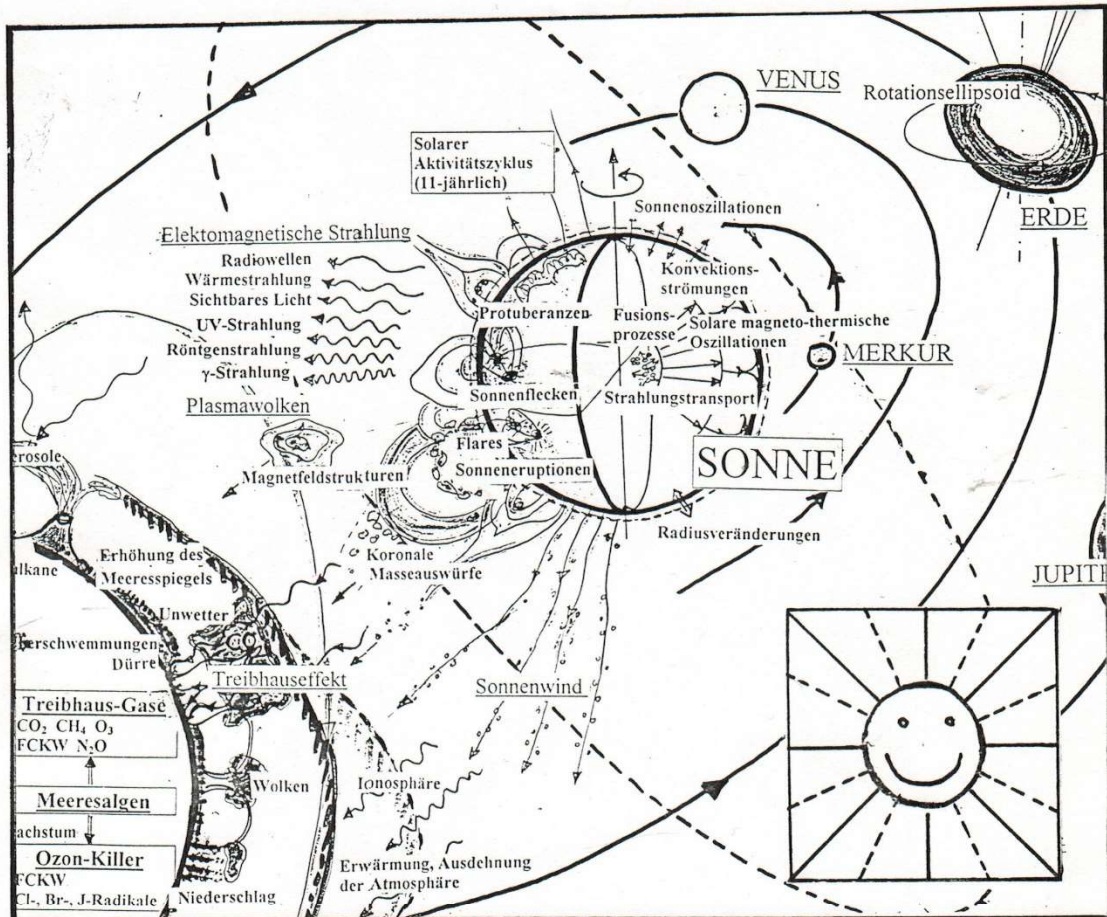


Dienstag 16.4.96 19⁰⁰ Uhr

ATELIERHOF

Alexanderstraße 9b



Holger Kruse
Ulrich v.Kusserow

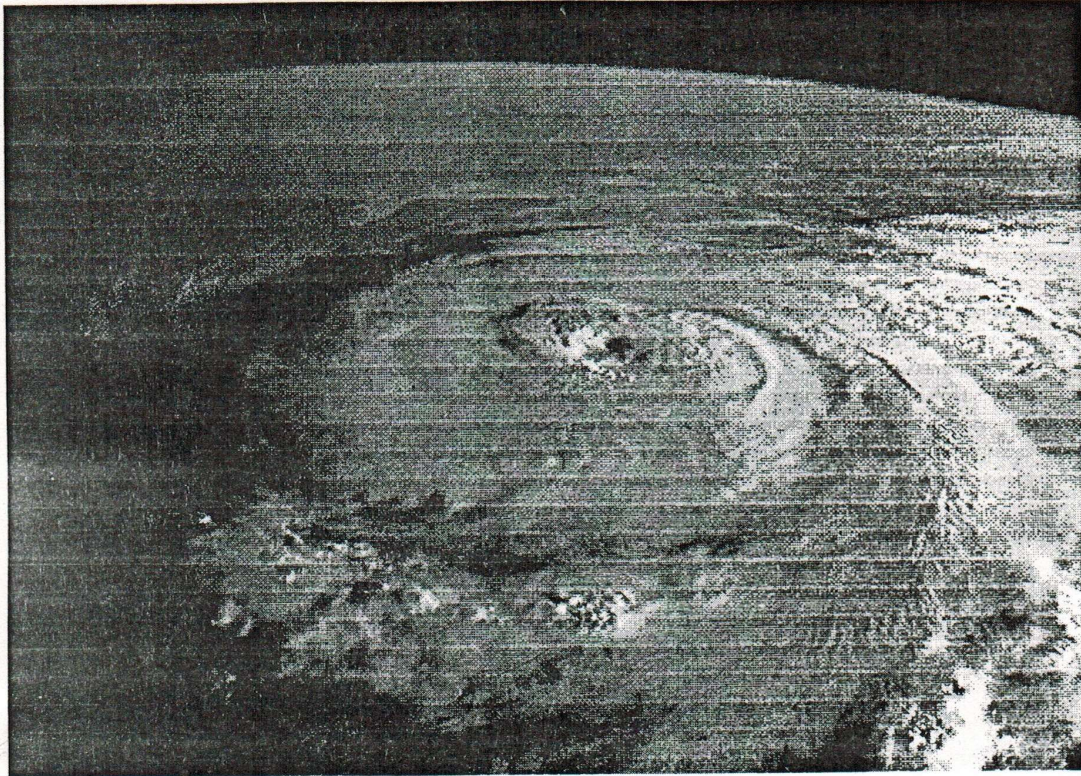


Einflußfaktoren des Klimas auf der Erde

Dia- und Videovortrag

Einflußfaktoren des Klimas auf der Erde

Ulrich v.Kusserow

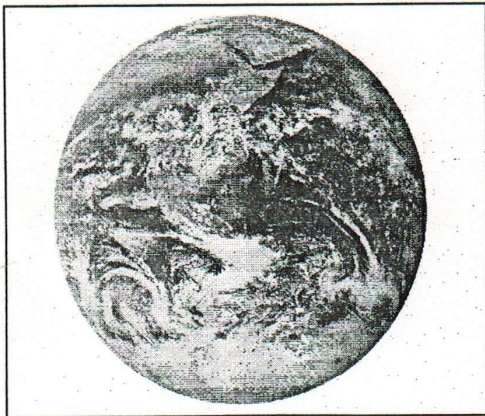


1. Probleme mit dem Klima in unserer Atmosphäre

(1) Der bekannte Astronom Fred Hoyle sagte 1948 : „Wenn wir über ein Foto von unserer Erde von außerhalb, aus dem Weltall verfügen, werden wir, was die Gefühle betrifft, eine neue Dimension erfahren“. Nach seinem Besuch im Weltall schrieb der amerikanische Astronaut Jim Buckli tief beeindruckt : „ Guck ´mal an, wie dünn die Erdatmosphäre ist. Alles jenseits dieser dünnen blauen Linie ist die Leere des Raumes. Und alles, was darunter liegt, benötigen wir, um unser Leben zu stützen. Und alles, was wir dieser Umgebung antun und die Qualität unseres Lebens ist unterhalb dieser dünnen blauen Linie. Das ist der einzige Unterschied zwischen dem, was wir hier auf der Erde genießen und der wirklich schroffen, unbewohnten Dunkelheit des Raumes. Es ist nicht sehr groß, nicht wahr?“. Offensichtlich ist uns Menschen heute noch nicht ausreichend bewußt, wie wertvoll, einmalig und verletzlich die Gasatmosphäre ist, in der die besonderen Bedingungen für Leben erfüllt sind.

(2) Jeder von uns weiß, daß wir in vielen Bereichen des Lebens auf der Erde unserer Umwelt nichts Gutes antun, daß sich die Lebensbedingungen für immer mehr Menschen zunehmend verschlechtern. Wir produzieren riesige Müllhalden auf dem Land, wir verschmutzen mit unseren Abwässern das Meer und füllen die Atmosphäre mit Abgasen. Auswirkungen unseres Handelns bekommen wir immer deutlicher zu spüren. Hauterkrankungen haben nicht nur psychische Ursachen, die Verunreinigungen der Luft schädigen auch die Pflanzen- und Tierwelt. Wir sprechen sowohl im Winter als auch im Sommer von der Ozonproblematik. Wir meinen im Winter das Ozonloch, die zunehmend regelmäßiger, länger und verstärkt auftretende Ausdünnung der atmosphärischen Schutzschicht gegen die für uns lebensgefährliche härtere solare UV-Strahlen; alle haben wir schon einmal von den intensiven Schutzmaßnahmen der Bevölke-

