemäßig wesentliche Rückkoppelungen des Klimas auf den Kohlenstoffkreislauf enthalten. Testläufe lassen hier, wie auch bei anderen Rückkoppelungsmechanismen erwarten, dass diese Prozesse auf den Klimawandel eher eine beschleunigende Wirkung haben werden. Praktisch alle Modelle haben einen Bias, der beim sogenannten „hindcasting“, der Anwendung der Modelle auf Perioden der Vergangenheit, für die hinreichend gute Daten vorliegen, um Abweichungen zwischen Modellergebnissen und „Realität“ quantifizieren zu können, in seiner räumlichen Verteilung ermittelt werden kann. Damit ist es möglich, Fehler dieser Art weitgehend zu eliminieren.

Auch die räumlich und zeitlich höher aufgelösten Regionalmodelle weisen die angeführten Schwächen auf. Sie sind darüber hinaus, ebenso wenig wie die statistischen Downscalingsätze, in der Lage, Mängel oder Fehler der GCMs zu korrigieren. Die Qualität der Ergebnisse hängt damit wesentlich von der Qualität des GCMs ab. So führen z.B. einige GCMs derzeit zuviel Feuchte mit der Atlantikluft in den Alpenraum. Dies spiegelt sich in allen auf diesen GCMs aufsetzenden kleinräumigen Ergebnissen wieder, und kann derzeit nur durch Expertenwissen „kompensiert“ werden. Eine sachkundige Interpretation von Modellergebnissen ist daher essentiell.

Extremereignisse stehen häufig in Zusammenhang mit eher kleinräumigen meteorologischen Prozessen, die von den Globalen Klimamodellen nicht hinreichend gut erfasst werden können, und auch bei der Regionalisierung oft nicht in befriedigender Weise berücksichtigt werden können. Auch in den Modellen ist daher die Unsicherheit hinsichtlich Extremereignissen besonders groß.

Trotz aller Schwächen und Unsicherheiten sind die Modelle in der Lage, die vergangene Klimaentwicklung ziemlich gut wiederzugeben [Rahmstorf et al. 2007]. Verbesserungen sind jedoch notwendig und möglich. Das IPCC hat für seinen 4. Sachstandsbericht ein eigenes System entwickelt, um Unsicherheiten zum Ausdruck zu bringen [IPCC 2007]. Dies betrifft einerseits eine Terminologie für die Wahrscheinlichkeiten des Eintritts von Ereignissen, denen Attribute wie „Praktisch sicher“, entsprechend >99% Wahrscheinlichkeit, „wahrscheinlich“ mit über 66% Wahrscheinlichkeit oder „sehr unwahrscheinlich“ mit weniger als 10% Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Daneben wird aber auch noch das Vertrauen in die Aussagen quantifiziert: „Sehr hohes Vertrauen“ bedeutet, dass eine Chance von 9 aus 10 dafür besteht, dass die Aussage richtig ist, „mittleres Vertrauen“ bedeutet eine 5 aus 10 Chance und „sehr geringes Vertrauen“ eine 1 zu 10 Chance für Richtigkeit der Aussage.

2.4 Attribution

Eine wichtige Frage vor allem in der politischen Debatte ist, in welchem Ausmaß die Klimaänderungen anthropogen bedingt (Attribution) sind, weil die Antwort auf diese Frage entscheidend für die Wirksamkeit von Maßnahmen und für die moralische Verpflichtung zu Maßnahmen ist. Aus erkenntnistheoretischer Sicht muss die Wissenschaft einen strenger Beweis für die Ursachen des Klimawandels schuldig bleiben. Dies gilt im übrigen auch für viele andere wissenschaftliche Aussagen, deren Gültigkeit in der Praxis nicht in Zweifel gezogen wird.

