

Sonnenflecken und das Erdklima (2)

Über die Vielfalt der Klimaeinflussfaktoren

von Ulrich von Kusserow

Erklärbar aufgrund der speziellen Ausprägung der Erdparameter und Planetenkonstellationen leben wir Menschen heute in einer Warmzeit des aktuellen Eiszeitalters, die wahrscheinlich schon in wenigen tausend Jahren durch eine Kaltzeit abgelöst wird. Die meteorologischen Variablen, die das Wettergeschehen und das Klima beschreiben, werden wesentlich durch die Einstrahlung der Sonne, darüber hinaus aber auch durch den vertikalen bzw. meridionalen Transport von Wärme durch bzw. in den unterschiedlichen Atmosphärenschichten und den Ozeanen bestimmt. Neben der großen Anzahl wichtiger, häufig noch nicht ausreichend erforschter natürlicher und systemimmanenter Klimaeinflussfaktoren sowie komplexer, auf ganz unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wirksamer Interaktionsprozesse darf auch der mannigfaltige Einfluss des Menschen auf die sich fortlaufend erfolgenden Veränderungen des Erdklimas nicht vernachlässigt werden.

Teil 1 dieser Reihe erschien in ASTRONOMIE+RAUMFAHRT im Unterricht 62 (2025) 2, S. 18–26

Nach einem alten Sprichwort ist „Klima das, was wir erwarten, Wetter das, was wir bekommen“. Wir Menschen erleben dabei ganz persönlich, dass sich das Wetter im Tagesablauf, innerhalb weniger Tage und vor allem im Laufe eines Jahres in den unterschiedlichen Klimazonen der Erde mehr oder weniger schnell und stark verändert. Trotz zunehmend verbesserter Wetterdaten, die in bodengestützten Wetterstationen und von Wettersatelliten aus gewonnen werden, die sich mit Hilfe leistungsfähiger Computer anhand von Modellrechnungen analysieren und zeitnah auswerten lassen, liegt die Genauigkeit von Wettervorhersagen schon für die folgenden drei Tage im Mittel bei nur etwa 75%. Folglich sollte sich auch das daraus statistisch ermittelbare Klima verändern, worunter definitionsgemäß die über einen Referenzzeitraum von etwa 30 Jahren gemittelten Eigenschaften des Wettergeschehens verstanden werden. Sowohl das Wetter, als auch das Klima beschreiben dabei den vor allem durch Temperatur, Windverhältnisse, Niederschläge, Luftfeuchtigkeit und Wolkenbedeckung charakterisierten Zustand in

ganz unterschiedlichen Bereichen der Erdatmosphäre.

Es war der US-amerikanische Mathematiker und Mitbegründer der Chaosforschung *Edward Norton Lorenz* (1917–2008), der 1961 begann, erste Modelle zur Wettervorhersage mit Hilfe eines sehr einfachen Computers zu rechnen. In seinen Simulationsrechnungen verwendete er die drei Klimavariablen Temperatur, Luftdruck und Windrichtung, um die konvektiven Bewegungen von Gasen und Flüssigkeiten nach deren Erhitzung zu analysieren. Bei der numerischen Lösung von drei miteinander gekoppelten Differentialgleichungen fand er heraus, dass bereits kleinste Änderungen der Anfangsbedingungen schon nach kurzer Zeit signifikante Abweichungen des Systemverhaltens zur Folge hatten. Als er die zeitliche Entwicklung seiner drei Klimavariablen durch Punkte in einem dreidimensionalen Phasenraumdiagramm graphisch darstellte, entdeckte er, dass die unendlich langen, sich niemals kreuzenden Entwicklungstrajektorien dieser Punkte einen später nach ihm benannten „seltsamen At-

traktor“ umlaufen. Beim Blick aus geeigneter Richtung auf die Gesamtheit der Trajektorien fiel ihm auf, dass dieses Gebilde eine ähnliche Form wie die zweier Schmetterlingsflügel aufwies (sogenannter „Schmetterlingseffekt“).

Das chaotisch und deterministisch bezeichnete Verhalten solcher nicht-linearen, durch Rückkopplungsprozesse ausgezeichneten Systeme, die auch in der Meteorologie bei der Wettervorhersage oder bei der Klimaentwicklung von großer Bedeutung sind, zeigt sich darin, dass deren Entwicklung besonders sensitiv von den Anfangs- und Randbedingungen abhängig ist. Schon kleine Veränderungen in derart komplexen Systemen mit einer Vielzahl von Systemelementen und Einflussfaktoren können große, und anders als bei linearen Denkansätzen, auch unerwartet überraschende Auswirkungen haben. Um diesem, vormals weitgehend unbemerkten Umstand Rechnung zu tragen, betitelte *Edward Lorenz* einen von ihm im Jahre 1972 gehaltenen Vortrag wie folgt: „Kann der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien einen Tornado in Texas auslösen?“ Muss es danach nicht sehr schwierig sein, die Entwicklung des langzeitigen Klimas auf der Erde mit Hilfe globaler Klimamodellrechnungen genauer vorherzusagen, wenn in diesem Klimasystem doch so viele physikalische, chemische und biologische nicht-lineare Prozesse auf ganz unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen, oft sogar auch sehr zeitverzögert miteinander interagieren?

Das Klima auf unserem Planeten hat sich im Laufe der Erdgeschichte nachgewiesenermaßen immer wieder unterschiedlich schnell, teilweise auch relativ abrupt verändert. Heute wird häufiger davon ausgegangen, dass hauptsächlich wir Menschen selbst, vor allem aufgrund des weltweit zunehmenden Ausstoßes von Treibhausgasen, für die aktuell zu beobachtende Erderwärmung

verantwortlich sein müssen, was als Zeichen deutlichen Klimawandels von Wissenschaftlern teilweise sogar als „Hitze-katastrophe“ tituliert wird. Um anhand von aktuellen Daten und mit Hilfe von Klimamodellierungen möglichst verlässliche Vorhersagen über Klimaveränderungen in der Zukunft machen zu können, ist es sicherlich sehr sinnvoll, auch die zeitlichen Änderungen wichtiger Klimavariablen in der Vergangenheit genauer anzuschauen und rationale Begründungen über deren Entwicklungsverhalten zielführend zu berücksichtigen.

Nicht nur aktuell, sondern bereits seit den 1960er Jahren hat die mittlere Windgeschwindigkeit auf der Erdoberfläche abgenommen. Neuere Studien gehen davon aus, dass dieses als „Windstillung“ bezeichnete Phänomene sich als Folge des vor allem menschengemachten Klimawandels fortsetzt, bis 2050 sogar um 15% zunehmen könnte. Diese Abnahme der Windgeschwindigkeit ließe sich durch die aktuelle globale Erwärmung erklären, da sich mit der durch sie erfolgenden Verringerung der Temperaturunterschiede zwischen den unterschiedlichen Klimazonen auch die Gradienten des Luftdrucks zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten verringert haben. Seit etwa zwei Jahrzehnten hat auch die Bedeckung durch niedrige Wolken, deren optische Dichte sowie die als Albedo bezeichnete Reflektivität in den mittleren nördlichen Breiten und tropischen Gebieten abgenommen, was aufgrund verstärkt erfolgender Sonneneinstrahlung die Erderwärmung begünstigt. In den vergangenen 10 Jahren war davon fast der gesamte Atlantik betroffen, was den dort 2023 zu beobachtenden Hitze-kord erklären könnte. Die Ausbildung niedriger Wolken kann zum einen durch globale Erwärmung behindert werden, weil die Luft in Bodennähe dadurch trockener ist, die Wolkenschicht-dichte abnimmt und Wolken erst in größerer Höhe bei niedrigeren Temperaturen entstehen können. Andererseits könnte auch die im Rahmen des Umweltschutzes in den vergangenen Jahrzehnten erfolgte Verringerung des Ausstoßes anthropogener Aerosole für die Abnahme der Wolkenbedeckung verantwortlich sein, so dass dadurch tatsächlich weniger Wolkenkondensationskeime zur Ausbildung von Wolken zur Verfügung stehen [17].

Temperaturänderungen im Rhythmus der Milankovitch-Zyklen

Auch wenn die globale Erdtemperatur in den Zeiträumen zwischen 1850 und 1875, 1940 und 1975 sowie 1998 und 2012 sich kaum änderte, so stieg sie nach Ende der Kleinen Eiszeit (**Bild 10c**) doch kontinuierlich um insgesamt etwa 1,5°C an. Heute wird befürchtet, dass sich dieser Temperaturanstieg insbesondere aufgrund der seit etwa 40 Jahren sehr starken Zunahme der Konzentration des Kohlenstoff-Dioxids (**Bilder 12b, c**) in der Erdatmosphäre auch in Zukunft drastisch fortsetzen könnte. In diesem Zusammenhang lohnt sich allerdings ein genauerer Blick auf die Temperaturentwicklungen der vergangenen Millionen Jahre.

Seit 2,7 Millionen Jahren befindet sich die Erde in einem sogenannten Eiszeitalter, nachdem beide Polgebiete, von da ab neben der Antarktis auch die Arktis dauerhaft und großflächig mit Eisschilden bedeckt sind. **Bild 10a** zeigt die Entwicklung der globalen Erdtemperaturen in den vergangenen 5,3 Millionen Jahren, die anhand des Isotopenverhältnisses der stabilen Kohlenstoff-Isotope ^{12}C und ^{13}C rekonstruiert werden konnte. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass sich die Temperaturen immer wieder auf relativ kleinen Zeiträumen um bis zu 10°C veränderten [18]. Es fällt außerdem auf, dass die Temperaturschwankungen relativ zu den Temperaturverhältnissen um 1950, beginnend vor 1,2 Millionen Jahren vor heute zunächst auf Zeitskalen von rund 41.000 Jahren, seitdem im Rhythmus von eher 100.000 Jahren, relativ regelmäßig zwischen Warm- und Kaltzeiten variierend, recht hohe bzw. sehr niedrige Werte annehmen.

Höher aufgelöst veranschaulicht **Bild 10b** die Entwicklung der Temperaturen in den letzten 400.000 Jahren. Die Zeitspanne der Kaltzeiten beträgt im Mittel etwa 85.000 Jahre, die der Warmzeiten etwa 15.000 Jahre [19]. Die Temperaturunterschiede zwischen den Warm- und Kaltzeiten des aktuellen Eiszeitalters können dabei mehr als 10°C, Temperaturschwankungen in den Kaltzeiten bis zu 6°C betragen. Wir leben heute in dem als Holozän bezeichneten Zeitalter der Erdgeschichte in einer Warmzeit des aktuellen Eiszeitalters, in der bisher Temperaturschwankungen von maximal nur etwa 1,5°C registriert werden konnten (**Bild 10c**) [20]. In den vergangenen 10.000 Jahren traten

immer wieder Klimaoptima (des Holozän, während der mittelalterlichen und mittelalterlich und der heutigen Warmzeit) mit globalen Temperaturen von bis zu 16°C und Klimapessima (z. B. während der Kleinen Eiszeit) von bis zu 14°C auf. Die mittlere Erdtemperatur beträgt heute etwa 15,1°C.

Es war der schottische Naturforscher *James Croll* (1821–1890), der 1864 eine aufgrund ihrer Qualität besonders anerkannte Arbeit über die mögliche Entwicklung der Eiszeiten durch den Gravitationseinfluss anderer Planeten auf die Erdbahnparameter veröffentlichte. Basierend auf den darin entfalteten Ideen entwickelte der serbische Mathematiker *Milutin Milankovitch* (1879–1958) von 1909 bis in die 1940er Jahre seine Theorie über die langperiodischen Veränderungen der Erdbestrahlung durch die Sonne, wodurch sich die Schwankungen der globalen Erdtemperatur über die vergangenen hunderttausende Jahre recht gut erklären lassen. Er begründete diese natürlichen Klimaveränderungen auf der Nordhemisphäre durch die periodischen Änderungen wichtiger Erdbahnparameter, wodurch es zu einem periodisch aufeinanderfolgenden Wachstum und Abschmelzen der Eisschilde in den Polargebieten kommen müsste. Die Eis-Albedo Rückkopplung machte er dabei als Steuerfunktion für den Beginn und das Ende der Kaltzeitzphasen verantwortlich.

