

Warnsignal Klimawandel: Wird Wasser knapper?

Lange Trockenperioden und die Auswirkungen
auf Natur, Land- und Forstwirtschaft,
Wasserversorgung, Gewässer und Wirtschaft



**Beiträge der
Akademie für Natur- und Umweltschutz
Baden-Württemberg**

Band 42

**Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH
Stuttgart**

Warnsignal Klimawandel: Wird Wasser knapper?

Lange Trockenperioden und die Auswirkungen auf Natur,
Land- und Forstwirtschaft, Wasserversorgung, Gewässer und Wirtschaft

Band 42

Beiträge der Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg

WARNSIGNAL KLIMAWANDEL: WIRD WASSER KNAPPER?

Lange Trockenperioden und die Auswirkungen auf Natur,
Land- und Forstwirtschaft, Wasserversorgung, Gewässer und Wirtschaft

Mit Beiträgen von:

Jörg Belz, Heinz Engel, Andreas Fangmeier, Jürgen Franzaring, Peter Fuhrmann,
Hermann H. Hahn, Jens Kappler, Vassilis Kolokotronis, Peter Krahé, Mojib Latif,
Fritz-Gerhard Link, Elisabeth I. Meyer, Franz Nestmann, Peter Oberle, Frank Paul,
Hansjochen Schröter

Herausgeber: Claus-Peter Hutter und Fritz-Gerhard Link



Herausgegeben von der
Akademie für Natur- und Umweltschutz (Umweltakademie)
beim Umweltministerium
(Baden-Württemberg)



Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart

Die Veröffentlichung ist eine Dokumentation der Fachtagung „Warnsignal Klima – wird Wasser knapper?“ der Umweltakademie Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe am 8. März 2005 in Karlsruhe.

Fotos: Frank Paul (S. 53), Elisabeth I. Meyer (S. 65 oben, Tafel 7 oben), Andreas Frutiger (S. 65 unten), Eva Tania Schellenberg (Tafel 5), Rainer Zah (Tafel 6 Abb. VII), Christian Kock (Tafel 7 Mitte), Alexander Meyer (Tafel 7 unten), Universität Karlsruhe, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (S. 140ff.)

Ein Markenzeichen kann warenrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN-10: 3-8047-2276-8

ISBN-13: 978-3-8047-2276-7

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzungen, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

Die Beiträge geben die Auffassung des jeweiligen Autors wieder.

© 2006 Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH

Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart

Redaktion: Fritz-Gerhard Link, Hans-Jörg Eberhardt

Lektorat: Hans-Jörg Eberhardt, Angela Meder

Herausgeber: Claus-Peter Hutter und Fritz-Gerhard Link

Satz, Druck und Bindung: primustype Robert Hurler GmbH,
Notzingen

Einbandgestaltung: Neil McBeath, Stuttgart

Umschlagbild: Elisabeth I. Meyer

Nach der Flut ...

CLAUS-PETER HUTTER, LEITER DER AKADEMIE FÜR NATUR- UND UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG

Wasserwirtschaft und Klimawandel in Baden-Württemberg

PETER FUHRMANN, UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG, LEITER DER ABTEILUNG WASSER UND BODEN

THEMENKREIS 1

Aktuelle Klimaforschung und Wasserdargebot 13

Verändert der Mensch das Klima? 14

MOJIB LATIF, UNIVERSITÄT KIEL, LEIBNIZ-INSTITUT FÜR MEERESWISSENSCHAFTEN (IFM-GEOMAR)

Entwicklung von Trockenperioden im zukünftigen Klima –

Antworten aus dem KLIWA-Projekt 24

VASSILIS KOLOKOTRONIS, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND STRAHLENSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG, KARLSRUHE

Extreme Niedrigwasserstände in Deutschlands Flüssen – Ursachen und Entwicklungen 34

HEINZ ENGEL, JÖRG BELZ UND PETER KRAHÉ, BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, KOBLENZ

Gletscherschwund in den Alpen – Beobachtungen und Konsequenzen 50

FRANK PAUL, UNIVERSITÄT ZÜRICH-IRCHEL, GEOGRAPHISCHES INSTITUT

THEMENKREIS 2

Auswirkungen von Niedrigwasserjahren 61

Fließgewässer und Niedrigwasser – eine ökologische Perspektive 62

ELISABETH I. MEYER, WESTFÄLISCHE WILHELMS-UNIVERSITÄT MÜNSTER, INSTITUT FÜR EVOLUTION UND ÖKOLOGIE DER TIERE, ABTEILUNG LIMNOLOGIE

