

Inhalte und Ergebnisse der Klimatage 1996

Teil I

Ulrich v.Kusserow

1.Tag: Einflußfaktoren auf das Klima

Holger Kruse und Ulrich v.Kusserow, Olbers-Gesellschaft e.V.

Das Klimaproblem ist nach Ansicht führender Experten eines der großen Umweltprobleme unserer Zeit. Es gibt eine große Anzahl von miteinander wechselwirkender *natürlicher, Klimasystem immanenter* oder durch Menscheneinfluß bedingter *anthropogener Klimafaktoren*. Das durch Materie- und Energietransport, durch Erwärmungen, Strömungen und Winde, durch komplexe Prozesse in den Weltmeeren, im Polareis, auf dem Festland, in der Erdatmosphäre und in der Biosphäre bestimmte Verhalten des Klimasystems erhält seine Energie vorwiegend von der Sonne, zu einem geringen Anteil aus Prozessen im Erdinnern, seltener aus dem übrigen Kosmos.

Das Wettergeschehen in der Erdatmosphäre spielt sich in der untersten Atmosphärenschicht, der *Troposphäre*, ab. Darüber liegt in der *Stratosphäre* die das Leben auf der Erde schützende Ozonschicht. Von der Sonne eingestrahlt härtere elektromagnetische Strahlung führt oberhalb der *Mesosphäre* zur Aufheizung und Ionisation der weiter außen gelegenen, als *Thermosphäre* beziehungsweise *Ionosphäre* bezeichneten Schichten. Solare Teilchenstrahlung mit eingelagerten Magnetfeldern wechselwirkt schließlich mit der *Magnetosphäre* der Erde.

Während man unter dem Begriff *Wetter* kurzzeitige, lokale, durch die am Ort vorherrschenden Temperaturen und Luftdruckverhältnisse, durch Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, charakteristische Formen von Niederschlägen sowie durch spezielle Windgeschwindigkeiten bestimmte Witterungsverhältnisse versteht, meint man mit dem Begriff *Klima* globale, über Zeiträume von deutlich mehr als einem Jahr andauernde Wetterverhältnisse eines größeren Gebietes auf der Erdoberfläche.

Wir leben heute in einem in der Erdgeschichte seltenen sogenannten *Eiszeitalter*. Sogar beide Polargebiete sind seit etwa 2,3 Millionen Jahren mit Eiskappen bedeckt. Seit etwas weniger als 1 Million Jahren schwankt dabei die Menge des Eisvolumens mit einer typischen Zykluslänge von etwa 100 000 Jahren relativ periodisch. Seit etwa 12 000 Jahren leben wir heute in einer sogenannten *Warmzeit* mit relativ geringem Eisvolumen und auffallend stabilem Klima. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird es in etwa 50-80 000 Jahren wieder eine sogenannte *Eiszeit* mit größerem Eisvolu-

men und dabei deutlich abgesunkenem Meeresspiegel geben.

In der Klimageschichte hat es innerhalb weniger Jahre immer wieder dramatische Klimaänderungen mit abrupten Temperatursprüngen um bis zu 10°C gegeben. Meeresströmungen, sogenannte *maritime Förderbänder* wurden dabei durch unterschiedliche natürliche Einflußfaktoren verlagert oder sogar gestoppt, der Energietransport mit einschneidenden Folgen gestört. Die Leuchtkraft der Sonne hat sich im Laufe ihrer mehr als 4,5 Milliarden Jahre andauernden Entwicklung kontinuierlich um insgesamt etwa 30% erhöht. Die stetige Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration und die einhergehende Verringerung des *Treibhauseffektes* sowie die Ausbildung einer vor UV-Strahlung schützenden *Ozonschicht* waren es, die unter relativ konstanten Bedingungen die kontinuierliche Entwicklung von Leben auf der Erde wohl erst ermöglichten. Die durch Menschen bedingte Ausdünnung der Ozonschicht und die Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Erdatmosphäre sind es, die heute eine nichtnatürliche Störung des Klimasystems bewirken könnten oder sogar schon bewirken. Umweltschädliche *Aerosole* dämpfen die Auswirkungen des Treibhauseffektes nur vorübergehend. Eine weitere Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration könnte durch eine Zunahme des *Pflanzenwachstum* gebremst werden. Ein erhöhter Treibhauseffekt würde unter Umständen sogar zur Verlagerung oder Abschaltung des *Golfstroms* führen, so daß, trotz weltweit im Mittel ansteigender Temperaturen, Teile Europas bei Unterbrechung dieses maritimen Förderbandes entsprechend ihrer relativ hohen nördlichen geographischen Breiten deutlich abkühlen könnten.