Die Neigung und Präzessionsbewegung der Erdachse sowie die Stärke der Elliptizität des Erdorbits um die Sonne in einem Schwerpunkt dieser Ellipsenbahn stellen die sich periodisch ändernden Erdbahnparameter dar. Als entscheidende Einflussfaktoren können sie den sich zeitlich systematisch verändernden Einfallswinkel sowie die variierende Intensität der Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche und damit auch die Veränderungen der globalen Erdtemperatur zur Folge haben (**Bild 11a**). Die Neigung der Erdachse schwankt periodisch zwischen 21,5° und 24,5° relativ zur Normalen auf der Ekliptik, der Ebene der Umlaufbahn der Erde um die Sonne. Die Gravitationswechselwirkung mit dem Mond gewährleistet dabei die recht stabile Ausrichtung dieser Achse und damit auch ein für die Lebensentwicklung auf unserem Planeten so wichtiges weitgehend stabiles Klima. Auf Zeitskalen zwischen 19.000 und 24.000 Jahren umläuft die Erdachse diese Normale in Form ei-

ner Präzessionsbewegung. Außerdem verändert sich die Exzentrizität der Ellipsenbahn und damit auch der Abstand der Erde von der Sonne im Perihel und Aphel periodisch auf typischen Zeitskalen von etwa 100.000 Jahren. ([21], [22])

Im Rahmen der auch durch Ergänzungen verbesserten Generalisierten Milankovitch-Theorien (GMT) kann heute die Richtigkeit der Ansätze von *Milankovitch* in nicht-linearen Modellrechnungen bestätigt werden. Die 100.000 Jahre Zykлизität der Entwicklung der Erdtemperatur in den vergangenen 1,2 Millionen Jahre lässt sich anhand der Ergebnisse dieser Rechnungen reproduzieren. Auch der zu etwa diesem Zeitpunkt erfolgende Übergang von der 42.000 Jahre Zykлизität kann damit erklärt werden. Die CO_2 -Konzentration spielt dabei offensichtlich eine wichtige Rolle für die Verstärkung der glazialen Zyklen.

Für die angenähert periodischen Änderungen der Erdbahnparameter sind vor allem die von der Sonne, den anderen Planeten des Sonnensystems sowie die vom Mond ausgeübten Gravitationskräfte auf das Erdellipsoid verantwortlich. Von Bedeutung könnten in diesem Zusammenhang auch die Resonanzbewegungen der planetaren Himmelsobjekte untereinander sein. Besonders auffallend ist die Tatsache, dass sich die Venus, die Erde und der Jupiter sehr exakt alle 11,07 Jahre entlang einer Linie ausrichten, also in Konjunktion zueinander stehen (**Bild 11b**). Die Verbindungslien zwischen der Sonne und den besonders massereichen Planeten Jupiter und Saturn bilden außerdem alle 19,86 Jahre einen rechten Winkel untereinander. Und die Sonne rotiert alle 11,86 Jahre um das Baryzentrum, den gravitativen Schwerpunkt des Sonnensystems.

Langzeitige Änderungen der Temperatur und Kohlendioxid-Konzentration

Auch wenn sich der Klimawandel durch eine Vielzahl variierender Messgrößen charakterisieren lässt, so wird doch häufig vor allem die Entwicklung der auf der Erdoberfläche gemessenen Temperaturen zu dessen Veranschaulichung verwendet. In **Bild 12a** sind die Schwankungen der mittleren Erdtemperaturen der vergangenen 500 Millionen Jahre relativ zur mittleren Temperatur für den

Zeitraum von 1960–1990 dargestellt. In den früheren Phasen der Erdgeschichte vor einigen 100 Millionen Jahren traten offensichtlich langfristige Temperatursprünge von bis zu 16°C auf, während die Temperaturen in den vergangenen 10.000 Jahren relativ konstant blieben, das Klima folglich also recht stabil war. Aufgrund des durch uns Menschen stärker beeinflussten Treibhauseffekts rechnen viele Wissenschaftler für 2050 bzw. 2100 allerdings mit einem sehr starken Anstieg der mittleren Erdtemperaturen.

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, waren die regelmäßigen Variationen der Erdbahnparameter aufgrund gravitativer Wechselwirkungen im Sonnensystem wohl die Haupttreiber des starken natürlichen Klimawandels der vergangenen 2,7 Millionen Jahre. Trotz starker periodischer Variationen der magnetischen Sonnenaktivität auf unterschiedlichen, sehr speziellen Zeitskalen, änderte sich die Gesamtintensität (TSI) der elektromagnetischen Strahlung, die von der Sonne ausgehend in die Erdatmosphäre eintrat, zumindest seit 1800 vermutlich allerdings nur recht wenig [23]. Der im 20. Jahrhundert stärkere Anstieg der Erdoberflächentemperaturen kann durch die Schwankungen der TSI allein nicht gut erklärt werden. Stattdessen wird dafür von vielen Wissenschaftlern der seit 1850 mit der Temperaturrentwicklung weitgehend einhergehende Anstieg der gemessenen CO_2 -Konzentration in der Erdatmosphäre hauptverantwortlich gemacht.

Bild 12b zeigt die Entwicklung der Kohlendioxid-Konzentration der vergangenen 400 Millionen Jahre. Diese schwankt ebenfalls im Lauf der Zeit zwischen etwa 200 ppm und mehr als 2000 ppm sehr stark. In Ansätzen erkennt man dabei eine mögliche Korrelation mit der Temperaturrentwicklung. Die CO_2 -Konzentration beträgt im Augenblick etwa 427 ppm. Aufgrund des durch den Menschen in den vergangenen Jahrzehnten verursachten zunehmend stärkeren Ausstoßes dieses Treibhausgases wird ein weiterer drastischer Anstieg auch der Erdtemperaturen befürchtet. ([24], [25])

Trägt man sowohl die Temperaturanomalien als auch die CO_2 -Konzentrationen für die vergangenen 800.000 Jahre gemeinsam in ein Diagramm ein (**Bild 12c**), so zeigt sich im Zeitalter der Milankovitch-Zyklen eine sehr en-

ge Korrelation zwischen diesen beiden Messgrößen. Die Temperaturrentwicklung läuft der Entwicklung der CO_2 -Konzentration dabei allerdings teilweise voraus. Es bleibt daher zumindest unklar, ob die Konzentration von CO_2 wirklich die Temperaturausprägung bestimmt, ob dies nicht umgekehrt der Fall sein könnte, die Temperatur also die CO_2 -Konzentration bestimmt, oder ob sich beide Größen eher abhängig von anderen Klimatreibern parallel zueinander entwickeln [26].

Über die Strahlungsbilanz, den Treibhauseffekt und anthropogene Klimaeinflüsse

Der natürliche Treibhauseffekt spielt eine sehr wichtige Rolle für die Energiebilanz, die stark dominierend vor allem durch die Strahlungstransportprozesse in der Erdatmosphäre bestimmt wird. Wenn die Oberflächentemperatur konstant bleiben soll, dann müsste die Strahlungsbilanz dafür sorgen, dass die von der Sonne in die Atmosphäre eingestrahlte elektromagnetische Energie im Gleichgewichtszustand stets wieder durch die Atmosphäre ins Weltall abgestrahlt wird. Abweichend von diesem recht theoretischen Konzept könnte die vor allem in den letzten Jahrzehnten erfolgte Erwärmung der Ozeane, der Erdoberfläche sowie der Atmosphäre eher für die Ausbildung eines Energieungleichgewichts sprechen. [27]

Bild 13a veranschaulicht die höhenabhängigen Temperaturverhältnisse in den unterschiedlichen Schichten der Erdatmosphäre. Die Thermosphäre und Mesosphäre als äußerste Atmosphärenschichten werden durch solare UV-Strahlung sowie hochenergetische solare und kosmische Partikel so aufgeheizt, dass die Materie in der sogenannten Ionosphäre stärker ionisiert wird. In Zeiten starker Sonnenaktivität dehnen sich diese Schichten sehr weit sowohl in Richtung der Exosphäre außerhalb des Erdsystems, als auch in die unterhalb der Mesosphäre gelegene Stratosphäre aus, in der sich die stratosphärische Ozonschicht entwickelt. Die darin ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse können über die Tropopause als Grenzschicht zur darunterliegenden Troposphäre hinweg deutlichen Einfluss auf das vor allem dort ablaufende Wetter- und Klimageschehen nehmen.

Ursache	Folgen
Wachstum der Weltbevölkerung	<ul style="list-style-type: none"> zunehmender Energiebedarf verstärkter atmungsbedingter CO_2-Ausstoß
Zunahme der Verbrennung fossiler Energieträger	<ul style="list-style-type: none"> zunehmende Treibhausgasemission (CO_2, CH_4) verstärkter Abgasausstoß (Stick-, Schwefeloxide)
Zunahme der „Gewinnung regenerativer“ Energien	<ul style="list-style-type: none"> veränderte Energiebilanz (Windkraftwerke) Veränderung der Erdalbedo (Solarkraftwerke)
Wachstum von Megastädten in Ballungsgebieten	<ul style="list-style-type: none"> verstärkte Wärmeinseleffekte (Klimaanlagen) Rückbau der Wald-, Wiesen- und Ackerflächen
Verstärkung des globalen Verkehrsaufkommens	<ul style="list-style-type: none"> zunehmende Wolkenbildung durch Aerosolausstoß Reduzierung der Biomasse
Verstärkter Abgasausstoß und zunehmende Vermüllung	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugung troposphärischen Ozons zunehmende Verschmutzung der Weltmeere Algenwachstum
Abholzung der Regenwälder	<ul style="list-style-type: none"> Abbau der Biomasse Reduzierung der Senken für Treibhausgase reduzierte Wasseraufnahme, Störung des Wasser-kreislaufs

Tabelle 2 Mögliche Ursachen und Folgen anthropogener Klimabeeinflussung

In Bild 13b sind die komplexen Strahlungsenergieströme im Klimasystem der Erde mit Angaben über deren jeweilige Leistung pro Quadratmeter dargestellt. Basierend vor allem auf Satellitennutzungen ermöglicht dieses ermittelte Energiebudget allerdings nur einen ungefähren Überblick über die troposphärischen Strahlungstransportverhältnisse. Mit durchschnittlich 340 W/m^2 darf für den Energiefluss der Sonne in die Erdatmosphäre nur 1/4 des Wertes für die Solarkonstante verwendet werden. Zwar beleuchtet die Sonne aufgrund der Erdrotation im Laufe eines Tages nacheinander alle Bereiche der Erdoberfläche. Deren Größe beträgt zwar $4 \cdot \pi R_E^2$, die jeweils bestrahlte Kreisfläche hat aber nur eine Größe von πR_E^2 . Etwa 48 % der eingestrahlten kurzwelligeren Sonnenenergie gelangt direkt auf die Erdoberfläche, 23 % der Strahlung werden in der Erdatmosphäre absorbiert und 29 % zurück ins Weltall reflektiert. Nur etwa 12 % der von der Erdoberfläche aufgenommenen, in Wärme umgeformten und abgestrahlten Energie gelangt als Infrarotstrahlung in einem speziellen Frequenzbereich durch ein sogenanntes atmosphärisches Fenster direkt zurück ins Weltall.

Kohlendioxid mit seinem durchschnittlichen Volumenanteil von rund 0,08 % an der Zusammensetzung der Luft, in der Stickstoff mit 78 %, Sauerstoff mit 21 % sowie Argon mit 0,9 % die dominierenden Anteile haben, gehört

zu den natürlichen Treibhausgasen. Aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften bewirken diese Moleküle eine Art Wärmestau für infrarote Strahlung in der Troposphäre und Stratosphäre, den unteren Schichten der Erdatmosphäre (Bild 13a). Aufgrund des durch diese Gase vermittelten natürlichen Treibhauseffekts sind die Temperaturen auf der Erdoberfläche mit rund 15°C um 33°C höher als ohne deren Existenz.

Mit etwa 75 % an der Wirkung des Treibhauseffektes beteiligt, ist Wasserdampf auch im Zusammenhang mit der Wolkenbildung das wichtigste natürliche Treibhausgas, dessen atmosphärische Konzentration sehr stark zeiten- und breitenabhängig ist und durch starke Verdampfung des Meeresswassers (H_2O) vorübergehend auf bis zu 3 % ansteigen kann. Demgegenüber tragen Kohlendioxid (CO_2) mit 19 %, Ozon (O_3) mit 4 % deutlich weniger, Di-Stickoxid (N_2O) und Methan (CH_4) als weitere natürliche Treibhausgase mit jeweils etwa 1 % vergleichsweise sehr viel weniger zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei. Obwohl Ozon nur einen Volumenanteil von rund 0,000006 % der Atmosphärenkonzentration besitzt, ist der Einfluss dieses Moleküls doch von klimarelevanter Bedeutung, insbesondere was die Prozesse in der Stratosphäre der Erde betrifft. Von der UV-Strahlung der Sonne erzeugt (Bild 15), bewirkt die stratosphärische Ozonschicht eine Aufheizung dieser Atmosphärenschicht, und

sie schützt uns vor dem Eindringen besonders hochfrequenter, lebensbedrohender harter UV-Strahlung.