zung in Australien gegen die Sonnenstrahlung, von der Erblindung vieler Tiere in den Anden gehört. Wir meinen im Sommer mit den Ozonproblemen die in Smoggebieten in der Umgebung größerer Städte Jahr für Jahr häufiger auftretenden hohen Konzentrationen aggressiver Ozonmoleküle, die nicht nur Gebäuden und Pflanzen sondern auch unserer Gesundheit schaden; manch einer gewöhnt sich schon langsam an das lästige Augenbrennen vor allem auch auf dem Lande. Nicht nur wegen einer fortschreitenden Technisierung der Medien und größerer Mobilität durch die zunehmend einfacher werdende Möglichkeit des Reisens auch in entfernt gelegene Gebiete der Welt erfahren wir rechtzeitig und unter Umständen sehr direkt von der zunehmenden Fülle großer Naturkatastrophen. Wir müssen nicht erst nach Bangladesch, Indonesien, Südamerika oder Afrika fahren, um dort mit dem 'El Niño' die ersten heftigen Auswirkungen eines weltweit verstärkten Treibhauseffektes mit Dürrekatastrophen einerseits, heftigen Unwettern und Überschwemmungen andererseits zu erleben. Auch bei uns häufen sich die Überschwemmungen, schnell wechselnden extremen Wetterlagen und orkanartigen Stürme. Wir wissen, daß bei weiterem Abschmelzen des Polareises und der Gletscher, bei weiterem Anstieg der Meerestemperaturen der Meeresspiegel weltweit stark steigen wird. Noch glauben wir an eine „Rettung“ durch die Erhöhung der Deiche, auch wenn dies am Schicksal der Bewohner mancher Inselstaaten nichts ändern wird.



(3) Das Klimaproblem ist nach Ansicht führender Umweltexperten nur eines der großen Umweltprobleme, nicht erst des kommenden Jahrhunderts, nicht erst für unsere Kinder. Die starke Zunahme der Weltbevölkerung bei gleichzeitiger deutlicher Abnahme der Ackerbauflächen, die wachsende Verbreitung des konsumorientierten westlichen Lebensstils mit der Aufzehrung natürlicher Material- und Energiereservoirs, der ungebremsste Ausbau der Technologien und des Verkehrs, die zunehmende Verschmutzung von Luft, Wasser und Boden, die damit verbundenen Abfallprobleme, die starke Reduzierung der Artenvielfalt in der Tier-

und Pflanzenwelt, der Abbau naturbelassener Landschaften, zunehmende Gesundheitsprobleme sowie sich verschärfende lokale, aber auch weltweite soziale Probleme mit großer Arbeitslosigkeit, Armut, Hunger und Krieg bedrohen die Lebensentwicklung auf unserem Planeten. Viele dieser Problemkreise sind fast unkenntlich miteinander verwoben, sie bedingen sich gegenseitig. Ursache und Wirkung sind oft schwer voneinander zu trennen. Nicht selten sind es die reicheren Industrienationen, auch die Deutschen, auch wir, die die Probleme weiter verschärfen. Ein kleiner Teil der Weltbevölkerung besitzt fast alles, produziert sehr viel, auch den Abfall, die Umweltverschmutzung und die Treibhausgase. Nur sehr oberflächlich gesehen, sind es die Entwicklungsländer, die mit dem Problem der Überbevölkerung die Gefährdung eines menschenwürdigen Lebens auf der Erde wesentlich verursachen.