Klimaänderung und die Folgen für die Landwirtschaft 86

ANDREAS FANGMEIER UND JÜRGEN FRANZARING, UNIVERSITÄT HOHENHEIM, INSTITUT FÜR LANDSCHAFTS- UND PFLANZENÖKOLOGIE, STUTTGART

Alarmierende Entwicklungen durch Wasserknappheit im Wald 100

HANSJOCHEN SCHRÖTER, FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT, FREIBURG

Wenn Wasser knapper wird – Beobachtungen und Konsequenzen zur Wahrung der Biologischen Vielfalt 111

FRITZ-GERHARD LINK, UMWELTAKADEMIE BADEN-WÜRTTEMBERG, STUTTGART

THEMENKREIS 3

Nachhaltiges Wassermanagement und technologische Exportchancen 117

Wasserverbrauch in Haushalten und Landwirtschaft sowie Möglichkeiten zur Wassereinsparung 118

HERMANN H. HAHN, UNIVERSITÄT KARLSRUHE, INSTITUT FÜR WASSER UND GEWÄSSERENTWICKLUNG, BEREICH SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT

Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer – ein Beispiel aus Indonesien 137

FRANZ NESTMANN, PETER OBERLE UND JENS KAPPLER, UNIVERSITÄT KARLSRUHE, INSTITUT FÜR WASSER UND GEWÄSSERENTWICKLUNG, BEREICH WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURTECHNIK

ANHANG

Zusammenfassung der Inhalte und Ergebnisse der Fachtagung 144

FRITZ-GERHARD LINK, UMWELTAKADEMIE BADEN-WÜRTTEMBERG, STUTTART

Beiträge der Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg 153

Wir über uns 157

Farbtafeln Seiten 78–85

Nach der Flut ...

... kam die Trockenheit. Klimatische Extremereignisse häufen sich seit etwa Mitte der 1990er-Jahre immer mehr. Das Hochwasserereignis an der Elbe im Sommer 2002 war in den Köpfen der Menschen noch fest verankert und noch nicht alle Schäden beglichen, als im Sommer 2003 erneut eine rekordverdächtige Hitzewelle Trockenheit und Wassermangel hervorrief. Bis in den Sommer 2004 waren aufgrund der lang anhaltenden niederschlagsarmen Witterung Grundwasserstände landesweit in Baden-Württemberg auf historische Tiefststände gesunken und erholten sich nur langsam. Auch bei den Alpengletschern mussten empfindliche Einbußen verzeichnet werden. Der Waldzustandsbericht zog ebenfalls eine Besorgnis erregende Bilanz. In der Landwirtschaft – so etwa im Weinbau – konnten befriedigende Erträge vielerorts nur durch Bewässerung erzielt werden.

Wird die vom Menschen verstärkte globale Klimaerwärmung in Zukunft vermehrt solche extremen Wetteranomalien mit sich bringen? Klimaforscher sagen voraus, dass die erwärmte Atmosphäre mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann und das Klima der Erde insgesamt feuchter werden wird. Gleichzeitig entstehen aber auch mehr Turbulenzen und die Klimazonen der Erde verschieben sich polwärts. Für Süddeutschland bedeutet dies nach Ansicht vieler Wissenschaftler eine „Mediterranisierung“ des Klimas. Dabei werden regional unterschiedliche Auswirkungen zu erwarten sein, dennoch sind bereits jetzt akzentuiertere Niederschläge sowie eine Häufung von Starkniederschlägen und Orkanen auch während der Winter zu beobachten. Auf der einen Seite bedeutet dies Starkniederschläge, die zu einem Großteil oberflächlich abfließen, und andererseits dann wochenlange Trockenheit im Frühjahr und Sommer. Dieser Dynamik der Klimaerwärmung zu begegnen wird auch in unserem gemäßigten Klima der Mittelbreiten eine bedeutende Herausforderung der Zukunft sein. Nur durch entschiedenen Einsatz im Klimaschutz wird es gelingen, die um ein vielfaches höheren Kosten der Folgeschäden zu vermeiden.