Klimawandel kann verschiedene Ursachen haben, so dass in jedem Einzelfall die konkret wirkenden Mechanismen analysiert werden müssen, im Falle der Erwärmung des 20. Jahrhunderts betrifft dies vor allem den Einfluss solarer Veränderungen, Treibhausgaskonzentrationszunahmen und vulkanische Aktivitäten, deren Auswirkungen mit den zeitlichen und räumlichen Mustern des Klimawandels übereinstimmen müssen. Dazu wird eine breite Palette von Methoden eingesetzt. Einfache Analogieschlüsse von Ursachen früherer Klimaänderungen sind nicht zulässig. Übereinstimmend kommen diese Analysen zu dem Ergebnis, dass die dominante Ursache für die Erwärmung im 20. Jahrhundert die anthropogenen Treibhausgase sind. Das IPCC schrieb 2001 im 3. Sachstandsbericht, dass „der Großteil der beobachteten Erwärmung der letzten 50 Jahre wahrscheinlich menschlichen Aktivitäten zuschreibbar ist“, während es sechs Jahre später im 4. Sachstandsbericht 2007 schon heißt, dass

„der Großteil der Erwärmung sehr wahrscheinlich auf Treibhausgase zurückzuführen ist.“ Während das Vertrauen in die erste Aussage mit 2 aus 3 angegeben wurde, stieg es im 4. Sachstandsbericht auf 9 aus 10 [IPCC 2001, IPCC 2007].

Berechnet man den globalen Temperaturverlauf der letzten 150 Jahre mit einem GCM unter ausschließlicher Berücksichtigung der natürlichen Einflussgrößen, wie etwa Vulkanausbrüchen, so fällt die Temperatur in den letzten 30 Jahren leicht. Wenn nur die von Menschen gemachten Veränderungen berücksichtigt werden, wird der beobachtete, starke Temperaturanstieg reproduziert. Die beste Übereinstimmung über den gesamten Zeitraum erhält man, wenn beiden – natürlichen und anthropogenen Einflussgrößen – Rechnung getragen wird.

Die Globalen Klimamodelle geben auch Aufschluss darüber, welchen Beitrag verschiedene natürliche und anthropogene Faktoren zum Treibhauseffekt leisten. Die Unsicherheit ist für die einzelnen Faktoren unterschiedlich groß und das derzeitige Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse verschieden gut. So gilt der Beitrag der Treibhausgase als gut erfasst und als abgesichert. Er überwiegt die Beiträge der anderen Faktoren deutlich. Aerosole können sowohl verstärkend als auch dämpfend wirken, wobei vor allem hinsichtlich der indirekten Effekte (z.B. Wolkenbildung) die Unsicherheit sehr groß ist. Der Beitrag der Zunahme der Strahlungsintensität der Sonne ist deutlich kleiner als jener der Treibhausgase – das Verständnis wird jedoch als gering eingeschätzt, weil einerseits die historische Entwicklung der solaren Aktivität nicht gesichert ist, vor allem aber, weil verschiedene indirekte Effekte der Sonnenstrahlung noch nicht hinreichend untersucht sind. [IPCC 2007]

Aus diesen Analysen folgt, dass der fortgesetzte Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen durch menschliche Aktivitäten aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten zu einer weiteren Beeinflussung des Strahlungshaushaltes und zur Zunahme der Temperatur der bodennahen Luftschichten führen muss. Nur wenn die sogenannte Klimasensitivität, d.h. der Gleichgewichtstemperatur, die sich bei einer Verdoppelung der Treibhausgaskonzentration einstellen würde, wesentlich unter dem vom IPCC zugrunde gelegten Wertebereich zwischen 1.5 und 4.5 °C läge, könnte angenommen werden, dass die Klimaprojektionen des IPCC unzutreffend seien.

3. Klimawandel auf globaler und regionaler Ebene

Der Klimawandel war auf der Basis vorhandener wissenschaftlicher Erkenntnisse absehbar und wurde von der Wissenschaft tatsächlich schon vor mehr als 100 Jahren beschrieben und vor 70 Jahren, als ein erster, noch unpektakulärer Temperaturanstieg schon bemerkbar war, auch bereits quantitativ abgeschätzt. Inzwischen ist die globale atmosphärische Konzentration des wichtigsten anthropogenen Treibhausgases, Kohlendioxid, als Folge menschlicher Aktivitäten von einem Wert von etwa 280 ppm auf einen Wert von 380 ppm im Jahr 2008 markant angestiegen: das ist ein Anstieg von etwa 35% gegenüber dem vorindustriellen Wert. Dieser Anstieg ist primär auf den Verbrauch fossiler Brennstoffe und zu einem kleineren Teil auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen [IPCC 2007].