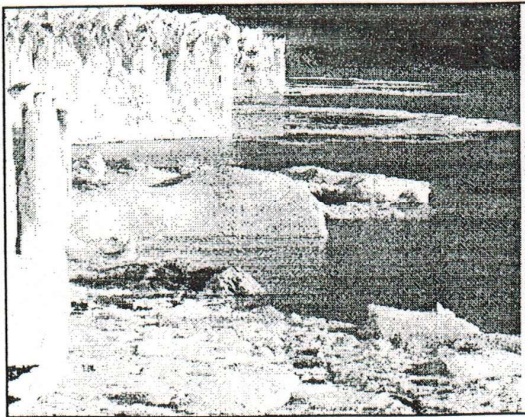
(4) Die Kenntnis des Menschen über Vorgänge in der Natur hat sich durch gewaltige Fortschritte in der Wissenschaft sehr vergrößert. Wir erkennen heute globalere Zusammenhänge des Lebens auf der Erde. Die zunehmende Fülle der Daten durch den Einsatz neuer Methoden und leistungsfähigerer Meßapparaturen, die Entwicklung komplexerer Modelle und der Einsatz immer größerer und schnellerer Computer hat auch große Fortschritte in der Wetter- und Klimaforschung gebracht. Wir erfahren heute, daß das Klima auch ohne den Einfluß des Menschen in der langen Erdgeschichte immer wieder „verrückt“ gespielt hat. In den letzten Jahren schwinden jedoch zunehmend die Zweifel daran, daß jetzt auch der Mensch massiven Einfluß auf die Entwicklung des Erdklimas nimmt. Noch gibt es Wissenschaftler, die diesen Einfluß nicht als bewiesen ansehen. Zu befürchten ist aber in diesem Zusammenhang, daß ein im streng naturwissenschaftlichen Sinne gültiger Beweis wohl erst dann erbracht werden kann, wenn es möglicherweise für eine Gegenreaktion schon zu spät ist, schnelle dramatische Klimaverände-

rungen die Lebensbedingungen auf der Erde einschneidend geändert haben. Alle Wissenschaftler betonen die Wichtigkeit der Erforschung der natürlichen Klimaeinflüsse, um die vom Menschen verursachten anthropogenen Einflüsse danach überhaupt abschätzen zu können. Dem ist unbedingt zuzustimmen, gleichzeitig könnte aber auch unser (Umwelt-)Bewußtsein darüber, daß wir der Natur mit vielen unserer Aktionen nicht sehr Gutes tun, dabei behilflich sein, unser Verhalten jetzt schon so zu verändern, daß wir nicht auf noch bessere Daten, Modelle und Computer und einen hundertprozentigen Beweis für die Einwirkung des Menschen auf unser Klima warten müssen.

2. Zur Klimageschichte der Erde

(1) Wer war nicht damit zufrieden, daß wir 1995 bei uns einen so herrlichen Sommer, gerade einen so langen, intensiven, schönen Winter gehabt haben? Hat sich da nicht die Behauptung, daß für die Menschen unangenehme Klimaveränderungen auf Grund eines zunehmenden Treibhauseffektes bevorständen, ad absurdum geführt? Tatsächlich war das aktuelle *Wetter* bei uns im letzten Jahr oft sehr angenehm, ähnlich wie „früher, als noch alles in Ordnung war“. Während man unter dem Begriff „Wetter“ aber die kurzzeitigen, eher lokalen, durch am Ort vorherrschende Temperaturen und Luftdruckverhältnisse, durch Luftfeuchtigkeit, Bewölkung und charakteristische Formen der Niederschläge sowie spezielle Windgeschwindigkeiten bestimmten 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. Die anhaltende Erhöhung der mittleren Temperaturen auf der Erdoberfläche und in den Ozeanen, die Zunahme der Stürme, Überflutungen und extremen Wetterlagen mit einer Vergrößerung der Dürregebiete in verschiedenen Teilen der Welt spricht deutlich für globale Klimaänderungen, auch wenn das Wetter bei uns öfter recht schön ist.

(2) In dem komplexen, nichtlinearen, manchmal im mathematischen Sinne chaotischen Klimasystem der Erde gibt es immer wieder *systemimmanente*, also nicht vom Menschen verursachte oder durch natürliche Prozesse plausibel begründbare, mehr oder weniger periodische, in ganz unterschiedlich lang andauernden Zeitintervallen ablaufende *Veränderungen* des räumlich mehr oder weniger *globalen Klimas*. So hätte die große Kälte dieses Winters bei uns durchaus vorausgesagt werden können. Seit 1945 treten nämlich ausgeprägt frostige Winter sehr regelmäßig zyklisch etwa alle acht Jahre auf. Das sibirische Hoch mit seinen kalten Luftmassen kann sich in diesen Zeiten gegen isländische Tiefs mit ihren eher milden Westwinden durchsetzen. Eine sogenannte „lange Atmosphärenwelle“, die mit einer Kältezone in Längsrichtung um die Erde wandert, bleibt seit mehreren Jahrzehnten aus ungeklärten Gründen regelmäßig über mehrere Jahre stehen, führt so zu der großen Anzahl dazwischenliegender warmer Winter.