Der gesamten Menschheit werden durch den vom Menschen verstärkten Treibhauseffekt mit geschätzten Erwärmungen um 4 °C im globalen Mittel große Veränderungen anstehen, bei deren Bewältigung gerade den Industrienationen eine große Verantwortung zukommt. Dabei geht es auch um wirtschaftliche Chancen, etwa im Bereich der regenerativen Energien. Nur ein weltweit gemeinsames Angehen der Herausforderungen kann dabei Erfolge bringen. Ein erster – freilich noch

nicht ausreichender Schritt zur Senkung der für den menschengemachten Treibhauseffekt verantwortlichen Treibhausgase – war das Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls im Februar 2005. Das Land Baden-Württemberg bekennt sich im Landesumweltplan zum Klimaschutz. Nach dem Klimaschutzkonzept 2010 des Umweltministeriums soll der Anteil der regenerativen Energien in Baden-Württemberg verdoppelt werden. Förderprogramme geben hierfür die notwendigen Anreize.

Unter dem Eindruck der 2003/2004 eineinhalb Jahre andauernden, zu trockenen Witterung veranstaltete die Umweltakademie im März 2005 zusammen mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe eine bundesweite Fachtagung unter dem Titel: „Warnsignal Klima – wird Wasser knapper?“ – als Beitrag zum Internationalen Hydrologischen Programm der UNESCO. Schwerpunkte der Tagung waren aktuelle Ergebnisse aus der weltweiten und regionalen Klimaforschung, z. B. dem Kooperationsprogramm „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) der Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie dem Deutschen Wetterdienst. Ebenfalls thematisiert wurden der Gletscherschwund im Zusammenhang mit der Wasserversorgung, die vergangenen Trockenjahre sowie die konkreten Auswirkungen auf die Landwirtschaft, den Wald, die biologische Vielfalt oder etwa die Fließgewässer und letztlich auch unserer Nahrungsversorgung. Weiterhin zeigte die Fachtagung Lösungsmöglichkeiten auf, wie einem geringeren Wasserangebot begegnet und Wasser eingespart werden kann.

In dem vorliegenden Band sind die Tagungsbeiträge und -ergebnisse dokumentiert. Hierbei werden der aktuelle Stand der Klimaforschung, zu erwartende zukünftige Entwicklungen, die Auswirkungen von langen Trockenperioden und die Möglichkeiten eines nachhaltigen Umgangs mit der lebenswichtigen Ressource Wasser aufgezeigt.

Claus-Peter Hutter

Leiter Umweltakademie Baden-Württemberg

Wasserwirtschaft und Klimawandel in Baden-Württemberg

Peter Fuhrmann

Die Thematik Klimawandel und Wasserverknappung ist eines der drängendsten Umweltprobleme unserer Zeit. Der jüngste Bericht des mit über 2000 Wissenschaftlern besetzten Klimagremiums der Vereinten Nationen, das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), kommt zu dem Ergebnis, dass sich das Klima durch menschliche Aktivitäten erwärmt – und zwar sehr viel schneller und stärker, als ursprünglich angenommen. Der IPCC-Bericht geht davon aus, dass die durchschnittliche Erdtemperatur bis zum Jahr 2100 bei aktiver Klimapolitik um 1,4 °C und bei ausbleibender Klimapolitik um 5,8 °C zunehmen wird. Dabei geht es nicht um auf einzelne Jahre bezogene, sondern um sehr langfristige Betrachtungen – und genau das ist der Öffentlichkeit nur sehr schwer zu vermitteln, insbesondere wenn dies mit Forderungen nach Einschränkungen oder Verhaltensänderungen verbunden ist. Bei ausbleibender Klimapolitik wird der durchschnittliche Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 um bis zu 88 cm ansteigen. Dies wäre für viele kleine Inselstaaten katastrophal. Die meisten Inseln der Malediven liegen beispielsweise einen Meter über dem Meeresspiegel, keine über drei Meter. Stark betroffen wären auch die Flussdeltaregionen, wie das Ganges-Delta in Bangladesch oder das Nildelta in Ägypten. In Bangladesch würden etwa 17% des Landes überflutet, wodurch die Hälfte der Reisanbauflächen gefährdet und über 11 Millionen Menschen landlos würden. Durch die Versalzung des Grundwassers käme es in diesen Regionen auch zu Engpässen bei der Trinkwasserversorgung. Damit wird ein weiteres Problem des Klimaschutzes deutlich: alles so weit weg!

