

Zeitschrift:	Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	109 (1991)
Heft:	14-15
 Artikel:	Das Klima der Erde : Ursachen, Geschichte und Zusammenhänge. 1. Teil
Autor:	Fischer, Gaston / Joss, Jürg
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-85914

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Das Klima der Erde

Ursachen, Geschichte und Zusammenhänge, 2. Teil

Der Gehalt an Kohlendioxid in der Atmosphäre heute und während der Eiszeiten

Die jüngste Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre

Aufgrund von Forschungsresultaten berichten die Medien häufig von der zunehmenden Konzentration von Koh-

von GASTON FISCHER,
NEUCHÂTEL, UND
JÜRG JOSS,
LOCARNO MONTI

lendioxid (CO_2) in der Atmosphäre. Zahlreiche Leser haben daher die berühmte Kurve von *Keeling et al.* [7] schon gesehen (Bild 17). Diese zeigt einerseits die saisonalen Schwankungen, die durch die Atmung der Lebewesen und durch die Photosynthese entstehen (Aufnahme von CO_2 durch die Pflanzen); andererseits finden wir eine rasche und kontinuierliche Erhöhung der

Konzentration dieses Gases. Die Spezialisten sind sich einig, dass diese kontinuierliche Zunahme durch die Tätigkeit des Menschen verursacht wird, insbesondere durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und durch die Brandrodung in den Tropen.

Damit wir verstehen können, warum die Natur das zusätzlich produzierte CO_2 nicht aufnehmen kann, müssen wir untersuchen, wie dieses Gas zwischen den verschiedenen Bereichen der Biosphäre ausgetauscht, gespeichert und abgebaut wird.

Der Austausch von CO_2 zwischen der Atmosphäre und der Vegetation der Kontinente

Man schätzt, dass jährlich etwa 100 Milliarden Tonnen Kohlenstoff durch die Atmung der Pflanzen und Tiere frei wird (wir berücksichtigen hier nur das Gewicht des Kohlenstoffs im CO_2 -Molekül). Eine Milliarde Tonne drückt man mit dem Symbol Gt (Gigatonne) aus. Somit setzt die Atmung jährlich 100 Gt Kohlenstoff frei (vgl. Abb. 18).

Der erste Teil dieses Beitrages ist in Heft 13, Seiten 296-307, erschienen.

Die Assimilationstätigkeit der Pflanzen entzieht der Atmosphäre auf der anderen Seite jährlich ebenfalls 100 Gt Kohlenstoff. Zu den 100 Gt Kohlenstoff, die jährlich durch Atmung frei werden, kommen jedoch noch weitere 6 Gt dazu, welche der Mensch durch Verbrennung freisetzt. Mit Überraschung müssen wir feststellen, dass die Natur offenbar nicht in der Lage ist, diesen vom Menschen verursachten Überschuss von nur 6 Prozent Kohlenstoff ohne Anreicherung in der Atmosphäre aufzunehmen.

Wie zuvor erwähnt wurde, beträgt die Konzentration an CO_2 in der Atmosphäre zurzeit etwa 350 ppmv (Millionstel Volumenteil). Dies entspricht einer Masse von 800 Gt Kohlenstoff. Wenn nun jährlich 100 Gt zwischen der Atmosphäre und dem Ökosystem ausgetauscht werden, so wird das CO_2 in der Atmosphäre etwa alle 8 Jahre umgesetzt. Um den vom Menschen verursachten Überschuss aufnehmen zu können, müssten die kontinentalen Ökosysteme zusätzlich Pflanzen erhal-

