

# Harte und weiche Fakten zum Klimawandel

## Einleitung

„Das Klima der Erde ist aus dem Gleichgewicht.“ – Diese Aussage beherrscht seit einiger Zeit die öffentliche Meinung. Da das Klima der Erde jedoch ein höchst diffiziles, von zahlreichen äußeren Einflüssen und auch internen Rückkopplungen gesteuertes System ist, das noch dazu eine große räumliche und zeitliche Variabilität auf unterschiedlichsten Skalen zeigt, ist es nicht nur für den Laien, sondern auch für den Fachmann schwer, einen Überblick zu gewinnen. Fragen wie „natürlicher oder anthropogener Klimawandel“, „wärmeres Klima = Katastrophenklima“ werden zwar in der öffentlichen Debatte oft als „erwiesene Tatsachen“ gehandelt und daraus sofort Schuldzuweisungen abgeleitet und meist noch erstaunlich simple „Lösungsvorschläge“ angeboten, in Wahrheit ist die Sache jedoch meist nicht so einfach – weder im Sinn von Verstehen noch im Sinn von „das Problem lösen“.

Der hier versuchte Beitrag eines kurzen Überblicks kann daher nur als Anregung verstanden werden, bei Interesse selbst weiter in die Tiefe zu gehen. Günstig dafür ist die Tatsache, dass die Zunft der Klimatologen der Erde im Rahmen des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) alle fünf bis sechs Jahre den Versuch unternimmt, einen Überblick über den „state of the art“ unserer Wissenschaft zu geben. Im Jahr 2007 ist der vierte dieser Serie von „Assessment Reports“ erschienen – 3 Bände mit insgesamt 3000 Seiten, die gratis von <http://www.ipcc.ch> herunter geladen werden können. Was den Alpenraum betrifft, kann ich auf die Arbeit der Gruppe der ZAMG zurückgreifen, der ich selbst angehöre. Auf dieser Basis werde ich versuchen, alle notwendigen Verkürzungen in Kauf zu nehmen, und einen Überblick über das weite Land des Klimawandels zu geben, wie er sich aus naturwissenschaftlicher Sicht darstellt. Wenn die davon nur schwer zu trennenden politischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen Aspekte interessieren, kann auf Böhm, 2008 verwiesen werden.

## Klimaantriebe

Wenn man die Vergangenheit des Klimas der Erde verstehen und seine Zukunft vorhersagen will, ist die Grundvoraussetzung dafür, die „Klimaantriebe“ zu kennen, die von außen her auf das Klimasystem einwirken. Erst dann kann man versuchen, das Wissen um die physikalischen Gesetze, die die Bewegungen, die Energieflüsse, die Zustandsgrößen der Atmosphäre, der Hydrosphäre (Luft) (flüssiges Wasser), der Kryosphäre (Schnee und Eis) und der Lithosphäre in ein „Klimamodell“ zu pressen, das dann ein virtuelles raum-zeitliches Abbild des Klimas der Erde erzeugt. Dieses wird dann in die Vergangenheit gerechnet, mit Daten des globalen Klimamessnetzes verglichen und nach dieser Evaluierung auch in die Zukunft hinein laufen gelassen.

Bei der Simulation der Vergangenheit kann man auf direkt gemessene oder indirekt rekonstruierte physikalische Klimaantriebe zurückgreifen, deren für das letzte Millennium wichtigste in den Abbildungen 1–2 dargestellt sind. Auf der längeren Zeitskala von Jahrtausenden und Jahrhunderttausenden sind noch andere als die hier im Vordergrund stehenden Klimaantriebe wirksam, wie etwa die Kontinentalverschiebung oder die veränderlichen Erdbahnparameter. Für diese Zusammenstellung werden wir uns auf diejenigen Faktoren beschränken, die in den letzten und den kommenden Jahrhunderten im Vordergrund stehen. Die Abb 1 zeigt oben die zeitlichen Verände-

rungen der früher „Solarkonstante“ genannten, von der Sonne gelieferter Energie, die als kurzweilige Strahlung an der Obergrenze der Erdatmosphäre eintrifft. Das untere Diagramm zeigt die (abkühlende) Wirkung von Vulkanausbrüchen, die durch die Rückstreuung an den durch explosive Vulkanausbrüche in hohe Luftschichten geschleuderten „Aerosolen“. Diese beiden natürlichen Faktoren haben bis vor etwa 50 Jahren vorwiegend die Klimavariationen des letzten Jahrtausends beherrscht, die mit einem „mittelalterlichen Wärmeoptimum“ begannen, dann in eine „kleine Eiszeit“ übergingen, von der sie sich mit steigender Solarintensität schließlich wieder bis Mitte des 20. Jahrhunderts etwa auf den Stand des Mittelalters „erholten“.

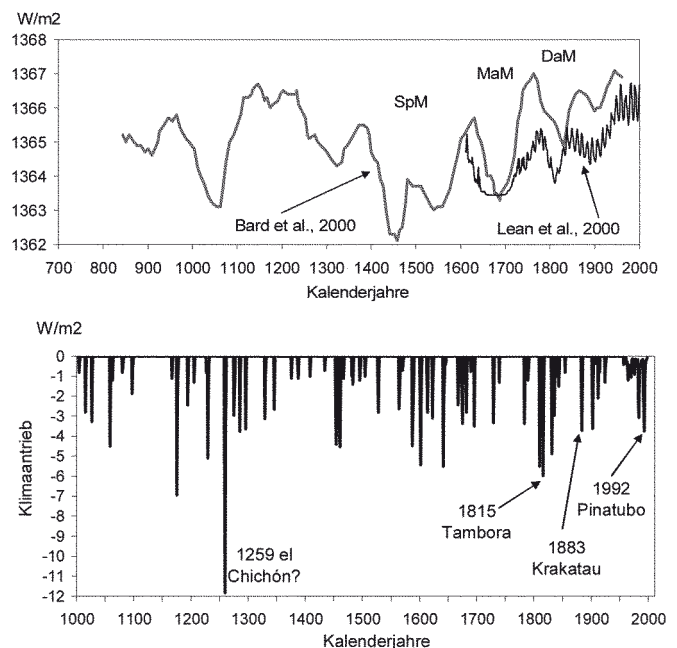


Abb 1. Natürliche Klimaantriebe im letzten Jahrtausend: Oben: zwei Rekonstruktionen der zeitlichen Variabilität der „Solarkonstanten“: Schwarz: aus den direkten Sonnenfleckenbeobachtungen (Lean et al., 2000) Grau: abgeleitet aus kosmogenen Baumjährring-  $^{14}\text{C}$ - und  $^{10}\text{Be}$ -Isotopenreihen aus Eisbohrkernen (Bard et al., 2000) SpM: Spörer-Minimum, MaM: Maunder-Minimum, DaM: Dalton-Minimum Unten: 1000-jährige Rekonstruktion des Klimaantriebes durch Vulkanausbrüche, die Schwefeldioxid in die Stratosphäre schleuderten, aus verschiedenen Eisbohrkernen und aus direkten Messungen (Crowley, 2000)

Dann begann der Mensch mit ins Klima einzugreifen, allerdings durchaus ambivalenter, als es dem gängigen Klischee „anthropogene Klimaerwärmung“ entspricht. Durch das Verbrennen fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) und durch Aktivitäten im Zusammenhang mit der Nahrungsmittelproduktion (Nassfeldanbau, Wiederkäuer ...) wurden vor allem die zwei „Leittreibhausgase“ Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) in der Atmosphäre in immer höheren Konzentrationen angereichert. Deren erwärmende Wirkung wurde jedoch in den ersten Jahrzehnten der extremen, und zunächst auf schmutzigen (zB Schwefel emittierenden) Technologien beruhenden, Wirtschaftsentwicklung nach dem Zweiten Weltkrieg „maskiert“.

Diese zB Sulfat-Aerosole hatten (wie die durch die Vulkane freigesetzten) in Summe eine abkühlende Wirkung auf das Erdklima, die bis etwa 1980 dauerte. Erst die großen Anstrengungen zur Luftreinhaltung bewirkten, zusammen mit dem Zusammenbruch der Schwer- und Rüstungsindustrie im früheren Ostblock, eine Trendwende dieses anthropogenen Klimaantriebes, die im unteren Diagramm von Abb 2 zu sehen ist.