In den mehratomigen Treibhausgasen ist die elektrische Ladungsverteilung asymmetrisch und daher polarisiert. Diese Gase können unter Einwirkung elektromagnetischer Wechselfelder im Wärmestrahlungsbereich von außen in Rotation oder Schwingungen versetzt werden. Sie nehmen dabei Energie auf, die sie in den unteren, dichten Schichten der Atmosphäre relativ schnell durch Stoßprozesse an benachbarte Moleküle übertragen kann, wodurch diese Atmosphärenschichten insgesamt aufgeheizt werden. In dünneren Schichten bewirken die rotierenden und gegeneinander schwingenden positiven und negativen Ladungen der sich im angeregten Zustand befindlichen Treibhausgase aufgrund seltener Stoßprozesse, dass die anfangs aufgenommene Energie, wie von einer Sendeantenne aus, auch wieder als Infrarotstrahlung in alle möglichen Richtungen abgestrahlt werden kann. Die einzelnen Treibhausgase besitzen dabei jeweils sehr charakteristische, sich teilweise überlappende Frequenzbänder, in denen die Wärmestrahlung ganz spezieller Wellenlängen absorbiert und danach, diffus in alle möglichen Richtungen verteilt, auch wieder reemittiert werden kann.

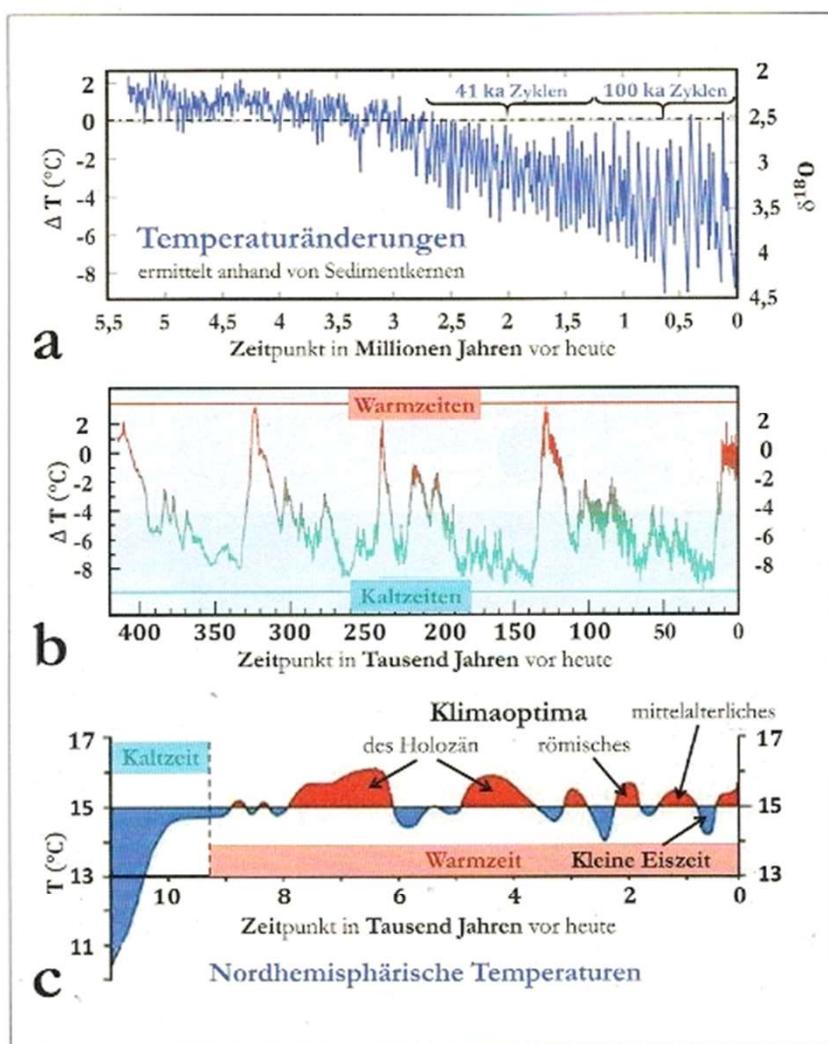
Der schwedische Physiker und Nobelpreisträger für Chemie *Svante August Arrhenius* (1859–1927) entwickelte 1895 eine Theorie zum Treibhauseffekt. Er stellte als erster die Hypothese auf, dass eine globale Erwärmung durch die anthropogene Kohlendioxid-Emission aufgrund der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Öl und Erdgas erfolgen müsste, weil atmosphärisches CO_2 -Treibhausgas die von der Erde abgestrahlte infrarote Wärmestrahlung absorbiert und dadurch das Erdklima aufheizen würde. Wasserdampf könnte dabei wie Kohlenstoffdioxid wirken und die Erwärmung verstärken.

2021 bekam der deutsche Klimaforscher, Meteorologe und Ozeanologe *Klaus Ferdinand Hasselmann* zusammen mit dem US-amerikanischen Meteorologen *Syukuro Manabe* den Nobelpreis für Physik für deren Beiträge zum Verständnis komplexer physikalischer Systeme, insbesondere für die physikalische Modellierung des Klimas der Erde, für die quantitative Analyse von dessen Varia-

tionen sowie für die zuverlässige Vorhersage der Erderwärmung. Hasselmann entwickelte eine Modellvorstellung darüber, wie das teilweise wechselhaft, teilweise chaotisch sich verändernde Wetter, mit dem häufig eher kontinuierlich sich entwickelnden Klima zusammenhängen könnte. Er entdeckte Methoden zur Identifizierung von Signalen, die den Einfluss sowohl natürlicher als auch menschlicher Einflussfaktoren erkennen lassen, mit Hilfe derer dann auch menschliche Fingerabdrücke als Verursacher der Erderwärmung aufgrund des Ausstoßes von CO_2 nachgewiesen werden konnten.

Nach der allgemeinen Theorie des Treibhauseffektes kann die Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration einen natürlichen Anstieg der Erdoberflächentemperatur von nur etwa 1°C verursachen. Nach der Hypothese des verstärkten anthropogenen CO_2 -Effekts sollte die seit Anfang der 1950er Jahre zu beobachtende Erwärmung dagegen allein durch menschliche Aktivitäten erklärt werden. Auch Wolkenprozesse und Veränderungen der Albedo werden dabei als mögliche Klimatreiber berücksichtigt. Weitere natürliche Klimaeinflussfaktoren, zum Beispiel durch die Sonne sowie Wärmetransportprozesse in den unterschiedlichen Schichten der Erdatmosphäre und der Ozeane, spielen in den Einschätzungen des Weltklimarates IPCC dagegen nur eine untergeordnete Rolle. Da der heutige und erwartete weitere Anstieg der Erdtemperaturen aber deutlich größer ist, als es nach der Theorie des CO_2 -Treibhauseffektes zu erwarten wäre, müssten unbedingt zusätzliche Folgeeffekte des Anstiegs der CO_2 -Konzentration in Form komplexer Rückkopplungsprozesse wirksam werden.

Generell könnten kleinste Veränderungen im hochkomplexen Klimasystem verschiedenartigste physikalische, chemische oder auch biologische Prozesse auslösen, die hier deutliche Änderungen der Temperatur- und anderer Klimaparameter zur Folge haben. Beispielsweise bewirkt ein CO_2 -getriebener Temperaturanstieg die Verdunstung von Wasser, dadurch eine Zunahme der Konzentration des Wasserdampfes in der Atmosphäre und eine weitere Temperaturerhöhung, weil Wasserdampf ja ein besonders wirksames Treibhausgas ist. Andererseits unterstützt ein höherer Wasserdampfgehalt die Ausbildung



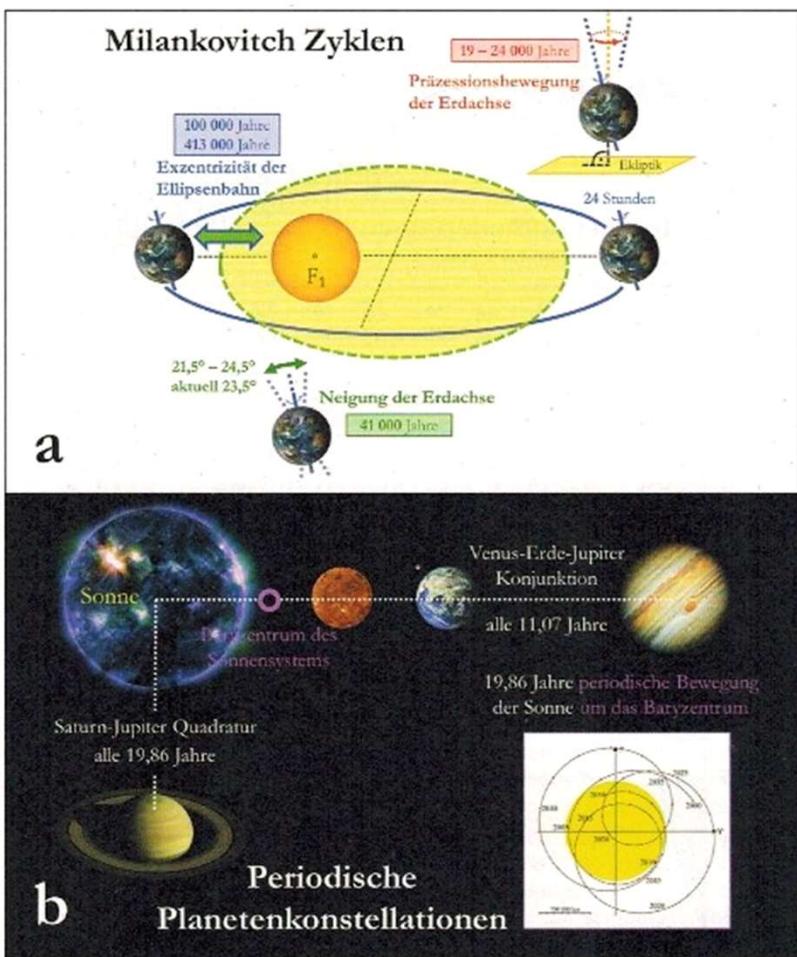
10 Änderungen der globalen Erdtemperaturen in den vergangenen 5,5 Millionen Jahren. a Rekonstruktion der Temperaturänderungen in den vergangenen Millionen Jahren der Erdklima-Geschichte relativ zur Temperatur um 1950 ($\Delta T = 0^\circ\text{C}$ in der Graphik) anhand des Anteils des Sauerstoffisotops in Sedimentkernen. In den vergangenen 2,7 Millionen Jahren erfolgten dabei auffallend regelmäßige Temperaturschwankungen mit typischen Zykluslängen von etwa 41.000 bzw. 100.000 Jahren. b Relativ periodische Schwankungen der Erdtemperaturen um 10 bis 12 Grad zwischen Warmzeiten (Dauer ca. 20–30.000 Jahre) und Kaltzeiten (Dauer ca. 80–100.000 Jahre) des aktuellen Eiszeitalters im Rahmen sogenannter Milankovitch-Zyklen. c Schwankungen der Temperaturen auf der Nordhalbkugel im Verlauf der aktuellen Warmzeit. Neben Klimaoptima (des Holozäns, in der Römerzeit, im Mittelalter und aktuelles) treten immer wieder auch Klimapessima (z. B. während der Kleinen Eiszeit) auf. R. A. Rohde/ Wikipedia; Wikimedia Commons; U. v. Kusserow nach W. Dansgaard (1969)/ C. D. Schönwiese (1995)

- Michael Heinzelmann – Klimawandel, das Holozän (Vorlesung 4, Teil 1 von 3) <https://www.youtube.com/watch?v=n9D8PIER2K0>
- Michael Heinzelmann – Klimawandel, das Holozän (Vorlesung 4, Teil 3 von 3) <https://www.youtube.com/watch?v=M213jdZ36uk>

von Wolken, wodurch die als Albedo bezeichnete atmosphärische Rückstreufähigkeit zunimmt, die Temperatur dadurch absinken kann. Zusätzliche Erwärmung kann auf längeren Zeitskalen für das Abschmelzen der Poleiskappen sorgen, was eine Verringerung der Eis-Albedo zur Folge hätte.