Kohlendioxid ist nur eines von mehreren Gasen, die den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und damit das Klima der Erde beeinflussen, aber es ist das bedeutendste der anthropogen emittierten. Es ist zu mehr als der Hälfte an der beobachteten globalen Erwärmung von 0,76°C zwischen den Perioden 1850/1899 und 2001/2005 beteiligt [IPCC 2007].

Die Verstärkung des Treibhauseffektes hat nachweisbare Auswirkungen – so ist etwa die Temperatur im letzten Jahrhundert im globalen Mittel um etwa 0,7°C gestiegen [IPCC 2007], während der Temperaturunterschied zwischen dem mittelalterlichen Optimum und der kleinen Eiszeit nur etwa 0,2°C betrug.

Die globale Erwärmung wird sich wegen der Trägheit und der Interaktionen der beteiligten Systeme noch über Jahrhunderte hinweg fortsetzen, selbst wenn die Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre stabilisiert würden. Der Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts (Abbildung 1) wird im günstigsten Fall bei 1,8°C gegenüber dem Mittel der Periode 1980 – 1999 liegen, ohne tiefgreifende Minderungsmaßnahmen bei 4°C, und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der GCM bei bis zu 6,4°C [IPCC 2007]. Dies bedingt eine Fülle anderer Veränderungen im Klimageschehen und in der Natur, auf die einzugehen hier nicht möglich ist¹⁾.

1) Für eine umfassende Darstellung siehe z.B. den 4. Sachstandsbericht des IPCC [IPCC 2007 A,B,C]

IPCC Temperatur-Szenarien

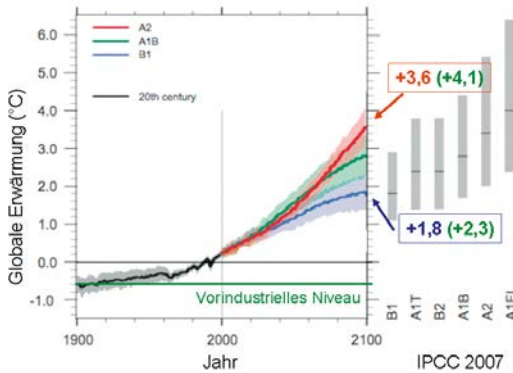


Abb. 1: Temperaturanstieg bis zum Ende dieses Jahrhunderts für verschiedene Szenarien nach IPCC 2007

Im alpinen Raum beträgt der Temperaturanstieg in den letzten 150 Jahren bis zu 2 °C (Abbildung 2), davon rund die Hälfte in den letzten 30 Jahren.

Trotz der Unsicherheiten in der regionalen Klimaszenarienmodellierung können gewisse regionale Aussagen speziell hinsichtlich der Temperaturentwicklung getroffen werden. Für die Wintermonate Dezember, Jänner und Februar ergeben die Berechnungen im Rahmen von reclip:more 2007 bis Mitte des 21. Jahrhunderts gegenüber der Periode 1981 bis 1990 eine Erwärmung für Österreich von +1,3 bis 2 °C, für das Frühjahr um +1,8 bis 2,5 °C. Der Westen und der gesamte Alpenraum kann sogar mit einem Temperaturplus von +2 bis 3 °C rechnen. Die

Sommermonate Juni, Juli und August werden +2 bis 2,5 °C wärmer sein als heute. Auch hier stehen der Westen und der gesamte Alpenraum mit einem Plus von bis zu +3 °C heraus. Der Herbst wird mit einer allgemeinen Erwärmung von rund +2,5 bis 3 °C die höchste Temperatursteigerung erfahren [Loibl et al., 2007]. Der stärkere Temperaturanstieg im Sommer und Herbst ist hauptsächlich auf den Niederschlagsrückgang in diesen Jahreszeiten zurück zu führen.