Die *Liste der Klimafaktoren* beginnt mit der Sonne als wesentlicher Energiequelle des Klimasystems (siehe auch Abbildung 1). Wenn ihre Leuchtkraft schwankt, hat dies natürlich Auswirkungen auf den Energiehaushalt der Erde, auch wenn komplexe Prozesse in der Erdatmosphäre und vor allem die Pufferwirkung der Weltmeere aufgrund ihrer hohen Wärmekapazität eine direkte Auswirkung auf die Troposphäre verzögern.

Neue Messungen zeigen heute die große Konstanz der *Sonneneinstrahlung*. Das muß nicht immer so gewesen sein, das kann sich in Zukunft auch ändern. Mehr oder weniger periodisch ablaufende magnetische *Aktivitätsschwankungen* auf der Sonne mit vorübergehend starker Erhöhung der UV-Strahlung, Materieausstoß mit eingelagerten Magnetfeldern werden heute hauptsächlich für mögliche, von der Sonne ausgehende Klimaschwankungen verantwortlich gemacht.

Die Lage und Form der Erdbahn sowie die Lage der Erdachse zur Bahnebene schwanken aufgrund gravitativer Wechselwirkungen der Himmelskörper des Sonnensystems periodisch mit unterschiedlichen Periodenlängen. Die von *Milankovitch* entwickelte Theorie der Überlagerungen der verschiedenen Perioden macht die beobachtete wiederholte Ausbildung von Eis- und Warmzeiten durch *Einstrahlungsschwankungen* verständlich. In der Erdgeschichte hat der Einschlag von Kometen sicherlich immer wieder dramatischen Einfluß auf die Erdatmosphäre und damit auch auf das Klima genommen. *Interplanetarer Staub* gilt heute ebenfalls als möglicher Verursacher der Klimaschwankungen mit 100 000-jähriger Periode.

Kontinentalverschiebungen mit Umorientierungen der Land- und Wasserverteilungen auf der Erdoberfläche haben mit typischen Zeitskalen von etwa hundert Millionen Jahren durch Veränderung der Meeresströmungen sicherlich ebenfalls großen Klimaeinfluß genommen. Unter Umständen haben sie erst den in jüngerer Klimageschichte auftretenden Wechsel zwischen Warm- und Eiszeiten durch Zusammenballung von Landmassen auf der Nordhalbkugel möglich gemacht. *Vulkanausbrüche* mit dem Ausstoß gewaltiger Aerosolmengen führt zu eher zu kurzzeitiger Klimabbeeinflussung von nur wenigen Jahren.

Der *Mensch* ist es, der durch *Verunreinigung der Weltmeere* und des Landes, durch Anreicherung der Erdatmosphäre mit unterschiedlichen *Spurengasen* zunehmend Einfluß auf das Klima nimmt. Die vor allem bei Verbrennungsprozessen freigesetzten Treibhausgase bewirken seit Beginn der Industrialisierung die Aufheizung der Erdatmosphäre und der Weltmeere. Daraus resultieren unter anderem ein zunehmendes Abschmelzen der Gletscher und Polkappen, die Erhöhung des Weltmeeresspiegels, die Ausbildung des sogenannten El Niño-Effekts mit folgereichen Meeresströmungsozillationen, extremere Wetterlagen mit Überschwemmungen, Unwettern einerseits und Dürrekatastrophen andererseits. Vor allem Fluorchlorkohlenwasserstoffe sind es, die die Ozonschutzschicht zunehmend zerstören, uns der gefährlichen UV-Strahlung aussetzen. Hierdurch werden Algenentwicklungsprozesse gestört, es kann von diesen Pflanzen nicht mehr soviel Kohlendioxid verarbeitet werden, die Treibhauseffektproblematik verschärft sich so weiter. In Zusammenwirkung mit Autoabgasen produziert erhöhte UV-Strahlung zudem die Konzentration gesundheitsgefährdenden troposphärischen Ozons. Der verstärkte Einsatz von Flugzeugen verschärft sowohl die Treibhauseffekt- als auch die troposphärische und stratosphärische Ozonproblematik.