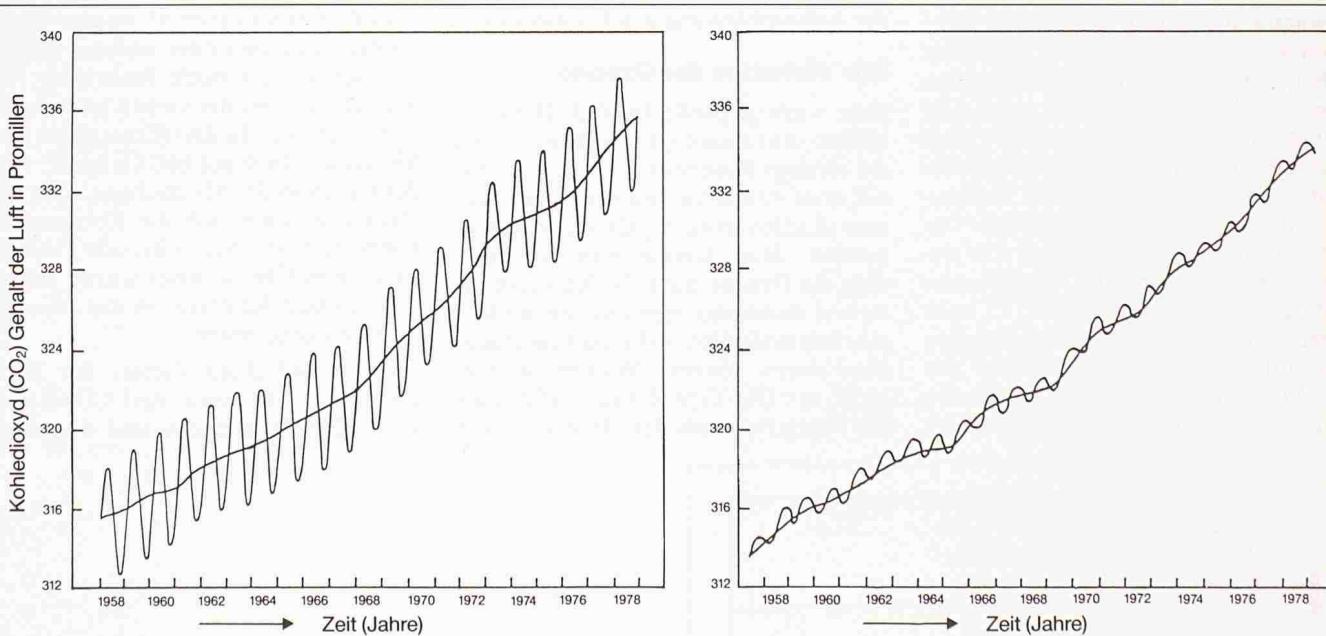


Bild 17. Diesen beiden Tafeln können wir entnehmen, wie die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre angestiegen ist. Die linke Tafel gibt die Messwerte an, welche auf der Insel Mauna Loa (Hawaii) ermittelt wurden, die Tafel rechts diejenigen, welche auf der amerikanischen Forschungsstation auf dem Südpol gemessen wurden. Die glatten Mittelwertskurven zeigen die mittlere globale Entwicklung. Die beiden oszillierenden Kurven geben die Messdaten mit ihren jahreszeitlichen Schwankungen wieder, die auf die Bindung des Kohlenstoffs durch Photosynthese zurückzuführen sind. Der Unterschied der beiden Grafiken spiegelt die ungleiche Verteilung der Kontinentalmassen über die nördliche und südliche Halbkugel wieder und zeigt, dass die saisonalen Schwankungen vor allem von der Vegetation auf den Kontinenten verursacht werden (Kurve adaptiert von Roger Revelle [8]).

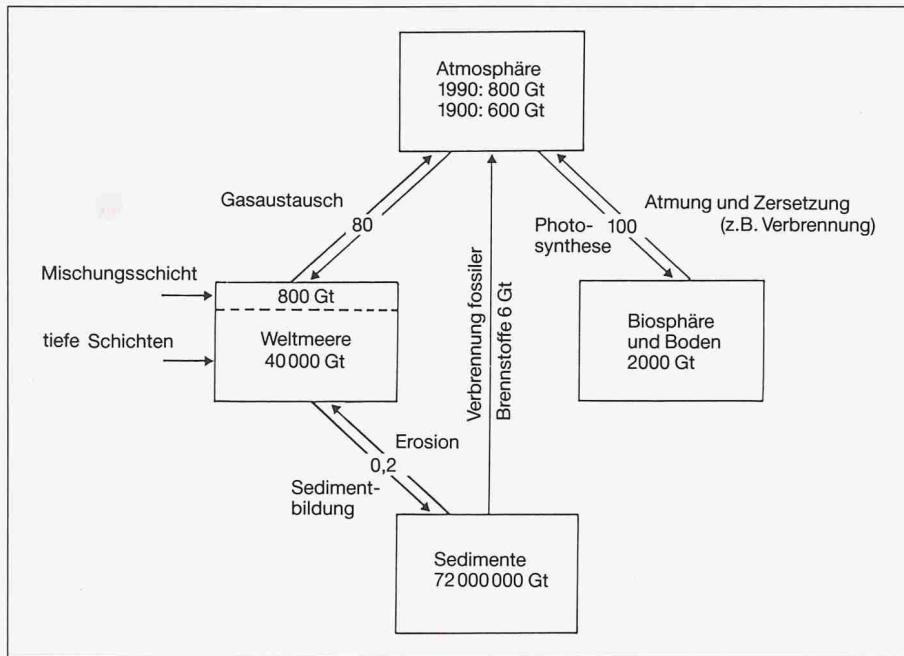


Bild 18. Übersicht über Kohlenstoffreservoirs und Kohlenstofftransporte. Die Reservoirkapazitäten werden in Gigatonnen (1 Gt = 1 Milliarde Tonnen) Kohlenstoff und die Flüsse in Gt pro Jahr angegeben (Nach G. Fischer [9]).

ten, doch mit dem Verbrennen der tropischen Wälder bewirkt der Mensch gerade das Gegenteil, er reduziert die Fähigkeit der vorhandenen Ökosysteme, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen.

Das unterschiedliche Verhalten der beiden Erdhälften

Weiter fällt beim Vergleich der beiden Kurven in Bild 17 auf, dass die jahreszeitlichen Unterschiede auf den Hawaii-Inseln (20° nördliche Breite) ausgeprägter sind als in der Region nahe beim Südpol. Dieser Unterschied röhrt daher, dass die Kontinente ungleich über die Erdkugel verteilt sind. Der Hauptteil des Festlandes und damit auch der Vegetation der Kontinente befindet sich auf der nördlichen Halbkugel. Auf der südlichen Halbkugel finden wir auf dem Festland nur sehr wenig Vegetation vor. Die Verschiedenheit der beiden Kurven in Bild 17 weist darauf hin, dass die jahreszeitlichen Schwankungen des CO₂-Gehaltes von der Vegetation auf den Kontinenten und nicht von der marinen Vegetation

verursacht wird. Man beachte, dass die Schwankungen im Norden gegenüber der Südhälfte nicht nur schwächer, sondern auch um sechs Monate verschoben sind, was durch die Verschiebung der Jahreszeiten um sechs Monate verursacht wird. Global gesehen schwächt die Südhalbkugel die im Norden beobachteten Schwankungen etwas ab. Das Ausmass der in Hawaii gemessenen Schwankungen bestätigt zudem die achtjährige Erneuerungszeit zwischen der Atmosphäre und den Kontinenten.