Abbildung 3 zeigt die mittlere Temperaturentwicklung für ganz Österreich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, basierend auf dem sogenannten A1B-Szenario des Klimamodells ECHAM5 [Röckner et al., 2006], einer Zukunftsentwicklung ohne starke Treibhausgasemissionsreduktionen. Verglichen werden die Sommer-, Winter- und Jahrestemperaturen. Bis zum Ende 2100 wird es nach diesen Berechnungen im Jahresdurchschnitt mehr als 4 °C wärmer sein als noch heute. Im Jahresgang werden die höchsten Erwärmungen im Sommer und Winter erwartet. Eine Überschreitung der 5 °C bis zum Jahrhundertwechsel ist nicht auszuschließen. Anders als bei den reclip:more Ergebnissen zeigen die ECHAM5 Szenarien einen stärkeren Temperaturanstieg im Winter und Sommer und einen geringeren in den Übergangsjahreszeiten.

Die für Österreich berechneten Niederschlagsmuster bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts zeigen saisonale und regional unterschiedliche Tendenzen auf. Nach den Ergebnissen von reclip:more 2007 werden die Niederschläge insgesamt abnehmen, vor allem im Osten. Den stärksten Nie-

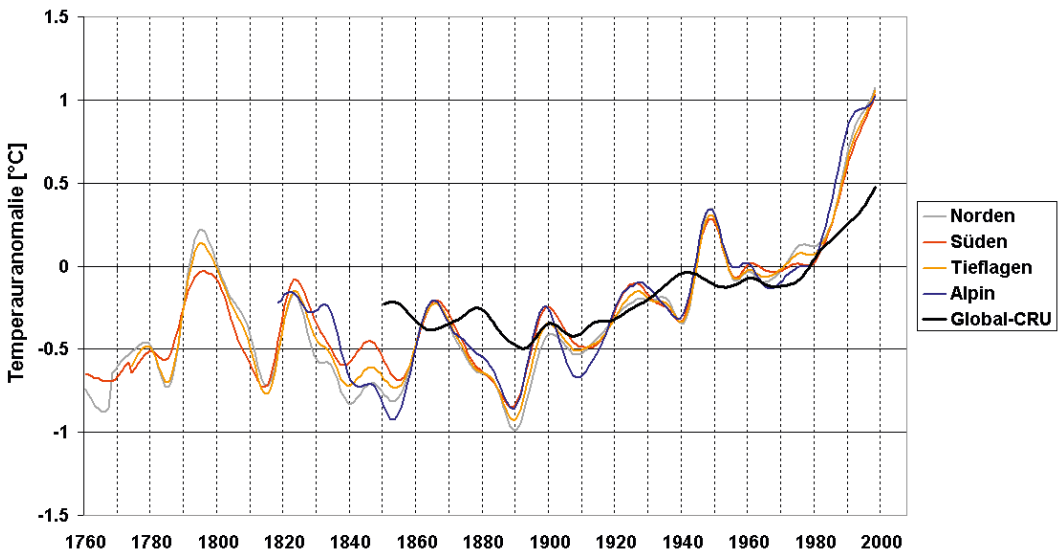


Abb. 2: Temperaturverlauf im Alpinen Raum und im globalen Mittel (Datenquelle: ZAMG)