(3) Überblickt man die gesamte Klimageschichte der Erde einige Milliarden Jahre zurück bis zu ihrer Entstehung vor etwa 4.5 Milliarden Jahren, so fällt auf, daß die Erdoberfläche recht selten, nur in 20% der Zeit, so wie heute in den Polargebieten, über längere Zeiträume mit großen Eiskappen bedeckt war. Wir leben heute in diesem Sinne in einem sogenannten *Eiszeitalter*. In den ersten beiden Milliarden Jahren nach ihrer Entstehung war es auf der Erde zu heiß, die Erdoberfläche war überall eisfrei. Vor etwa 2.3 Milliarden Jahren begann das erste Eiszeitalter. Insgesamt gab es wohl nur vier längere Zeit-

räume, in denen zumindest eines der Polargebiete regelmäßig mit Eis bedeckt war. Die heute anzutreffende arktische Vereisung begann vor etwa 2.3 Millionen Jahren, die antarktische besteht schon seit etwa 12 bis 14 Millionen Jahren..

(4) Innerhalb des jetzigen Eiszeitalters wechseln sich die als Eiszeiten bezeichneten kälteren Phasen relativ regelmäßig mit den von der Lufttemperatur etwa 10°C wärmeren, auch als Zwischeneiszeiten bezeichneten Warmzeiten ab, in denen das Gesamteisvolumen etwa auf ein Drittel absinkt. Zwischen zwei Eiszeiten liegt dabei ein Zeitraum von etwa 100 000 Jahren. Seit etwa 10 000 Jahren leben wir heute in einer Warmzeit, in der das Klima im Vergleich zu vergangenen Zeiten ungewöhnlich stabil ist. Dennoch führten schon kleine Temperaturänderungen im Bereich von etwa 1°C wie zum Beispiel im Verlauf der mittelalterlichen sogenannten „kleinen Eiszeit“ zu für den Menschen drastischen Klimaänderungen. Temperaturerhöhungen hatten dabei eine deutliche Erhöhung des Meeresspiegels durch das Abschmelzen der Eisplatten und Gletscher, vor allem aber auch durch die wärmebedingte Ausdehnung des Meerwassers zur Folge. In etwa 50 -70 000 Jahren ist mit großer Sicherheit der Beginn einer neuen Eiszeit zu erwarten, schon sehr viel früher kann mit deutlichen zwischenzeitlichen anhaltenden Abkühlungen gerechnet werden. Während sich dabei die Eisfläche über die Arktis und Grönland hinaus bis ins mittlere Europa ausdehnen kann, kann sich aus geographischen Gründen die Eisfläche um den Südpol herum nur verdicken, sich aber nicht wesentlich weiter ausdehnen. Das Eis bricht hier nämlich über den Festlandrand der Antarktis ab und treibt durchs Meer in wärmere Gebiete.



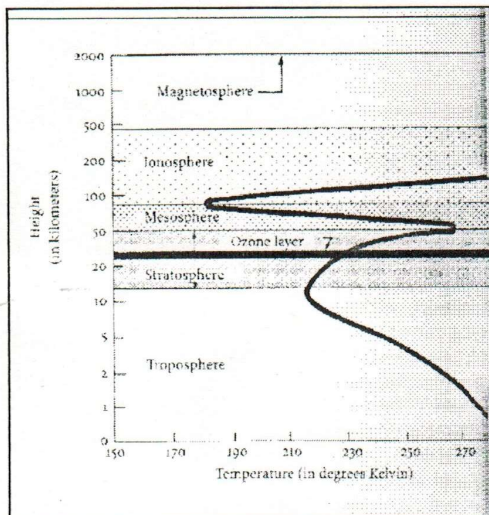
(5) In der Erdklimageschichte vor der heutigen Warmzeit hat es immer wieder sehr abrupte Klimawechsel gegeben. Dabei kam es unter Umständen zu plötzlichen Kälteeinbrüchen mit Temperaturänderungen von bis zu 10°C innerhalb nur eines Jahrzehnts und intensiven Wärmeperioden, die jeweils mindestens 1000 Jahre andauerten. Neue Erkenntnisse über globale Zirkulationsströmungen von Wärme und Salzgehalt in den Ozeanen geben eine mögliche Erklärung für den Auslösemechanismus dieser abrupten Vorgänge. In allen Weltmeeren existieren riesige, als maritime Förderbänder bezeichnete Zirkulationszellen, die sehr weiträumig die Wärmeverteilung in den Meeren durchführen. Wenn diese Strömungsstrukturen gestört oder sogar „abgestellt“ werden, kann das tatsächliche sehr schnelle, einschneidende Klimaveränderungen zur Folge haben.

Beispielsweise fließt im Atlantik warmes Oberflächenwasser über den Äquator nordwärts bis in die Nähe Grönlands. Diese als Golfstrom bezeichnete Meeresströmung ermöglicht in Nord- und Westeuropa ein, dem geographischen Breitengrad eigentlich nicht entsprechendes, sehr mildes Klima. Daß der Golfstrom so effektiv Wärme transportiert, liegt daran, daß ihm zwischen Nord-/Südamerika und Europa/Afrika atmosphärische Luftströmungen Feuchtigkeit entziehen, der Salzgehalt und die Dichte des Meeres dabei zunimmt und in hohen Breite bei weiterer Temperaturabnahme das Absinken des Meerwassers so möglich macht. Ist die Feuchtigkeitsabfuhr durch atmosphärische Luftströmungen gestört oder wird in hohen geographischen Breiten zu viel Süßwasser etwa durch Abschmelzen der Eiskappen zugeführt, so kann ein effektives Absinken des kalten Meerwassers behindert, das maritime Förderband gestoppt werden. Es würde sich dann eher ein flacheres, stärker äquatororientiertes Förderband ausbilden. Bei zunehmender globaler Temperaturerhöhung durch einen verstärkten Treibhauseffekt könnten so die Umlenkung atmosphärischer Luftströmungen oder das Abschmelzen der Pol-

kappen zu einer Unterbrechung des Golfstroms und damit zu einer deutlichen Klimaveränderung mit paradoxerweise starker Abnahme der Temperatur in Europa führen.