Das Verhalten der Ozeane

Eine wichtige Rolle im CO₂-Haushalt spielen die Ozeane (Bild 18). Sie stellen ein riesiges Reservoir an CO₂ dar, das auf etwa 40 000 Gt geschätzt wird, wovon jährlich etwa 80 Gt ausgetauscht werden. Man könnte nun erwarten, dass die Ozeane die 6 Gt Kohlenstoff, welche durch das menschliche Wirken jährlich zusätzlich in die Luft gelangen, absorbieren können. Warum ist dem nicht so? Der Grund liegt darin, dass das Hauptreservoir der Ozeane für die

Atmosphäre nicht zugänglich ist und dadurch der Kohlenstoff nicht direkt ausgetauscht werden kann. In Bild 18 sind die beiden Teile dieses Reservoirs angedeutet. Nahe an der Oberfläche befindet sich die Mischungsschicht, die nur etwa 100 m tief reicht. Diese dünne obere Schicht steht in mehr oder weniger engem Kontakt mit der Atmosphäre; sie reagiert auf Wind und jahreszeitliche Temperaturunterschiede. Unter dieser aktiven oberen Schicht, in der auch die Meeresströmungen wie der Golfstrom fliessen, finden wir das grosse Reservoir der ruhigen Tiefen des Ozeans, das in bezug auf Temperatur und Salzgehalt horizontal geschichtet ist (Bilder 19 und 20). Zwischen der oberen Schicht und diesem Reservoir findet nur ein extrem langsamer Gas austausch statt; Austauschzyklen von Jahrtausenden sind dabei typisch.

Zwischen der oberen Mischungsschicht und der Atmosphäre beträgt die jährliche Austauschmenge etwa 80 Gt, so dass ein Erneuerungszyklus etwa zehn Jahre dauert. Diese Wasserschicht kann aber keine grösseren Mengen Kohlenstoff einlagern. Die Aufnahmefähigkeit dieser Schicht hängt von ihrer Ausdehnung, den physikalisch-chemischen Eigenschaften und der Temperatur des Wassers ab. Je nach Gehalt an CO₂ in der Atmosphäre ist die in der Mischschicht gespeicherte Menge etwas grösser oder kleiner und von der gleichen Grössenordnung wie in der Atmosphäre. Da der etwa zehnjährige Austauschzyklus zwischen der Atmosphäre und dem Wasser sehr kurz ist, werden Überschüsse im einen oder anderen Reservoir schnell auf beide Reservoirs verteilt. Daher stieg der Gehalt an Kohlenstoff nicht nur in der Atmosphäre von 620 Gt um 1850 auf 800 Gt heute, sondern auch in der Mischungsschicht der Ozeane erhöhte sich die Kohlenstoffkonzentration. Nur ein sehr kleiner Teil dieses Überschusses wurde jedoch vom grossen Reservoir in den Meerestiefen aufgenommen.

Im meerbedeckten Gebiet der Erde überlagern sich somit drei CO₂-Reservoirs: Die Atmosphäre und die obere

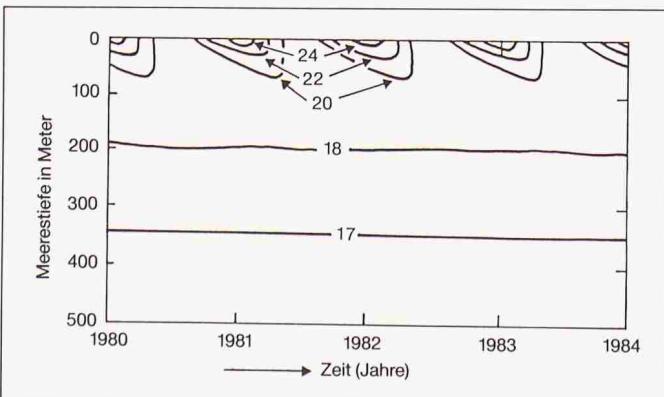


Bild 19. Ein Beispiel für den jährlichen Temperaturverlauf des Meerwassers in den verschiedenen Tiefen auf dem 35. nördlichen Breitengrad in der Mitte des Atlantiks. Man sieht, dass die Temperaturen der oberen Mischungsschicht den Jahreszeiten folgen. In Tiefen unter 200 m dagegen ist die Wassertemperatur nur noch eine Funktion der Tiefe und, zwar nicht aus diesem Bild ersichtlich, des Ortes (Aus W.R. Holland [10]).

Mischungsschicht bilden die beiden oberen Reservoirs und stehen in einem engen Austausch zueinander. Das dritte, untere Reservoir ist zwar riesig, beteiligt sich aber praktisch nicht an diesem Austausch, denn dieser findet für menschliches Ermessen nur unglaublich langsam statt.

Der Gehalt an CO₂ in der Atmosphäre im Laufe der Eiszeitzyklen

Im Abschnitt «Fossile Luft gibt Auskunft über den damaligen CO₂-Gehalt in der Atmosphäre» haben wir gesehen, dass der Gehalt an CO₂ in der Atmosphäre ziemlich stark schwanken kann: Vom Tiefstand zwischen 180 und 240 ppmv während der Eiszeiten stieg er bis zu Werten um 270 ppmv während der Zwischeneiszeiten an. Wir haben im letzten Kapitel auch gesehen, dass dieses Phänomen erstmals im Labor von Professor Hans Öschger in Bern an Luftblasen in Bohrproben von grönländischem Eis beobachtet wurde. Die Analysen eines französisch-russischen Forschungsteams bestätigten diesen Anstieg anhand von Eisproben aus dem antarktischen Wostok. Anhand solcher Bohrproben kennen wir den Verlauf des atmosphärischen CO₂-Gehalts der letzten 165 000 Jahre, das heißt während eines Zeitraums, der von der letzten Eiszeit (Würm) über die anschließende Zwischeneiszeit (Eem) bis zur vorletzten Eiszeit (Riss) reicht. Diese Eisproben sind regelrechte Archive und zeigen, dass sich die CO₂-Konzentration offenbar am Ende einer Eiszeit parallel zur Temperatur entwickelte. Zu Beginn einer neuen Eiszeit hingegen sank der Gehalt an CO₂ in der Atmosphäre mit einer Verspätung von fünf- bis zehntausend Jahren ab. So lange braucht es, um einen einmal erhöhten CO₂-Gehalt wieder abzubauen.

