

Klima und Klimafolgen

Kurzfassung zur Ringvorlesung am 6. Juli 2015

Die beobachtete globale Perspektive

Klimawandel in der fernen Vergangenheit: Paläoklimatologie

Das Klima hat sich in der Erdgeschichte häufig geändert. Es gab große Ereignisse wie Eis- und Warmzeiten über tausende Jahre und kleinere Schwankungen über mehrere Jahrhunderte. Informationen aus Eisbohrkernen zeigen die Ursachen für diese Klimaänderungen. Wenn Eis aus mehreren Kilometern Tiefe untersucht wird, enthalten das Eis selbst sowie die darin enthaltenen Luftbläschen wertvolle Informationen über den Zustand der Atmosphäre zum Zeitpunkt, als das Eis an dem Ort gebildet wurde. Die verschiedenen Eisschichten in einem Eisbohrkern erzählen eine Geschichte über beispielsweise die Menge des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) und lassen somit Aussagen über dessen zeitliche Änderung zu. Die chemische Zusammensetzung weiterer Elemente im Eis ermöglicht eine Abschätzung der Temperatur der Atmosphäre. So lassen sich Änderungen der Temperatur auf der Erde bestimmen. Bei einem Vergleich dieser Temperaturkurve der letzten 600.000 Jahre mit einer Kurve des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre wurde festgestellt, dass in Zeiten einer hohen globalen Mitteltemperatur auch der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre hoch war (280 ppm¹). Bei niedrigeren Temperaturen ist der Kohlendioxidgehalt dementsprechend niedrig (180 ppm). Die Eis- und Warmzeiten hatten eine Dauer von mehreren zehntausend bis hunderttausend Jahren.

Ursachen der Erwärmung

Eine Änderung der Temperatur und somit auch des Klimas hängt von vielen Faktoren ab. Einerseits gibt es sogenannte externe Faktoren, wie beispielsweise die Sonnenaktivität, aber auch die Neigung der Erdachse. Zweitens findet man auf der Erde viele Faktoren, die über kurz oder lang für ein Gleichgewicht des Klimas sorgen. Dabei wäre zu denken an die Oberfläche der Erde (dunkle Wälder absorbieren mehr Sonnenstrahlung als beispielsweise weißer Sand) und die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre (welche und wie viele Treibhausgase sind vorhanden). Jeder dieser Faktoren, sowohl extern als intern, wirkt auf einer bestimmten Zeitskala. Das heißt z. B. für die Neigung der Erdachse, dass sie für uns Menschen praktisch keine Rolle spielt, weil die Neigung sich nur über tausende Jahre hinweg verändert. Im Gegensatz dazu ist die Lebensdauer von einigen Treibhausgasen mit nur einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten relativ kurz. Und gerade diese Treibhausgase spielen eine entscheidende Rolle für die momentan beobachtete Klimaänderung.

Es ist schon seit über einem Jahrhundert bekannt, dass neben Wasserdampf die wichtigsten Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) sind. Ohne Treibhausgase würde die Durchschnittstemperatur auf Erde mit -18 °C deutlich niedriger als heute mit ca. +15 °C liegen (natürlicher Treibhauseffekt). Die genaue absolute Temperatur ist dabei nicht entscheidend. Hauptsache ist, dass die Treibhausgase für einen Temperaturanstieg sorgen. Nun sind die Treibhausgase in sehr geringen Mengen in unserer Atmosphäre vorhanden. Ein Anstieg dieser Gase führt deswegen schon schnell zu einem zusätzlichen Temperaturanstieg (anthropogener, bzw. vom Menschen verursachter Treibhauseffekt). Und genau das ist, was in den letzten grob 150 Jahren passiert ist. Seit der industriellen Revolution Mitte des 19. Jahrhunderts wurden sehr große Mengen an Treibhausgasen (vor allem CO₂) in die Atmosphäre ausgestoßen. Dadurch stieg die Konzentration von CO₂ von 280 auf mittlerweile knapp 390 ppm. Eine solche hohe Konzentration gab es in den letzten 600.000 Jahren nicht. Wenn man nun bedenkt, dass die Konzentration von Treibhausgasen eine direkte Auswirkung auf den Anstieg der Durchschnittstemperatur auf der Erde hat, müsste diese auch ansteigen. Dies passiert. Konnte man bis Anfang des 20. Jahrhunderts die Schwankungen der Temperatur gut aus beispielsweise dem Einfluss der Sonne, der Neigung der Erdachse, oder Vulkanausbrüchen herleiten, geht dies jetzt nur noch zum Teil. Der Anstieg der Durchschnittstemperatur lässt sich hauptsächlich auf die

¹ ppm: „parts per million“ (Teilchen pro millionen Teilchen Luft)

erhöhte Konzentration der Treibhausgase sowie, in geringerem Maße, auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen.