Zur Abschätzung der Auswirkungen des durch den Menschen verursachten zusätzlichen Treibhauseffektes müssen

eine Vielzahl positiver und negativer nicht-linearer Rückkopplungsprozesse berücksichtigt werden. Solche Klima-Rückkopplungen können nicht direkt beobachtet und vermessen werden. Eine Vielzahl von Prozessen wechselwirken dabei mehr oder weniger abhängig voneinander. Vielleicht sind manche von ihnen durch Wissenschaftler auch noch gar nicht als relevant erkannt worden. Von daher besteht eine große Un-



11 Einfluss periodisch variierender Planetenkonstellationen auf die Erdbahnparameter und das Erdklima. **a** Periodische Variationen der Exzentrizität des elliptischen Erdorbits, der Neigung der Erdachse sowie ihrer Präzessionsbewegung als charakteristische Erdbahnparameter, die auf unterschiedlich langen Zeitskalen im Verlauf der Milankovitch-Zyklen deutlichen Einfluss auf das Erdklima genommen haben. **b** Regelmäßige Venus-Erd-Jupiter-Konjunktionen, Saturn-Jupiter-Quadraturen und periodische Bewegungen der Sonne um das Baryzentrum des Sonnensystems könnten Einfluss auf die periodischen Variationen des solaren Aktivitätszyklus, dadurch indirekt auch auf das Erdklima nehmen. U. v. Kusserow/NAS; U. v. Kusserow/NASA/C. Smith Wikimedia Commons

- Michael Heinzelmann - Klimawandel Vorlesung 3: Eis- und Warmzeiten (Teil 2 von 2) <https://www.youtube.com/watch?v=kiv3lwUfM4>
- Bright Side Science - Earth Doesn't Orbit the Sun | What is a Barycenter? <https://www.youtube.com/watch?v=c4l1WifIPZo>

sicherheit bei der Abschätzung des zusätzlichen Einflusses auf die Erhöhung der Erdtemperatur.

Arrhenius war bereits vor 130 Jahren davon ausgegangen, dass sich die Erdtemperatur bei einer Verdopplung der CO_2 -Konzentration auch aufgrund von Folgeeffekten grundsätzlich um 5°C erwärmen müsste. Die Temperaturerhöhung, die bei Verdopplung der Konzentration allein dieses Treibhausgases zu erwarten sein sollte, wird heute als Klimasensitivität bezeichnet. Nach dem jüngsten 6. Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahre 2021 liegen die unsiche-

ren Schätzwerke für diese Größe, die im Rahmen globaler Klimamodellrechnungen und durch Datenanalyse beobachteter Klimaänderungen ermittelt wurden, zwischen $2,5^\circ\text{C}$ und 4°C . [28]

Basierend auf detaillierten Daten aus einer Datenbank hat der deutsche Physiker *Hermann Harde* in den vergangenen Jahren umfangreiche Modellrechnungen zum spektralen Absorptionsverhalten der drei Treibhausgase H_2O , CO_2 , O_3 und CH_4 in den unterschiedlichen Klimazonen vom Äquator bis zu den Polgebieten durch eine Vielzahl von erdatmosphärischen Schichten hindurch

ausgeführt. Global gemittelt über diese Klimazonen konnte er aufzeigen, dass der stark breitenabhängige Wasserdampfgehalt entscheidend, im kurzwelligen Strahlenspektrum zu 94 %, im langwelligen Bereich zu etwa 80 %, für die Aufheizung der Atmosphäre verantwortlich ist. Mit zunehmender CO_2 -Konzentration zeigt der Temperaturanstieg dabei einen abflachenden Verlauf, was auf die zunehmend gesättigte Absorption in den absorbierenden Spektrallinien schließen lässt. Für die Absorptionsbilanz hat er in seinen Rechnungen zur Absorption des Sonnenlichts und der von der Erde ausgesandten Infrarotstrahlung eine Strahlungstransfergleichung in den bis zu 228 unterschiedlichen Atmosphärenschichten für den Äquatorbereich, die mittleren Breiten sowie die Polgebiete verwendet. [28]

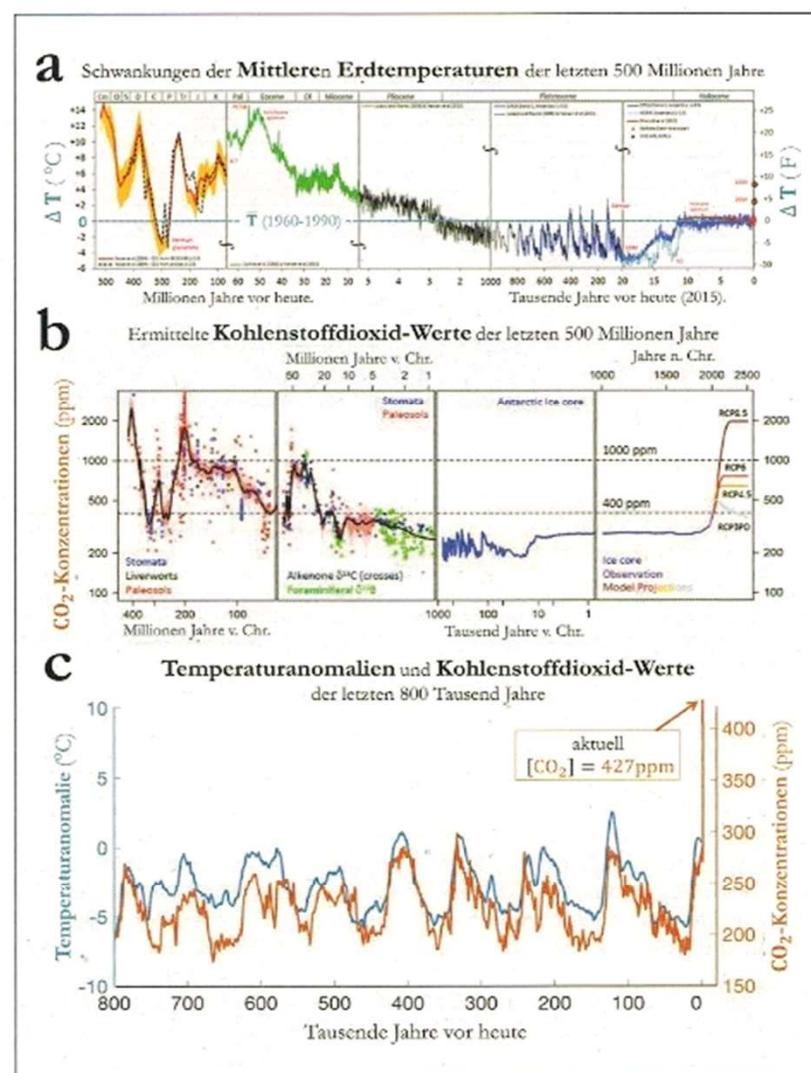
Zur Auswirkung auf das Klima und zur Ermittlung der Klimasensitivitäten hat *Harde* Simulationsrechnungen durchgeführt. Bei seinen Ergebnissen handelt es sich nicht um grobe Schätzungen, sondern differenziertere Berechnungen für die unterschiedlichen Klimazonen. In einem Zweilagenklimamodell berechnete er die Auswirkungen des Treibhauseffektes, berücksichtigte Verdunstungsprozesse, Konvektionsströmungen zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre sowie den Wärmetransfer zwischen den Klimazonen durch Winde und ozeanische Strömungen. Ergebnis seiner Simulationsrechnungen waren schließlich auch Aussagen über die Klimasensitivitäten. In den Tropen beträgt sie nur $0,61^\circ\text{C}$, in den mittleren gemäßigten Breiten $0,59^\circ\text{C}$ und in den Polgebieten $0,82^\circ\text{C}$. Als Ergebnis seiner Modellrechnungen ergibt die gewichtete Mittelung über alle Klimazonen dabei einen Wert von $0,62^\circ\text{C}$ für die Klimasensitivität auf der Erde.

Die Ozeane absorbieren nahezu 30 % des anthropogen erzeugten atmosphärischen Kohlendioxids aufgrund menschlicher Aktivitäten. Auch Seegras-, Algen- und Mangrovenwälder stellen in diesem Zusammenhang wirksame aquatische Systeme dar. Weitere wichtige CO_2 -Senken findet man in der Biosphäre, in Wäldern, Mooren und Graslandschaften. Mittels Photosynthese nehmen die Pflanzen hier CO_2 auf, lagern Kohlenstoff in organischen Stoffen an und geben Sauerstoff ab, der für das Leben auf unserem Planeten von zentraler Bedeutung ist. Auch die Lithosphäre wirkt als

Kohlenstoffsenker, in dem dabei unter Wettereinfluss auf längeren Zeitskalen Carbonatgestein gebildet wird. Ein Teil des hier gebundenen Kohlenstoffs wird bei Vulkanausbrüchen allerdings unter anderem in Form von Kohlendioxid mehr oder weniger eruptiv wieder freigesetzt.

Es müsste unter anderem auch in diesem Zusammenhang geklärt werden, inwieweit die aktuell recht starke Zunahme der atmosphärischen CO_2 -Konzentration nicht allein menschengemacht ist, sondern inwieweit sie in Anteilen nicht auch auf natürliche Weise erzeugt wird. Über dem Meeresspiegel gibt es auf der Erde 1500 Vulkane, die im Holozän, also in den vergangenen 10.000 Jahren mehr oder weniger aktiv waren. Schätzungen über die Anzahl der Unterwasservulkane gehen darüber hinaus von Hunderttausenden bis zu einer Million Vulkanen aus. Der Hunga-Tonga-Unterwasservulkan im Südpazifik brach 2022 aus und spuckte gewaltige Mengen an Treibhausgasen, vor allem Wasserdampf und CO_2 aus.

Zwar ist die verbreitete wissenschaftliche Meinung, dass der Einfluss solcher Vulkaneruptionen auf das Klima nur minimal sein kann und auch nur kurzzeitig wirksam wäre [30]. In den letzten Jahren wurden allerdings 19.000 neue Unterwasservulkane entdeckt, die nach neuesten Erkenntnissen möglicherweise bis zu dreimal mehr CO_2 als bisher vermutet emittierten könnten. 300.000 Quadratkilometer beträgt die Fläche des größten Einzeltyps östlich von Japan auf dem Grund des pazifischen Ozeans. Lōihi Seamount heißt der größte aktive Unterwasservulkan, der 35 km südlich der Hauptinsel „Big Island“ des hawaiianischen Archipels gelegen ist. Auf dieser Insel wird bereits seit 1958 regelmäßig die atmosphärische CO_2 -Konzentration in einer Messstation auf dem 4169 m hohen Mauna Loa Vulkan gemessen. Nachdem dieser Vulkan 2022 ausgebrochen war, musste diese Messtation kurzzeitig auf den 4207 m hohen, 34 km entfernt gelegenen Vulkan Mauna Kea verlegt werden. Es stellt sich vor diesem Hintergrund die Frage, ob diese beiden Stationen für die Messungen der CO_2 -Konzentration, deren Werte für die Einschätzung der Klimaentwicklung überall auf der Welt heute verwendet werden, tatsächlich sehr gut geeignet sind.

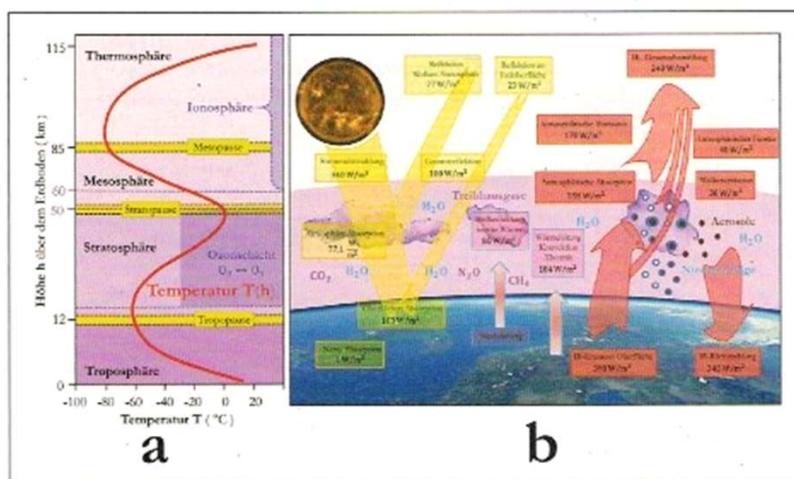


12 Temperaturschwankungen sowie Entwicklungen der atmosphärischen Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen in den vergangenen 500 Millionen Jahren. **a** Schwankungen der globalen Erdtemperaturen im Laufe von einigen 100 Millionen Jahren um bis zu 20°C . **b** Schwankungen der Konzentrationen des atmosphärischen Kohlendioxids im Verlauf der Erdgeschichte in den vergangenen 420 Millionen Jahren um bis zu 2000 ppm. **c** Temperaturen und atmosphärische CO_2 -Konzentrationen der letzten 800.000 Jahren im Verlauf der Milankovitch-Zyklen. G. Fergus; G.L. Foster et al.; M. Shan / J. Shakun / D. Lüthi et al. (2008) / J. Jouzel et al. (2007) / U. v. Kusserow

Auch wenn der CO_2 -Ausstoß für ein konkretes Land sich nicht einfach und nur indirekt aus dem Umfang der jeweils verwendeten fossilen Brennstoffe berechnen lässt, so ist die Aussage doch bemerkenswert, dass dieser Emissionsfaktor in Deutschland in den vergangenen sechs Jahr stagniert, offensichtlich relativ stabil geblieben ist.