3. Aufbau und Struktur der Erdatmosphäre

(1) Das *Wettergeschehen* und das Klima werden durch Prozesse gesteuert, die in der Erdatmosphäre ablaufen. Die dünne Gas- und Staubhülle der Erde reicht ohne zeitlich und räumlich feste äußere Grenze bis in etwa 1000 km Höhe. Schon in einer Höhe von 700 km ist dabei der Luftdruck bereits auf Werte des in der Technik heute realisierbaren Hochvakuums abgesunken. Nur das unterste Stockwerk in der Atmosphärenschicht ist vom interplanetaren Raum als dünner bläulicher Saum zu sehen, weil hier die Konzentration von Wassertropfen und anderen Teilchen groß genug ist, um das Sonnenlicht merklich zu streuen. In dieser als *Troposphäre* bezeichneten Schicht spielt sich im wesentlichen das Wetter ab. Licht aus dem sichtbaren Spektralbereich kontrolliert überwiegend die hier ablaufenden Prozesse. Die Troposphäre reicht nahe der Polgebieten bis in etwa 8 km Höhe, in Äquatornähe geht sie in etwa 16 km Höhe, von der sogenannten Tropopause begrenzt, in die höheren Atmosphärenschichten über.



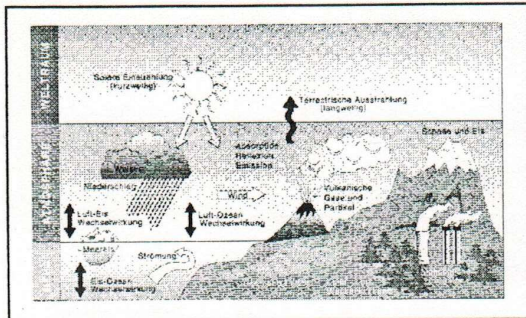
(2) Während die Temperatur in der Troposphäre nach außen hin bei Reduzierung der Teilchendichte auf etwa 10% des Wertes nahe dem Erdboden kontinuierlich bis auf etwa -55°C abnimmt, steigt sie in der darüberliegenden *Stratosphäre* langsam wieder bis auf etwa -5°C an, weil in der hier anzutreffenden *Ozonschicht* solare UV-Strahlung absorbiert wird. In der sich ab etwa 50 km anschließenden *Mesosphäre* fällt die Temperatur mit zunehmender Höhe wieder stark ab und erreicht in der Mesopause in 85 km Höhe mit etwa -90°C die tiefste Temperatur der gesamten Erdatmosphäre. Während diese Atmosphärenschicht wenig Sonnenenergie absorbiert, erfolgt in der sich nach oben anschließenden *Thermosphäre* bei extrem niedriger Dichte durch Absorption harter UV-Strahlung

unter Ausbildung von Ozonmolekülen eine starke Aufheizung und Temperaturanstieg auf Werte sogar deutlich über denen der Erdoberfläche. Wegen der in dieser Atmosphärenschicht erfolgenden Ionisation von Molekülen wird diese Zone auch als *Ionosphäre* bezeichnet. Molekularer Sauerstoff und Stickoxide absorbieren hier extrem harte UV- und Röntgenstrahlung der Sonne. Die in ihrer Intensität stark schwankende solare Teilchenstrahlung löst in dieser äußeren Atmosphärenschicht eine große Anzahl hochenergetischer Prozesse aus, die zu täglichen Variationen der physikalischen Parameter, insbesondere unterschiedlichen Ausdehnung der Thermosphäre führen. Knapp unterhalb 500 km beginnt die Ausdünnung der Erdatmosphäre zur *Exosphäre* mit extrem geringer Teilchendichte und hoher kinetischer Temperatur der Teilchen. In der hier anzutreffenden *Magnetosphäre* werden schließlich geladene Teilchen vom Erdmagnetfeld eingefangen und bewegen sich in den drei sogenannten *Van-Allen-Gürteln*, eingefangen in sogenannten magnetischen Flaschen, entlang der magnetischen Feldlinien zwischen dem magnetischen Nord- und Südpol hin- und her, bevor sie mit genügend hoher Energie in Polnähe oder in sogenannten Rekonnexionsprozessen durch Auflösung und anschließende Neuorientierung magnetischer Feldstrukturen auch näher zum Äquator hin in tiefere Atmosphärenschichten eindringen können und hier die Polarlichter auslösen.

(3) Die Erdatmosphäre ist ein *Gemisch aus Gasen, Wassertropfen, Eisparkeln und festen Beimengungen* (Aerosolen) wie Staub, Ruß, Salzpartikeln und Pflanzenpollen. Die gasförmige Luftzusammensetzung wird heute durch Stickstoff (78%), Sauerstoff (21%), Argon (0.9%) und Kohlendioxid (0.03%) dominiert. Sehr selten vorkommende sogenannte *Spurengase* sind

es jedoch, die die Luft in dem Sinne „verunreinigen“, daß sie erheblichen Einfluß auf das Klimageschehen nehmen. Zu diesen Gasen gehören vor allem auch die Treibhausgase, die das Ausmaß des Treibhauseffektes bestimmen, die Ozonkiller, die die Ozonschutzschicht angreifen sowie die Gase, die den toxischen sauren Regen verursachen. Eine besondere Rolle kommt dem Treibhausgas Wasserdampf zu, wenn es zu Wassertropfen kondensiert, dabei die Luftfeuchtigkeit, Wolkenbildung sowie Niederschläge bestimmt oder durch Gefrieren zu Eispartikeln zu einem Kristallisationspunkt für das Einsetzen komplexer chemischer Reaktionen wird.

4. Verschiedene Faktorengruppen des Erdklimas



(1) Klimaereignisse spielen sich am Boden der Erdatmosphäre ab. Im Laufe der Erdgeschichte hat sich eine Zusammensetzung der dünnen atmosphärischen Gas- und Staubschicht ausgebildet, die das Leben für Pflanzen, Tiere und den Menschen in der Biosphäre hier möglich machen. Die Atmosphäre übernimmt zum Einen für uns eine Schutzfunktion gegenüber der aus dem interplanetaren Raum und dem übrigen Weltall eindringenden elektromagnetischen

beziehungsweise Teilchenstrahlung. Interstellarer Staub, Meteorite oder sogar Kometen können die Klimabedingungen in der Erdatmosphäre unter Umständen gewaltig beeinflussen. Sie funktioniert zum Andern aber auch als Moderator, um die von der Sonne eingestrahlte Energie durch komplexe Prozesse in den höheren Atmosphärenschichten aufbereitet der in der Troposphäre ablaufenden „Klimamaschine“ zuzuführen.