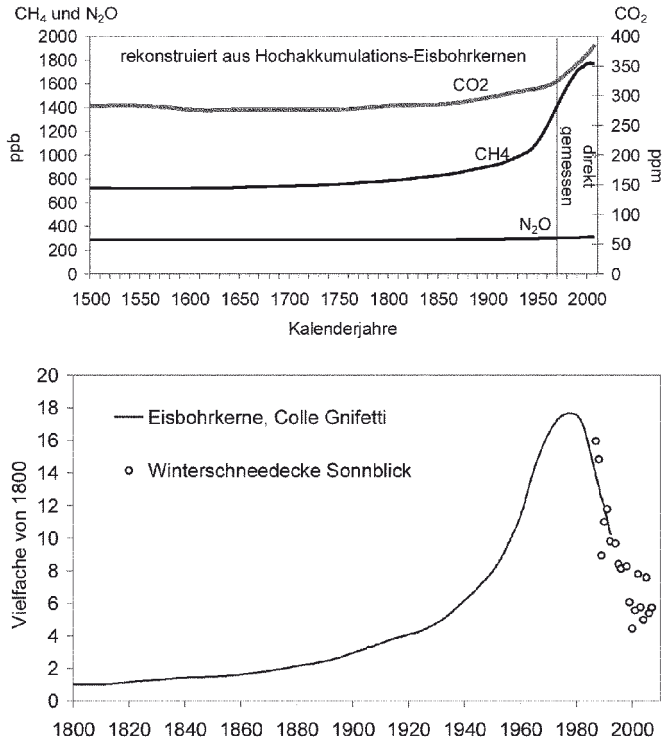


Abb 2. Zusätzliche Klimaantriebe durch den Menschen:  
Oben: Entwicklung der drei langlebigen Treibhausgase 1500–2007 aus Eisbohrkernen und aus direkten Messungen, Quelle: Robertson et al, 2001 (aktualisiert)  
Unten: Sulfatgehalt im Firn und Eis der Hochalpen. Kombiniert aus den stark geglätteten Daten eines Eisbohrkerns (Colle Gnifetti, 4450m, Monte Rosa Gipfelzone) seit 1800 mit jährlichen Messungen im Winterschnee im Sonnblickgebiet (3100m, Hohe Tauern) seit 1982  
Quellen: Wagenbach, pers. Mitt, 2008 und Schöner, 1995 (aktualisiert bis 2007)

Die Treibhausgasemissionen allerdings konnten nicht reduziert werden, was meiner Einschätzung nach auch für die Zukunft nicht in nennenswertem Ausmaß zu erwarten ist. Zu eng ist wohl das „Komfortgas“ CO<sub>2</sub>, das unsere Räume heizt, unsere Maschinen und Fahrzeuge antreibt mit unserer Zivilisation verbunden, zu stark ist der Aufholbedarf der Mehrheit der Erdbevölkerung in dieser Hinsicht, und zu eng ist wohl auch das Methan mit der Ernährung der Menschheit verbunden. Dies führte nach 1980 zum nun tatsächlich erfolgten Eintritt ins „anthropogene Treibhausklima, das uns wahrscheinlich auch die nächsten Jahrhunderte begleiten wird, bis weiterer technologischer Fortschritt die dann zurückgehenden Reserven an „gespeicherter fossiler Solarenergie“ (nichts anderes sind die drei fossilen Energieträger) zu ersetzen vermag.

Dass der langfristige und großräumige Temperaturverlauf mit gekoppelten globalen Atmosphäre-Ozean Zirkulationsmodelle (AOGCMs, genauere Beschreibung im Schlussabschnitt), denen die beschriebenen Klimaantriebe vorgegeben werden, bereits gut simulierbar ist, zeigen die beiden Zeitreihen der Abb 3. Die oben beschriebenen Charakteristika des Klimas des letzten Millenniums werden vom Modell Erik (benannt nach dem Wikinger Erik dem Roten) sehr ähnlich zu dem simuliert, was

etwa durch hunderte Baumringanalysen im Alpenraum rekonstruiert worden ist. Wir finden in beiden Fällen exakt datierte einzelne Jahre, wie das extreme „Jahr ohne Sommer“ (1816), wir finden mitten im „Klimaoptimum“ des Mittelalters einen beinahe gleich kalten Sommer, der typisch ist für ein ganzes kaltes Jahrhundert, das im überwiegend warmen Mittelalter eingebettet ist (das 11. Jahrhundert). Wir sehen die allmähliche Abkühlung im 14. und 15. Jahrhundert und den endgültigen Absturz in die Kernperiode der „Kleinen Eiszeit“ in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts. Für die Diskussion „natürliches versus anthropogenes Klima“ ist anzumerken, dass bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts die heißesten Sommer und auch das mittlere Temperaturniveau gerade das der mittelalterlichen Warmzeit erreicht hatte, und dass in den letzten 20 Jahren die Temperaturkurve aus dem „natürlichen Bereich“ der letzten 1250 Jahre hinauszuwachsen beginnt.

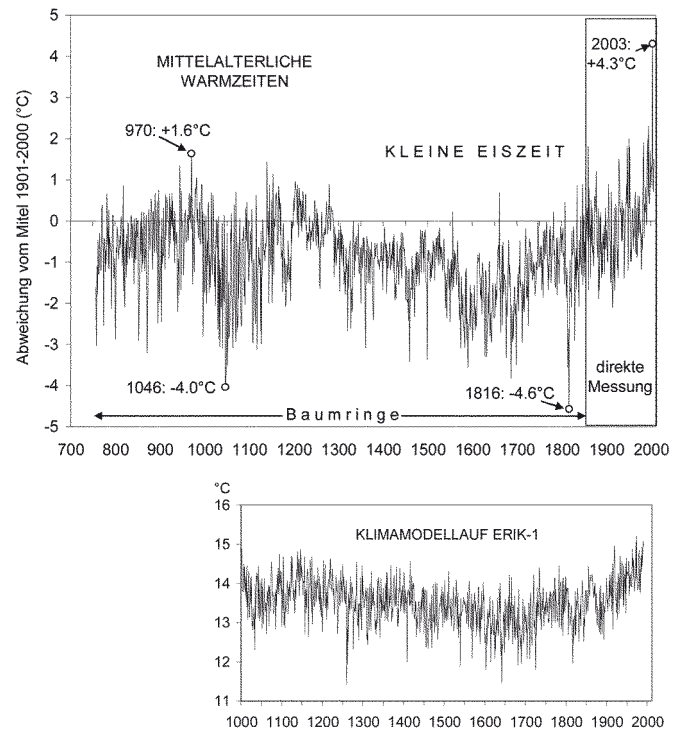


Abb 3. Klimamessung, Klimarekonstruktion und Klimamodellierung für das letzte Millennium:  
Oben: Rekonstruktion der Sommer-Frühherbst Temperaturen (Juni-September) in den Alpen seit dem Jahr 755 n Chr  
755–1850: rekonstruiert aus Hunderten Jahrringdichtereihen (Büntgen et al, 2005), 1851–2006: direkt gemessene hochalpine HISTALP-Daten (Auer et al., 2007).  
Unten: Klimamodelllauf ERIK-1 für die Sommermitteltemperaturen (Juni-September) der Jahre 1000–1990 für Festlandeuropa (10°W-40°E, 35°N-70°N) (Zorita et al, 2004)

## Gegenwärtige Trends

Bleiben wir vorerst noch auf dem sichereren Grund der gemessenen Klimatrends. Abb 4 verdeutlicht den beschriebenen Übergang vom natürlichen zum anthropogen mitbestimmten Klima für den Großraum Alpen und im globalen Mittel, die in diesem Fall bereits durch direkte instrumentelle Messungen an mehr als hundert (Alpenraum) bzw mehr als tausend (global) Stellen des seit 250 Jahren Mitteleuropa, seit 150 Jahren die gesamte Erde in ausreichender Dichte abdeckenden Klimamessnetzes. Wir erkennen in der Abbildung die noch kühle letzte Phase der „kleinen Eiszeit“, den Ende des 19. Jahrhunderts einsetzenden natürlich bedingten Erwärmungstrend, der schließlich um 1940 bis 1950 – synchron mit einem Maximum der solaren Einstrahlung (vergleiche Abb 2) einen vorläufigen Höchstwert erreichte

# Harte und weiche Fakten zum Klimawechsel

(Ellipse 1). Die erste anthropogene (Aerosol-) Periode kühlte das Klima weltweit und noch stärker regional ab, was zB verbreitet zu einer beginnenden Vorstoßperiode der Gletscher führte. Um 1980 stießen drei Viertel der österreichischen Gletscher wieder vor. Dieser Gletschervorstoß wurde jedoch sehr plötzlich durch die starke Erwärmung der Phase 3 unterbrochen, die auf die bereits beschriebene Art und Weise hauptsächlich auf den Einfluss der Treibhausgase zurück zu führen ist.