Diese Schwankungen des CO₂-Gehalts der Atmosphäre können nicht durch kleine Änderungen in der Austauschmenge zwischen den verschiedenen Kohlenstoffreservoirs erklärt werden, insbesondere nicht zwischen dem Reservoir in der Atmosphäre und der Festlandvegetation. Klimaänderungen können höchstens zu einem vorübergehenden Ungleichgewicht führen: Sterbende Wälder, z.B. setzen vorübergehend mehr CO₂ frei, als sie aufnehmen; demgegenüber assimiliert eine wachsende Vegetation, die von den zurückweichenden Eismassen Gelände zurückerober, mehr CO₂. Aber solche Abweichungen vom Gleichgewicht beschränken sich auf Zeitabschnitte während den Klimaumstürzen. Dagegen besteht während den Eiszeiten und den Zwischeneiszeiten ein Gleichgewicht zwischen Freisetzung (durch Atmung) und Bindung von Kohlenstoff in CO₂.

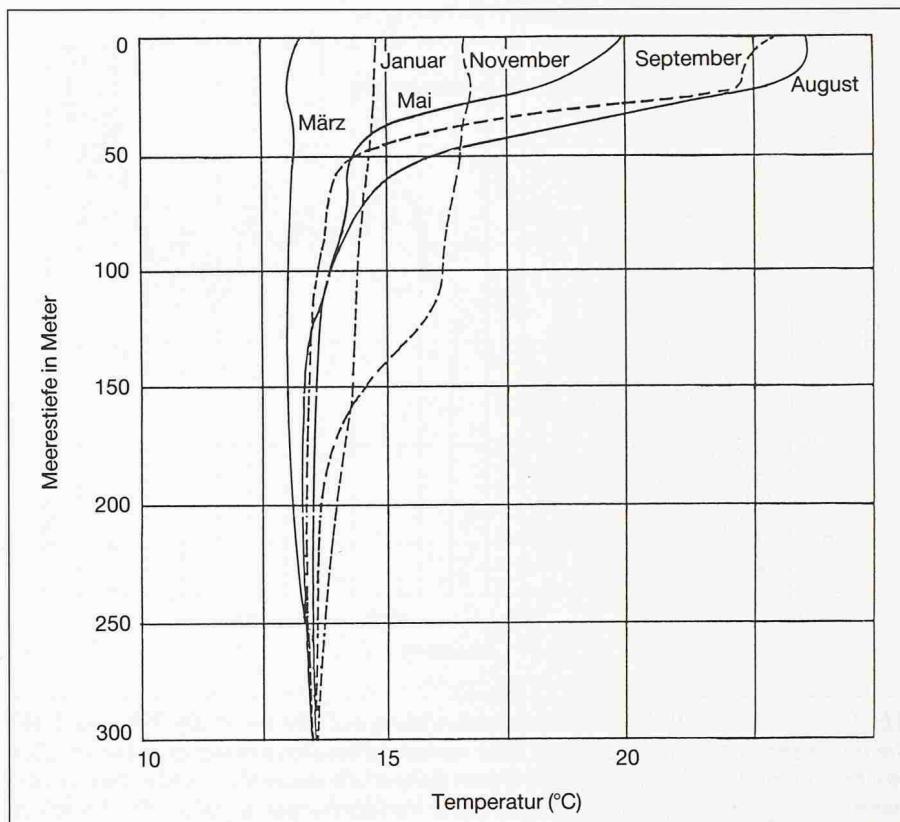


Bild 20. Vertikale Temperaturverteilung zwischen März 1964 und Januar 1965 bei Villefranche-sur-Mer (43°39' N, 7°17' O). Die resultierenden Temperaturen ergeben sich durch ein kompliziertes Zusammenspiel der Meeresströmungen, beeinflusst durch den Wind, den Salzgehalt, die Temperatur selber und durch den Druck. In den Tiefen der grossen Ozeane sinkt die Temperatur auf beinahe 0 °C: Bei den dort herrschenden Verhältnissen (Temperatur, Druck) hat das Wasser das kleinste Volumen bzw. die höchste Dichte. Eigentlich würde die Erdwärme so tiefe Temperaturen nicht zulassen, aber das Meerwasser steht mit grossen Polareismassen in Berührung. Verschwänden die arktischen und antarktischen Eiskappen, würde die Temperatur des Meerwassers in den Tiefen der Ozeane wahrscheinlich auf etwa 10 °C ansteigen, wie sie in den Tiefen des Mittelmeeres (bis über 3000 m tief) gemessen werden. Dadurch würde das Wasservolumen gleich aus zwei Gründen zunehmen: Einerseits durch das geschmolzene Eis, andererseits wegen der geringeren Wasserdichte (Grafik: Zoologische Forschungsstation von Villefranche-sur-Mer).

(durch Photosynthese). Mit andern Worten, die Jahresbilanz des natürlichen CO₂-Austausches ist in diesen Zeiten, über viele Jahre gesehen, ungefähr ausgeglichen.