Wo ist unsere Betroffenheit? Gut in Erinnerung ist uns allen hoffentlich noch der extrem heiße Sommer des Jahres 2003. Klimaforscher gehen davon aus, dass dieser extreme Sommer überwiegend auf die weltweite Klimaerwärmung zurückgeht und sich das Wiederholungsrisiko eines solchen Sommers verdoppelt habe. Wir müssen davon ausgehen, dass die Niederschläge im Winterhalbjahr zunehmen und im Sommerhalbjahr eher abnehmen. Die Anzahl der Sommertage ($T > 25\text{ °C}$) und der heißen Tage ($T > 30\text{ °C}$) wird steigen.

Verhältnisse wie 2003 werden somit öfter auftreten als bisher. Bei einer Häufung der Niedrigwasserperioden wird die Wasserwirtschaftsverwaltung künftig mit Problemen konfrontiert werden, wie wir sie direkt im Anschluss an das „Hochwasserjahr“ 2002, im „Niedrigwasserjahr“ 2003 erleben konnten. Im Sommer 2003 war es bedingt durch die unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen und die überdurchschnittlich hohen Lufttemperaturen zu niedrigen Abflüssen und hohen Gewässertemperaturen in allen Gewässern Baden-Württembergs gekommen. Die Gewässertemperaturen erreichten bzw. überschritten kurzfristig die kritische Temperatur von 28 °C. Die hohen Wassertemperaturen verbunden mit lokalen Sauerstoffdefiziten führten zu einigen größeren Fisch- und Muschelsterben in Rhein und Neckar. Der Neckar musste im Juli und August 2003 zur Stützung des Sauerstoffgehaltes belüftet werden. Eine Konsequenz der hohen Gewässertemperaturen und niedrigen Abflüsse war, dass die Kraftwerke an Neckar und Rhein ihre Leistung stark reduzieren mussten. Mehrere Kraftwerke mussten auch ganz abgeschaltet werden. Hier wird deutlich, dass zunehmende Trockenperioden in Verbindung mit hohen Lufttemperaturen im Sommer zu stark reduzierten Wasserführungen und kritischen Gewässertemperaturen in Oberflächengewässern führen können. Die dadurch verursachten Auswirkungen auf die Gewässerökologie und auf die für die Stromversorgung unverzichtbare Kühlwassernutzung der Oberflächengewässer sind gravierend.

Baden-Württemberg hat sich zusammen mit Bayern und dem Deutschen Wetterdienst im Jahr 1999 die Aufgabe gestellt, mögliche Veränderungen des Wasserhaushalts durch die Klimaveränderungen zu untersuchen. Mittlerweile liegen die ersten Ergebnisse für die Abschätzung der Hochwasserabflüsse und deren Entwicklung in den nächsten 50 Jahren aus dem Projekt KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) vor. Wir haben Grund zur Annahme, dass sich kleine und mittlere Hochwasserereignisse künftig häufen werden. Wir gehen derzeit für das Neckareinzugsgebiet von einer 15%-igen Erhöhung des HQ_{100} (statistisch einmal in 100 Jahren überschwemmte Flächen) aus. Die Auswirkungen auf das Niedrigwasserverhalten einzelner Gewässer, wie beispielsweise auf den Neckar oder den Rhein, werden aktuell ab diesem Jahr in KLIWA untersucht. Nähere Informationen hierzu werden in diesem Band im Beitrag von Vassilis Kolokotronis geliefert.

Wir müssen davon ausgehen, dass zukünftig die Niederschläge im Winterhalbjahr zunehmen und im Sommerhalbjahr eher abnehmen. Welche Auswirkungen hat diese Verschiebung der Niederschläge auf die Grundwasservorräte und damit auf die Trinkwasserversorgung des Landes? Im Rahmen des KLIWA-Projektes ist die Wasserwirtschaftsverwaltung gerade dabei, für verschiedene klimatische

Prognoseszenarien die zu erwartenden Grundwasserneubildungsraten in den Jahren 2020 bis 2050 zu berechnen. Erste Ergebnisse aus diesen Modellbetrachtungen liegen Mitte 2005 vor.