Neben diesem beschriebenen Trend, der in Mitteleuropa etwa doppelt so stark war wie im globalen Mittel gegeben war (+2°C seit 1890 gegenüber +1°C), sei auf die regional viel stärkere kurzfristige (hochfrequente) Variabilität hingewiesen, die umso stärker die langfristigen Hintergrundtrends übertönt, je mehr man ins Regionale und Lokale geht. Diese Tatsache sei stets bedacht, wenn wieder ein extremer Winter (sowohl einen extrem milden als auch einen extrem kalten und schneereichen haben wir in den Nordalpen ja in den letzten drei Jahren erlebt) oder ein „Jahrtausendsummer“ (2003) zu voreiligen Schlüssen über die Langfristtrends verleiten. Einzelfälle aber auch zu kurze Zeitreihen erlauben in der Klimatologie nie statistisch signifikante Trendaussagen, im Fall des räumlich und zeitlich noch variableren Niederschlages in noch stärkerem Maß als für den gezeigten Fall von Jahresmitteln der Temperatur.

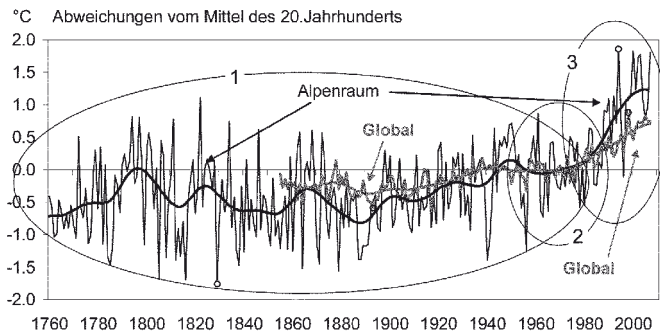


Abb 4. Direkt gemessene Jahresmittel der Lufttemperatur im Großraum Alpen 1760–2007 (schwarz) und im globalen Mittel 1858–2007 (grau). Dargestellt sind Anomalien zum Mittel des 20. Jahrhunderts. Alpenraum: 4-19°E, 43-49°N, Mittel aus 124 Einzelreihen; Global-Land: Mittel aus 2000 Festland und Inselstationen

- 1: letzte natürliche Periode – solarer und vulkanischer Einfluss dominant
- 2: erster merklicher menschlicher Einfluss – die Aerosolperiode
- 3: Eintritt ins Treibhauszeitalter

Quellen: Auer et al, 2007 und Jones et al, 1999 (aktualisiert)

Während bei der Temperatur der Langfristtrend im Großraum Alpen auch für Unterregionen repräsentativ ist (die +2° gelten sowohl für Perugia, Wien, Marseille oder Bern und genau so für die Hochalpinen Observatorien auf dem Säntis, der Zugspitze oder auf dem Sonnblick), zeigt sich bei den Niederschlagstrends in Abb 5 ein markanter Unterschied zwischen langfristig ansteigendem Trend im Nordwesten des Alpenbogens und langfristiger Tendenz zu trockeneren Verhältnissen im Südosten. Die Größenordnung beider gegenläufiger Trends liegt bei 10–15% pro Jahrhundert, während die Kurzfristvariabilität bei plus-minus 50% liegt.

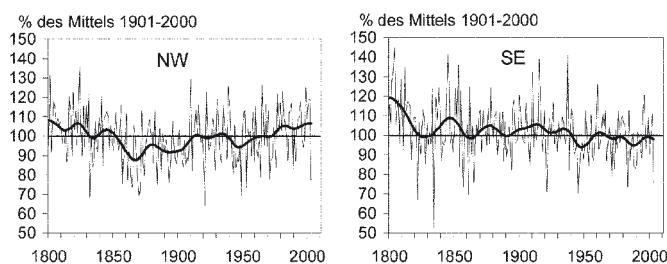


Abb 5. Regionale Trendunterschiede beim Niederschlag:

Regionaler Jahresniederschlag 1800–2007, gemittelt aus je 50 Einzelreihen. Links: nordwestlich des Alpenbogens (Frankreich, Schweiz, Süddeutschland, Vorarlberg, Tirol), rechts: südöstlich des Alpenbogens (Ungarn, Slowenien, Kroatien, Bosnien, Friaul, Veneto, Kärnten, West- und Oststeiermark. Dargestellt sind die Einzeljahre und der 30-jährig geglättete Verlauf.

Quellen: HISTALP Datenbank, Auer et al, 2006

Ohne hier auf die Entwicklungen der anderen Klimaelemente ausführlich eingehen zu können, sei lediglich erwähnt, dass ein regionaler Anstieg der Sonnenscheindauer registriert werden konnte, der durch ein nordwärts Wandern des subtropischen Hochdruckgürtels vor allem im Sommer verursacht worden ist, und der auch die regional stärkere Erwärmung gegenüber der globalen erklärt. Beim Wind zeigte sich in den letzten 130 Jahren insgesamt ein allerdings nicht signifikanter leichter Rückgang nach stürmischeren Verhältnissen zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Beim Anteil des Schneefalls am Gesamtniederschlag manifestierte sich der Erwärmungstrend in einem Rückgang wieder in der Größenordnung von 10–15%, allerdings mit systematischen jahreszeitlichen Unterschieden in unterschiedlicher Seehöhe nach dem Schema: Rückgang im Winterhalbjahr im Tal, in den Übergangsjahreszeiten in den mittleren Seehöhen von 1500–2000 m und winterliche Stabilität in der Gletscherregion, die aber im Sommer sensitiv reagierte.

## Extremwerte

Wohl die größte Diskrepanz zwischen harten wissenschaftlichen Fakten und deren Wahrnehmung durch die Öffentlichkeit besteht auf dem Gebiet der extremen Ausformungen des Klimas. Unter dem allgemein akzeptierten Schlagwort „das Klima wird immer verrückter“ hat in sich ein Dogma festgesetzt, das gerade bei den weichsten Fakten ansetzt, die die klimatologische Wissenschaft derzeit (noch?) zu bieten hat. Weiche Faktenlage bei den Extremwerten herrscht sowohl bei der Klimarekonstruktion der Vergangenheit, als auch bei der Klimamodellierung – in beiden Fällen begründet durch eine Tatsache, die im Kapitel 8.5.4 des Working Group 1 Reports von IPCC-2007 (Model Simulation of Extremes) so beschrieben ist:

Because most AOGCMs have coarse resolution and large-scale systematic errors, and extreme events tend to be short lived and have smaller spatial scales, it is somewhat surprising how well the models simulate the statistics of extreme events in the current climate, including the trends during the 20th century. This is especially true for the temperature extremes, but intensity, frequency and distribution of extreme precipitation are less well simulated.

Ich habe es absichtlich beim englischen Originaltext belassen, erstens um nicht den Vorwurf der Manipulation zu ermöglichen, zweitens aber, weil ich ein Fan der Zwischentöne bin, die diese Sprache bietet. Dieses „somewhat surprising“ und das „less well“ sind schon kleine Meisterstücke. Im Original des Textes, bevor der mühsame Prozess des peer reviewing durchgeführt werden musste, war noch etwas direkter von „serious deficiencies in the simulation of precipitation“ die Rede, und zwar „both in the intensity and the distribution of precipitation“.