Die Erforschung aller möglichen natürlichen Klimafaktoren ist von großer Bedeutung, weil erst dadurch eine realistische Abschätzung der anthropogenen Einflüsse bei Klimavariationen möglich ist.

2.Tag: Einfluß des Menschen auf unser Klima

Klimageschichte der Erde, Prof.Dr.Klaus Herterich, Uni Bremen

Eine große Fülle von *klimatologischen Datensignalen* spiegelt die große Komplexität der Vorgänge in der Natur wieder. Daten dienen den Klimatologen als Orientierung, ihre physikalisch-mathematischen *Modellrechnungen* versuchen die Zusammenhänge zwischen historischen Daten und denen der Gegenwart zu verstehen. Man möchte *Vorhersagen* über die zukünftige Entwicklung oder aber auch Aussagen über Grenzbereiche der Klimaforschung machen, in denen es an ausreichendem Datenmaterial fehlt. Über das sogenannte *Paläoklima*, das Klima der Erdgeschichte, gibt es zumindest für die letzten 200 000 Jahre genügend Daten, die relativ zuverlässige Modellierungen ermöglichen.

Heute besteht ein weltweit dichtes Netz von Meßstationen, die mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung die Registrierung physikalischer Zustände innerhalb der Atmosphäre, der Ozeane und des Festlandeseis ermöglichen. *Daten aus der Vergangenheit* lassen sich dabei aus Tiefseesedimenten oder aus der Tiefenstruktur polarer Eisschichten gewinnen. So läßt sich beispielsweise der Tiefenlage verschiedener Schichten eine Zeitskala zuordnen, gibt die Planktonartenverteilung innerhalb der Weltmeere Aufschlüsse über historische Temperaturentwicklungen, ermöglicht das Verhältnis zweier Sauerstoffisotope in Meeresbodensedimenten Aussagen auch über das globale Eisvolumen als wichtiger Klimagröße. *Klimamodellrechnungen* suchen nach mathematischen Lösungen für einen Satz physikalischer Gleichungen. Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe, Temperatur- und Dichteverteilungen sollen modelliert werden, Einflüsse der Vorgänge in der Biosphäre werden dabei in den letzten Jahren verstärkt berücksichtigt. Auch große Modelle wie das *Hamburger Globale Atmosphärische Zirkulationsmodell* benötigen eine große Anzahl vorgegebener Daten, sogenannte Randbedingungen. Die Qualität der aus den Rechnungen erhaltenen *Ergebnisse* muß anschließend anhand anderer gesicherter Daten getestet und im Erfolgsfall auch *verifiziert* werden.

Wichtige Randbedingung für das Klimasystem der Erde ist die Stärke der *Sonneneinstrahlung* am Außenrand unserer Atmosphäre. Neben möglichen Leuchtkraftschwankungen der Sonne sind es mit der Exzentrizität der Erdbahn, der schwankenden Erdachsenneigung und der Präzessionsbewegung der Erdachse vor allem drei *Erdbahnparameter*, die eine starke Einstrahlungsänderung der Sonnenenergie und damit auch die mit dem Namen *Milankovitch* assoziierten Klimaän-