Abgesehen von der anthropogenen Verstärkung des Treibhauseffektes gibt es mehrere andere, dabei sehr grundsätzliche Prozesse, durch die der Mensch deutlichen Einfluss auf das Erdklima nehmen kann (Tabelle 2). Vor al-

lem wegen des fortschreitend starken Wachstums einer immer anspruchsvoller werdenden Weltbevölkerung besteht in einer globalisierten Welt ein immer größer werdender Energiebedarf. Die Städte vergrößern sich zunehmend in riesigen Ballungsgebieten. Gleichermaßen gilt für die Industrien und den Ausbau der Verkehrswegen auf dem Land, den Meeren und in der Luft, was häufiger eine starke Verschmutzung der Umwelt zur Folge hat. Nicht nur die Nahrungsmittelherstellung muss dabei zur zufriedenstellenden Versorgung der Bevölkerung sehr intensiviert werden, was



13 Einstrahlung der Sonne in die Erdatmosphäre. **a** Darstellung der gemittelten Temperaturen in den unterschiedlichen Schichten der Erdatmosphäre. Durch hochenergetische elektromagnetische Strahlung sowie durch solare und kosmische Strahlung aus dem fernen Universum werden die Thermo- und Mesosphäre ionisiert, Sauerstoffatome, Sauerstoff- und Ozonmoleküle in der stratosphärischen Ozonschicht durch komplexe physikalische und chemische Prozesse wechselseitig ineinander umgewandelt. **b** Schematische Darstellung der Umwandlungsprozesse der von der Sonne in das Erdsystem eingestrahlten elektromagnetischen Energie, die für den Energiehaushalt im Klimasystem der Erde von entscheidender Bedeutung ist. U. v. Kusserow; U. v. Kusserow/NASA

- Strahlungs- und Wärmeaushalt der Erde <https://www.youtube.com/watch?v=BIQd1w7xfz0>
- Wieviel tragen und die Sonne zur globalen Erwärmung bei? <https://www.youtube.com/watch?v=6haqGBFCJLs>

in zunehmendem Maße auch zur Ausbeutung der Natur, zur Reduzierung der Biomasse führt. Neben der dadurch verstärkten Abgas- und Treibhausgasemission sowie genereller Umweltverschmutzung können auch Veränderungen der Energiebilanz, des Wasser-, Kohlenstoff- oder Stickstoffkreislaufs, der Wolkenbedeckung und des Albedo-Effektes sehr wohl entscheidenden klimarelevanten Einfluss auf die Temperaturentwicklung und andere Klimaparameter sowie auf die sehr wohl relevanten atmosphärischen und ozeanischen Wärmetransport- und Speicherungsprozesse im Erdsystem nehmen.

Klimarelevante „Top-Down“- und „Bottom-Up“- Prozesse

Klimarelevante Prozesse in der Erdatmosphäre lassen sich in zwei Kategorien aufteilen, je nachdem, ob sie dort von oben nach unten („Top-Down“) oder von unten nach oben („Bottom-Up“) Einfluss nehmen (Bild 14). Beide Einflussrichtungen wirken dabei nicht unabhängig voneinander, denn sie können sich auch wechselseitig beeinflussen. So bestimmt beispielsweise die Sonneneinstrahlung von oben die klimazonenabhängige Ausprägung der Vegetation unten auf der

Oberfläche, während in Regenwäldern die Ausdünnung chemischer Verbindungen wie etwa Isopren von unten die Bildung von Aerosolen unterstützt, die oben wesentlich zur Wolkenbildung beiträgt.

In Bild 14a sind wichtige klimarelevante „Top-Down“-Prozesse überblickartig veranschaulicht.

1. Die **stratosphärische Ozon-Dynamik**: Die UV- und Teilchenstrahlung der Sonne sowie kosmische Strahlung bewirken unter zusätzlichem Einfluss komplexer chemischer Prozesse die Ausbildung und Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht, durch die auch Änderungen der Temperatur- und Strömungsverhältnisse in der oberen Troposphäre verursacht werden.

2. Die **Wolkenbildungsprozesse**: Geladene kosmische und hochenergetische solare Partikel können die Ausbildung größerer Aerosole und Kondensationskerne und dadurch die Entwicklung von Wolken unterstützen, in denen Sonnenstrahlung absorbiert und reflektiert wird, durch die sich die Albedo im Erdsystem stark verändern kann, in denen Gewitter ausgelöst werden und von denen Niederschläge ausgehen.

3. **Aerosol-Einfluss und Treibhauseffekte**: Atmosphärische Aerosole und

Treibhausgase können die Sonnenstrahlung reflektieren, streuen, brechen bzw. absorbieren und reemittieren, dadurch deutlichen Einfluss auf die Strahlungsbilanz, den Energiehaushalt im Erdsystem nehmen.

4. **Erdoberflächenprozesse**: Die Sonnenstrahlung heizt ortsabhängig die Oberfläche der Erde, verstärkt die Megastädte in Ballungszentren auf, lässt Gletscher schmelzen. Sie ermöglicht das Pflanzenwachstum, treibt die komplexen Strömungsvorgänge in den Ozeanen, in denen Energie langzeitig gespeichert werden kann, und aus denen Wasser zur Wolkenbildung verdampft.

In Bild 14b sind wesentliche Klimaeinfluss nehmende Bottom-Up-Prozesse überblickartig dargestellt.

1. **Antrieb atmosphärischer Zirkulationen**: Die im Erdboden bzw. in den turbulent oder zyklisch variiierenden Meeresströmungen gespeicherte Sonnenenergie treibt den atmosphärischen Wärmetransport in meridionalen bzw. äquatorialen Konvektionszellen.

2. **Erzeugung natürlicher Aerosole**: Die die Wolkenbildung ermöglichen Aerosole entstehen vor allem durch die Erosion von Wüsten in Form von Wüstensand, durch die Erosion von Landschaften als Mineralstaub, bei der Meeressicht durch Salzkristalle, durch Aussendung biogener Teilchen von Algen, aus Wald- und Wiesenlandschaften in Form von Pollen, Sporen, Bakterien oder Viren sowie aus vulkanischer Asche.

3. **Ausbreitung atmosphärischer Wellen**: Durch Berge, aufeinandertreffende Luftmassen oder Gewitter können Luftmassen unter Gravitationseinwirkung die Anregung und Ausbreitung regionaler atmosphärischer Schwerewellen bzw. wesentlich großkalriger globaler und langwelligerer Planetarer Wellen bewirken. Letztere beeinflussen die globale Atmosphärenzirkulation, den polwärigen Wärmetransport durch die Polarwirbel sowie das Schlängeln der Jetstreams im Zusammenhang mit der Ausbildung ausgeprägter Hoch- bzw. Tiefdruckgebiete.

4. **Anthropogene Einflüsse**: Durch Industrie, Gewerbe, Transport und Besiedlung werden eine Vielzahl von Abgasen und Aerosole durch menschlichen Einfluss erzeugt. Da-

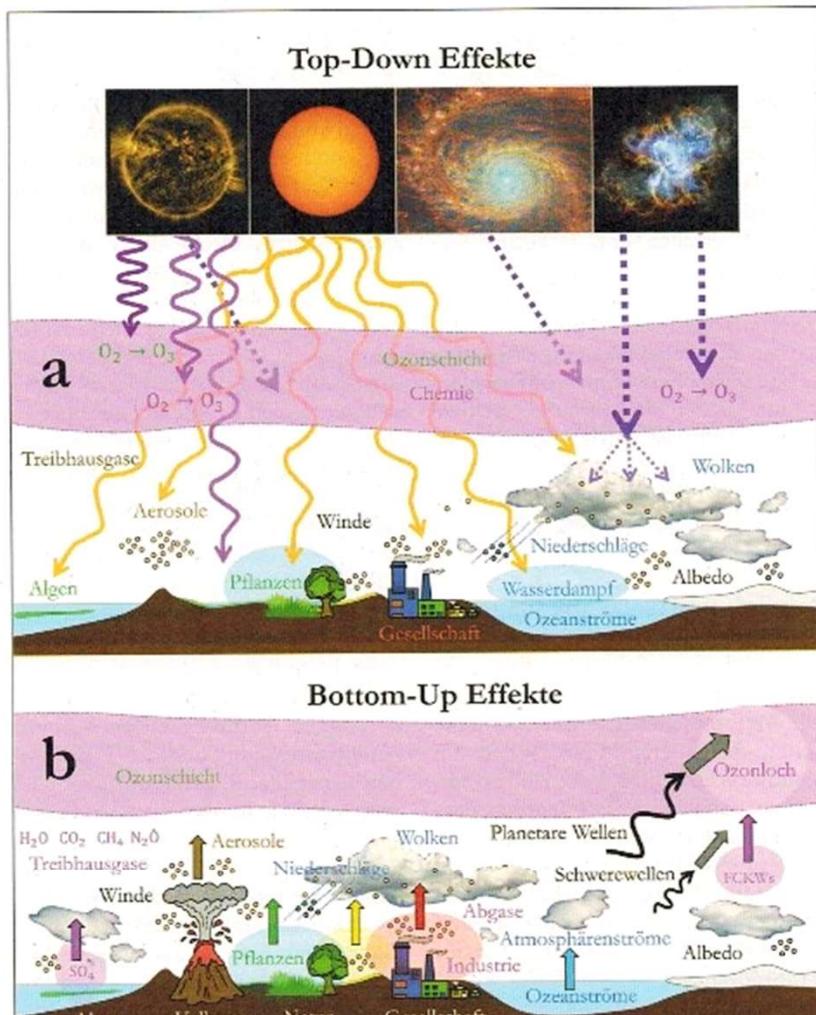
bei werden als Treibhausgase vor allem Kohlendioxid, Methan, Stickoxide sowie troposphärisches Ozon erzeugt, die Landschaften und Weltmeere durch Müll verunreinigt, die Atmosphäre vor allem über städtischen Wärmeinseln regional auffallend stark erwärmt. Fluorchlorkohlenwasserstoffe unterstützen die Ausbildung von Ozonlöchern.

Entwicklungen in der stratosphärischen Ozonschicht

Die stratosphärische Ozonschicht, die die Biosphäre sehr effektiv vor dem Eindringen allzu harter UV-Strahlung von der Sonne, in Teilen auch von dem solarer und kosmischer Partikelstrahlung schützt, spielt eine komplexe Rolle im Zusammenhang mit dem Erdklima. Durch harte solare UVC-Strahlung mit Wellenlängen kleiner als 240 nm in der oberen Stratosphäre erzeugt, kann sie durch energieärmere UVC- sowie UVB-Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 280 nm und 315 nm, durch Kosmische Strahlung, aber auch durch menschengemachte, durch die Troposphäre aufsteigende Fluorkohlenwasserstoffe (FCKWs) abgebaut werden (Bild 15).

Durch Photodissoziation werden Sauerstoffmoleküle (O_2) in der Stratosphäre durch UVC-Strahlung in jeweils zwei Sauerstoffatome (O) zerlegt ($O_2 + h\nu (\lambda < 240\text{nm}) \rightarrow 2O$). Katalysiert durch geeignete andere Moleküle oder Atome (K) können sich danach Ozonmoleküle (O_3) ausbilden ($O_2 + O + K \rightarrow O_3 + K$). Die bei dieser relativ schnellen Reaktion freiwerdende überschüssige Energie sorgt in Form kinetischer Energie für die Erwärmung der Stratosphäre. Allzu häufige Verschmelzungen der Sauerstoffatome zu Sauerstoffmolekülen ($2O + K \rightarrow O_2 + K$), die die Ozonbildung behindern würden, finden hier nicht statt.