Im Hinblick der Analyse eventueller Trends von Extremwerten in der Vergangenheit kommen noch zwei zusätzliche Herausforderungen dazu. Zum einen erfordern die Gesetze der Statistik lange und räumlich dichte Zeitreihen, um zu signifikanten Ergebnissen zu kommen, gerade wenn die sehr seltenen sehr starken Ausreißer das Ziel der Analyse sind. Und genau diese langen Zeitreihen erfordern als *conditio sine qua non* die sorgfältige Homogenisierung dieser Zeitreihen. Wie wir zeigen konnten (Auer et al, 2007) erfährt eine durchschnittliche

Klimazeitreihe im Durchschnitt alle 20 bis 30 Jahre eine Diskontinuität (Verlegung, Instrumenten- oder Technologiewechsel, Änderung der Umgebung und zahlreiche andere Gründe), deren Stärke das eigentliche Klimasignal erreichen oder auch übertreffen kann. Und gerade für die zur Analyse von „short lived“ Extremwerten besonders benötigten Klimazeitreihen von Tageswerten (oder noch kürzerer Zeitspannen) zeigen eine zweite Besonderheit der entsprechenden Feldverteilungen: Sie dekorrelieren räumlich viel stärker, als längerfristige Mittelwerte oder Summen. Abb 7 zeigt das exemplarisch für die Tages- bis Jahreswerte von Temperatur und Niederschlag, wobei hier noch die zusätzliche besondere „Empfindlichkeit“ des Klimatelements Niederschlag hervortritt.

Da zur Homogenisierung der Zeitreihen (=Anpassung früherer an den aktuellen „Zustand“ einer Messreihe) hoch-korrelierte Zeitreihen benachbarter Referenzreihen benötigt werden, zeigt die Abb 6 den Hauptgrund für die leider derzeit noch gegebene Tatsache, dass es homogenisierte Klimazeitreihen auf Tagesbasis kaum noch gibt. Das gilt sowohl international als auch für den Alpenraum oder Österreich. Für einige Subregionen Österreichs arbeitet unsere Gruppe gerade an der Erstellung räumlich dichter Tagesreihen für das 20. Jahrhundert, und eine internationale COST-Aktion („HOME“ siehe Anhang) hat ua das Problem der Homogenisierung von Tagesreihen zu Gegenstand.

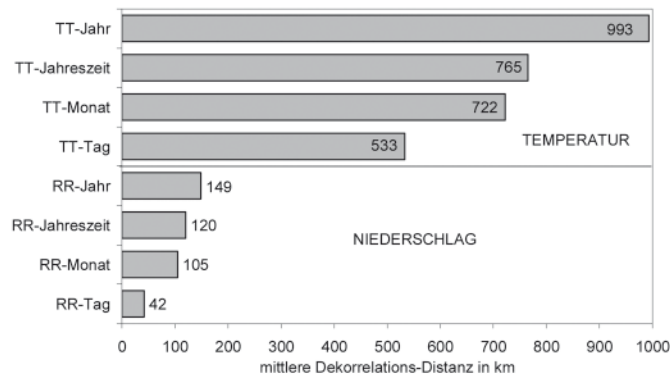


Abb 6. Räumliche Dekorrelation auf 50% gemeinsame Varianz im Europäischen Klimamessnetz von Jahres-, Jahreszeiten-, Monats- und Tageswerten von Temperatur und Niederschlag  
Quelle: Scheffinger et al, 2003 (interner Projektsber. ALP-IMP)

Spiegelbildlich dieselben Probleme zeigen sich bei der Trendanalyse der Extremwerte. Deren große räumliche und zeitliche Variabilität rückt lokale Ergebnisse in den Vordergrund und verdeckt den Überblick auf die Gesamtsituation. Naturgemäß eröffnet das in der öffentlichen, aber leider auch in der wissenschaftlichen Debatte ein weites Feld entbehrlichen Streits, widersprüchlicher Ergebnisse und das osmotische Eindringen weltanschaulicher Argumentation in ein wissenschaftlich noch nicht befriedigend aufgearbeitetes Thema. Immer kann in den zweifellos real vorhandenen, aber noch nicht flächen- und zeitabdeckend analysierten Mustern der Extremwert-Verteilungen gerade das Ereignis oder Ergebnis herausgesucht werden, das am besten die jeweilige Position untermauert – „picking“ heißt der dafür existierende Fachausdruck. Um nicht in genau diese Falle zu tappen, werden in der Folge nur kurz einige vorläufige Ergebnisse vorgestellt, wobei das bisher gesagte die notwendige Einschränkung im Hinblick Verallgemeinerung klargestellt haben sollte.

Ein interessantes vorläufiges Ergebnis, das unsere laufenden diesbezüglichen Projekte erbracht haben bzw gerade erbringen (Foralps, A Tale of two valleys), ist vor allem beim Niederschlag der überraschend enge Zusammenhang zwischen Trends von Extremwertindizes auf Tagesbasis und den entsprechenden Trends von Mittelwerten, bis hinauf zu Jahresmitteln. Abb 7

bringt ein Beispiel für Extremen Tagesabfluss und Niederschlag im großen Donau Einzugsgebiet des Pegels Nussdorf (Wien), Abb 8 einen Vergleich von Niederschlagsjahressummen und Tageswertsindizes Klimareihe in den Hohen Tauern. Es scheint somit, zumindest für den Großraum Alpen, nicht so zu sein, dass Trends der Extremwerte auch in ganz andere Richtungen gehen können, als die der Mittelwerte. Es ist also nicht unbedingt zu erwarten, dass zum Beispiel in Gegenden mit generell fallendem Niederschlagstrend (wie etwa im Südosten des Alpenbogens) ein Anstieg der Starkregen zu erwarten ist oder, im umgekehrten Fall in Regionen mit Niederschlagszunahme (wie etwa im Nordwesten des Alpenbogens) die Trockenperioden häufiger werden.

Dieser Befund gilt auch für die Temperatur: Also mit generellem Erwärmungstrend steigen die Extremwerte, die sich auf Hitze beziehen und im gleichem Maß ist ein Rückgang der Kälteindizes zu beobachten. Beides nicht notwendigerweise in linearer Form, speziell wenn Schwellwertsüber- oder -unterschreitungen genau analysiert werden, sind nichtlineare Zusammenhänge die Regel.

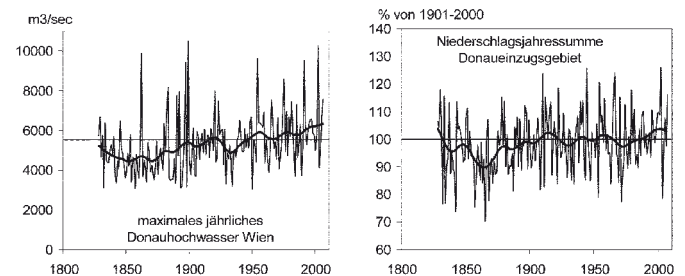


Abb 7. Links: Zeitreihe der jährlich größten Durchflussmengen der Donau bei Wien, 1828-2006, Quelle: Godina R, Hydrographisches Zentralbüro, Wien, 2008, persönliche Mitteilung  
Rechts: Flächenmittel der Jahressummen des Niederschlages im Einzugsgebiet der Donau oberhalb Wiens Quelle: 28 langjährige HISTALP Niederschlagsreihen, Auer et al, 2007  
Alle Reihen für Einzeljahre (dünn) und 30-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpassfilter)

