

Unser Klima im Wandel, Teil 1

Die physikalischen Grundlagen

Von Peter Triloff

In den Medien meist spektakulär aufbereitet, werden klimatische Extremereignisse aller Art vor allem von einem Personenkreis mit größerem Erfahrungsschatz unter der Rubrik „das gab es schon immer“ als normale Wetterereignisse eingestuft. Womit sie, auf einen Erfahrungshorizont von etwa 60 Jahren und ihren Standort bezogen, nicht unrecht haben. Zudem leben wir in einer geographischen Zone mit bislang nur seltenem Auftreten von Wetterextremen, so dass die großen Wetterkatastrophen immer noch weit entfernt von uns stattfinden. Aber unser für lange Zeiträume ungeeignetes Zeitgefühl ist für die Einordnung der um uns herum auftretenden – zudem auch noch bekannten – klimatischen Ausnahme-Ereignisse in den erforderlichen größeren Zeitrahmen doch ein Hindernis, da unser Zeitgefühl keine gute statistische Funktion hat. Vor diesem Hintergrund ist das Wetter, über längere Zeiträume das Klima, sowie dessen Änderung, ein Klimawandel, nach wie vor ein vortreffliches Streitthema. Daher scheint sich ein möglicher Klimawandel, wenn er nicht schon zum Klischee verkommen ist, vielen als ein eher positives, fernes Zukunftsszenario zu präsentieren, mit längeren, gemütlich wärmeren Sommern, mehr Urlaubsstimmung und ein paar Wirbelstürmen und Überschwemmungen weit weg, die es zudem immer schon gegeben hat. Auf jeden Fall nichts Beunruhigendes.

Der Öffentlichkeit weitgehend unbekannt, besteht bei allen mit historischem, aktuellem und zukünftigem Klima verbundenen Wissenschaften einhelliger Konsens, daß diese „normalen“ Einzelereignisse in ihrer zunehmenden Häufigkeit und Stärke die Vorboten einer tiefgreifenden Änderung der Lebensbedingungen auf diesem Planeten sind, dem sich nichts und niemand entziehen kann. Und die nicht als Laune der Natur aus dem Nichts über uns hereinbricht, sondern direkte Folge des Lebensstils einer Minderheit der Weltbevölkerung (20%) mit deren gigantischen Energieverbrauch (80%) durch Verbrennung von Kohlenstoff ist. Komplettiert durch hemmungslosen Raubbau aller ökonomisch sinnvoll greifbarer Ressourcen, deren Plünderung mitsamt Auswirkungen durch die immer großräumigere Trennung von Produktion und Konsum, d.h. der Globalisierung, dem Konsumenten in unseren reichen Ländern vorenthalten wird. Entsetzen

bereitet ihm höchstens noch der Tauschakt Ware gegen Geld.

In den folgenden vier Ausgaben des Hoyboten soll der Zustand des Klimas – stark gerafft und emotionslos – mit Hintergründen, Auswirkungen und ev. Gegenmaßnahmen beleuchtet werden, wobei schließlich besonderes Gewicht auf die lokale Situation gelegt werden soll, um dem Thema die Attribute des „Abstrakten“ und „Fernen“ und „Unabänderlichen“ zu nehmen. Quellenangaben am Ende der Serie.

Ändert sich die CO₂-Konzentration, ...

Seit Beginn der industriellen Revolution Mitte des 19. Jahrhundert haben die sich entwickelnden Gesellschaften ihren Energiebedarf aus dem Verbrennen von in der frühen Erdgeschichte in der Erdkruste eingelagertem Kohlenstoff und seinen Verbindungen mit Wasserstoff (Kohle, fossile Kohlenwasserstoffe) gedeckt. Von der gesamten, seit dieser Zeit verbrauchten Energieform wurde die Hälfte aber erst in den letzten 20 Jahren verbraucht! Das Hauptendprodukt dieser Verbrennung ist Kohlendioxid (CO₂); die momentan jährlich weltweit in die Atmosphäre abgegebene Menge des Gases liegt bei etwa 30 Milliarden Tonnen, entsprechend etwa 8,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Ca. 2,2 Milliarden Tonnen davon sind Folge von Brandrodung und Umwandlung von Grün- in Ackerland, etwa 6,3 Milliarden Tonnen Folge der Verbrennung fossiler Energieträger. Diesem aktuellen Jahresverbrauch steht ungefähr 1 Million Jahre an Wachstum der dafür nötigen organischen Ausgangsstoffe gegenüber. Statistisch bleibt ein CO₂-Molekül ca. 120 Jahre in der Atmosphäre.