Die beobachtete regionale Perspektive

Deutschlandweite Beobachtungen

In Deutschland hat sich die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur von Anfang des 19. Jahrhundert bis jetzt um knapp 1,0 °C erhöht. Laut dem Deutschen Wetterdienst (DWD) war darin das Jahrzehnt von 2000 bis 2009 mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9,4 °C die wärmste Dekade seit mindestens 130 Jahren. Dabei ist der beobachtete Temperaturanstieg im Südwesten Deutschlands besonders hoch. Selbst das „kühlste“ Jahr dieser Dekade, 2004, lag mit einer Durchschnittstemperatur von 9,0 °C deutlich über dem langjährigen klimatologischen Mittel (1961 – 1990) für Deutschland von 8,2 °C.

Zu berücksichtigen ist, dass der Temperaturanstieg in den verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich stark ausfällt: Für die Temperaturen im Frühling zeigen die Auswertungen des DWD einen geringeren Anstieg als im Jahresmittel. Trotzdem waren die Frühjahre seit 1990 besonders warm. Gleich sechs davon gehören zu den zehn wärmsten seit Beginn der Aufzeichnung. Erheblich mehr tragen die Sommertemperaturen zum Trend in der Jahresmitteltemperatur bei. Im Sommer wurde nämlich einen statistisch signifikanter Anstieg von ca. 1,1 °C beobachtet. Ein Beispiel eines sehr heißen Sommers war der Sommer 2003. Dieser „Jahrhundertssommer“ war im Mittel um mehr als 1 °C wärmer als alle bisherigen Sommer seit 1901. In Karlsruhe wurde am 13. August 2003 eine Rekordtemperatur von 40,2 °C beobachtet. Nicht nur im Sommer 2003, sondern in allen Sommern ab 2000 lagen die Mitteltemperaturen immer über dem klimatologischen Durchschnitt. Vier der zehn wärmsten Sommer traten ebenfalls ab 2000 auf.

Bei der Entstehung von Niederschlag spielt eine Vielzahl an Prozessen auf unterschiedlicher Skala eine Rolle. Deswegen ist es schwierig, einen signifikanten Trend für Niederschlag abzuleiten. Trotzdem lassen sich auch beim Niederschlag Veränderungen beobachten. Gegenüber dem Beginn des 20. Jahrhunderts ist das Gebietsmittel der jährlichen Niederschlagsmenge in Deutschland für die Jahre 1901 bis 2008 um etwa 10 % angestiegen. Die beiden ersten Dekaden des 20. Jahrhunderts waren allerdings vergleichsweise trocken und beeinflussen das Ergebnis stark. Übers Jahr betrachtet hat vor allem im Frühjahr die Menge an Niederschlag zugenommen. Für den Monat März beispielsweise wurde für den 108-jährigen Betrachtungszeitraum gegenüber dem entsprechenden langjährigen Monatsmittel (1961 bis 1990) eine mittlere Zunahme um 34 % beobachtet. Im Sommer ergibt sich insgesamt kein wesentlicher Trend. Allerdings hat sich die Verteilung der Niederschlagsmengen innerhalb der Sommermonate geändert: geringeren Niederschlagsmengen im Juli und August stehen stärkere Niederschläge im Juni gegenüber. Die Winterniederschläge nahmen dagegen generell um 19 % zu.

Beobachtungen in Baden-Württemberg

Die Jahresmitteltemperatur in Baden-Württemberg stieg seit Anfang des 19. Jahrhunderts bis Anfang des 20. Jahrhundert von ca. 8°C auf über 9°C an. Analog zur Bundesebene erfolgte der größte Anstieg in den letzten 30 Jahren.