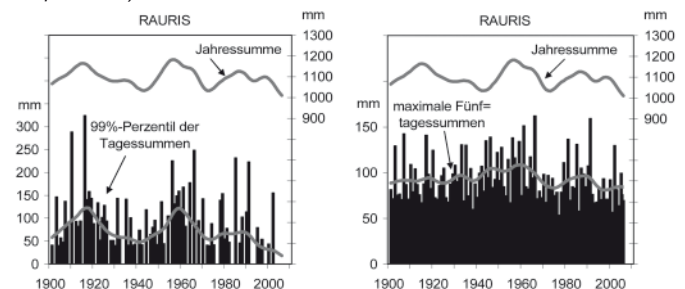


Abb 8. Ähnlichkeit zwischen der gesamten Jahressumme des Niederschlages (die 20-jährig geglätteten Linien oben in den Abbildungen) und von zwei Niederschlags-Extremwertindizes für den inneralpinen Ort Rauris (Einzeljahre und 20-jährig geglättet, unten).  
Links: Summe der Tagesniederschläge, die in der Klimanormalperiode 1961-90 nur noch von 1% aller Fälle übertroffen werden (= 99%-Perzentil). Rechts: maximale Fünftagesummen eines Jahres  
Quelle: Auer et al, 2008a und b

Der vorläufige Befund der Ähnlichkeit der Trends von auf Tageswerten beruhenden Extremwerten und denen der Mittel- oder Summenwerte lässt auch einem weiteren vorläufigen Ergebnis erhöhte Bedeutung zukommen, das eine noch unveröffentlichte Untersuchung an den längsten HISTALP-Monats-, Jahreszeiten- und Jahresreihen von Luftdruck, Temperatur und Niederschlag erbracht hat. Es wurde die längsten Zeitreihen der Region (jeweils 20 bis 30 Reihen), die alle in die frühe instrumentelle Periode zurückreichen (vor 1840) nach einem hier nur kurz skizzierbaren Verfahren auf langfristige Veränderungen der Variabilität untersucht.

# Harte und weiche Fakten zum Klimawechsel

Das Verfahren wurde auf alle einzelnen Reihen getrennt angewendet, um die statistisch zu erwartende Erhöhung der Varianz mit abnehmender Reihenanzahl zu vermeiden. Bei der Jahreszeiten- und Jahresanalyse wurden zunächst die Trends selbst durch Hochpassfilterung eliminiert (Filterweite 30 Jahre), dann in übergreifenden Zeitfenstern von 30 Jahren Quantile (von 1% bis 99%) berechnet. Dadurch konnten mit den Interquantilbereichen verteilungsfreie Zeitreihen der Klimavariabilität erzeugt werden. Analysiert wurden jeweils die 80-, 90- und 98% Interquantilbereiche. Für Jahresgang-bereinigte (durch Normalisierung) sequentielle Monatsreihen wurde das analoge Verfahren auf der Basis von 10-jährigen (=120 monatlichen) Zeitfenstern durchgeführt.

Bei Luftdruck und Temperatur ergaben sich regional sehr ähnliche Verläufe der Interquantil-Zeitserien, beim Niederschlag reagierte der mediterrane, der atlantische und der kontinentale Bereich des Großraums Alpen regional und jahreszeitlich unterschiedlich. Generell wurde überraschenderweise sowohl in den letzten 200 Jahren, als auch in den letzten 50 Jahren keine generelle Steigerung der Klimavariabilität beobachtet, wie sie in der Öffentlichkeit als Selbstverständlichkeit vorausgesetzt wird. Speziell bei der Temperatur sind die Trends der Variabilität (= der „Verrücktheit des Klimas“) in allen Jahreszeiten und in allen Subregionen rückläufig. Abb 9 illustriert das am Beispiel der sequentiellen Monatsreihen der Lufttemperatur, gemittelt über alle 24 Langzeitreihen. Beim Niederschlag liegen jahreszeitlich und regional unterschiedliche Trends der Variabilität vor, wobei die markantesten Zunahmen der Variabilität typischerweise dort beobachtbar sind, wo auch die Trends der Niederschlagsmengen zunehmen, zum Beispiel im Herbst und Winter der Subregion nordwestlich des Alpenbogens. Tabelle 1 zeigt das exemplarisch für den 90%-Interquantilbereich und den Langfristtrend vom 19. zum 20. Jahrhundert.

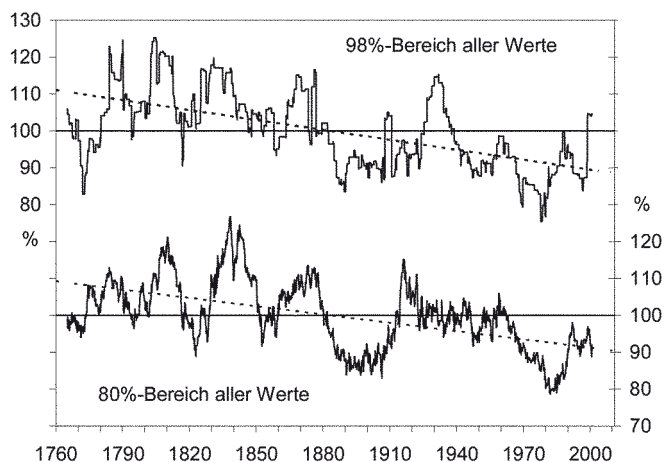


Abb 9. Zeitreihen der Variabilität des Temperaturklimas im Großraum Alpen von 1760 bis 2006: 80% und 98%-Quantilbereich in Zeitfenstern von 120 Monaten, die in Monatsschritten über standardisierte 30-jährig hochpassgefilterte sequentielle Monatsreihen der Temperaturen der 24 vor 1840 beginnenden instrumentellen Messreihen der Region bewegt wurden. Dargestellt ist hier das Mittel über alle diese Langzeitreihen. Quelle: Zwischenergebnis einer laufenden Untersuchung der Arbeitsgruppe Klimawandel der ZAMG-Wien

Will an die Charakteristika der Trends von Klimaextremwerten zusammenfassen, muss an erster Stelle auf die noch großen Forschungsdefizite hingewiesen werden, die vor allem auf der ungenügenden Dichte von Langzeit-Messreihen beruhen. Die vorläufigen Ergebnisse aus dem Großraum Alpen zeigen einen generellen Rückgang der Temperatur-Variabilität bei gleichzeitig steigenden Temperaturen. Beim Niederschlag liegen regional und jahreszeitlich unterschiedliche Trends der Variabilität vor, es scheinen jedoch die Trends der Extremwerte analog zu denen der über längere Zeiträume akkumulierten Summen zu verlaufen. In jedem Fall sind die Langfristtrends der Veränderungen der Variabilität bzw der Extremwerte wesentlich geringer als die Kurzfristvariabilität selbst – ein Faktum, auf das auch bei den Trends der Klimaelemente selbst bereits hingewiesen worden ist.

## Die nächsten 100 Jahre

State of the Art zur Simulation des künftigen Klimas sind so genannte gekoppelte Atmosphäre-Ozean globale Zirkulationsmodelle (AOGCMs), die eine digitalisierte Erde samt Ozean, Lufthülle, manchmal auch schon Erdoberfläche samt Pflanzenkleid, in denen tatsächlich in einer gewissen räumlichen Auflösung (derzeit horizontal bereits weniger als 100 km, vertikal 20 bis 30 Ozeanschichten, und ebenso viele Atmosphärenschichten) und einem darauf abgestimmten zeitlichen Taktfrequenz (Minuten bis Stunden) das Wetter der gesamten Erde für die kommenden 100 Jahre oder für die vergangenen 1000 Jahre abläuft. Diese Modellläufe berechnen somit, was das Klimasystem intern mit den äußeren Antrieben so anstellt – ohne Anspruch auf Vollständigkeit also, welche Energiemengen von den Ozeanen vom Äquator Richtung Pole transportiert werden, wie viel flüssiges Wasser durch Verdunstung in die Atmosphäre gelangt, wie viel einfallende kurzweilige Sonnenstrahlung von Schneeoberflächen in Sibirien oder der Antarktis ins Weltall reflektiert wird und auch, welche Energiemengen in Form langwelliger (Wärme-)Strahlung durch die Treibhausgase am Entweichen aus der Erdatmosphäre gehindert werden, welche Energiemengen in Erwärmung und welche in Bewegung (Stürme) umgesetzt wird und vieles anderes mehr.