Die jährliche deutsche Emission liegt bei 900 Millionen Tonnen, ist die höchste in der EU, die sechsthöchste nach den USA, China, Russland, Indien und Japan und fast soviel, wie Afrika oder Südamerika produzieren. Wir sind also einer der absoluten Hauptverschmutzer der Atmosphäre mit CO₂. Beim pro Kopf-Ausstoß im Jahr (Gesamtbevölkerung) liegen wir mit ca. 10 Tonnen im Mittelfeld, während Australien, die USA, Norwegen, Saudi-Arabien und die Vereinigten Arabischen Emirate Spitzenreiter mit ca. 20 to pro Kopf sind. Ohne einen Nutzen verbrennen in China derzeit riesige Mengen Kohle pro Jahr durch Selbst-

entzündung, weil die Flöze knapp unter der Oberfläche liegen und durch Schwarzabbau in Kontakt mit Sauerstoff kommen. Am meisten CO_2 entsteht mit 3,5 kg/kg bei der Verbrennung von Kohle, gefolgt von Öl mit ca. 2,5 kg/kg und Methan (Erdgas) mit etwa 1,9 kg/kg. Momentan befinden sich 56% aller von Menschen je produzierten CO_2 noch in der Atmosphäre, so daß deren Gehalt von 0,028 % (280 ppm) zu Beginn der industriellen Revolution auf heute 0,038 % (380 ppm) um 36% gestiegen ist, der höchste Wert seit mindestens 700.000 Jahren, wahrscheinlich sogar seit mehreren Millionen Jahren. Die Zunahme liegt bei knapp 2 ppm/Jahr. Von der emittierten Menge werden ca. 3 Milliarden Tonnen pro Jahr von den Ozeanen aufgenommen und haben inzwischen zu einer meßbaren Versauerung des Meerwassers um ca. 0,1 pH-Einheiten geführt.

Woran liegt es nun, daß CO_2 so wichtig für das Klima ist? Das Molekül hat die Eigenschaft, für Licht durchlässig zu sein, Wärmestrahlung aber aufzunehmen und in alle Richtungen wieder abzustrahlen, wodurch die Luft erwärmt wird. Genau dieses macht das CO_2 in der unteren Atmosphäre: das Sonnenlicht gelangt ungehindert bis auf die Erdoberfläche und erwärmt diese. Die erwärmte Oberfläche gibt diese als Wärmestrahlung ab, die das CO_2 aufnimmt und damit zu einer Erwärmung der Luft führt, ähnlich den Glasscheiben im Auto oder einem Treibhaus. Ohne diesen Effekt läge die globale Durchschnittstemperatur aufgrund physikalischer Gesetze bei -18°C ; die vorindustrielle Konzentration von 280 ppm entsprach einer Erwärmung um 33°C , was der damaligen globalen Durchschnittstemperatur von $13,7^\circ\text{C}$ entsprechen hat.

Ein steigender CO_2 -Gehalt führt aufgrund o.g. Eigenschaften des Moleküls zu einem Ungleichgewicht zwischen von der Sonne ankommender und in den Weltraum abgehender Energie, mit der Folge, daß die Atmosphäre sich erwärmt. Ein Gleichgewicht wird erst wieder erreicht, wenn längere Zeit kein zusätzliches CO_2 mehr dazukommt. Dieses Energie-Ungleichgewicht beträgt zur Zeit $0,85 \text{ Watt/m}^2$ Erdoberfläche und stellt den zusätzlichen Treibhauseffekt dar, mit dem das in die Atmosphäre emittierte CO_2 diese erwärmt. Ein natürlicher Beitrag zur atmosphärischen Erwärmung z.B. durch erhöhte Sonnenaktivität seit Mitte des letzten Jahrhunderts ist nicht erkennbar, da deren Intensität in den letzten 65 Jahren unverändert geblieben ist, während die Temperatur gestiegen ist.