Weitere Ergebnisse stehen im „Monitoringbericht 2011“ des Kooperationsvorhabens KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland Pfalz zur Verfügung. Für den Bericht, der alle fünf Jahre aktualisiert wird, wurden alleine in Baden-Württemberg Beobachtungsdaten von rund 250 Wetterstationen ab 1931 ausgewertet. Der durchschnittliche Temperaturanstieg im Beobachtungszeitraum 1931 bis 2000 lag bei ca. 0,8 °C, im Zeitraum 1931 bis 2010 allerdings schon bei ca. 1,1 °C. In den letzten zehn Jahren lagen zudem nahezu alle Jahresmitteltemperaturen erheblich über dem langjährigen Mittelwert, der sich auf den Zeitraum 1961 bis 1990 bezieht. Eine Ausnahme stellt lediglich das Jahr 2010 dar. Der Bericht zeigt auch, dass die Erhöhung der durchschnittlichen Lufttemperatur in den Sommermonaten in den letzten Jahren deutlich stärker ausgefallen ist als in den Wintermonaten.

Ein Trend wie in den Temperaturdaten in Baden-Württemberg ist in den Niederschlagsdaten nicht feststellbar. Für eine komplexe Variable wie den Niederschlag ist eine Periode von zehn Jahren eindeutig zu kurz. Einzig wurde seit 1931 im Winterhalbjahr ein Anstieg der mittleren Niederschlagshöhe um ca. 25 % beobachtet. Im Sommerhalbjahr hingegen ist die Veränderung der Niederschlagshöhe eher gering.

Beobachtungen in Karlsruhe

In Karlsruhe wurde ebenfalls einen signifikanten Trend im Anstieg der Jahresmitteltemperaturen beobachtet. Mit Ausnahme von 1996 und 2010 lagen in Karlsruhe seit 1990 alle Jahre, und das meist deutlich, über dem langjährigen Mittel der Jahre 1961 bis 1990.

Besonders eindrücklich ist die gegenläufige Entwicklung bei klimatischen Kennwerten für das Sommer- und Winterhalbjahr. Seit 1878 hat sich die Anzahl der Sommertage (Tagesmaximumtemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$) in Karlsruhe nahezu verdoppelt. Die Anzahl der Eistage (Tagesmaximumtemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$) hat sich im gleichen Zeitraum dagegen halbiert.

Das zukünftige Klima

Szenarien für die Zukunft – Klimamodelle

Generell können Klimamodelle die klimatischen Gegebenheiten und Entwicklungen gut abbilden und bieten die Möglichkeit, das mögliche Klima der Zukunft abzuschätzen. Viele physikalische Prozesse im Klimasystem sind gut verstanden und können daher auch im Modell gut parametrisiert werden. Globale Klimamodelle erlauben dank der umfassenden Abdeckung der Erde Projektionen, welche übergeordneten Entwicklungen in unterschiedlichen Klimazonen zu erwarten sind. Regionale Klimamodelle erlauben aufgrund ihrer hohen Auflösung hingegen eine kleinräumig detaillierte Darstellung für spezifische Fragestellungen.

Einschränkungen in der Aussagekraft von Klimamodellen ergeben sich zum einen daraus, dass manche Prozesse und Rückkopplungen im Erdsystem noch nicht umfassend verstanden sind. Forschungsbedarf besteht beispielsweise noch bezüglich der Auswirkung der Klimaänderung auf den Austausch zwischen Treibhausgasen und der Biosphäre oder zwischen Wolken und dem Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Interne Rückkopplungen können zur Folge haben, dass sich aus kleinen Änderungen der Anfangsbedingungen große Unterschiede in der Modellrechnung ergeben. Zum anderen bewirkt die interne Variabilität des Klimasystems, dass nichtlineare Prozesse Klimaentwicklungen beeinflussen und damit Projektionen erschweren. Außerdem können zufällige Antriebe wie Vulkanismus das Klima zeitweise beeinflussen.

Um die gesamte Bandbreite möglicher Entwicklungen des Klimas zu berücksichtigen, werden mehrere Klimasimulationen durchgeführt, so genannte Ensembles. Diese werden entweder gebildet, indem verschiedene Klimamodelle die gleichen Antriebsdaten benutzen, oder indem ein regionales Klimamodell unterschiedliche Globalmodelle oder unterschiedliche Läufe (Realisierungen) eines Globalmodells heranzieht.