Der Rekordsommer 2003 hat an vielen Stellen des Landes die Grundwasserstände von Höchstständen zu Beginn des Jahres 2003 innerhalb nur eines Jahres zu den über viele Jahre niedrigsten gemessenen Ständen geführt. Solch außergewöhnlich starke Absenkungen des Grundwasserspiegels sind zuletzt in den Jahren 1966 und 1977 beobachtet worden. Versorgungsengpässe bei der öffentlichen Trinkwasserversorgung sind bis auf wenige kleinere Einzelfälle, bedingt durch zurückgehende Quellschüttungen, nicht aufgetreten. Die großen Fernwasserversorgungsunternehmen verzeichneten gleichzeitig im August 2003 Rekordlieferungen. Die öffentliche Trinkwasserversorgung in Baden-Württemberg basiert auf einem Versorgungsverbund von ortsnahen Grundwasservorkommen, überregionalen Wasservorkommen und Fernwasser. Dieser Verbund hat sich auch bei dem extrem trockenen und heißen Sommer 2003 bestens bewährt. Zudem haben Diskussionen im Nachgang zu den Ereignissen vom 11. September 2001 die Vorteile dieser überwiegend dezentralen Versorgungsstruktur erneut deutlich werden lassen. Die Nutzung ortsnaher Vorkommen trägt darüber hinaus zur Bewusstseinsbildung um die Notwendigkeit von Maßnahmen für den Gewässerschutz bei.

Vor dem Hintergrund, dass in Baden-Württemberg der gesamten Grundwassernutzung durch Trinkwasserversorgung und industrielle Entnahmen etwa das Zehnfache an Grundwasserneubildung gegenüber steht, sollen noch ein paar Anmerkungen zum Thema „Regen- und Abwassernutzung“ zur Sprache kommen.

Die Nutzung von Regenwasser für die Gartenbewässerung ist sicherlich genauso zu befürworten wie der Einsatz wassersparender Armaturen im Haushalt. Die Nutzung von Regenwasser im häuslichen Bereich – von der Toilettenspülung bis hin zum Einsatz beim Wäschewaschen – ist jedoch aus hygienischer Sicht nicht unproblematisch. Das hierfür erforderliche doppelte Leitungssystem in der Hausinstallation birgt die Gefahr der Fehlnutzung bzw. der Fehlanlüsse.

Unter dem Stichwort „abwasserloses Haus“ werden Abwasserströme getrennt gesammelt, gereinigt und danach soweit als möglich wiederverwendet. In Baden-Württemberg gibt es hierzu Pilotprojekte (z. B. DEUS 21 in Knittlingen). Das Abwasserrecycling ist in unseren Breiten jedoch in gesundheitlicher, seuchenhygienischer und nicht zuletzt wirtschaftlicher Hinsicht kritisch zu hinterfragen. In bestimmten Einzelfällen, in Ländern mit großer Wasserknappheit, kann ein Einsatz jedoch durchaus sinnvoll sein.

Im Februar 2005 wurde weltweit das in Kraft treten des Klimaprotokolls von Kyoto gefeiert. 141 Staaten haben das Abkommen ratifiziert, das zwar einen

ambitionierten, angesichts der gigantischen Herausforderung aber doch eher kleinen Schritt zur Reduktion der Treibhausgase darstellt. Ein erster Schritt in die richtige Richtung ist getan; ob es jedoch gelingt, weitere für eine aktive Klimapolitik dringend erforderliche Vereinbarungen zu treffen, um die eingangs angesprochene Erderwärmung in verträglichen Grenzen zu halten, bleibt fraglich. Um so wichtiger ist es, dass wir uns rechtzeitig mit dem Thema Klimawandel und seine Konsequenzen für die Wasserwirtschaft auseinandersetzen. Hierfür leistet unser gemeinsam mit Bayern durchgeführtes KLIWA-Projekt gute Dienste.

Anschrift des Verfassers

Ministerialdirigent Peter Fuhrmann
Umweltministerium Baden-Württemberg
Leiter der Abteilung 5 – Wasser und Boden –
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart
Tel.: 0711/126-1500
E-Mail: Peter.Fuhrmann@um.bwl.de

THEMENKREIS 1

Aktuelle Klimaforschung und
Wasserdargebot

Verändert der Mensch das Klima?