(2) Zentrale Energiequelle für die Klimaprozesse ist die Sonne, die uns mit elektromagnetischer sowie mit Teilchenstrahlung von außen her versorgt. Ihre Leuchtkraft und hochenergetische Prozesse in ihrer Atmosphäre ermöglichen, bedrohen aber unter Umständen auch das Leben auf der Erde. Die Sonne bestimmt von daher auch die fundamentalste Gruppe von Faktoren, die das Klima in der Erdatmosphäre ausmachen.

(3) Die Erde bewegt sich auf einer schwach exzentrischen elliptischen Bahn um die Sonne in einem ihrer Ellipsenbrennpunkte. Das durch den gravitativen Einfluß vor allem der nahen größeren Planeten wie des Jupiters oder aber unseres Mondes bedingte zeitliche Verhalten der Erdbahnparameter stellt eine weitere wichtige Gruppe von Klimafaktoren dar, die sowohl für Stabilität als auch für langzeitige, große klimatische Schwankungen verantwortlich sind.

(4) Die Erdatmosphäre wird nach unten hin vom Festland, von Eisplatten und zu 2/3 von Meeresflächen bedeckt. Eine Gruppe wichtiger Klimafaktoren geht von Veränderungen in den oberen Schichten der äußeren Erdschale aus. So wird der Verlauf der Meeresströmungen und damit auch die Verteilung von großen Wärmemengen sehr stark durch die Topographie der Tiefenstrukturen der Kontinente bestimmt. Die mit großen Zeitskalen von Millionen Jahren ablaufenden Kontinentalverschiebungen können dabei langfristig gewaltige Klimaveränderungen bewirken. Die Südhalbkugel ist heute anders als die Nordhalbkugel überwiegend von Meer bedeckt. Dies war in der Erdgeschichte nicht immer so und hat große Bedeutung für das Klimageschehen heute. Erdbeben können die Erdoberflächenstruktur in kurzen Zeiträumen, zumindest lokal begrenzt, umformen. Vulkanausbrüche haben kurzzeitig unter Umständen einen starken Einfluß auf das Erdklima. Durch den Ausstoß gewaltiger Sulfataerosole können sie die globale Atmosphärentemperatur für wenige Jahre sogar recht stark erniedrigen. Die Verteilung und Größe von Wüstenflächen nimmt durch die Aufwirbelung mineralischer Aerosole und Staub ebenfalls deutlichen Einfluß auf die Temperaturverteilung in der Erdatmosphäre. Die Größe und Art von Eis- und Felsflächen bestimmt die Stärke der Reflexion des Sonnenlichts, das sogenannte Albedo der Oberflächenstrukturen.

(5) Anthropogene, vom Menschen beeinflusste Klimafaktoren stehen oft im Zusammenhang mit der Treibhauseffektproblematik und der Gefahr einer möglichen Erhöhung der globalen Meeres- und Atmosphärentemperaturen durch unkontrollierte Produktion weiterer Treibhausgase. Toxische Aerosole und möglicherweise auch vermehrte Wolkenbildung könnten das wahre Ausmaß einer bevorstehenden Klimakatastrophe dabei vorübergehend verdecken oder auch verstärken.

(6) Nur oberflächlich gesehen steht die Ozonlochproblematik in keinem engen Zusammenhang mit der Klimaproblematik. Die Produktion von immer mehr Spurengase, die als Ozonkiller die stratosphärische Schutzschicht gegen die solare UV-Strahlung vorübergehend ausdünnen, führt aber in einem möglicherweise positiven, das heißt sich verstärkenden Rückkopplungsprozeß mit dem Treibhauseffekt auch zu globalen Temperaturerhöhungen und dies wiederum zu weiter vergrößerten Ozonlöchern. Den Meeresalgen kommt in diesen komplexen Prozessabläufen eine große Bedeutung zu.