Zu berücksichtigen bleibt außerdem, dass die Modellrechnungen für die Zukunft auf Szenarien bezüglich der Entwicklung der Treibhausgase beruhen und daher von den in den Szenarien gemachten Annahmen abhängen.

Wesentliche Auswirkungen und Folgen

Abhängig von der Höhe des Temperaturanstiegs ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen. Ein prominentes Beispiel ist das Abschmelzen der Polkappen. Vor allem in der Arktis beobachtet man seit mehreren Dekaden eine Abnahme des Meereises. Diese Abnahme ist sogar noch rasanter als es von den Klimamodellen erwartet wurde. Ein anderes Beispiel ist, dass die Verdunstung von Wasser stark temperaturabhängig ist, wodurch sich weltweit die Niederschläge ändern. Eine Schwierigkeit bei der Betrachtung von Niederschlägen ist allerdings, dass die Verteilung des Niederschlags regional und zeitlich stark variiert, auch ohne Klimawandel. Bevor also von einem Niederschlagstrend, sowohl nach oben als nach unten, die Rede sein kann, bedarf es langen Beobachtungsreihen oder Modellsimulationen. Es ist zu erwarten, dass sich die Menge des Jahresniederschlags in Deutschland zwar kaum, die Verteilung der Niederschläge übers Jahr hinweg allerdings schon ändert. Es wird erwartet, dass sich im Winter die Niederschlagsmenge erhöhen wird, während im Sommer dagegen in Zusammenhang mit längeren Trockenperioden die Menge eher abnehmen wird. Eine indirekte Folge von längeren Trockenperioden wäre die Austrocknung der Böden. Dies bedeutet, dass, wenn es nach längerer Zeit zu regnen anfängt, der Boden kaum Wasser aufnehmen kann. Das Risiko für Überschwemmungen nimmt also zwangsläufig zu.

Die Ungerechtigkeiten im Treibhaus Erde

Der momentane Klimawandel findet weltweit statt. Nur sind die Auswirkungen des Klimawandels nicht immer über gleich. Das heißt, dass es Gebiete auf Erde gibt, wo relativ wenige Änderungen zu spüren sein

werden und Gebiete, wo das Gegenteil der Fall ist. Vor allem Gebiete mit sowieso schon vielen existenziellen Problemen, werden den Klimawandel besonders zu spüren bekommen. Beispielsweise gibt es große Teile Afrikas, in welchen auch ohne Klimawandel kaum Wasser zur Verfügung steht. Eine Änderung der Niederschlagsverteilung würde den täglichen Kampf ums Wasser deswegen verschärfen.

In Bezug auf den Meeresspiegelanstieg gibt es zwar viele mögliche Entwicklungen, von einem Anstieg ist aber immer die Rede. Weitaus der größte Teil der Menschheit lebt in Küstenregionen. Wenn nicht für ausreichend Schutz gesorgt wird, werden sehr viele Menschen die Auswirkungen des Klimawandels zu spüren bekommen. In den westlichen Ländern sind genügend finanzielle Mittel vorhanden, sich vorerst für diesen Anstieg zu schützen. Viele Länder haben aber diese Mittel nicht, brauchen aber Anpassungsmaßnahmen. Eine Migration eines Teils der Weltbevölkerung scheint hier unausweichlich, was eine zusätzliche Belastung für die politische Agenda vieler Länder wäre.

Die ökonomische Dimension des Klimawandels

Der Klimawandel hat große volkswirtschaftliche Auswirkungen. Wenn extreme Wetterereignisse wie Stürme, Hagel oder Überschwemmungen häufiger und intensiver auftreten, steigt damit zwangsläufig das Risiko für Schäden an Gebäuden, Fahrzeugen oder in der Land- und Forstwirtschaft an.

Die Schwierigkeit mit Extremereignissen ist, dass sie nur selten auftreten. Für die Analyse eines Ereignisses bräuchte man also sehr lange Zeitreihen, um genügend Ereignisse zu erfassen. Ein hundertjähriges Ereignis tritt eben im Schnitt über viele Hunderte von Jahren einmal pro Jahrhundert auf. Das heißt im Umkehrschluss aber nicht, dass, wenn zwei „Jahrhundert-Ereignisse“ innerhalb eines Jahrhunderts auftreten, diese Ereignisse öfter auftreten. Eine ausreichend lange Zeitreihe für statistische Aussagen ist oft nicht vorhanden, wodurch die Aussage über Zu- oder Abnahme eines Ereignisses unsicher wird.