Mojib Latif

Die Klimaproblematik

Die Jahrhundertflut des Jahres 2002 und der Rekordsommer des Jahres 2003 in Deutschland haben die Klimaproblematik in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses gerückt. Dabei stellt sich die Frage, in wieweit diese Wetterextreme schon Anzeichen für den globalen Klimawandel sind. So war der Sommer 2003 gemittelt über ganz Deutschland der wärmste seit Beginn der flächendeckenden, instrumentellen Wetterbeobachtungen im Jahr 1901. Die mittlere Tagestemperatur betrug $19,6^{\circ}\text{C}$ und lag damit $3,4^{\circ}\text{C}$ über dem langjährigen Referenzwert. An einigen wenigen Stationen gibt es noch längere Messreihen. So reicht die Messreihe am Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes im bayrischen Alpenvorland bis 1781 zurück. Die mittlere Sommertemperatur am Hohenpeißenberg des Jahres 2003 von $19,1^{\circ}\text{C}$ lag 5°C über dem langjährigen Mittelwert und war damit die höchste je gemessene Temperatur an dieser Station. Die jüngsten Wetterextreme passen gut in das Bild eines globalen Klimawandels. Es gibt heute kaum noch einen Zweifel darüber, dass der Mensch einen Einfluss auf das weltweite Klima ausübt und dass sich das Weltklima in den nächsten Jahrzehnten infolge dieses Einflusses noch weiter erwärmen wird.

Das Klimaproblem hat seinen Ursprung darin, dass der Mensch durch seine vielfältigen Aktivitäten bestimmte klimarelevante Spurengase in die Atmosphäre entlässt. Diese Spurengase führen zu einer zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Luftschichten, dem „anthropogenen Treibhauseffekt“. Von größter Bedeutung ist dabei das Kohlendioxid (CO_2), das vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Erdöl, Kohle, Erdgas) in die Atmosphäre entweicht. Der weltweite CO_2 -Ausstoß ist eng an den Welt-Energieverbrauch gekoppelt, da die Energiegewinnung vor allem auf fossilen Energieträgern basiert. Andere wichtige Spurengase sind vor allem Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O , Lachgas) und die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW). Das Kohlendioxid hat einen An-

teil von ca. 50% an dem durch den Menschen verursachten (anthropogenen) Treibhauseffekt. Vom Menschen in die Atmosphäre emittiertes CO_2 hat eine typische Verweildauer von ca. 100 Jahren, was die Langfristigkeit des Klimaproblems verdeutlicht.

Der CO_2 -Gehalt der Erdatmosphäre war seit Jahrhunderttausenden nicht mehr so hoch wie heute. Messungen belegen zweifelsfrei, dass sich die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution rasant erhöht hat. Lag der CO_2 -Gehalt um 1800 noch bei ca. 280 ppm (ppm: parts per million), so liegt er heute schon bei fast 380 ppm. Dass der Mensch für diesen Anstieg verantwortlich ist, ist unstrittig. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass der CO_2 -Gehalt heute schon so hoch ist wie seit ca. 450000 Jahren nicht mehr (s. Abb. 1). Dabei hat man die Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre aus Eisbohrkernen der Antarktis rekonstruiert, indem die im Eis eingeschlossenen Luftbläschen analysiert wurden.