derungen mit typischerweise 100 000-jähriger Periode bewirken. Die Ergebnisse der in diesem Zusammenhang durchgeführten Modellrechnungen legen nahe, daß es vor allem die in den Sommerzeiten vor etwa 25 000 Jahren abgeschwächte Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel war, die zu einem verstärkten Aufbau des Inlandeisvolumens mit daraus resultierender verstärkter Rückstrahlung (Albedo) der Sonnenenergie, einer globalen Temperaturerniedrigung um etwa 4°C und somit zur *Ausbildung der letzten Eiszeit* führte. Auch wenn die weltweit globale Sonnenenergieeinstrahlung wegen der wenig schwankenden *Solarkonstanten* im Jahresmittel in etwa konstant bleibt, war es vor etwa 6 000 Jahren doch die erhöhte Sonneneinstrahlung vor allem in den Augustmonaten in der Nordhemisphäre, die damals zur Entwicklung eines Klimaoptimums führte. Aus den Modellrechnungen gewonnene Abschätzungen über Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilungen über Land stimmen dabei mit erhaltenen Meßdaten relativ gut überein. Die Berücksichtigung des *Einflusses von Aerosol- und Wolkenbildungsprozessen* auf das Erdklima kennzeichnet den aktuellen Stand der atmosphärischen Klimamodellierungen. Geplant sind der Einbau atmosphärischer und maritimer *Kohlendioxidkreisläufe* unter besonderer Berücksichtigung der in den Algen- und Planktonkulturen ablaufenden biochemischen Prozesse.

Treibhauseffekt- und Aerosolproblematik, Dr.Gabi Hegerl, Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg

Seit Beginn der Industrialisierung verändert der Mensch die Zusammensetzung der Atmosphäre durch den vermehrten Ausstoß klimarelevanter Spurengase. Dies sind insbesondere das Kohlendioxid, dessen hohe Konzentration als Treibhausgas zu einer möglichen globalen Erwärmung führt, sowie Sulfat-Aerosole und Rußpartikel, deren Konzentration die verstärkte Reflexion von Sonnenstrahlen und damit, zumindest regional, Abkühlungen bewirken kann. Die uns so betreffende Fragestellung ist: Ist es der Mensch, der das Klima verändert?

Um abzuschätzen, wie das Klimasystem auf diese Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzungen reagiert, wurden *Simulationen* mit aneinandergeschalteten, dreidimensionalen Ozean- und Atmosphärenmodellen durchgeführt. Bis zur Gegenwart wurden dem Modell die beobachteten Konzentrationen von Kohlendioxid sowie mit Hilfe von historischen Emissionen geschätzte Konzentrationen von Sulfat-Aerosolen vorgeschrieben, für die Zukunft bis zum Jahre 2050 die *Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen* gemäß einem Szenarium der Entwicklung der zu erwartenden anthropogenen Emissionen eingegeben. In der Modell-

simulation steigt die mittlere bodennahe Temperatur der Erde zunächst langsam an, nach 1980 beginnt eine starke Erwärmungsphase, wie sie in der Realität ja heute auch tatsächlich beobachtet wird (siehe Abbildung 2).

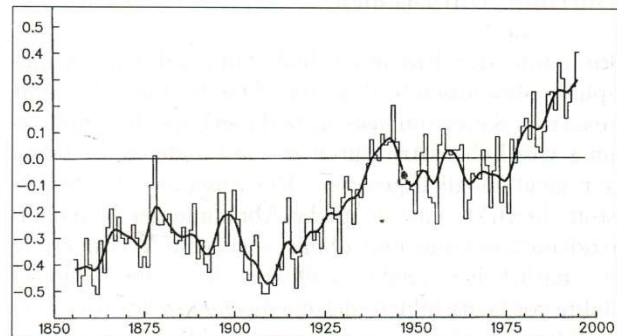


Abbildung 2: Mittlere beobachtete Abweichung der Oberflächentemperatur der Erde von einem mittleren Zustand, gebildet aus den Beobachtungen von 1961-1990. Die Abbildung zeigt, daß die Temperatur auf der Erdoberfläche kurz- und langfristigen Schwankungen unterliegt. Weiterhin zeigt sich ein deutlicher Erwärmungstrend: Das Jahr 1995 war das wärmste Jahr seit Beginn der Temperaturbeobachtungen. Analysen der räumlichen Struktur dieser Erwärmung zeigen, daß sie mit hoher Wahrscheinlichkeit vom Menschen mitverursacht wurde. Text: G.Hegerl Grafik: P.D.Jones (persönliche Kommunikation mit G.Hegerl)