Klimamodelle sind mittlerweile recht gut in der Lage, die Häufigkeit von Ereignissen in der Vergangenheit wiederzugeben. Diese gleichen Modelle erwarten nun für die Zukunft eher eine Zunahme der Extremereignisse. Da solche Ereignisse regional sehr unterschiedlich auftreten, ist eine Zunahme weltweit nicht im gleichen Umfang zu erwarten. Welche Ereignisse wo, wann und wie viel zunehmen werden, bedarf noch viel Forschung.

Konsens ohne Konsequenz: Das 2-Grad-Ziel

Die internationale Klimapolitik versucht die Ziele beim Klimaschutz in einem gemeinsamen Abkommen festzulegen. Ein erster wichtiger Schritt in dieser Richtung war das Kyoto-Protokoll aus dem Jahr 1997. Dieses Protokoll legte für Industrieländer den maximalen durchschnittlichen Treibhausgasausstoß zwischen 2008 und 2012 fest. In 2009 fand in Kopenhagen eine der jährlichen UN-Klimakonferenzen statt. Obwohl die Ergebnisse der Verhandlungen meist kritisch betrachtet wurden, wurde festgehalten, dass der globale Anstieg der Temperatur 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Wert nicht übersteigen sollte. Die Begründung liegt darin, dass die Forschung davon ausgeht, dass bei einem stärkeren Anstieg die Folgen des Klimawandels nicht mehr beherrschbar sein werden. Inwiefern die Grenze tatsächlich bei exakt 2 °C liegt, ist nicht zu beweisen. Eine solche Grenze aber bietet die Möglichkeit allen Bemühungen beim Klimaschutz eine gleiche Zielsetzung voranzustellen.

Schwierig zu beantworten ist die Frage, welche Treibhausgasmengen noch emittiert werden dürfen, um die 2-Grad-Grenze nicht zu überschreiten. Klar ist allerdings, dass das Zeitfenster für ein konsequentes Handeln immer enger wird. Der WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung – Globale Umweltveränderungen) beispielsweise ging in einem Sondergutachten von 2009 davon aus, dass das 2-Grad-Ziel nur erreicht werden kann, wenn die Industrieländer noch vor 2015 den Trend ihrer CO₂-Emissionen umkehren. Das ist nicht der Fall gewesen. Bis 2020 müssten die Emissionen auf ein Drittel reduziert werden. Bei erfolgreicher Einführung eines weltweiten Emissionshandels wäre für diese Reduktion allenfalls noch bis 2025 Zeit. Schwellenländer wie etwa China, Indien oder Brasilien müssten aufgrund ihrer nachholenden Entwicklung die Trendumkehr zwischen 2020 und 2025 erreichen.

Tatsächlich haben die weltweiten CO₂-Emissionen nach Angaben der Weltenergieagentur 2013 mit 34 Mrd. Tonnen Kohlendioxid ein neues Rekordniveau erreicht, Tendenz steigend. Damit übersteigt die weltweite Emissionsentwicklung den angenommenen Verlauf fast aller IPCC-Szenarien.

Kurz vor der Weltklimakonferenz im Dezember 2012 in Doha machte die Weltbank mit ihrem Bericht „Dreht die Hitze herunter“ („Turn Down the Heat: Why a 4°C Warmer World Must be Avoided“) auf die dramatischen Folge einer ungebremsten Klimaerwärmung aufmerksam. Zusammenfassend stellt die durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) erstellte Studie fest, dass sich die Welt wahrscheinlich um mehr als drei Grad bis zum Ende des Jahrhunderts erwärmen wird, wenn es keine weiteren Verpflichtungen und Aktionen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen über die bislang zugesagten Reduktionsziele einzelner Staaten hinaus gibt. Und würden die bisherigen Reduktionsverpflichtungen nicht in die Tat umgesetzt, besteht eine große Wahrscheinlichkeit, dass einen Anstieg von 4 Grad noch vor Ablauf des Jahrhunderts erreicht wird – in einigen Szenarien schon um das Jahr 2060.