Kurzwelligere UVC-Strahlung sowie vor allem UVB-Strahlung bewirken durch Photodissoziation ($O_3 + h\nu (240\text{nm} < \lambda < 340\text{nm}) \rightarrow O_2 + O$), unterstützt durch Ozonumwandlung in Sauerstoffmoleküle ($O_3 + O \rightarrow 2O_2$), den Ozonabbau. Auch die Einwirkung freier, in der Atmosphäre häufiger vorkommender natürlicher Radikale der Hydroxyde (OH), Stickoxide (NO), Chloride (Cl) oder Bromide (Br) sowie menschengemachte FCKWs können die stratosphärische



14 Vorwiegend vertikal wirksame natürliche bzw. vom Menschen beeinflusste Klimaprozesse im Erdsystem. a Von der Sonne und aus dem fernen Universum verursachte „Top-Down“-Effekte.

b Von erdoberflächennahen Gebieten ausgehende „Bottom-Up“-Effekte. U. v. Kusserow/NASA

Ozonschicht stärker ausdünnen. Unter Einwirkung der Sonne spielen sich hier sehr komplexe chemische Prozesse, insbesondere auch auf der Oberfläche von Aerosolen ab, die in kalten polaren Regionen jahreszeitenabhängig immer wieder auch für die Ausbildung sogenannter Ozonlöcher sorgen. [31]

Für den Ozonschichtabbau in tieferen Stratosphärenschichten könnte auch ein bisher noch umstrittener, als CRE bezeichneter Elektronen-Reaktions-Mechanismus mitverantwortlich sein, der durch den Einstrom kosmischer Partikelstrahlung erfolgen soll. Wenn halogenenthaltende Moleküle auf geladenen Oberflächen von Festkörpern, Aerosolen oder flüssigen Wolken durch freigesetzte Elektronen dissoziiert werden, dann könnten

unter nachfolgendem Einfluss der Sonnenstrahlung verstärkt Cl^- -Ionen erzeugt werden, die einen effektiven Ozonabbau zur Folge haben. In etwa 18 km Höhe, also im Bereich der tieferen Stratosphäre, erreicht die Konzentration der Elektronen, die durch den Einstrom hochenergetischer kosmischer Partikel erzeugt werden, tatsächlich ihr Maximum. Gerade in Zeiten schwacher Sonnenaktivität, wenn der Einstrom kosmischer Strahlung in die Erdatmosphäre aufgrund wesentlich schwächerer heliosphärischer Magnetfelder weniger behindert wird, lassen sich tatsächlich, passend zu dieser Theorie, verstärkte, dabei oft breitenabhängige Ozonausdünnungen in den unteren Stratosphärenschichten registrieren. [32]

Die Verstärkung der Ozonschicht bewirkt eine Erwärmung der Stratosphäre, deren Ausdünnung dagegen eine Abkühlung. Je schwächer die Ozonschicht ist, umso größer ist der Anteil der UVB-Strahlung, die neben der nahezu gesamten UVA-Strahlung ($315 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$) tief in die Atmosphäre bis zur Erdoberfläche vordringen kann. Sie bewirkt hier eine Aufheizung der Atmosphäre, der Ozeane und der Erdoberfläche. Stratosphärische Temperaturänderungen wirken sich dabei bis in die Tropopause und sogar obere Troposphäre aus, wo sie merklichen Einfluss auf die Temperaturverhältnisse sowie klimarelevant auch auf die in den oberen Bereichen der Troposphäre strömenden Winde nehmen können.

Aerosole und Wolkenbildungsprozesse

Den Einfluss der Wolken auf das aktuelle Wettergeschehen können wir Menschen direkt empfinden. Wenn am Taghimmel plötzlich dicke Wolken auftauchen, dann spüren wir deutlich, dass es kühler wird, weil die Sonne durch sie verdeckt wird. Dagegen erleben wir die Nacht als wärmer, wenn Wolken dafür sorgen, dass die vom Erdboden ausgehende Wärmestrahlung in ihnen sowie durch den Treibhauseffekt absorbiert und zur Erde zurückgestrahlt wird. Über den Wüsten ist die Luft extrem trocken. Ohne viel Wasserdampf und Wolken heizt die Sonnenstrahlung die Erdoberfläche hier am Tage deshalb extrem stark auf. Des Nachts wird es dort aber sehr kalt, weil die von der Erdoberfläche ausgestrahlte Wärmeenergie fast ungehindert in Richtung Weltall entweichen kann. Lässt sich die aktuelle Klimaerwärmung unter anderem auch dadurch erklären, dass die Wolkenbedeckung in den letzten Jahrzehnten stetig abgenommen hat?

Wenn die Wasserdampfkonzentration in der vor allem mit Gaspartikeln und kleinen Schwebeteilchen gefüllten Luft ihren maximal möglichen, temperaturabhängigen kritischen Wert überschreitet, die sogenannte relative Feuchtigkeit von 100 % überschreitet, dann kondensiert der Wasserdampf im Umfeld vor allem hydrophiler, wasserliebender Kondensationskeime unter Ausbildung farbloser, nicht sichtbarer Wassertröpfchen (Bild 16). Bei Tempe-

raturen unter -10°C bilden sich dagegen Eiskristalle um solche Materiekerne aus, deren Abmessungen zwischen einem Nanometer und einem Mikrometer liegen können. Große Teilchendichten der Kondensationskerne, hoher atmosphärischer Wassergehalt sowie niedrige Temperaturen fördern, unterstützt durch elektrostatische Aufladungen sowohl die Entstehung als auch zunehmende Verdichtung dieser Wassertröpfchen, wodurch Wolken entstehen. Dies gelingt z. B., wenn Luft beim Aufstieg abgekühlt wird, Kaltfronten eindringen, wenn sich strömende Luftmassen durchmischen, oder wenn kosmische Partikelstrahlung die Atmosphäre ionisiert. Aufgrund von Streuprozessen werden die Wolken für uns sichtbar, so dass wir deren komplexe Entwicklung auf unterschiedlichen Zeitskalen direkt verfolgen können. [33]

Die Mechanismen, durch die Aerosole direkt Einfluss auf das Erdklima nehmen können, sind vielfältig, aufgrund beteiligter komplexer Wechselwirkungsprozesse mit anderen Phänomenen bisher allerdings nur unzureichend erforscht. Wie beschrieben, sind sie es zum einen, die den so einflussreichen Prozess der Wolkenbildung erst ermöglichen. Sie besitzen zudem, wie beispielsweise im Fall der Rußpartikel, die Eigenschaft, Sonnenlicht zu absorbieren, Wärme abzustrahlen und dadurch die Erwärmung der Troposphäre zu unterstützen. Wie im Fall mineralartiger Aerosole, können sie das Sonnenlicht aber auch reflektieren oder brechen, wodurch sich die Photosphäre eher abkühlt. In der Stratosphäre kehren sich die Verhältnisse dagegen offensichtlich um. Rußpartikel können kührend, Mineralpartikel dagegen erwärmend wirksam werden. In der unteren Stratosphäre können auf der Oberfläche von Aerosolen zudem photochemische Prozesse vereinfacht ablaufen, die den Ozonabbau zur Folge haben, wodurch die UV-Strahlung verstärkt klimarelevanter Einfluss in der Photosphäre nehmen kann. Andererseits kann die UV-Strahlung von Aerosolen aber auch absorbiert werden. [34]

Wolken findet man hauptsächlich in der Troposphäre, zum Teil auch in der Stratosphäre, als leuchtende Gaswolken sogar in der Mesosphäre. Sie entstehen in unterschiedlichen Höhen mit unterschiedlichen Eigenschaften, bewegen sich in verschiedene Richtungen mit un-

terschiedlicher Stärke und können sich unter Umständen sehr schnell wieder auflösen. Über den Ozeanen werden sie durch die Verdunstung des Wassers sowie durch den Aufstieg von Salzkristallen in der Meeresglocke oder Dimethylsulfat aus Algenkulturen gebildet, die hier als Kondensationskeime wirksam werden können. Über den Regenwäldern sind es Blütenpollen, die diese Aufgabe übernehmen. In den Bergen entstehen Wolken durch Aufwinde, beim Aufstieg der Luftmassen in kältere Regionen.

Wolken nehmen einen großen Einfluss auf den Strahlungshaushalt in der Erdatmosphäre. Ihre Häufigkeit und Verteilung können das Wettergeschehen über lange Zeiträume bestimmen und damit Einfluss auf die Entwicklung des Erdklimas nehmen. Aufgrund ihrer Rückstrahlfähigkeit tragen tieferstehende Wolken stark zur Erdalbedo bei, was eine Abkühlung zur Folge hat. Ihre optische Dichte ist dabei für die UV-Strahlung sehr hoch. Lichtabsorption kann andererseits auch zur Erderwärmung beitragen. Gleiches gilt auch für hohe Cirrus-Wolken, die eher den Treibhauseffekt unterstützen. Über Monate oder sogar Jahre bestehende, besonders großräumig verteilte und dichte Wolkenbedeckungen können verstärkt nach großen Vulkanausbrüchen das Wettergeschehen stark beeinflussen. Niederschläge aus Wolken, Blitze und heftige Unwetter insbesondere in tropischen Bereichen, sind zumindest sehr stark wetterbestimmend.

Ozeanischer und troposphärischer meridionaler Wärmetransport

Neben den vielfältigen Prozessen des Strahlungsantriebs, die mit vorwiegend vertikaler Ausrichtung in der Erdatmosphäre wirksam werden, nehmen darüber hinaus auch ozeanische und atmosphärische Wärmetransportprozesse Einfluss auf die Entwicklung des Erdklimas. Es ist der starke Unterschied der Sonneneinstrahlung zwischen dem Äquator und den Polgebieten, der theoretisch zu einem Temperaturgefälle von etwa 100°C in den Breitengraden führen müsste. Dieser starke Temperaturunterschied bewirkt allerdings den Transport von Wärme, Wasser und Feuchtigkeit, auch von Wolken und Dreihimpuls mit einer netto Vorzugsrichtung vom Äquator zu den Polen, wodurch das Tem-

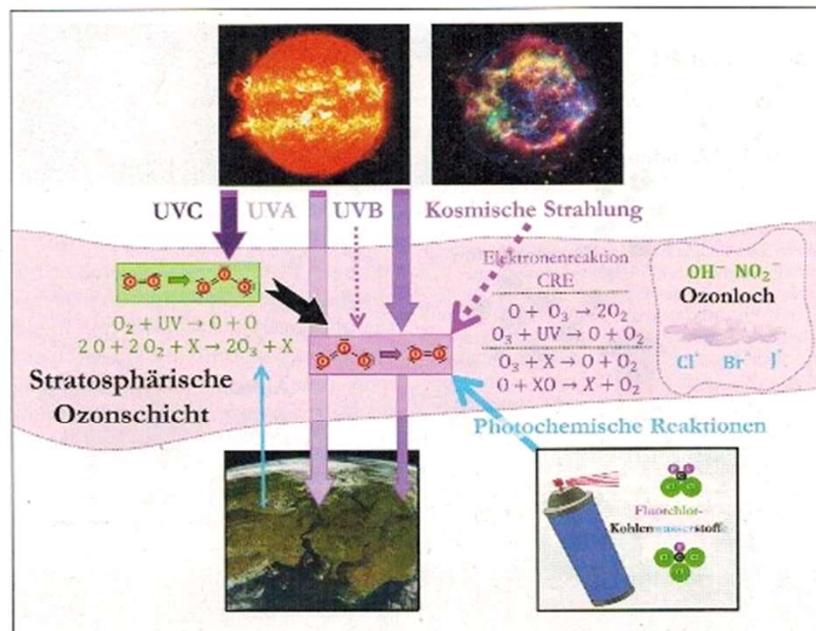
raturgefälle auf kaum mehr als 40°C reduziert wird.

Aufgrund der wesentlich höheren Wärmekapazität des Wassers im Vergleich zur Luft bleibt die von der Sonne eingestrahlte Wärme wesentlich länger in den Weltmeeren gespeichert. Der größte Teil der in ihnen transportierten Wärme wird verstärkt in mittleren geographischen Breiten an die Atmosphäre abgegeben. Starke thermische Schwankungen können jahreszeitliche oder dekadische Oszillationen des Wärmetransports sowohl in den Ozeanen als auch in der Atmosphäre auslösen. **Bild 17** veranschaulicht die Komplexität der Transportwege in den Weltmeeren sowie die wichtigsten meridionalen Transportwege in der Troposphäre der Erde.

Angetrieben durch die Wärmezufuhr von der Sonne, durch Temperaturunterschiede, durch Winde und Wellen, durch die vom Mond ausgeübten Gezeitenkräfte, unter Einfluss von Dichtegradienten insbesondere aufgrund variierenden Salzgehaltes, der breiten-abhängigen Stärke und Richtung der auf der rotierenden Erde wirkenden Corioliskraft sowie abhängig von der Art der Küstenkonfigurationen und Tiefenkonturen am Boden der Meeresbecken wird das Meerwasser in Ozeanströmen zyklisch bewegt und gelenkt. **Bild 17a** zeigt den komplexen Verlauf der sich über große Distanzen hinweg ausbreitenden warmen und kalten Oberflächen- und bodennahen Tiefenströmungen in den sieben Weltmeeren, deren Oberflächendichten orts- und zeitabhängig deutlich variieren können. [35]

Der Golfstrom transportiert warmes Wasser an der Oberfläche sowie absinkendes schwereres Wasser in größeren Meerestiefen in eher entgegengesetzter Richtung. Die Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation (AMOC) im Atlantischen Ozean bewirkt, dass warmes Wasser nach Norden und kaltes Wasser nach Süden transportiert wird. Der antarktische Zirkumpolar-Strom ist die größte, sehr wichtige Meeresströmung, die alle Meeresbecken durchzieht und durch ihre Auf- und Ab-Wellungen einen wichtigen Beitrag zum Energieaustausch mit der Atmosphäre bewirkt.