Mögliche Ursachen für die natürlichen Schwankungen des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre im Laufe der Eiszeitenabfolge

Wie können wir den unterschiedlichen CO₂-Gehalt in der Atmosphäre während der Eis- und der Zwischeneiszeiten erklären? Im Abschnitt «Wie Eiszeiten ausgelöst werden» haben wir gesehen, dass die Eiszeiten auf der nördlichen Halbkugel durch Schwankungen der Erdbahn ausgelöst werden; und wir erinnern uns daran, dass es etwa zehntausend Jahre braucht, bis eine Eiszeit voll einsetzt. Wenn eine Klimaabkühlung durch das Zusammenspiel der verschiedenen Erdbahnparameter eingesetzt hat, verändern sich die Tempera-

turen der Landmassen und der oberen Schichten des Meeres (Bilder 19 und 20). Der Wasserspiegel der Ozeane senkt sich etwas, die tieferen Wasserschichten erfahren dadurch aber noch kaum Veränderungen. Diese betreffen zu Beginn vorwiegend die obere Mischungsschicht: Die Meeresströmungen, ihre Temperaturen, ihre Tiefe und Fähigkeit, CO₂ einzulagern, werden verändert. Mit der Zeit beginnt auch der Austausch mit den tiefen Meereschichten eine Rolle zu spielen. Wahrscheinlich müssen wir die Ursache für die Verschiedenheit der Übergänge zu Beginn und am Ende einer Eiszeit in der Mischungsschicht suchen. Dabei könnten die verschiedenen Anpassungszeiten des CO₂-Gehalts der Atmosphäre bei der Abkühlung und der Erwärmung die Verspätung, bzw. Gleichzeitigkeit, der beiden Übergangsphasen des Klimas erklären. Gewisse Anzeichen deuten darauf hin, dass grossräumige Strömungen in den tiefen Berei-

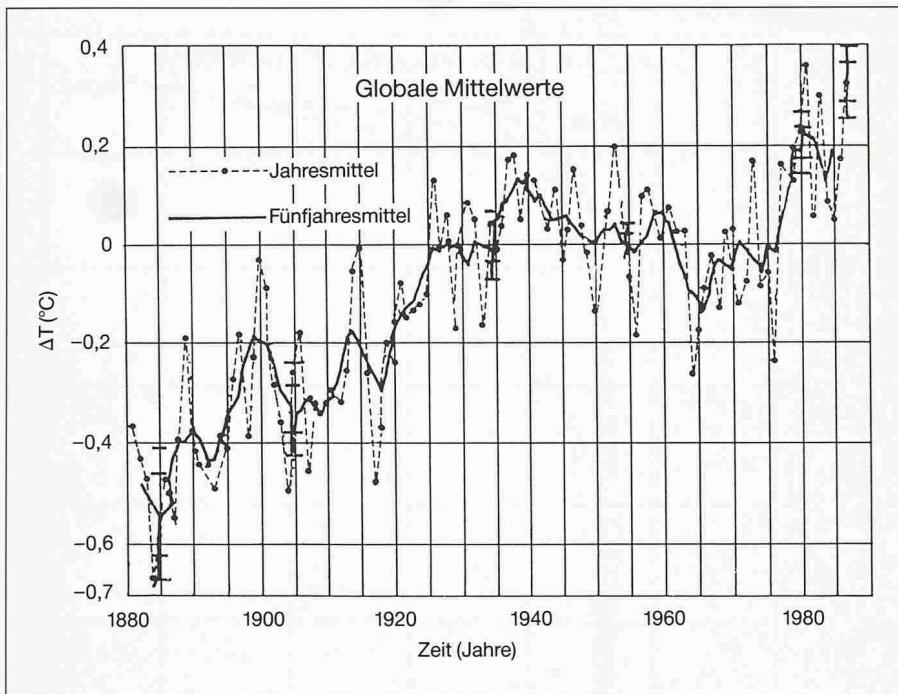


Bild 21. Durchschnittliche Temperaturrentwicklung auf der Erde von 1880 bis 1987. Die gemessenen Werte wurden aus dem vorhandenen Datenmaterial gemittelt. Dies geschah, damit Lokalbedingungen, wie zum Beispiel die wesentlich markantere Erwärmung in den grossen Agglomerationen, keine Verfälschungen ergeben. Die Punktlinie zeigt Jahresmittelwerte an, die ausgezogene Linie Durchschnittswerte über fünf Jahre. Siehe auch Bild 22. (Entnommen von Richard A. Kerr [11]).