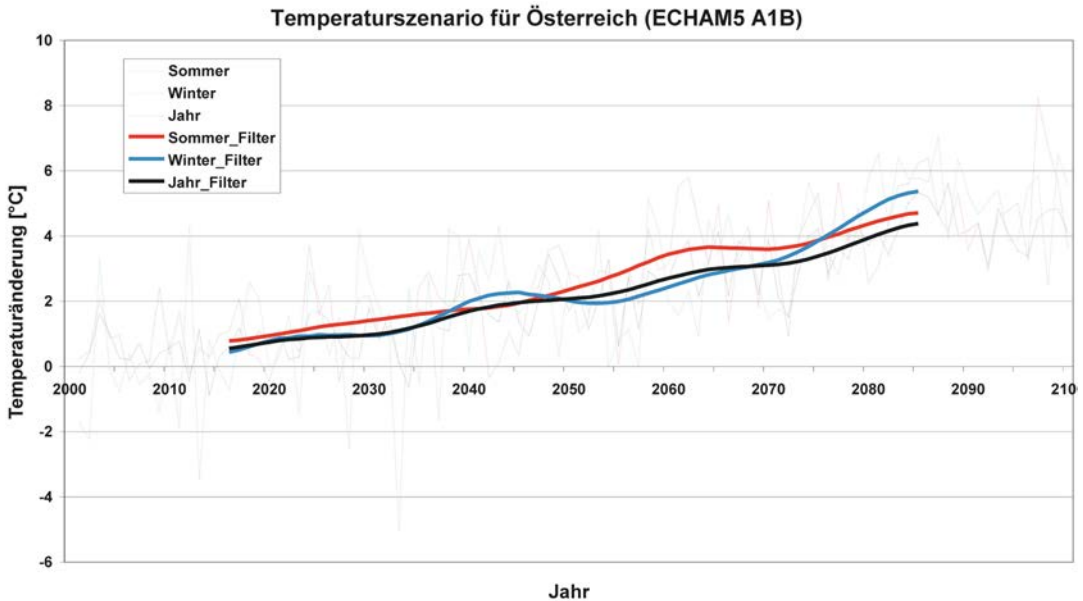


Abb. 3: Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperaturen in Österreich nach dem A1B Szenario bis Ende 2100. (Niedermair et al., 2007)

derschlagrückgang verzeichnen die Jahreszeiten Sommer und Herbst. Allerdings zeigen die Modelle nicht alle den gleichen Trend. Im Osten Österreichs kann es z.B. im Sommer je nach Modell von einer Abnahme um -15 % bis zu einer Zunahme um +15 bis 30 % kommen. In den Wintermonaten ist mit einer Niederschlagszunahme von +15 bis 30 % zu rechnen [Loibl et al., 2007].

Die Unsicherheiten bei der Niederschlagsentwicklung sind wesentlich größer als bei der Temperatur. Speziell die kleinräumigen Niederschlagstrends in den Gebirgsregionen können in verschiedenen Regionalmodellen deutlich unterschiedlich aussehen. Was jedoch alle regionalen Klimaszenarien für den Ostalpenraum zeigen ist eine Verlagerung des Niederschlags aus den Sommermonaten in den Winter. Bis Ende des Jahrhunderts werden, verglichen zu derzeitigen Niederschlagssummen, im Sommer die Niederschläge bis zu 50 % abnehmen, im Winter hingegen rund 40 % zunehmen. Die größten Unsicherheiten bestehen in den Übergangsjahreszeiten. Fast alle Modelle zeigen eine Zunahme der Niederschlagsintensität, sogar in den Sommermonaten, trotz Abnahme der Niederschlagsmenge.

Infolge des Temperaturanstiegs ist im Winter mit einem höheren Regenanteil am Niederschlag zu rechnen; speziell im Flachland wird

es daher seltener eine Schneedecke geben. Dies hat Auswirkungen auf die Landwirtschaft, die Wasserwirtschaft, die Tourismuswirtschaft und das Verkehrswesen. Nach Formayer et al. (2009) ist die Seehöhe, bis zu welcher der Niederschlag als Schnee fällt, regional sehr verschieden, wobei sie im Osten Österreichs wegen der Kaltlufteinbrüche aus Norden und Osten niedriger liegt. Eine Temperaturerhöhung um 1° C führt zu einer Verlängerung der Wachstumsperiode der Vegetation um etwa 11 Tage. Die größere Wärme führt zu rascherer Reife von Getreide und Früchten, häufig verbunden mit einem Rückgang des Ertrages. Die Häufigkeit von Temperaturen über 30°C wird sich in allen Seehöhen mindestens verdoppeln. Die Zunahme der Hitzeperioden stellt in den Städten eine Herausforderung an die Stadtplaner, die Bauvorschriften, die Architekten, und viele andere, bis hin zum Pflegepersonal in Krankenhäusern und Pensionistenheime dar. Diese wenigen Beispiele mögen als Hinweis genügen, dass die Auswirkungen des Klimawandels vielfältig sind und viele Wirtschaftssektoren betreffen.