Die Meeresströmungen bestimmen die Temperaturen in den Regionen der Erde, die sie durchströmen und, so die Ausbildung typischer Wettermuster in den unterschiedlichen Klimazonen beeinflussen. Neben den Wassertempera-



15 Durch hochenergetische Sonnenstrahlung, kosmische Strahlung und durch das Leben in der Biosphäre der Erde sowie Vorgänge in der Erdoberfläche verursachte chemische, physikalische und geologische Prozesse, die die Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht und als Folge davon auch die Klimaentwicklung in der Troposphäre beeinflussen. U. v. Kusserow/NASA

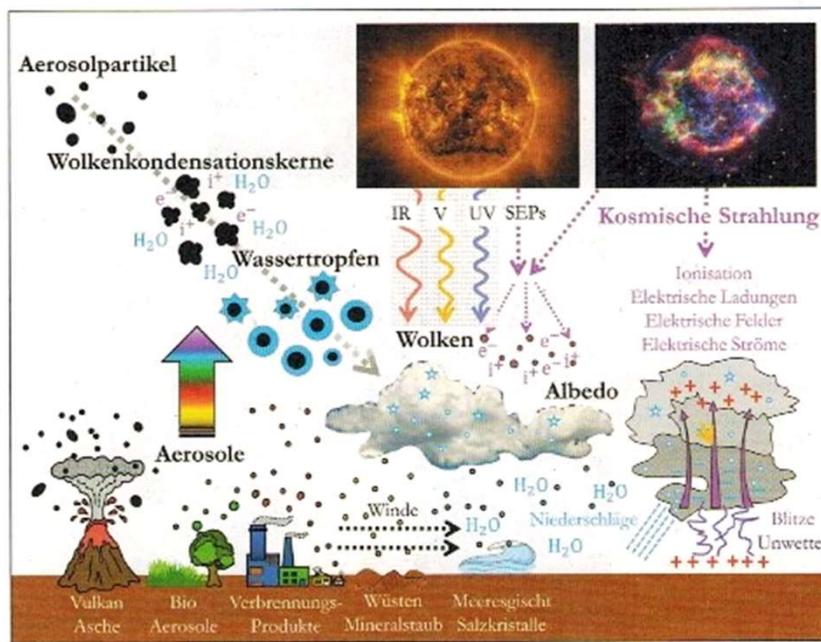
- Der natürliche Aufbau und Abbau von Ozonmolekülen in der Stratosphäre
<https://www.youtube.com/watch?v=OWVtK318G4Q>
- Prof. Dr. Peter Braesicke - Ozon(loch) und Klimawandel <https://www.youtube.com/watch?v=AsaLqWmO2IE>

turen bestimmen vor allem die Windsysteme und Wellen den ozeanischen Temperaturaustausch mit der Atmosphäre. Schmelzende grönlandische und antarktische Eisschilde können Meeresströmungen abkühlen und verlangsamen, was zum einen die atmosphärische Abkühlung in polnäheren Gebieten zur Folge haben kann, zum anderen Nährstoffe zur Unterstützung des klimabeeinflussenden Wachstums von Algen zur Folge hat.

Die einen Großteil der natürlichen Klimavariabilität steuernden Ozeanzyklen sind meteorologische Oszillationen in den Weltmeeren, die in charakteristischen Zeitabständen nahezu zyklisch zwischen zwei Zuständen hin- und herpendeln. So beschreibt die Pazifische Dekaden-Oszillation (PDO) Änderungen der Oberflächentemperaturen des nördlichen Pazifiks gegenüber einem bestimmten Mittelwert. In dem einen Zustand (PDO+) heizt sich die Temperatur an der nordamerikanischen Westküste auf, während sich der Nordwestpazifik abkühlt. Im anderen Zustand (PDO-) sind die Verhältnisse gerade umgekehrt. Im Rhythmus von 60 Jahren wechseln sich diese Tempe-

raturverhältnisse ab, wobei die globalen Temperaturen im Zustand PDO+ besonders stark ansteigen. Die Atlantische Multidekaden-Oszillation (AMO) hat eine ähnliche Zykluslänge, hinkt der PDO aber um 20 Jahre hinterher. Im Zustand PDO+ (PDO-) ist der Nordatlantik auffallend wärmer (kälter). Die AMO nimmt deutlichen Einfluss auf die Sommertemperaturen Europas. Ihre Langzeiterwärmungstrends sind dabei oft mit geringerer Wolkenbedeckung verbunden.

Neben weiteren Ozeanzyklen wie die Arktische Oszillation (AO), die Antarktische Oszillation (AAO), der Südliche Jahres-Mode (SAM), der Indische Ozean-Dipol (IOD) sowie die El Niño/La Niña-Südliche Oszillation (ENSO) (siehe Teil 3 dieser Artikelserie) spielt vor allem auch die Nordatlantische Oszillation (NAO) eine zentrale Rolle für die Klimaentwicklung auf der Erde. Diese für das europäische Klima bedeutsame Oszillation beschreibt den Luftdruckunterschied zwischen dem Island-Tief und dem Azoren-Hoch. Wenn dieser sehr hoch ist (NAO+), dann erreichen die vom Atlantik herkommenden Westwinde Europa weiter im Norden, wodurch die Winter hier wärmer und feuchter



16 Die im Erdsystem in ganz unterschiedlichen Zusammenhängen erzeugten diversen Aerosolpartikel sowie aus dem fernen Universum einströmende hochenergetische, häufiger geladene Partikel sorgen für die Ausbildung von Wolkenkondensationskernen, durch Anlagerung von Wassermolekülen für die Entstehung von Wassertropfen und durch deren Verdichtung schließlich für die Entwicklung von Wolken, die das Erdklima stark beeinflussen. Die Abbildung veranschaulicht die Vielfalt der dafür verantwortlichen Prozesse sowie den Einfluss der kosmischen Strahlung auf die Ionisation der Materie, die Ausbildung elektrischer Felder, das Fließen erdatmosphärischer elektrischer Ströme sowie auf deren möglichen Einfluss auf die Entwicklung von Unwettern, Gewitter und Niederschlägen. U. v. Kusserow/NASA • Wolkenforschung: Das Geheimnis der Aerosole. <https://www.dw.com/de/wolkenforschung-das-geheimnis-der-aerosole/video-18513450> • Henrik Svensmark: Der Zusammenhang zwischen kosmischer Strahlung und Klima <https://www.youtube.com/watch?v=yhr-0kiMIQc>

sind. Bei geringen Druckunterschieden (NAO-) treffen die Westwinde eher im Südwesten Europas aufs Festland. Während es dadurch auf der Iberischen Halbinsel stärker regnet, kann kalte Polarluft bis nach Mittel- und Nordeuropa vordringen. Während die PDO und AMO zeitversetzt beide etwa im 60-Jahres-Takt schwingen, wechselt die vor etwa 100 Jahren entdeckte NAO ihre positiven und negativen Zustände in nur schwach ausgeprägten Zyklen mit unterschiedlichen Perioden zwischen 7 bis 60 Jahren.

Anhand vielfältiger meteorologischer Messdaten wurden der Verlauf, die Periodizitäten für diese unterschiedlichen Oszillationen sowie deren Klimaeinfluss in den verschiedenen Klimazonen zumindest für die vergangenen 150 Jahre recht genau ermittelt. Für die PDO, AMO und NAO konnten mit Hilfe paleoklimatologischer Methoden sogar übergeordnete Langzeittrends für die vergangenen 1000, 1700 bzw. 5000 Jahre gefunden werden. Wenn sich die Wirkungen dieser Zyklen im Verlaufe von

Jahren und Jahrzehnten sowie auf wesentlich größeren Zeiträumen überlagern und untereinander beeinflussen, dann könnten sie relativ systematisch Einfluss auf das Klimageschehen nehmen. So ließe sich beispielsweise die Mittelalterliche Warmzeit dadurch erklären, dass sich die Zustände AMO+ und NAO+ sowie mehrere El-Niño-Ereignisse in diesen Jahrhunderten häufiger überlagerten. Während der Kleinen Eiszeit dominierten dagegen die Zustände AMO-, NAO- und La Niña.

Rund ein Drittel des gesamten Wärmetransports erfolgt in den Ozeanen, zwei Drittel dagegen in der Atmosphäre. In der Troposphäre findet der meridionale Wärmetransport in beiden Hemisphären vom Äquator zu den Polgebieten in jeweils drei Windgürteln, den sogenannten Hadley-, Ferrel- bzw. polaren Zellen statt (**Bild 17b**).

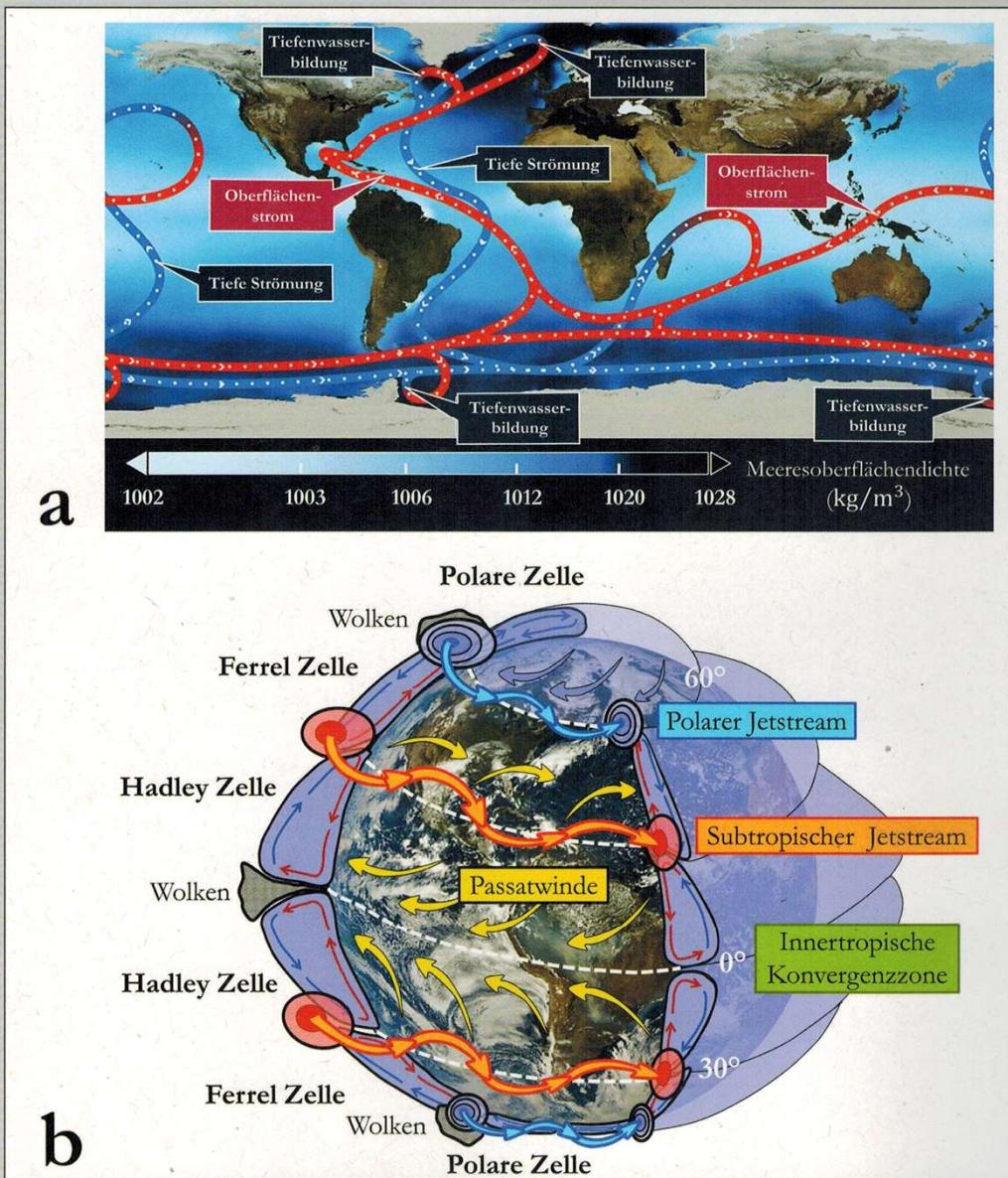
Es war der englische Rechtsanwalt George Hadley (1685–1768), der sich in seiner Freizeit mit Physik und Meteorologie beschäftigte, der 1686 das Auftreten der Passatwinde erklären wollte, mit

dessen Unterstützung Segelschiffe bereits im Mittelalter recht schnell von Europa nach Amerika gelangen konnten. Er stellte dafür eine Theorie auf, bei der die atmosphärischen Strömungsstrukturen in den nach ihm benannten Zellen sowie der Einfluss der Corioliskraft eine zentrale Rolle spielen. Nahe dem Äquator ist die Sonneneinstrahlung am stärksten, wodurch die Erdoberfläche sowie die Luft direkt über ihr besonders intensiv erwärmt wird, an Dichte verliert und dadurch bis in etwa 12 km Höhe aufsteigt. Sie dehnt sich hier aus, bewegt sich in beiden Hemisphären nahezu parallel zur Oberfläche polwärts, kühlte sich dabei zunehmend ab und sinkt bei etwa 30° geographischer Breite verdichtet schließlich zur Erdoberfläche zurück. Während sich am Äquator über einem Tiefdruckgebiet in der aufsteigenden feuchten, sich mit der Höhe abkühlenden Luft Wolken entstehen, erzeugt die bei 30° absinkende trockene Luft ein Hochdruckgebiet. Unter dessen Einfluss strömt die Luft in beiden Hemisphären zurück zum Äquator, wodurch der konvektive Zyklus der Hadley-Zellen in sich geschlossen ist. Unter Einfluss der Corioliskraft wird diese bodennah, zum Äquator zurückströmende Luft nach Westen abgelenkt. Äquatornah treiben diese starken Passatwinde auch die westlich gerichtete Meeresströmung, die die Fahrt der Segelboote zum amerikanischen Kontinent zusätzlich beschleunigt. [36]

Die Polaren Zellen stellen ebenfalls konvektive Wärmetransportssysteme dar, von denen aus verstärkt „kalte“ Infrarotstrahlung in das Weltall entweichen kann. Bei Breitengraden von etwa 60° ist die kühle, relativ trockene Luft noch warm genug, um bis in etwa 8 km Höhe aufzusteigen. Danach strömt die Luft vor allem polwärts, kühlte sich über den Polgebieten stark ab, sinkt dadurch zurück zur Erdoberfläche und erzeugt hier ein Hochdruckgebiet. Sie bewegt sich danach bodennah äquatorwärts und ersetzt bei etwa 60° die hier aufgestiegene Materie. Zwischen 90° und 60° geographischer Breite strömen aufgrund der Corioliskraft auch hier Ostwinde, die nach Westen gerichtet sind.