Derlei Simulationsrechnungen sind mit einem gigantischen Rechenaufwand verbunden, dem auch die schnellsten derzeit zur Verfügung stehenden Rechenanlagen nicht gewachsen sind. Und es sind die derzeit schnellsten Rechenanlagen, die in einer Handvoll internationalen Großrechenzentren dazu zur Verfügung stehen, und diese Super-Computer brauchen für einen typischen Klima-Lauf Monate ihrer CPU-Zeit! Man muss daher notwendigerweise Abstriche machen. Diese gehen einerseits in Richtung räumlich-zeitliche Auflösung des Rechengitters, andererseits müssen die bekannten physikalischen Zusammenhänger vereinfacht werden, um sie schnell genug rechnen zu können. Das alles führt zu einer unterschiedlichen Fähigkeit der Klima-Simulationsrechnungen, mit unterschiedlichen Ausformungen des Klimas zurecht zu kommen. Auf einer Skala von gut über mittelmäßig zu schlecht bis gar nicht liefern die modernen AOGCMs bereits brauchbare Ergebnisse für globale bis kontinentale Muster vor allem der Temperatur und zwar über deren Mittel über längere Zeiträume. Schlechter werden sie, wenn man ins Regionale bis Lokale geht und hier vor allem, wenn der Wasserkreislauf ins Spiel kommt. Hier werden die Fakten zunehmend „weich“. Schwierigkeiten bei der Simu-

Tabelle 1. Prozentuelle Änderungen (Grundwert 19. Jahrhundert) der Klimavariabilität (Interquantilbereich 90%) vom 19. zum 20. Jahrhundert auf Jahreszeiten- und Jahresbasis in drei Subregionen des Großraums Alpen für die Klimaelemente Temperatur und Niederschlag. Quelle wie für Abb 9

	NE	NW	S	NE	NW	S	NE	NW	S	NE	NW	S	NE	NW	S	
	FRL	FRL	FRL	SOM	SOM	SOM	HER	HER	HER	WIN	WIN	WIN	JAHR	JAHR	JAHR	
Temp.	-16.0	-14.9	-13.2	-20.0	-7.6	-2.3	-3.2	-9.7	+0.3	-7.4	-12.0	-6.2	-28.9	-23.8	-11.5	%
Nied.	-6.1	-3.0	-9.0	+1.7	+8.9	-2.4	-0.3	+14.1	-5.8	+8.8	+13.5	-2.6	-4.6	+5.3	-3.7	%

lation der Wolkenbildung, besonders bei den kleinräumigen konvektiven Vorgängen, machen Aussagen über Starkregen, Hagel, Gewitter, Tornados nur sehr bedingt bis gar nicht möglich. Gerade diese extremen Ausformungen des Wetters stehen aber in der Klimadebatte im Vordergrund (Stichwort „das Klima wird immer extremer“).

Zur Modellierung der Klimavergangenheit stehen die rekonstruierten Klimaantriebe zur Verfügung, wie sie für das letzte Jahrtausend in den Abb 1 und 2 gezeigt und besprochen worden sind. Abb 3 zeigte eine Realisierung für die letzten 1000 Jahre Sommer-Frühherbst Temperaturen für Europa, und wie diese recht gut den Verlauf einer auf Baumringen beruhenden Temperaturrekonstruktion aus Alpinen Hochlagen. Eine rechnerisch-physikalische Simulation des künftigen Klimaverlaufs setzt eine Abschätzung des künftigen Verlaufes der Klimaantriebe voraus. Typischerweise werden dazu AOGCMs zweimal laufen gelassen, einmal ohne Veränderung sowohl der natürlichen als auch der anthropogenen äußeren Antriebe und einmal unter dem Einfluss von erwarteten Konzentrationsänderungen der anthropogenen Treibhausgase, die sich aus Abschätzungen der künftigen politischen, wirtschaftlichen, sozialen, technologischen Entwicklungen ergeben. IPCC hat dazu zahlreiche „Entwicklungsfamilien“ abgeleitet, deren Unterschiede zumindest eine ebenso hohe zusätzliche Unsicherheit zu der aus den mathematisch-physikalischen Modellunsicherheiten resultierenden hinzufügt. Das faszinierende daran ist jedoch, dass man auf diese Weise verschiedene Zukunftswelten virtuell durchspielen kann, und so die Möglichkeit besteht, die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf das Erdklima abzuschätzen. Tabelle 2 ist ein Versuch, die drei wesentlichen Szenarien-Familien der Entwicklung der Menschheit im 21. Jahrhundert kurz zusammenzufassen. Als Leitszenario wird von IPCC das mit A1B bezeichnete verwendet, die mit „business as usual“ oder „hässliche Globalisierung“ charakterisierbare A2-Welt zeigt, welche Erwärmung nach oben hin absteckbar ist, die „schöne neue Welt“ des geplanten und global umgesetzten Umweltbewusstseins läuft unter B1 und führt zur geringsten Treibhausgasbelastung.

Tabelle 2: Kurzbeschreibung der drei am häufigsten verwendeten IPCC-Zukunftsszenarien der globalen Entwicklung im 21. Jahrhundert nach Nakicenović und Swart, 2000

A1-Familie	<p>Schnelles Wirtschaftswachstum in einer mobilen, global stark vernetzten, immer mehr zusammenwachsenden Welt. Einkommensunterschiede zwischen Individuen und zwischen Ländern bzw Regionen vermindern sich.</p> <p>Hohe Investitionen in Bildung und Forschung. Höhere Lebenserwartung und bessere Gesundheit führen weltweit zu kleineren Familien. Bis 2050 steigt die Erdbevölkerung auf 9 Mrd, dann fällt sie bis zum Jahr 2100 auf 7 Mrd.</p> <p>Neue Technologien werden schnell eingesetzt. Energieeffizienz steigt an. Sehr unterschiedliche Energieprioritäten, im „Marker Szenario“ A1B wird ein ausbalancierter Mix aus verschiedenen Energiequellen benutzt.</p>
A2-Familie	<p>Wenig globale Vernetzung in einer regional differenzierten, kulturell pluralistischen Welt. Verglichen mit A1 insgesamt weniger Wirtschaftswachstum, anhaltend große Einkommensunterschiede zwischen Individuen und zwischen Ländern bzw Regionen. Fertilitäts- und Sterblichkeitsraten entwickeln sich weniger stark als in den A1-Welten. Die Erdbevölkerung wächst weiter und erreicht im Jahr 2100 15 Milliarden.</p> <p>Der Energiemix ist ebenfalls differenzierter als in der A1-Welt und orientiert sich hauptsächlich an der regionalen Verfügbarkeit. Große Teile der Wirtschaftsentwicklung müssen in die Nahrungsproduktion investiert werden, dadurch gibt es in den anderen Sektoren weniger Weiterentwicklung als in A1, auch im Energiesektor.</p>

B1-Familie	<p>Das Hauptmerkmal der B1 Entwicklungslinien ist ein hohes Umwelt- und Sozialbewusstsein, das sich in einem global kohärenten Trend zu nachhaltiger Entwicklung führt.</p> <p>Nach unruhigen bis chaotischen Jahrzehnten setzen sich Gemeinschafts-Werte gegenüber Individualismus durch, dabei spielen gesteuerte Erziehung und starke politische Steuermechanismen eine führende Rolle.</p> <p>Reduzierter Konsum und starke Konzentration auf erneuerbare Energieformen führen zu den bedeutendsten Erfolgen auf dem Sektor der Eindämmung der Treibhausgasemissionen. Die Erdbevölkerung entwickelt sich ähnlich wie in den A1-Szenarios, aber aus anderen Gründen, hauptsächlich wegen der erhöhten Sicherheit durch das soziale Engagement der Gesellschaft</p>
------------	--

Dass man bei der Umsetzung der aus den sozio-ökonomisch-politischen Szenarien abgeleiteten Treibhausgasantrieben in AOGCMs noch mit großen Unsicherheiten umgehen können muss, und zwar wie schon erwähnt auch infolge der noch existierenden Unzulänglichkeiten der Klimamodelle auf manchen Gebieten, illustriert Abb 10. Sie zeigt die überaus unterschiedlichen Ergebnisse von zwei der besten derzeit zur Verfügung stehenden Modelle für die erwarteten Veränderungen des mittleren Jahresabflusses auf der iberischen Halbinsel für die Zeit um 2020. Die bereits erwähnten Unzulänglichkeiten der Niederschlagsmodellierung führen zu sogar konträren Aussagen einer Zunahme der Wasserführung der Flüsse um bis zu 50% im Fall des einen Modells und zu einer Abnahme um bis zu -50% in der Simulation durch das andere Modell.