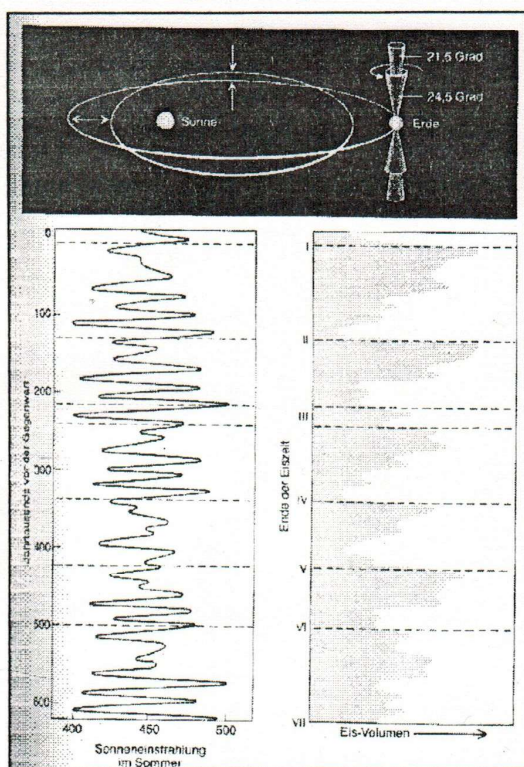
5. Klimaeinfluß der Erdbahnparameter

(1) Die Erde umläuft die Sonne auf einer schwach exzentrischen Ellipsenbahn einmal in etwa 365 Tagen. Innerhalb von ungefähr 24 Stunden dreht sie sich dabei um sich selbst. Wir erleben dabei abhängig vom Beobachtungsort auf der Erde Tag und Nacht, je nachdem, ob wir uns auf der der Sonne zugewandten beziehungsweise von ihr abgewandten Seite befinden. Die Rotationsachse der Erde steht nicht senkrecht auf ihrer Bahnebene, der sogenannten Ekliptik. Sie ist zur Zeit um etwa 23.5° geneigt. Diese sogenannte Schiefe der Ekliptik führt zur Entstehung unterschiedlicher Jahreszeiten durch unterschiedliche Einstrahlungsverhältnisse auf der Nordbeziehungsweise Südhalbkugel. In der Nähe des Äquators treffen die Sonnenstrahlen nahezu senkrecht auf die Erdoberfläche. Die Strahlung läuft hier auf relativ kurzem Weg durch die Atmosphäre, wird folglich nicht so stark absorbiert, bevor sie auf den Erdboden trifft. Die Strahlungsleistung pro m^2 Erdoberfläche ist bei diesem nahezu senkrechten Einfall besonders hoch. Wenn die Nordhalbkugel im Nordsommer stark zur Sonne geneigt ist, treffen hier die Sonnenstrahlen relativ steil auf die Erdoberfläche. Zur gleichen Zeit ist auf der Südhalbkugel Winter, weil hier die Sonnenstrahlen wegen des flachen Einfalls eine nur geringe Strahlungsleistung pro m^2 haben. In höheren geographischen Breiten durchlaufen die Sonnenstrahlen wegen ihres schrägen Einfalls zudem eine sehr viel längere Strecke in der Atmosphäre. Jeweils im Winter trifft man nahe der Polgebieten eine durchgängige Polarnacht an, jeweils im entsprechenden Sommer ist bei allerdings sehr niedrigem Sonnenstand ständig Tag. Die Entfernung der Erde von der Sonne schwankt bei geringer Exzentrizität ihrer Bahnellipse im Laufe eines Jahres um etwa 3.3%. Das entspricht etwa einem Unterschied zwischen sonnenfernsten und sonnennächsten Punkt von etwa 5 Millionen Kilometern. Im Nordsommer ist die Sonne heute am weitesten von der Erde entfernt, im Südsommer liegt sie uns am nächsten. Die Intensität der Sonnenstrahlung am äußersten Rand der Erdatmosphäre schwankt so um etwa 7%.

(2) Die Erde ist auf Grund der durch ihre Eigenrotation auf sie ausgeübten Zentrifugalkraft etwas abgeplattet. Der Durchmesser ist am Äquator um etwa 500 m größer als von Pol zu Pol. Der schräg stehende Rotationsellipsoid Erde ist ein den vor allem von der Sonne und dem Mond, in geringerem Umpfang auch von den andern Planeten, insbesondere dem Jupiter ausgeübten Gravitationskräften unterworfenen Kreisel. Für kurze Zeiträume von einigen Jahrzehnten scheint zwar die Ausrichtung der Erdachse in Bezug auf die Sternkonstellationen relativ konstant zu bleiben. Den so von außen an den schrägen Rotationsellipsoid angreifenden Drehmomente, die die Erdachse aufrichten wollen, weicht die Erde aber aus und beschreibt mit einer Umlaufzeit von etwa 25 700 Jahren mit ihrer Achse einen Kegel mit einem halben Öffnungswinkel von zur Zeit 23.5° um die senkrecht zur Erdbahnebene stehende Achse der Ekliptik. Neben dieser lunisolaren Präzessionsbewegung bewirken aber auch die störenden Kräfte anderer Planeten sowohl eine langzeitige Drehung der gesamten Erdbahnellipse relativ zu den

Sternen als auch eine *Veränderung der Exzentrizität* der Erdbahn. Typische Periodenlängen dieser Fluktuationen in den Bahnparametern liegen bei etwa 100 000 Jahren.

(3) Die Überlagerung der gravitativen Einflüsse durch die langsame Drehung der Erdbahnebene einerseits und der lunisolaren Präzession andererseits bewirken zusätzlich *Schwankungen der Schiefe der Ekliptik*, das heißt der Erdachsenlage, um $\pm 1.5^\circ$ zwischen etwa 21.5° und 24.5° . Die Periodendauer dieser sogenannten Nutationsbewegung liegt bei etwa 41 000 Jahren. Ohne die *stabilisierende Wirkung* unseres Trabanten, *des Mondes*, würde die Lage der Rotationsachse der Erde wesentlich instabiler sein und im Verlauf größerer Zeitintervalle größere chaotische Schwankungen durchlaufen. Die daraus resultierenden klimatischen Veränderungen würden die Entwicklung des Lebens auf der Erde ohne die Existenz des Mondes erheblich stören, vielleicht sogar unmöglich machen.



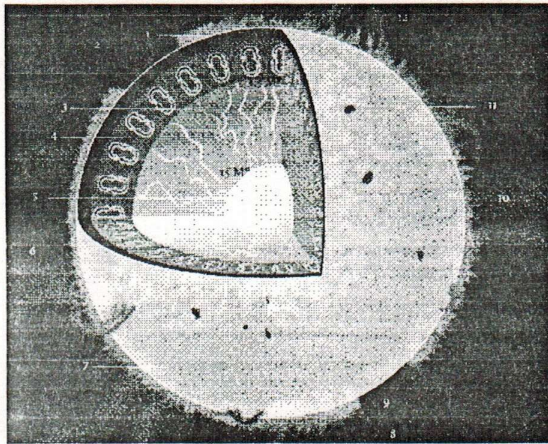
(4) In den letzten Millionen Jahren wurden langzeitige Klimaschwankungen durch die recht periodisch auftretenden Eiszeiten mit großem Eisvolumen vor allem auf der Nordhalbkugel bestimmt. Eiskappen in der Umgebung der Polargebiete, vor allem auf der nördlichen Halbkugel, haben sich viele Male zyklisch immer wieder ausgedehnt und anschließend verkleinert. Etwa alle 100 000 Jahre war die Eisfläche besonders groß, etwa 10 000 Jahre dauerten die ungewöhnlich warmen Zwischeneiszeiten. Schwankungen des Eisvolumens zeigten dabei neben der dominierenden 100 000 Jahr-Periode weitere typische Modulationen mit Perioden von etwa 20 000, 25 000 oder 40 000 Jahren. Die offensichtliche Übereinstimmung dieser typischen Perioden der *Eisvolumenschwankungen* mit den Perioden der *Erdbahnparameter-schwankungen* fiel Astronomen und Mathematikern schon vor mehr als hundert Jahren auf. Es ist zudem ja auch sehr anschaulich plausibel, daß periodische Entfernungs- und Lageschwankungen der Erde in Bezug auf die Sonne auch periodische Einstrahlungsschwankungen und