Aussagen zur Veränderung der Häufigkeiten oder Intensitäten von Extremereignissen sind noch nicht wirklich belastbar. Hinsichtlich atlantischer Stürme zeigen die Klimamodelle kein eindeutiges Signal: Zwar verstärkt sich in einigen Klimamodellen die Sturmhäufigkeit am Atlantik, gleichzeitig verlagern sich die Zugbahnen wei-

ter nach Nordwesten. Wie sich dieser kombinierte Effekt auf Atlantische Stürme in Österreich auswirkt ist unklar. Aus physikalischen Gründen scheint eine Veränderung des Hochwasserrisikos wahrscheinlich, quantifizieren lässt sich das jedoch nicht (Formayer und Kromp-Kolb 2007). Die Gefahr von Dürreperioden steigt.

4. Maßnahmen

Die Kosten für den Klimawandel sind hoch, unabhängig davon, wie sie ausgedrückt werden: in Geld, Menschenleben, Gesundheit, verlorener Infrastruktur oder Artenverlust, und sie werden progressiv höher, je weiter der Klimawandel fortschreitet. Bei einem Temperaturanstieg von mehr als 2°C im globalen Mittel besteht, jenseits der systematischen Änderungen mittlerer Werte und extremer Ereignisse, die Befürchtung, dass sogenannte Kipp-Punkte des Klimasystems überschritten werden [Lenton 2008], das heißt dass Prozesse mit sogenannten positiven Rückkopplungen auf die Temperatur, also Klimawandel verstärkende Prozesse, oder solche mit großräumig katastrophalen Auswirkungen in Gang gesetzt werden, die nicht, oder nur mehr sehr schwer zu bremsen sind. Das Überschreiten dieser Kipp-Punkte zu verhindern ist gegenwärtig das Ziel der europäischen Klimaschutzpolitik.

Um den globalen Temperaturanstieg in diesem Jahrhundert mit 2° C zu begrenzen [WBGU 2003, EU 2007] muss innerhalb weniger Jahre eine Trendumkehr bei den globalen Treibhausgasemissionen erreicht und eine Senkung der Treibhausgasemissionen bis 2020 in den Industriestaaten um 15 - 30%, bis 2050 weltweit um 60% - 80% erzielt werden [Stern 2006]. Selbst wenn die Industrienationen ihre Emissionen um 90% bis 2050 senken, müssen die Schwellen und Entwicklungsländer die ihren noch um 50% gegenüber dem Stand von 2000 reduzieren [Stern 2006]. Unter diesen Voraussetzungen kann die Treibhausgaskonzentration voraussichtlich bei etwa 450 ppm stabilisiert werden. Dann besteht etwa eine 50:50 Chance, die 2°C Temperaturerhöhung in diesem Jahrhundert nicht zu überschreiten.

Neben diesen Maßnahmen, die das Ausmaß und die Geschwindigkeit des Wandels mindern sollen, sind auch Maßnahmen zur Anpassung an die klimabedingten Veränderungen (Adaptation) unumgänglich. Unter „Anpassung an den Klimawandel“ werden alle Aktivitäten zusammengefasst, welche die gegenwärtigen oder erwarteten zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf menschliche Gesellschaften abmildern sol-

len bzw. die dazu dienen, sich eventuell aus dem Klimawandel ergebende Chancen zu nützen [AustroClim 2008]. Anpassungsmaßnahmen reichen von der Planung und der zeitgerechten Errichtung von Dämmen zum Schutz gegen den Anstieg des Meeresspiegels, über Umstellungen in Produktpaletten und Leistungsangeboten von Firmen und Kommunen, von geänderter Frucht- und Sortenwahl, Bearbeitungsmethoden und -zeiten in der Landwirtschaft und den Veränderungen in den Ökosystemen, etwa der Baumartenzusammensetzung der Schutzwälder in alpinen Tälern, bis hin zu Hochwasserschutz und Hitzevorwarnung. Dabei ist jeweils die lokale Ausprägung des globalen Klimawandels ausschlaggebend, und, weil der Klimawandel ein dynamischer Prozess ist, genügt Anpassung an die jeweils gegenwärtige Situation nicht.