Um den Einfluß der CO_2 -Konzentration auf das Klima zu beschreiben, wird eine Maßzahl verwendet, die Klimasensitivität. Sie beschreibt die Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur bei einer Verdoppelung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration. Der wahrscheinlichste und sich immer mehr bestätigende Wert

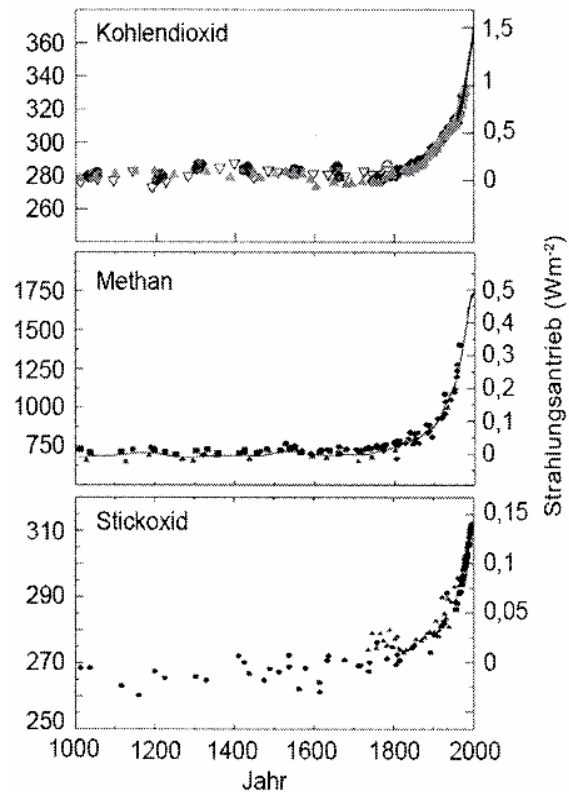


Abb 1.: Verlauf der Konzentration wichtiger Treibhausgase in den letzten 1000 Jahren Quelle: Rahmstorf

dafür liegt bei 3°C , in dem der kühlende Effekt von Aerosolen (Ruß, Staub, Schwefel, etc.; ihre starke Zunahme hat in den letzten 3 Jahrzehnten zu einer teils über 20%igen Abnahme des auf der Erde ankommenden Sonnenlichts geführt) bereits enthalten ist. Das heißt, die Verdoppelung der CO_2 -Konzentration führt zu einer Netto-Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um ca. 3°C .

Das CO_2 ist damit der Thermostat der Erde, die Ozeane als „Kühlflüssigkeit“ verzögern die Auswirkungen seiner Einstellung, verhindern sie aber nicht. Neben CO_2 sind noch Methan und Stickoxide bedeutende Treibhausgase, deren Konzentration in den letzten Dekaden ebenfalls stark zugenommen hat. Ihre Wirkung wird in der Regel in CO_2 -Äquivalenten ausgedrückt. Wasserdampf als stärkstes Treibhausgas wird nicht berücksichtigt, da der gesamte Wassergehalt der Atmosphäre in 10 Tagen ausgetauscht und durch unsere Aktivitäten nicht direkt erhöht wird.

Der Zusammenhang von CO₂-Gehalt und Temperatur wurde vielfach belegt durch Daten aus Eisbohrkernen und Sedimenten vom Meeresboden, die zeigen, daß die CO₂-Konzentration in der letzten Warmphase der Erde (Kreidezeit) bis weit über 1000 ppm und in den Eiszeiten danach unter 200 ppm betragen hat. Seit der letzten Phase der Kreidezeit (-100 Mio. Jahre) ist der CO₂-Gehalt über einen langfristigen Regelkreis stetig abgesunken und hat die Erde in den letzten zwei Millionen Jahren in eine neue Eiszeitperiode geführt. Diese 100 Millionen Jahre andauernde Abkühlung wurde durch einen „Unfall“ vor ca. 55 Mio. Jahren unterbrochen. Neuesten Erkenntnissen zufolge kam es im nördlichen Atlantik höchstwahrscheinlich zu einem vulkanischen Riss in der Erdkruste und in der Folge zu einem Kontakt einer Methan-Lagerstätte mit Magma, bei dem in kürzester Zeit enorme Mengen CO₂ in die Atmosphäre gelangten. Der heutige Anstieg der CO₂-Konzentration scheint dem damaligen an Intensität und Geschwindigkeit nicht unähnlich und lässt deshalb Rückschlüsse auf die weitere Entwicklung des heutigen Klimas zu. Damals ist die globale Durchschnittstemperatur in wahrscheinlich nur wenigen Jahrhunderten um 5 – 6°C gestiegen und hat zum Aussterben von ca. 70% aller Tier- und Pflanzenarten in den Ozeanen und an Land geführt; die Saurier waren auch mit dabei. Ca. 500.000 Jahre später war der klimatische Ausgangszustand wieder erreicht.