damit auch Klima-, insbesondere auch regelmäßige Eisvolumenschwankungen auf der Erdoberfläche zur Folge haben müßten. Der Astronom Milutin Milankovitch war es schließlich, der in der nach ihm benannten *Theorie der Milankovitch Zyklen*, wonach Eiszeiten durch Veränderungen der Sonneneinstrahlung in höheren Breiten durch säkulare Schwankungen der Erdbahn und unterschiedliche Orientierung der Erdachse im Raum bedingt sind, mathematisch-analytisch durchrechnete. Der Einsatz von Großrechnern ermöglicht heute eine genauere numerische Analyse und führt zu einer recht guten Bestätigung dieser Vorstellungen von den Ursachen der beobachteten langzeitigen Klimaschwankungen.

(5) Die stärksten schwankenden Klimasignale treten mit einer Periode von 100 000 Jahren auf. Diese Periode ist mit periodischen Schwankungen der Bahnexzentrizität assoziiert. Tatsächlich erwartet man aber gerade bei dieser Schwankung die am wenigsten dramatischen Klimaänderungen, zumal bei Änderung der Exzentrizität die Einstrahlungsbilanz im Jahresmittel relativ neutral bleiben sollte. Dennoch könnten aber nach der Theorie nichtlinearer Systeme kleine Störungen durchaus große Wirkungen zur Folge haben. 1995 fanden Wissenschaftler eine andere mögliche Erklärung für die Periodizität der Eisbedeckungsschwankungen. Zeitliche Schwankungen der Häufigkeit des ^3He -Isotopenvorkommens in ozeanischen Sedimenten zeigten nämlich überraschenderweise ebenfalls eine auffallende Periode von etwa 100 000 Jahren.

Da dieses spezielle Heliumisotop hauptsächlich durch in die Erdatmosphäre eindringenden *interplanetaren Staub* ins Meer gelangt, könnte auch ein periodischer Durchgang der Erde durch spezielle interplanetare Staubwolken an einem speziellen Ort im Sonnensystem immer wieder zu einer klimatischen Abkühlung und zur Ausbildung großer polarer Eisplatten führen. Hier fehlen aber noch Modellrechnungen, die eine Abschätzung des Einflusses der Absorptionswirkung durch Staub auf das Klima geben können. Weiteren Aufschluß über die Ursachen der Eiszeitzyklen kann auch die weitere Untersuchung der in der Sonne ablaufenden periodischen Vorgänge geben.

6. Variationen der Sonnenleuchtkraft und Sonnenaktivität



(1) Die Sonne ist Energiequelle für die in der Erdatmosphäre arbeitende Klimamaschine. Sie versorgt uns zum einen mit dem gesamten *Spektrum der elektromagnetischer Strahlung*. Unterschiedlich stark ausgeprägt, empfangen wir von ihr Radiowellen, vor allem Wärmestrahlung und sichtbares Licht, UV-, Röntgen- sowie γ -Strahlung, die Einfluß auf unser Klima nehmen. In der Sonnenatmosphäre mehr oder weniger periodisch und heftig ablaufende magnetohydrodynamische Prozesse produzieren zudem einen ständigen Teilchenstrom, den sogenannten *Sonnenwind*. Zusammen mit den vorwiegend in Zeiten hoher Sonnenaktivität aus der Sonnenkorona gestoßenen gewaltigen *Plasmawolken* mit eingelagerten Magnetfeldstrukturen trifft so immer wieder zusätzlich eine große Menge sehr energiereicher geladener Materie auf die äußeren Erdatmosphärenschichten, nimmt dabei ebenfalls Einfluß auf das Klima. Die Untersuchung der zeitlichen und den Wellenlängenbereich betreffenden Variationen der Sonnenleuchtkraft, des Einflusses der stark variierenden *Teilchenstrahlung* auf den physikalischen Zustand unserer Atmosphäre sind so von großer Bedeutung für die Analyse der Wichtigkeit der unterschiedlichen natürlichen Klimafaktoren.

(2) Die Sonne und ihre Planeten wie auch die Erde sind etwa 4.5 Milliarden Jahre alt. Über einen so langen Zeitraum versorgt uns unser Stern ständig mit der in seinem Zentrum bei der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium freiwerdenden Fusionsenergie. Wärmestrahlung weiter im Innern und Wärmekonvektionströmungen im äußeren Drittel der Sonne transportieren die Energie nach außen. Komplexe Magnetfeldstrukturen werden dabei in der Sonne erzeugt, die den Wärmetransport stark beeinflussen. Die *Leuchtkraft der Sonne*, die gesamte pro Zeiteinheit von der Oberfläche nach außen abgestrahlte Energie, hat sich im Laufe der langen Entwicklung deutlich verändert. Sie lag zur Zeit der Stern- und Planetenentstehung um etwa 30% niedriger als heute. Eigentlich hätte so auch die Temperatur auf der Erdoberfläche damals sehr viel niedriger sein müssen. Wie hätte sich dann aber hier unser Leben so entwickeln können? Die errechneten starken Temperaturänderungen hätten es eigentlich nicht zulassen können. Dieses als „*faint young sun problem*“ bezeichnete Erklärungsdilemma findet seine Auflösung darin, daß die bei der Ausbildung der damaligen Atmosphäre entstandenen Treibhausgase wie zum Beispiel das Kohlendioxid damals höher konzentriert vorlagen und so die Abstrahlung der vom Erdboden reflektierten Wärmestrahlung hinaus in das Weltall stärker unterbanden als heute, daß zwar die Einstrahlungsenergie der Sonne damals wirklich deutlich niedriger lag, daß aber ein stärkerer *Treibhauseffekt* auf dem Erdboden zumindest annähernd ähnliche Temperaturen wie heute gewährleistet hat. Im Laufe ihrer Entwicklung hat der Sonnenradius und damit auch die Sonnenleuchtkraft stetig, allerdings sehr sehr langsam zugenommen. Leben ist dabei