In zunehmendem Maße wird auch „geo-engineering“ ins Spiel gebracht. Dabei geht es um großtechnologische Lösungen, wie etwa das Ausbringen von Aerosolen in die Stratosphäre zur gezielten Reflexion der Sonnenstrahlung. Auch die sogenannte Sequestrierung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Storage) in ausgeförderten Erdöl- oder Erdgaslagern, Kohlegruben oder Aquiferen kann zu dieser Kategorie von Maßnahmen gerechnet werden. Den bisher vorgebrachten geo-engineering Ansätzen wird entgegengehalten, dass sie, anders als die Minderungsmaßnahmen, in der Regel ausschließlich das Klimaproblem ansprechen, ohne einen Beitrag zu anderen Problemen, wie etwa der Energieverknappung zu leisten, und dass noch zu klären ist, ob neue Probleme als Folge ausgeschlossen werden können.

5. Schlussbetrachtung

Wiewohl das Klimaproblem aus Sicht der Klimatologie hinreichend gut verstanden wird, um politische Maßnahmen – auch einschneidende Maßnahmen – zu rechtfertigen, lohnt es sich doch, das Klimaproblem auch einmal als reines Risikomanagementproblem vor unsicheren naturwissenschaftlichen Voraussetzungen zu betrachten. In diesem Fall muss man unterscheiden zwischen vier möglichen Situationen, die sich daraus ergeben, dass die Warnungen der Klimatologen entweder berechtigt sind (A) oder – z.B. in Folge ungenügenden Verständnisses der Prozesse – nicht (B) und dass die Staatengemeinschaft entweder Maßnahmen im Sinn der von den Wissenschaftler vorgeschlagenen setzt (J) oder nicht (N) [Craven 2008]. Wenn Maßnahmen gesetzt werden (J) entstehen die wirtschaftlichen Kosten der Klimaschutzmaßnah-

men, von denen zahlreiche aber auch aus anderen Gründen, wie Energieeinsparung oder Luftreinhaltung sinnvoll sind. Der Schaden ist also im Fall BJ nicht groß, und im Fall AJ sind die Kosten nach allen Berechnungen des IPCC, von Stern und anderen klein gegenüber dem vermiedenen Schaden. Werden keine Maßnahmen gesetzt (N) so entsteht bei der Kombination BN (auf ein nicht existentes Problem wurde nicht reagiert) weder Schaden noch Nutzen, bei AN (auf ein existentes Problem wurde nicht reagiert) erreicht die Klimaänderung jedoch Maximalausmaße deren Folgen noch nicht in vollem Umfang abschätzbar sind. Selbst wenn man der gängigen Klimatheorie nicht folgt, ergibt sich daher allein aus Sicht des Risikomanagements der logische Schluss, dass die geforderten Maßnahmen zu setzen sind. Umso mehr muss man zu diesem Schluss kommen, wenn man sich von der Glaubwürdigkeit der wissenschaftlichen Aussagen überzeugt hat.

Literaturverzeichnis

AustroClim 2008: „Anpassungsstudie“. Ist-Stand-Erhebung zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich. Kurzbericht an das BMLFUW. www.austroclim.at

EU 2007: Commission Staff Working Document. Accompanying document to the Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius. The way ahead for 2020 and beyond. Impact Assessment. Brussels January 10th 2007

Craven, Greg (2008): You tube: How it all ends. (Zugriffsjahr: 2008) <http://www.youtube.com/watch?v=6A58X73GnzE&feature=channel>

Formayer H und P. Haas, 2009: Einfluss von Luftmasseigenschaften auf die Schneefallgrenze. In: Prettenhaler F., H. Formayer, N. Vetter, P. Haas, C. Habsburg-Lothringen, 2009: Der sozio-ökonomische Einfluss des Klimawandels auf den Winter- und Sommertourismus in Österreich. Endbericht des Forschungsprojektes der ÖAW.