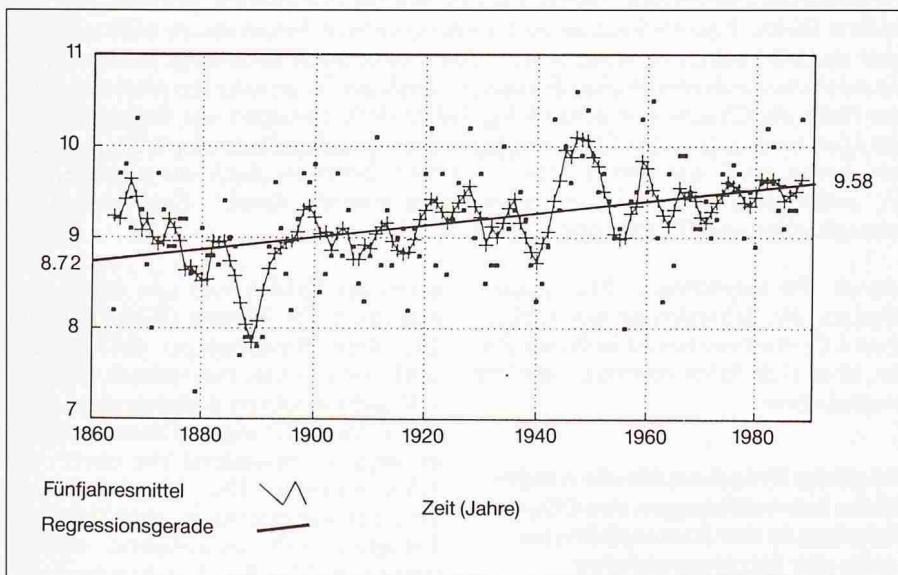


Bild 22. Die jährlichen Durchschnittstemperaturen in Neuenburg von 1864 bis heute. Damit sich diese Werte besser mit Bild 21 vergleichen lassen, haben wir ebenfalls die Durchschnittswerte über fünf Jahre ausgerechnet. Da es sich hier um Temperaturen einer einzelnen Messstation handelt, sind die jährlichen Ausschläge grösser als bei Bild 21, welches Daten von mehreren hundert Messstationen enthält. Die ausgezogenen Kurven mit den über fünf Jahre gemittelten Werten gleichen sich auffällig und zeigen mehrjährige Zeitabschnitte, die wärmer oder kälter sind als der Durchschnitt. Die Ausschläge in den Bildern 21 und 22 wurden wahrscheinlich durch Schwankungen der von der Sonne abgegebenen Energie hervorgerufen und durch vulkanische Russ- und Staubwolken, die über mehrere Jahre die globale Atmosphäre leicht trüben können [14]. Die allgemeine Temperaturerhöhung von $0,9^{\circ}\text{C}$ ist etwas stärker als in Bild 21 (etwa $0,7^{\circ}\text{C}$) und könnte durch die Veränderung lokaler Faktoren bedingt sein: Die Umgebung der Messstation des kantonalen Observatoriums von Neuchâtel ist immer städtischer geworden (Observatorium von Neuchâtel).

chen der Weltmeere sich während der Eiszeiten ganz umstellen (siehe z.B. Broecker u. Denton [12]). Der Massenaustausch mit der Mischungsschicht wird dadurch stark erhöht und der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre kann sich dadurch verringern.

Die Eiszeiten auf der südlichen Halbkugel

Im ersten Kapitel dieser Aufsätze haben wir den Treibhauseffekt beschrieben und die ausschlaggebende Rolle des Kohlendioxids und weiterer Spurengase hervorgehoben, die eine für die Wärmestrahlung weniger durchlässige Luftsicht schaffen. Diese bewirken auf der Erdoberfläche eine um 36° höhere Temperatur, als man sie auf einer Erde ohne Atmosphäre erwarten würde. Je mehr CO_2 in der Atmosphäre vorhanden ist, desto stärker wirkt sich der Treibhauseffekt aus und desto wärmer wird es an der Erdoberfläche. Das Umgekehrte trifft ebenso zu: Ein geringerer CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre bewirkt eine kühlere, ab einer gewissen Temperaturgrenze für den Menschen unwirtliche Erdoberfläche.

Doch kehren wir zu den natürlichen Schwankungen des CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre zurück. Sie haben zur Folge, dass der klimatische Unterschied zwischen Eiszeiten und Zwischeneiszeiten verstärkt wird. Da CO_2 vorwiegend auf dem Festland generiert wird, dieses aber mit der Südhalbkugel durch die globale, atmosphärische Zirkulation in engem Kontakt steht, verteilt sich eine Änderung mit einer Verspätung von höchstens ein bis zwei Jahren jeweils auf die ganze Erde (Bild 17). So kommt es, dass durch die einsetzende Vergletscherung auf der nördlichen Halbkugel auch auf der südlichen Halbkugel eine Abkühlung spürbar wird. In den mittleren Breiten der Südhalbkugel, welche fast ausschliesslich vom Meer eingenommen werden, macht diese Abkühlung nur ein bis zwei Grad aus, während sich auf den gleichen Breitengraden der Nordhalbkugel eine Abkühlung um etwa 5 Grad ergibt. In den Polargebieten der beiden Halbkugeln wirkt sich eine Abschwächung des Treibhauseffekts hingegen annähernd gleich aus, da dort die Erwärmung der Oberfläche durch Sonneneinstrahlung vergleichbar ist.

Wie wir im Abschnitt «Wie Eiszeiten ausgelöst werden» gesehen haben, kann die südliche Halbkugel bei einer Änderung der astronomischen Parameter keine Eiszeit auslösen, dazu sind ihre Landmassen zu klein. Sie wird deshalb umgangssprachlich oft auch als Wasserhalbkugel, im Gegensatz zur nördlichen Landhalbkugel bezeichnet.