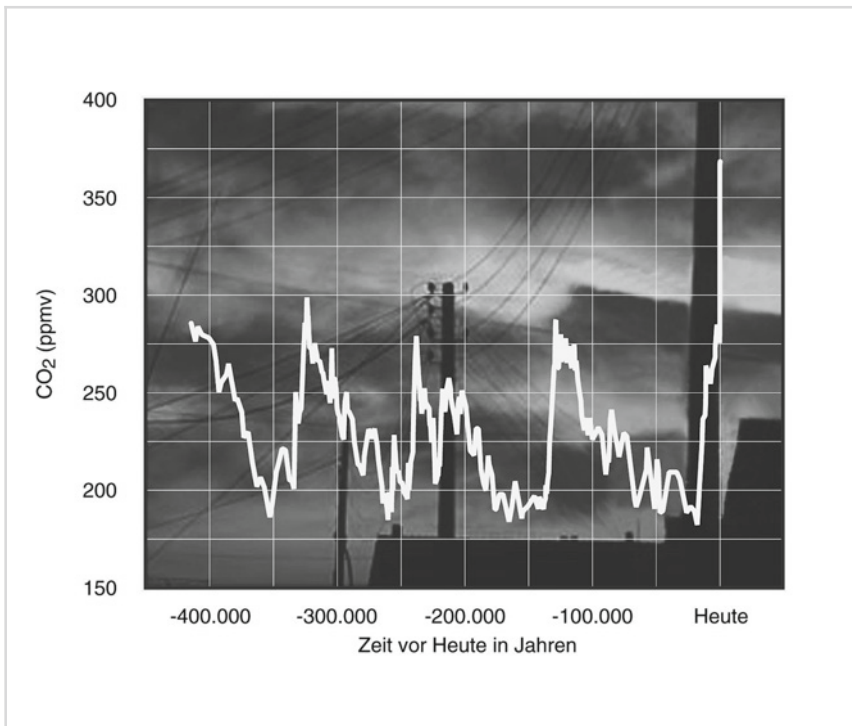


Abb. 1: Der Kohlendioxid-(CO_2 -)Gehalt der Erde in den letzten ca. 450000 Jahren. Der Anstieg der CO_2 -Konzentration seit Beginn der Industrialisierung ist offensichtlich auf den Menschen zurückzuführen.

Der zusätzliche (anthropogene) Treibhauseffekt

Bei einer Erde ohne Atmosphäre wäre die Oberflächentemperatur ausschließlich durch die Bilanz zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und der vom Boden abgestrahlten Wärme-(Infrarot-)Strahlung festgelegt. Diese Oberflächentemperatur würde im globalen Mittel etwa $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ betragen. Selbst eine Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und Stickstoff, die ja die Hauptkomponenten unserer Atmosphäre (ca. 99%) bilden, würde daran nichts wesentliches ändern. Dagegen absorbieren bestimmte Spurengase, wie Wasserdampf und Kohlendioxid, die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung und emittieren ihrerseits auch in Richtung der Erdoberfläche langwellige Strahlung. Dies führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche (Abb. 2). Die Temperatur der Erdoberfläche beträgt daher im globalen Mittel ca. $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dieser natürliche Treibhauseffekt ist dafür mit verantwortlich, dass es Leben auf unserem Planeten gibt. Die beteiligten Gase werden als „Treibhausgase“ bezeichnet.

Die Konzentration der langlebigen Treibhausgase nimmt systematisch zu: seit Beginn der Industrialisierung bis heute bei Kohlendioxid (CO_2) um ca. 30%, bei Methan (CH_4) um 120% und bei Distickstoffoxid (N_2O , Lachgas) um ca. 10%. Hierdurch wird eine langfristige, zusätzliche Erwärmung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche angestoßen. Ein verstärkter Treibhauseffekt führt auch zu Veränderungen des Niederschlags, der Bewölkung, der Meereisausdehnung, der Schneebedeckung und des Meeresspiegels sowie der Wetterextreme, d. h. letzten Endes zu einer globalen Klimaveränderung. Für die Menschheit besonders wichtig ist hierbei die mögliche Änderung der Extremwertstatistik, was anhand der Elbe-Flut 2002 und der Dürre 2003 deutlich geworden ist. Aber auch die Veränderungen in den Gebirgsregionen können dramatische Ausmaße annehmen. Dies erkennt man vor allem an dem Rückzug der Gebirgsgletscher in den Alpen, die seit 1850 bereits etwa die Hälfte ihres Volumens verloren haben. Die Gletscher werden sich aber noch weiter zurückziehen. Die meisten Alpengletscher wären schon in etwa fünfzig Jahren unter Annahme eines „business as usual“ (BAU)-Szenariums verschwunden, d. h. wenn keine Maßnahmen unternommen werden, um den anthropogenen Treibhauseffekt abzumildern. Die Permafrostgebiete, das sind Regionen, in denen die Böden praktisch das ganze Jahr über gefroren sind und nur oberflächlich im Sommer leicht antauen, werden sich ebenfalls zurückziehen. Die Folgen im Gebirge wären unübersehbar, da der Rückzug des Permafrostes die Stabilität ganzer Berglandschaften gefährden könnte. Bis jetzt nicht gekannte Hangabruptungen und Murenabgänge, das sind Schlamm- und Gerölllawinen, könnten die Folgen sein.