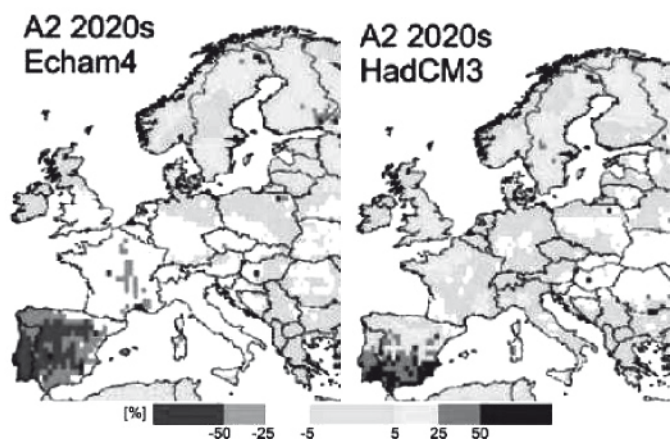


Abb 10. Simulation der Veränderung der Wasserführung der Flüsse Europas für die 2020er-Jahre unter Annahme eines „business as usual“ Treibhausgasverlaufs (IPCC-Szenario A2) in Prozent. Links: Max Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, rechts Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Exeter, UK. (IPCC-2007, WG-2 Report, Ausschnitt aus fig.12.1)

Es gibt zurzeit zwischen 10 und 20 „state of the art“ globale transiente Simulationsrechnungen des Erdklimas der kommenden 100 Jahre. Die räumliche Auflösung konnte in den letzten 10 Jahren von 100 km in Richtung 50 km gedrückt werden. Auf die Details kann hier nicht eingegangen werden, eine ausführliche Beschreibung findet man in den Kapiteln 8 bis 11 des Working Group 1 Reports von IPCC-2007. Die von den AOGCMs bereits erreichte räumliche Auflösung zwischen 100 und 50 km ist für regionale Zwecke bereits brauchbar und wird in IPCC-2007 auch gegenüber den Versuchen, die Auflösung höher zu treiben, empfohlen.

Für lokale Anwendungen muss man die Ergebnisse der globalen Modellrechnungen herunter skalieren (verfeinern), das vor allem dann, wenn die Extremwerte interessieren, die per Definition kleinräumig sind, besonders beim Niederschlag. Die physi-

# Harte und weiche Fakten zum Klimawechsel

kalisch elegantere Methode und auch die, die dem Verständnis der Vorgänge dienlicher ist, ist das „dynamische Downscaling“, das in den Rahmen einer größeren, globalen Realisierung ein feinmaschigeres Modell setzt und die vorgegebenen Strukturen der globalen Ergebnisse hinunterrechnet. Derzeit bewegt man sich in Richtung einer Auflösung von wenigen km, allerdings mit noch sehr unterschiedlichen und teils widersprüchlichen Ergebnissen. Die neueste Entwicklung geht in Richtung kompressibler Berechnung, was einen wesentlichen Schritt in Richtung mehr Realitätsnähe bedeutet (CLM-Modelle). Die zurzeit noch eher schwachen und zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse des dynamischen Downscalings, gerade im komplizierten Gelände des Alpenraums, machen die verschiedenen Methoden des „statistischen Downscalings“ interessant, ganz besonders, wenn es in kleine Einzugsgebiete geht. Dabei werden statistische Zusammenhänge gemessener Klimadaten zum Herunterrechnen benutzt.

Vor allem durch die steigende Computer-Performance ist zu erwarten, dass in Zukunft derjenige Schritt auch für die Klimamodellierung möglich sein wird, der vor etwa 10 Jahren die Wetterprognose grundlegend verbessert hat, und der eine Qualitäts- und damit Vertrauensabschätzung ermöglicht: Die Ensemble-Prognose (eine große Anzahl von Parallelrealisierungen der Zukunft). Derzeit ist das Hauptproblem die nur ungenügende Verifizierung der Modellergebnisse über die nicht ganz logische Annahme, dass eine gute Realisierung der Gegenwart (im Vergleich zu Messdaten) auch für die der Klimazukunft zutreffend ist. Was der aktuelle Forschungsstand für das Klima des 21. Jahrhunderts erwartet, sei nun zum Schluss im regionalen Maßstab (Mitteleuropa und hier speziell die für Österreich interessanten Fakten) stichwortartig skizziert:

## Zusammenfassende Darstellung für Mitteleuropa

Im regionalen Maßstab Mitteleuropas macht sich bereits bei allen Klimaelementen der bekannte Zusammenhang des Anstieges der hochfrequenten Klimavariabilität gegenüber den langfristigen Klimatrends bemerkbar. Das bewirkt, dass die folgenden langfristigen Aussichten noch längere Zeit durch das kurzfristige „Rauschen“ der Schwankungen von Jahr zu Jahr „maskiert“ sein werden.

### Besser belegte Aussichten bis 2100:

Anhaltender Temperaturanstieg um 3°C (A1B Szenario), stärker im Sommer im mediterranen Bereich, im Winter im nordöstlichen Bereich der Region. Das ist mehr, als der in den letzten 150 Jahren beobachtete Temperaturanstieg in der Region um rund 2°C. Szenarienvariabilität etwa +1°C (B1 +2°, A1 +4° und mehr).

Zunahme aller Arten von positiven Temperaturextremwerten (heiße Tage, absolute Maxima, etc) bei etwa analoger Abnahme der negativen Temperaturextremwerte (Frost, absolute Minima etc)

Kaum Änderungen der Wind- und Sturmtätigkeit (das gilt nur für Mitteleuropa, in anderen Teilen Europas herrscht Uneinigkeit unter den Modellen). Die Erwartung der Nichtzunahme der Sturmtätigkeit in der Zukunft deckt sich mit dem Datenbefund der vergangenen 130 Jahre (Matulla et al., 2007)

Anhaltender Rückgang des Anteils der festen Komponente des Niederschlages

Bodenfeuchte zunehmend beeinflusst von der Temperatur (Verdunstung) und weniger vom Niederschlagsangebot

Weiterer Gletscherrückgang der aktiven Alpengletscherfläche auf 40 bis 50% (von 1980) bis 2050, auf 15-20% bis 2100

### Schlechter belegte Aussichten bis 2100:

Tendenziell eher Niederschlagszunahme nördlich der Alpen, Abnahme südlich der Alpen, die Grenze zwischen Zu- und Abnahme weiter im Süden im Winter, weiter im Norden im Sommer. Die Größenordnung der Änderungen liegt in Mitteleuropa im Bereich -5 bis +10% im Winter, bei -5 bis -20% im Sommer. Das ist etwas mehr als das, was wir aus den gemessenen regionalen Langfristrends der letzten 200 Jahre kennen, die 10%/100 Jahre nicht übertroffen haben.

Zunahme der sommerlichen stabilen Schönwetterlagen durch weitere nordostwärts Verlagerung des Subtropenhochs (laut MPI-Modellen, Hadley-Modelle zeigen das nicht)

### Kaum belegte Aussichten:

Änderung der konvektiven Niederschläge, Gewitter, Hagel, Tornados, Muren, also der meisten kleinräumigen Extremausformungen des Klimas, die schlecht bis zum Teil gar nicht in der Modellphysik der großräumigen Modelle enthalten sind, und beim Downscaling Schwierigkeiten machen. Mehr dazu in IPCC-2007, chapt.8

Vorsicht gerade bei den Extremwerten vor interessensgesteuerten Meinungen (exemplarisch dargestellt in Pielke jr. et al., 2008)

## Österreich:

### Besser belegte Aussichten bis 2100:

Anhaltender Temperaturanstieg um 3-3.5°C (A1B Szenario), regional im Winter im Westen 3°, im Osten 3.5°, im Sommer im Norden 3.3°, im Süden 3.8° Szenarienvariabilität etwa +1°C (B1 +2°, A1 +4° und mehr).