Während die Hadley- und Polaren Zellen starke Energiequellen bzw. Energiequellen darstellen, der Wärmetransport in ihnen in klar umrissenen Konvektionszellen erfolgt, gilt dies für die dazwischen liegenden, sogenannten

Bild 17 zu unserem Beitrag auf Seite 15



17 Insbesondere auch von der Sonne getriebene Wärmetransportvorgänge in den Weltmeeren und der troposphärischen Erdatmosphäre. **a** Das als thermohaline Zirkulation bezeichnete globale Förderband repräsentiert den Strömungsverlauf des warmen Meerwassers in den Oberflächenbereichen sowie der kalten Meereströmungen in den Tiefenbereichen der fünf Ozeane. Die lokal varierende Dichte des Meerwassers in den unterschiedlichen Meeressbereichen, die neben dem starken Sonneneinfluss durch den jeweiligen Salzgehalt und die speziellen topologischen Strukturen der Kontinente den Kreislauf der Meereströmungen bestimmt, ist in dieser Abbildung farbkodiert dargestellt. **b** Starke Temperaturgradienten zwischen den äquatorialen und polaren Gebieten sorgen für den polwärts gerichteten, weitgehend meridionalen Wärmetransport in den als Hadley-, Ferrel- und Polar- bezeichneten atmosphärischen Konvektionszellen. Auch die in der Atmosphäre der rotierenden Erde dabei induzierten Wolkenbildungsprozesse und gerichtete Windströmungen nehmen starken Einfluss auf das Klima. NASA/GSFC Scientific/U. v. Kusserow, U. v. Kusserow/NASA, • Thermohaline Zirkulation/ Golfstrom / Globales Förderband <https://www.youtube.com/watch?v=WtsCZ7Rglak>
• Atmosphärische Zirkulation – Schulfilm Geographie <https://www.youtube.com/watch?v=DoOts0siRhQ>

Ferrel-Zellen nicht. Die erst 1856 von dem amerikanischen Meteorologen *William Ferrel* (1817–1891) entdeckten wesentlich schwächeren Konvektionsströmungen bewirken in mittleren Breiten zwischen 30° und 60° unregelmäßige Windströme, die von West nach Ost gerichtet sind. Während diese Zonen immer wieder von Hoch- und Tiefdruckgebieten durchlaufen werden, ist dies für Zonen unterhalb von 30° und oberhalb von 60° in der Regel nicht der Fall.

Eigenschaften wie die Höhe und Länge der Hadley-Zellen sowie die Stärke des in ihnen erfolgenden Wärmetransports beeinflussen regionale Klimamuster, Temperaturen und Niederschläge sowie die Verteilung der Wüsten und tropischen Regenwälder. Starke UV-Strahlung der Sonne unterstützt die Verstärkung der Ozonschicht und dadurch die Erwärmung der Stratosphäre, wodurch die Höhe der Hadley-Zellen in der inneren tropischen Konvergenzzone, in der die heftigsten Regenfälle auf der Erde niedergehen, zunimmt. Die Position dieser auch als thermischer Äquator bezeichneten Zone, in der die Hadley-Zellen beider Hemisphären aufeinandertreffen, verändert sich zumindest wetterrelevant im Verlauf der Jahreszeiten in nördlicher bzw. südlicher Richtung. Eine starke Ausdünnung der Ozonschicht bewirkt die Abkühlung der unteren Stratosphäre, wodurch die Hadley-Zellen äquatornah nicht so weit aufsteigen können, der Wärmetransport dadurch früher polwärts umgelenkt wird, die Hadley-Zellen folglich flacher und länger werden, zu höheren Breitengraden vordringen und als Folge davon das Klima auf längeren Zeitskalen merklich verändern können.

Die Ausprägung aller Zirkulationszellen ist nur in Zeiten der Tagundnachtgleiche in beiden Hemisphären weitgehend identisch. Jeweils in Winterzeiten ist der atmosphärische Wärmetransport vom Äquator zum Pol auf der betreffenden Halbkugel jeweils wesentlich stärker als in Sommerzeiten. Generell ist der Wärmetransport in diesen Zirkulationszellen auf der Südhalbkugel aufgrund der im Vergleich zur Nordhalbkugel wesentlich geringeren Landmasse sowie der ausgedehnten antarktischen Eisfläche geringer als auf der Nordhalbkugel, wodurch es in der Antarktis im Mittel 2°C kühler ist als in der Arktis. In der oberen Troposphäre zwischen den Polaren und Ferrel-Zellen sowie

zwischen den Ferrel- und Hadley-Zellen strömen mit den polaren Jetstreams bzw. subtropischen Jetstreams besonders starke Winde, die das Wetter und bei langfristigen Änderungen ihrer Eigenschaften auch das Erdklima nicht nur in ihrer direkten Umgebung massiv beeinflussen können.

Die Hadley- und Polaren Zellen zählen zu den wichtigsten Einflussquellen für das Erdklima. Ebenso spielen Stürme in den mittleren Breiten eine entscheidende Rolle für den Wärmetransport vom Äquator zu den Polen. Auch wenn dieser Transport vermeintlich wenig am Energiegehalt des Klimasystems ändert, so können dessen Veränderungen doch zum Klimawandel beitragen, indem sie die so wichtige atmosphärische Strahlungsbilanz beeinflussen.

Im abschließenden 3. Teil dieser Artikelserie sollen ergänzend zunächst die Einflussfaktoren äquatorialer troposphärischer sowie stratosphärischer, insbesondere auch in Polnähe wirksamer Wärmetransportprozesse auf das Erdklima vorgestellt werden. Ausführlicher geht es danach um verschiedene Klimaeinflüsse des Weltraumwetters, die von Prozessen außerhalb des Sonnensystems, durch Kosmische Strahlung, durch die möglicherweise aufgrund variierender Planetenkonsellationen veränderlichen Magnetfelder der Sonne sowie durch Prozesse in der Magnetosphäre und Ionosphäre der Erde mitbestimmt werden. Es sollen darüber hinaus auch mögliche Einflüsse des auf größeren Zeitskalen wirksamen sogenannten Weltraumklimas erläutert werden, die bereits während der frühen Entwicklung unseres Sonnensystems im Zusammenhang mit dem sogenannten „Faint Young Sun Paradox“ eine klimarelevante Bedeutung auch im Zusammenhang mit der frühen Entwicklung des Lebens in der Erdbiosphäre gehabt haben könnten.

Literatur

- [17] H.-R. Döbel, F. Vahrenholt: Radiative Energy Flux Variation from 2001–2020. *Atmosphere* 2021, 12(10), 1297 <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/10/1297>
- [18] Judd, E. J. et al.: A 485-million year history of Earth's surface temperature. *Science* 385, eadk3705, 2024 <https://henry.pha.jhu.edu/SCIENCE.pdf>
- [19] Neugebauer, F.: Climate Change – A review. 2019 https://www.researchgate.net/publication/333746713_Climate_Change_-_A_review
- [20] Hansen, B.: History of Earth's Climate 7. Holocene. <https://www.dandebat.dk/eng-klima7.htm>
- [21] Schwarz O.: Die Milankovich-Zyklen. Universität Siegen, Didaktik der Physik https://www.physik.uni-siegen.de/didaktik/materialien_offen/milankowitzsch.pdf
- [22] Rickert, T.: Eiszeiten in einem einfachen Klimamodell. Diplomarbeit, IFM-Geomar, Kiel 2010 https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/9250/1/TRickert_Dipl_2010.pdf
- [23] von Kusserow, U.: Sonnenflecken und das Erdklima (1) – Erforschung der variablen Sonnenaktivität. *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* 198, 2025 https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Artikel/UvK_Sonnenflecken_und_das_Erdklima_1.pdf
- [24] Rahmstorf, S.: Klimawandel und CO₂; haben die „Skeptiker“ recht? Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, 2004 https://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/rahmstorf_neu_2004.pdf
- [25] Valone, T. F.: Linear Global Temperature Correlation to Carbon Dioxide Level, Sea Level, and Innovative Solutions to a Projected 6°C Warming by 2100. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol.9 No.3, March 2021 <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=107789>
- [26] Ritter, S. R.: Which Comes First, Or The Heat? Chemical and Engineering News, Volume 87, Issue 51, 2009 <https://cen.acs.org/articles/87/151/Comes-First-CO2-Heat.html>
- [27] Reimer, E.: Strahlungshaushalt und -klima der Erde. Institut für Meteorologie, FU Berlin https://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/trumf/Lehre/Lehrveranstaltungen_alt/modul_luftchemie_ws0809/Strahlung_Klima_ws0809.pdf
- [28] Shan, M.: Analysis on the Influence of Doubled Carbon Dioxide on the Extreme Weather. *Applied and Computational Engineering* 3(1), 2023 https://www.researchgate.net/publication/371455398_Analysis_on_the_Influence_of_Doubled_Carbon_Dioxide_on_the_Extreme_Weather
- [29] Harde, H.: Was trägt CO₂ wirklich zur globalen Erwärmung bei? Spektroskopische Untersuchungen und Modellrechnungen zum Einfluss von H₂O, CO₂, CH₄ und O₃ auf unser Klima. Hamburg 2011 <https://www.thalia.de/shop/home/artikeldetails/A1018504601>
- [30] Wagner, S.: Vulkanismus und Klima in der Vergangenheit: Was lässt sich für die Zukunft lernen? Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG), 2020 https://themen spezial.leskp.de/fileadmin/user_upload/PDFs/vulkanismus/einzelkapitel/4-1-Vulkanismus-und-Klima-der-Vergangenheit.pdf
- [31] Miehle, P. u. a.: Ozonschicht und Ozonloch. IfU Bayern, 2014 https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_48_ozonschicht_ozonloch.pdf
- [32] Lu, Q.-B.: Universal Mechanism for Quantitative Understanding of Global Ozone Depletion, 2022 <https://arxiv.org/pdf/2212.09712>
- [33] Kalisch, J.: Der Einfluss von Wolken auf den Strahlungsantrieb der Erde. Dissertation an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2011 https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/12380/1/JKalisch_Diss_2011.pdf
- [34] Rieger, D.: Der Einfluss von natürlichem Aerosol auf Wolken über Mitteleuropa. KIT Scientific Publishing, 2017 <https://www.ksp.kit.edu/site/books/m/10.5445/KSP/1000069611/>
- [35] Karls, E., Klotz, S.: Meeresströmungen und ihr Klimaeinfluss. Universität Tübingen Geographisches Institut, 2008 https://homepages.uni-tuebingen.de/stefan.klotz/seiten/Klimawandel/C_Petnehazi.pdf
- [36] Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung: Globale atmosphärische Zirkulation [https://www.pik-potsdam.de/~thomas/uni/scripts/Lektion%201%20\(Oekosystem%20Erde\)/Lektion%201.5%20\(Zirkulation\).pdf](https://www.pik-potsdam.de/~thomas/uni/scripts/Lektion%201%20(Oekosystem%20Erde)/Lektion%201.5%20(Zirkulation).pdf)

Ulrich von Kusserow

Besselstr. 32–34
28203 Bremen
E-Mail: uvkusserow@t-online.de