Durch die in den letzten 2 Mio. Jahren CO₂-bedingt langsam abgesunkenen Temperaturen konnten die Auswirkungen der drei zyklischen Schwankungen (Milankovitch-Zyklen) von Erdbahn und -lage auf die Sonneneinstrahlung (die Erde eiert wie ein Kreisel) zu kräftigen Vereisungen mit eingelagerten Warmphasen führen. In den letzten 350.000 Jahren - so weit zurück reicht der Wostok-Eisbohrkern aus der Antarktis - kam es zu drei Eiszeiten, in deren Verlauf auch der CO₂-Gehalt schwankte; er ist in dieser Zeit aber nie über 300 ppm (80 ppm niedriger als heute) gestiegen. Verblüffend ist dabei der stark synchrone Verlauf von CO₂-Konzentration und Temperatur (Abb. 1).

Etwa 20 kurzfristige, kräftige Klimaänderungen ohne große Schwankungen im CO₂-Gehalt entstanden in der letzten Eiszeit vor 20.000 – 10.000 Jahren durch abrupte Änderungen von Meeresströmungen wie des Golfstroms und belegen deren Labilität. Eine letzte starke Abkühlung im Nordatlantik (mit Europa) vor etwa 8000 Jahren wurde durch das Brechen eines Eisdammes aus der Eiszeit in Nordamerika ausgelöst, durch den sich ein riesiger Schmelzwassersee (seine Reste sind die Großen Seen) in den Nordatlantik ergossen hat, was zu einer Unterbrechung des Golfstroms führte. Meeresströmungen können durch Süßwasser unterbrochen werden, da sie durch Unterschiede von Temperatur und Salzgehalt angetrieben werden und eine Verdünnung mit Süßwasser das Meerwasser leichter macht, was dessen Absinken in die Tiefsee und damit die Zirkulation vermindert.

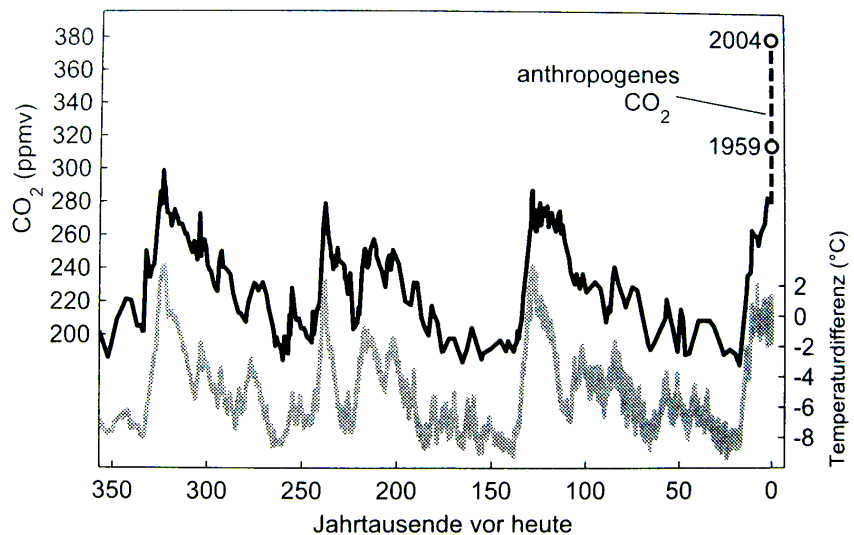


Abb. 1: Verlauf der CO₂-Konzentration (schwarze Linie) in der Atmosphäre in den letzten 350.000 Jahren bis zum Jahr 2004 (gestrichelte, schwarze Linie = vom Menschen verursachte Entwicklung seit Mitte des 19. Jahrhunderts; graue Linie = Temperaturänderung in der Antarktis relativ zu heute)

An diesem Punkt sind in fast unerlaubter Kürze die wesentlichsten physikalischen Faktoren bestimmt, nach denen Treibhausgase (hauptsächlich CO₂) die globale Durchschnittstemperatur und damit das Klima beeinflussen: über den CO₂-Gehalt der Atmosphäre mit den Ozeanen als Puffer. Der Regelkreis, der dahinter steckt: ändert sich die Temperatur, folgt die CO₂-Konzentration - ändert sich die CO₂-Konzentration, so folgt die Temperatur. Kleinräumiger wird das Klima durch Meeresströmungen bestimmt.