Bild 23. Die Berner Alpen, vom Faulhorn (2681 m) aus fotografiert. Auf einer Höhe von 2400 m ist eine klare farbliche Trennlinie erkennbar, die auf die zum Zeitpunkt der Aufnahme vorhandene Inversionslage zurückzuführen ist: Die kalten und oft verschmutzten Luftmassen bleiben unten. Normalerweise nehmen die Temperaturen mit zunehmender Höhe ab, und zwar im Mittel 6 °C bis 9 °C pro Höhenkilometer. Bei stabiler Wetterlage und nach einer kalten Nacht kommt es aber vor, dass die Ausstrahlung in der Nacht einen Kaltluftsee gebildet hat. Dadurch entsteht im Kaltluftsee ein umgekehrtes Temperaturprofil: Die Temperatur nimmt nach unten hin ab. Die Trennlinie zwischen beiden entgegengesetzten Temperaturprofilen nennt man Inversionsniveau. Unter dem Inversionsniveau können Luftpakete nicht entweichen, die durch die Atmung von Lebewesen und durch die menschliche Tätigkeit verbraucht sind. Sie bleiben unter dem Inversionsniveau gefangen, so dass sich die Schadstoffe in der Luft immer mehr ansammeln. Zudem kann das Licht sekundäre chemische Reaktionen auslösen, welche Schadstoffe produzieren, insbesondere braungefärbte Stickoxide und Ozon, die für die Atmungsorgane schädlich sind. Auf diese Weise entsteht der «Smog» in den grossen Städten und in dichtbevölkerten Tälern (Wallis). Er kann eine Dunstglocke bilden, welche das Sonnenlicht nur noch teilweise durchlässt, wodurch die Inversionslage weiter begünstigt wird. Das Nebelmeer über dem Mittelland ist ebenfalls ein durch die Inversionslage verursachtes Phänomen (Foto G. Fischer).

Zusammenfassend wollen wir uns merken, dass auf der Nordhalbkugel die natürlichen Schwankungen der Kohlendioxidkonzentration in der Luft den Gegensatz zwischen Eiszeit und Zwischeneiszeit verstärken. Auf der Südhemisphäre, dagegen, finden gleichzeitig wie zur Nordhalbkugel ähnliche, allerdings etwas abgeschwächte Temperaturvariationen statt.

Positive Rückkopplung und selbstregulierende Klimafaktoren

Wie wir gesehen haben, ist die natürliche Reduktion des CO₂-Gehalts in der Luft während der Eiszeit eine Folge der Vereisung, welche durch astronomische Mechanismen ausgelöst wird. Diese Verstärkung des Phänomens bezeichnen wir als positive Rückkopplung auf die ursächliche Wirkung: Sie verstärkt den ersten Effekt (Eiszeit oder Zwischeneiszeit, in diesem Falle die Eiszeit) und ist somit das Gegenteil eines selbstregulierenden Mechanismus.

Im grossen Reflexionsvermögen des Schnees finden wir eine weitere positive, d.h. verstärkende Rückkopplung: Je kälter das Klima wird, desto grösser wird die eingeschneite Fläche, womit ein höherer Anteil des Sonnenlichts direkt in das Weltall zurückreflektiert wird, d.h. ohne dass dabei der Boden erwärmt wird; m.a.W.: Die *Albedo* (siehe Abschnitt «Die von der Erde empfangene Einstrahlung») erhöht sich, und es wird noch kälter. Gibt es aber nicht auch eine negative, stabilisierende Rückkopplung des Klimas? Kurzfristig gesehen gibt es sie durchaus, z.B. in der Temperaturträgeit, die bewirkt, dass sich das Klima, verglichen mit den Eiszeitschwankungen, von Jahr zu Jahr weniger ändert als dies ohne Trägheit geschehen würde. Für die Zeitabschnitte von Jahrhunderten und Jahrtausenden können wir aber nur schwache ausgleichende Effekte anführen. Eine einfach zu verstehende negative Rückkopplung ist folgende: Wenn es in den unteren Luftschichten

wärmer wird, kann die Luft mehr Wasserdampf aufnehmen, der in höheren Luftschichten, wo die Atmosphäre in jedem Falle kälter ist, häufiger zu Wolkenbildung führt. Diese wirft einen grösseren Anteil der auftreffenden Sonnenenergie zurück, womit sich die *Albedo* erhöht. Damit gelangt weniger Energie bis in die untere Atmosphäre, so dass sie sich abkühlt, was der ursprünglichen Erwärmung entgegenwirkt.

Die weltweiten Folgen einer Erhöhung des CO₂ in der Atmosphäre

Wenn wir die Bilder 15 und 17 miteinander vergleichen, stellen wir fest, dass der Gehalt an CO₂ sich immer mehr von den ursprünglichen Werten der Zwischeneiszeiten entfernt. Wohin wird uns diese Entwicklung führen? Nach allem, was wir gehört haben, müssen wir davon ausgehen, dass der Treibhauseffekt sich verstärken wird: Es wird wärmer werden. Dies ist denn auch das Resultat vieler Klimamodelle.

In welchem Ausmass aber wird die mittlere Temperatur auf der Erde steigen?

Wir können versuchen, die Erhöhung zu errechnen oder anhand von Vergleichen und Messungen der näheren Vergangenheit zu schätzen. Messungen seit 1850 deuten darauf hin, dass die mittle-

re Temperatur auf der Erde bisher um 0,7 °C zugenommen hat (Bild 21), während gleichzeitig die Kohlendioxidkonzentration von 270 auf 350 ppmv, also um 30 Prozent angestiegen ist. Man schätzt, dass eine Verdoppelung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre die Temperatur global um 2-3 °C ansteigen lassen würde, eine enorme Erhöhung!

Nachwort der Autoren des Beitrages «Das Klima der Erde» zur Frage:

Einsatz von Kernenergie als Mittel gegen den CO₂-Anstieg?

Seit dem Erscheinen der französischen Fassung dieses Beitrages wurde verschiedentlich die Idee geäussert, Kernenergie als Ersatz für fossile Energie zu verwenden und damit eine drohende Klimaänderung zu bannen. Dazu möchten wir die nachfolgenden Überlegungen beifügen und hoffen, damit eine offene, aufbauende und objektive Diskussion über ein Problem anzuregen, das uns in Zukunft wohl immer mehr beschäftigen wird.