Formayer H. und H. Kromp-Kolb, 2007: Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Oberösterreich. Forschungsbericht im Auftrag von Umweltlandesrat Rudi Anschöber

Giorgi, F. and L.O. Mearns (1991): Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Rev. Geophys.*, 29, 191-216.

IPCC, 2001: Climate Change: the IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge UK.

IPCC, 2007: Fourth IPCC Assessment Report. Working Group I. [www.ipcc.ch]

Kromp-Kolb, H. und H. Formayer (2005): Schwarzbuch Klimawandel. Ecowin Verlag Salzburg

Lenton, Timothy M., Hermann Held, Elmar Kriegler, Jim W. Hall, Wolfgang Lucht, Stefan Rahmstorf and Hans Joachim Schellnhuber (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS* vol. 105, no. 6, pp. 1786–1793, February 12, 2008

Loibl W., Beck A., Dorninger M., Formayer H., Gobiet A., und Schöner W. (2007). Research for Climate Protec-

tion: Model Run Evaluation - Final Report. ARC systems research GmbH.

Niedermaier M., Lexer M. J., Plattner G., Formayer H., und Seidl R. (2007). Klimawandel & Artenvielfalt - Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften? Österreichische Bundesforste AG.

Rahmstorf, Stefan, Anny Cazenave, John A. Church, James E. Hansen, Ralph F. Keeling, David E. Parker, and Richard C. J. Somerville (2007): Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science* Vol 316 4 May 2007.

Roeckner, E., R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Habermann, L. Kornblüeh, E. Manzini, 266 U. Schlese, and U. Schulzweida (2006), Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model, *J. Climate*, 19, 3771–3791, 268 doi: 10.1175/JCLI3824.1.

Rutherford, S., Mann, M.E., Osborn, T.J., Bradley, R.S., Briffa, K.R., Hughes, M.K., Jones, P.D., Proxy-based Northern Hemisphere Surface Temperature Reconstructions: Sensitivity to Methodology, Predictor Network, Target Season and Target Domain, *Journal of Climate*, in press, 2005.

Smil, Vaclav (1991). *General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization*. Wiley. pp. 369. ISBN 0471629057

Stern, (2006): STERN REVIEW: The Economics of Climate Change. (Zugriffsdatum: 23.10.2006)

http://www.hm-treasury.gov.uk/Independent_Reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.c

Stott, P. A., S. F. B. Tett, G. S. Jones, W. Ingram, J. F. B. Mitchell and M. R. Allen (1999): Natural and anthropogenic causes of twentieth century temperature change. Oral presentation at: Conference on "Detection and Modeling of Regional Climate Change", 9 – 12 June 1999. ICTP, Trieste.

WBGU (2003): Über Kioto hinaus denken. Klimastrategie für das 21. Jahrhundert. Sondergutachten. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderungen. Berlin 2003

Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dr. Helga Kromp-Kolb, Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordanstr. 82, A-1190 Wien.

E-Mail: helga.kromp-kolb@boku.ac.at

Vortragende

Univ.-Prof. Dr. Helga Kromp-Kolb

- 1971 Promotion, Universität Wien
- 1982 Habilitation in Meteorologie, Universität Wien
- 1995 ordentliche Professur an der BOKU
- 2004-2006 Vorsitzende des Senates der BOKU
- 2007-2011 Expertenbeirat des Klima- und Energiefonds der Österreichischen Bundesregierung
- 2008-2013 Universitätsrat der Karl Franzens Universität Graz
- 2008-2011 Potsdam- Institut für Klimafolgenforschung e.V., Wissenschaftskoordination

Auszeichnungen:

Un Bosco per Kyoto (2009), Goldenes Ehrenzeichen für Verdienste um das Land Wien (2006), Wissenschaftlerin des Jahres; Preis der WissenschaftsjournalistInnen Österreichs (2005), Konrad Lorenz-Preis, BMUJF (1991)