Dieser physikalische Zusammenhang hat zu einer Entwicklung der Durchschnittstemperatur auf der Nordhalbkugel geführt, wie sie Abb. 2 darstellt. Daran ist ersichtlich, dass diese seit Mitte des 19. Jahrhunderts

bis zum Jahr 2000 um $0,6^{\circ}\text{C}$ gestiegen ist und gerade den Höchstwert des Schwankungsbereiches der letzten zwei bis drei Millionen Jahre unter sich läßt. Der sich ab 2000 in mehrere Linien auffächernde Verlauf bis 2100 zeigt die Entwicklung bei unterschiedlicher Zunahme der CO_2 -Konzentration; der graue Bereich markiert die Schwankungsbreite. Danach wird eine Zunahme der Durchschnittstemperatur bis zum Jahr 2100 bei mindestens $1,5^{\circ}\text{C}$, d.h. knapp dem Dreifachen der bisherigen Zunahme, erwartet; 3°C gelten als der wahrscheinlichste Wert und eine Zunahme um mehr als $5,8^{\circ}\text{C}$ - das 10-fache der bisherigen Zunahme - ist wenig wahrscheinlich. Aus der Entwicklung bis zum Jahr 2000 muß auch geschlossen werden, dass die bisher weltweit beobachteten, temperaturbedingten Veränderungen durch die Erwärmung von nur $0,6^{\circ}\text{C}$ verursacht wurden. Diese ist dabei nur ein durchschnittlicher Wert, die tatsächlichen Änderungen können aufgrund vieler weiterer, meist regionaler Einflüsse gebietsweise wesentlich höher, aber auch deutlich tiefer liegen. Die Reaktionszeit der globalen Durchschnittstemperatur wird mit etwa 40 Jahren angegeben, so dass der jetzige Wert den CO_2 -Emissionen bis in die 60er Jahre des letzten Jahrhunderts entspricht. Die Reaktion erfolgt also mit einiger Verzögerung und das zusätzliche CO_2 der nachfolgenden 40 Jahre ist bereits in der Atmosphäre; wird also für mindestens nochmals 40 Jahre zu einer weiteren Erwärmung führen, selbst wenn ab morgen kein CO_2 mehr emittiert würde. Wenn ab heute für eine globale Umstellung auf kohlenstofffreie Energieträger dann noch weitere 50 Jahre angenommen werden, dürfte der Einfluß des CO_2 auf den Temperaturanstieg gegen Ende des Jahrhunderts beginnen, abzunehmen.

Entwicklung der mittleren bodennahen Lufttemperaturen der Nordhemisphäre in den letzten 1000 Jahren (als Abweichung vom Basisjahr 1990)

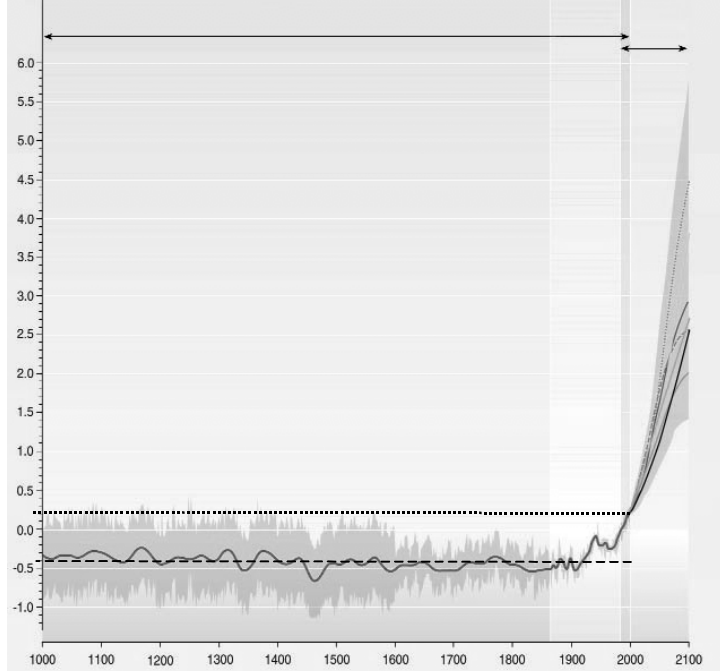


Abb 2: Der Verlauf der Durchschnittstemperatur der Nordhemisphäre in den letzten 1000 Jahren (wellige schwarze Linie) mit den möglichen Entwicklungen bis zum Jahr 2100, dargestellt an der Abweichung zum Bezugsjahr 1990 ($0,0^{\circ}\text{C}$ Änderung); grob gestrichelte Linie = Durchschnittstemperatur bis 1900; fein gestrichelte Linie = heutige globale Durchschnittstemperatur

Im zweiten Teil: Unser Klima im Wandel: Von globalen Veränderungen und Entwicklungen