Der Nachweis durch den Menschen verursachter Klimaänderungen wird durch die Überlagerung *natürlicher Klimaschwankungen* erschwert. Um zu entscheiden, ob der beobachtete Temperaturverlauf auch durch *interne*, durch Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Eis bedingte systemimmanente *Klimaschwankungen* bewirkt sein könnte, wurde das charakteristische *Muster* von an verschiedenen Orten ermittelten *Erwärmungstrends* untersucht. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, daß die beobachtete Erwärmung der letzten Jahrzehnte deutlich außerhalb eines *Musters* liegt, in der sich 95% der internen Klimaschwankungen abspielen. Eine alleinige Erklärung der derzeitigen Erwärmung durch andere externe Faktoren wie zum Beispiel durch Schwankungen der Vorgänge auf der Sonne, der Sonneneinstrahlung oder im Zusammenhang mit Vulkaneruptionen erscheint sehr unwahrscheinlich.

„Die gute Übereinstimmung der Beobachtungen mit dem Modellergebnis sowie Ergebnissen weiterer Studien, in denen zum Beispiel die vertikale Struktur der Temperaturverteilung in der Atmosphäre untersucht wird, legen die *Vermutung* nahe, daß der Mensch *tatsächlich das Klima bereits verändert hat*. Damit ist mit einem weiteren Anstieg der mittleren Temperatur um wenige Grad Celsius und mit einem Anstieg des Meeresspiegels um einige Dezimeter im globalen Mittel zu rechnen. Wie diese Veränderungen allerdings regional genau aussehen, und wie weit sich zum Beispiel

die Stärke und Zugbahn von Stürmen ändert, ist noch ziemlich unklar.“ (Gabi Hegerl, Hamburg, März 1996)

Aktuelles zur Ozonproblematik, Prof. Dr. John Burrows, Uni Bremen

Im Laufe der Erdentwicklung entstand eine Atmosphäre um unseren Planeten. Die Bildung des sehr reaktiven Sauerstoffgases wäre dabei ohne die Entwicklung von Lebensstrukturen wie auf anderen Planeten gar nicht möglich gewesen. Die Zunahme des Sauerstoffs bewirkte eine deutliche Abnahme der Kohlendioxidkonzentration und damit auch eine Verringerung des natürlichen Treibhauseffektes. Erst 400 Millionen Jahre vor heute bildete sich ein *biochemisches Gleichgewicht* auf der Erde aus und ermöglichte *höheres Leben* unter dem *Schutz einer stratosphärischen Ozonschicht*. Ozonmoleküle absorbieren die für DNA-Moleküle in biologischen Zellen so gefährliche UV-B-Strahlung. Die Bildung von Ozon beziehungsweise die hier erfolgende Absorption von UV-Strahlung führt zudem zu einer Temperaturerhöhung in höheren Atmosphärenschichten und ist somit auch für die *Ausbildung eines* sehr charakteristischen atmosphärischen *Temperaturprofils* verantwortlich, dessen Störung unter Umständen auch stärkere klimatische Veränderungen zur Folge haben könnte. In geringen Mengen bewirkt das riechende Ozongas in oxidativen Prozessen schließlich auch eine *Säuberung der Atmosphäre* von Abgasen. Die dramatische Zunahme der *Abgase* sowie der inflationäre Verbrauch von Fluorchlorkohlenwasserstoffen führte jedoch in den letzten Jahrzehnten zu einer drastischen Erhöhung sowohl der als *Sommersmog* bekannten troposphärischen, als auch zu einer als *Ozonloch* bezeichneten starken Reduzierung der stratosphärischen Ozonkonzentration („Ozon, oben zu wenig, unten zu viel“).