Gletscher: stärkerer Rückgang als im Alpendurchschnitt: bis 2100 nur noch rund 10% der aktiven Gletscherflächen von 1980

Alles andere wie für Mitteleuropa beschrieben

### Schlechter belegte Aussichten:

Tendenziell dieselbe subregionale Differenzierung beim Niederschlag wie oben für Mitteleuropa angegeben, nur mit engeren Bereichen der Zahlenwerte: +5 bis +10% im Winter, -7 bis -12% im Sommer. Diese saisonale Aufgliederung lässt eine Dämpfung des in Österreich üblichen Jahresganges des Niederschlages um 10 bis 20% erwarten (geringeres Sommermaximum, höheres Winterminimum). Die Messbefunde der Vergangenheit lassen einen relativ scharfen Übergang von der Nord- zur Südcharakteristik am Alpenhauptkamm erwarten. Im Wesentlichen wird eine Fortsetzung der aus den letzten 150 Jahren gegebenen Niederschlagstrendmuster erwartet (Auer et al, 2007).

### Kaum belegte Aussichten:

Gleiche Aussage wie für Mitteleuropa.

Im Einzelfall können, sozusagen in „Handarbeit“, vertrauenswürdige lokale Abschätzungen unternommen werden, wie zum Beispiel eine (flächendeckend noch nicht vorhandene) indirekte Quantifizierung der künftigen Entwicklung des Prozentanteils des Schnees am Gesamtniederschlag für die Hohe Tauern: (interne Unterlage des ZAMG-Projekts „A tale of two valleys“)

Abnahme vom Mittel des 20. Jahrhunderts bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (A1B):

In 1000m Seehöhe: Im Winter von 80% auf 58%, Frühling von 38% auf 16%, im Sommer gleichbleibend bei 0%, im Herbst von 29% auf 6%

In 2000m Seehöhe: Im Winter von 90% auf 70%, im Frühling von 86% auf 66%, im Sommer von 17% auf 5%, im Herbst von 59% auf 18%

In 3000m Seehöhe: Im Winter von 99% auf 97%, im Frühling von 99% auf 97%, im Sommer von 64% auf 34%, im Herbst von 99% auf 94%.

## Danksagung

Der hier unternommene Versuch einer zusammenfassenden Darstellung des Klimawandels ist wegen der geforderten Kürze notwendigerweise rudimentär. Die Überblicksarbeit war nur möglich durch zahlreiche Detailarbeiten, deren einfache Auflistung ebenfalls den Rahmen sprengen würde. Es sei deshalb nur auf einige wenige Grundlagen verwiesen:

Für die Klimazukunft wurde in erster Linie auf die breit angelegten Zusammenfassungen in den IPCC-Reports 2007, insbesondere WG-1 und WG-2 verwiesen.

Für die anderen Bereiche konnte auf Grundlagenarbeiten einer Reihe abgeschlossener und noch laufender Forschungsprojekte der Klimaabteilung der ZAMG zurückgegriffen werden: CLIVALP (FWF, P15076-N06), ALP-IMP (EU-FP5, EVK-CT-2002-00148), FORALPS (Interreg-Alpine-IIIb Alpine Space, I/III/3.1/21), A Tale of two Valleys (BMWf-Programm proVision, 133-111), HISTALP-2007 (ZAMG-BMwf 4426/07-9), Ö-Schnee-200 (ZAMG-BMwf 4426/07-21), COST ES Projekt

0601 HOME, HOMDAY (ZAMG-BMWF 4426/07-23). Für die Förderung sei an dieser Stelle nochmals gedankt.

## Literatur

- Auer I, Jurkovic A, Orlik A, Böhm R, Korus E, Sulis A, Marchetti A, Dolinar M, Nadbath M, Vertacnik G, Vicar Z, Pavcic B, Geier G, Rossi G, Leichtfried A, Schellander H, Gabl K, Zardi D, 2008a. High quality climate data for the assessment of Alpine climate, its variability and change on regional scale – Collection and analysis of historical climatological data and metadata. Technical Report of WP5, Interreg-IIIb- Alpine Space Project Foralps, I/III/3.1/21, 67 pages plus 7 annexes
- Auer I et al, 2008b. Endbericht des BMWF- proVision Projekts "A Tale of two Valleys. In Arbeit
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones PD, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercuri L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westerner G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E, 2007. HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760–2003. *International Journal of Climatology* 27: 17–46
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Mestre O, Moisselin JM, Begert M, Brazdil R, Bochnicek O, Cegnar T, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Szalai S, Szentimrey T. 2006. A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800-2002. *Int. J. Climatol.* 25 139-166
- Bard E, Raisbeck G, Yiou F, Jouzel J, 2000. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *TELLUS B* 52: 985–992
- Böhm R, Schöner W, Auer I, Hynek B, Kroisleitner C, Weys G, 2007. Gletscher im Klimawandel – Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. ZAMG-Morava, Wien, 111 Seiten
- Böhm R, 2008. Heiße Luft, Reizwort Klimawandel – Fakten-Ängste-Geschäfte. VAbENE, Wien-Klosterneuburg, 261 Seiten
- Büntgen U, Frank DC, Nievergelt D, Esper J, 2006. Summer temperature variations in the European Alps: AD 755-2004. *Journal of Climate* 19: 5606–5623
- Crowley TJ, 2000. Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. *Science* 289: 270–277
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 996 Seiten
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.. Working Group II Contribution to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 976 Seiten
- Jones PD, New M, Parker DE, Martin S and Rigor IG, 1999: Surface air temperature and its variations over the last 150 years. *Reviews of Geophysics* 37: 173–199
- Lean J, 2000. Evolution of the Sun's Spectral Irradiance since the Maunder Minimum. *Geophysical Research Letters* 27: 2425–2428
- Matulla C, Schöner W, Alexandersson H, von Storch H, Wang XL, 2007. European storminess: late nineteenth century to present. *Climate Dynamics* 29: DOI 10.1007/s00382-007-0333-y
- Nakicenović N and Swart (eds.), 2000. Special report on emission scenarios. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK, 599 Seiten
- Pielke RA Jr, Gratz J, Landsea CW, Collins D, Saunders MA, Musulin R, 2008. Normalized Hurricane Damage in the United States: 1900–2005. *Natural Hazards Review* 9/1: 29–42. DOI: 10.1061/ASCE/1527-6988(2008)9:1(29)
- Robertson A, Overpeck J, Rind D, Mosley-Thompson, Zielinski G, Lean J, Koh D, Penner J, Tegen I, Healy R, 2001. Hypothesized climate forcing time series for the last 500 years. *Journal of Geophysical Research – Atmosphere* 106: D14 p14783 (2000JD900469)
- Schöner W, 1995. Schadstoffdepositionen in einer hochalpinen winterlichen Schneedecke am Beispiel von Wurtenkees und Goldbergkees (Hohe Tauern). Dissertation, Universität Salzburg, 130 Seiten plus Karten- und Tabellenanhänge
- Zemp M, 2006. Glaciers and Climate Change. Spatio-temporal Analysis of Glacier Fluctuations in the European Alps after 1850. Schriftenreihe Physische Geographie, Glaziologie und Geomorphodynamik 49: 67 Seiten plus 5 Publikationen und Programme im Anhang. Universität Zürich
- Zorita E, von Storch H, Gonzalez-Rouco FJ, Cubasch U, Luterbacher J, Legutke S, Fischer-Bruns I, Schlese U, 2004. Climate evolution in the last five centuries simulated by an atmosphere-ocean model: global temperatures, the North Atlantic Oscillation and the Late Maunder Minimum. *Meteorologische Zeitschrift* 13: 271–289

## Korrespondenz:

Dr Reinhard Böhm

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

1190 Wien, Hohe Warte 38

e-mail: reinhard.boehm@zamg.ac.at