Seit 1980 wird eine regelmäßige Abnahme der Ozonkonzentrationen im Südfrühling, vor allem im Oktober, über der *Antarktis* gemessen. Über dem kalten Boden haben sich hier in einem stratosphärischen Hochdruckgebiet in einer zeitlich stabilen Wirbelstruktur Wolken aus Salpetersäure und Wasserdampf gebildet. Bei geeignet tiefen Temperaturen wandeln sich auf deren Oberflächen relativ stabile Chlorverbindungen in photolabile Cl_2 - und HOCl -Moleküle um. Nach der Polarnacht ohne Sonneneinstrahlung werden aus ihnen im Frühling durch die Einwirkung intensiver UV-Strahlung aktive *Chlorradikale* freigesetzt, die zu dem so gefürchteten *katalytischen*, das heißt sich in einem Kreisprozess ohne die Beseitigung der ihn auslösenden Reagenz wiederholenden Abbau der Ozonkonzentration führen. Vor allem die vom Menschen produzierten *FCKWs* sind es, die durch atmosphärische Austauschprozesse innerhalb mehrerer Jahre auch in die Stratosphäre vordringen und hier die beschriebenen

komplexen chemischen Prozesse auslösen. Andere geographische Gegebenheiten und unterschiedliche atmosphärische und maritime Strömungsstrukturen waren es dabei zunächst, die die Ausbildung von Ozonlöchern bis vor wenigen Jahren in der nördlichen *Arktis* noch verhinderten.

Das vom Institut für Umweltphysik an der Uni Bremen betreute *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME) an Bord des europäischen ESA-Satelliten ERS-2 zeichnet seit 1995 im wöchentlichen Abstand die globale Ozonverteilung in der Stratosphäre auf. Meßdaten zeigen die erwartete relativ niedrige Ozonkonzentration im Bereich des Äquators. Hier wird zwar durch starke Sonneneinstrahlung sehr viel Ozon gebildet, stratosphärische Windsysteme treiben es jedoch sehr schnell beidseitig polwärts. In mittleren geographischen Breiten findet man dann normalerweise mit über 300 Dobson die höchste Konzentration des durch Abkühlung abgesunkenen Ozons; (eine Ozonkonzentration von 1 Dobson liegt vor, wenn die gedanklich bei Temperaturen von 0°C unter Meereshöhennormaldruck zusammengepreßte Ozonschale eine Dicke von 1/100 mm hat). Das *letzjährige antarktische Ozonloch* erwies sich als sehr langlebig, auch über der *Arktis* wurden in diesem Frühling durch chemische Prozesse und besondere Strömungsdynamik ausgezeichnete Regionen durch Unterschreitung der magischen Grenze von 220 Dobson Ozonlöcher nachgewiesen. *Miniozonlöcher* über Bremen wurden im Februar/ März dieses Jahres auch vom Dach der Uni gemessen.

Weltweit und im Jahresmittel hat sich die Ozonkonzentration in den letzten Jahrzehnten um etwa 6% verringert, deutlich erhöhte UV-Strahlung auf der Erdoberfläche und eine Zunahme der Hautkrebsrate um mehr als 30% sind die Folge. *Wolken* streuen die aufgrund der Ozonlöcher verstärkte gesundheitsgefährdende UV-Strahlung effektiv und schützen uns so vor ihr. *Die FCKW-Produktion* in den Industrieländern ist in den letzten Jahren stark reduziert worden, aber erst im Jahre 2050 sind positive Auswirkungen, die Dicke der Ozonschicht betreffend, zu erwarten. Die für die nächsten Jahre prognostizierte Wirtschaftsentwicklung einiger Entwicklungsländer läßt jedoch einen erneuten Anstieg der FCKW-Produktion befürchten. Glücklicherweise treten Ozonlöcher nicht im Sommer auf, benutzte die Industrie kein Brom anstelle des Chlors in den Halogenkohlenwasserstoffen. Der hohe Wirkungsgrad dieser Radikale bei der Ozonzerstörung wäre noch verheerender gewesen, die Ozonschicht wäre unter Umständen total zerstört worden. Die verstärkte Bildung *troposphärischen Ozons* ist ein weltweit globales Umweltproblem. Modellrechnungen zeigen einen zu erwartenden deutlichen Anstieg durch *industrielle Aktivitäten und Biomassenverbrennung* zum Beispiel über Afrika.

(Fortsetzung folgt)