Heute beträgt der jährliche weltweite Endenergieverbrauch 230 EJ (Wärme und Elektrizität), wovon 6 EJ elektrische Energie, also knapp 3%, von der Kernenergie stammen. Ein Exa-Joule (EJ) entspricht dabei 10^{18} Wattsekunden. Die Schweiz konsumiert gesamthaft jährlich 0,75 EJ, somit pro Kopf etwa dreimal soviel wie die Bevölkerung im Mittel. An den schweizerischen Energiebedarf leistet die Kernenergie einen Beitrag von 8%. Experten rechnen, dass der Weltenergieverbrauch in den nächsten fünfzig Jahren auf 500 bis 600 EJ zunehmen wird. Ihrer Auffassung nach könnte die Kernenergie mittelfristig 30 bis 40 EJ liefern. Trotz massivem Ausbau der Kernenergieerzeugung würde damit der Bedarf an fossilen Brennstoffen noch stark ansteigen und folglich der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre ebenfalls weiter zunehmen. Dabei ist auch zu bedenken, dass der Bau der Kraftwerke mit ihren Verteilsystemen und der anschliessend notwendigen Entsorgung viel Erdöl benötigt.

Wollte man den gesamten zukünftigen Weltbedarf an Energie aus Kernenergieanlagen gewinnen, gelangt man zu erstaunlichen Ergebnissen. Prof. *Bernard Giovannini*, Prorektor der Universität Genf, hat eine solche hypothetische Rechnung aufgestellt [13]. Sie zeigt, dass es so nicht geht. Er ist davon ausgegangen, dass zehn Milliarden Menschen im Durchschnitt pro Kopf gleich viel Energie verbrauchen würden wie ein Schweizer heute, es müssten also 1200 EJ Energie verfügbar sein. Nimmt man an, dass der Verbrauch fossiler Energieträger auf den heutigen Stand begrenzt werden soll, dann müssten 1000 EJ Endenergie mit Kernkraftwerken erzeugt werden. Dies entspricht 50 000 Anlagen zu je 1000 Megawatt Leistung (Kapazität des KKW Gösgen). Eine solche Anzahl Kernkraftwerke würde die heute bekannten Uranreserven in wenigen Monaten aufbrauchen. Wie die Erfahrung zeigt, werfen auch «schnelle Brüter» Probleme auf, und Abhilfe mittels Kernfusion ist in weiter Ferne. Auch müsste man die Gefahr von Unfällen in Betracht ziehen, die sich mit zunehmender Anzahl Werke ebenfalls vergrössert (insbesondere wenn sich diese in technisch weniger entwickelten Ländern befinden).

Doch auch aus einem anderen Grund ist es unrealistisch anzunehmen, wir könnten das CO₂-Problem mit Kernenergie allein lösen: Kernenergie fällt zentral an, die Menschen dagegen benötigen die Energie dezentral. Zur Lösung dieses Gegensatzes ist ein kompliziertes und kostspieliges Verteilnetz notwendig, dessen Aufbau, Betrieb und Beseitigung wiederum Energie benötigt und an das sich möglichst viele anschliessen müssen. Dies führt zu langen politischen Diskussionen, wie dies die Geschichte der Fernwärme in der Schweiz zeigt: Einzig Beznau mit dem Heiznetz Refuna und Gösgen mit Industriewärme an eine Kartonfabrik leisten in grösserem Masse einen Beitrag zur direkten Substitution von Erdöl durch Fernwärme.

Ersetzt man Erdöl durch elektrische Energie, so verliert man bei deren Erzeugung aus Kernenergie zweimal so viel Abwärme, wie man elektrische Energie erzeugt. Daher wäre die direkte Wärmeabgabe ab KKW an sich sinnvoller, doch treten hier die oben erwähnten Probleme auf: 1988 betrug die abgegebene Wärmemenge in Refuna nur 1,4 Promille (von Gösgen an die Kartonfabrik 2 Promille) der gesamten durch Kernenergie in der Schweiz produzierten Wärme. Zu einer Reduktion des schweizerischen CO₂-Ausstosses um 20% müssten über 300 Refunas gebaut und ihre Wärme an Orte verteilt werden, wo wir sie verwenden können. Wenn dies aber in einem dicht-besiedelten und technisch hochentwickelten Land wie der Schweiz schwierig ist, ist es unrealistisch zu glauben, die Kernkraft könnte weltweit einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre leisten. Im Gegenteil ist die Kernenergie ein weiteres untaugliches Mittel, um das Energieproblem der Erdbevölkerung zu lösen. Auch besteht die Gefahr, dass sie uns einige weitere Jahre oder Jahrzehnte an den Machbarkeitswahn der Menschheit glauben lässt, statt dass wir uns auf einen schonungsvollen Umgang mit der Natur vorbereiten.

Wohl ist es sinnvoll, bereits verfügbare Kernenergie und Fernwärme für die Umstellung auf alternative Quellen zu nutzen. Dies ist umweltfreundlicher, als Erdöl zu verbrennen. Doch soll man den Stellenwert der Kernenergie realistisch einschätzen. Langfristig müssen wir vor allem einen sparsamen Gebrauch der verfügbaren Ressourcen in möglichst geschlossenen Kreisprozessen anstreben.

Gaston Fischer, Jürg Joss

Die Klimamodelle stimmen mit diesen Zahlen überein, geben aber zudem Auskunft, wie sich diese Temperaturerhöhung auf der Erde verteilen könnte. Nehmen wir an, dass der Gehalt an CO₂ sich verdoppelt, dann erwarten wir, dass die Temperaturen in niederen Breitengraden um 1,5 bis 2 °C zunehmen, in den mittleren Breiten um 3 bis

Literatur

- [1] *Hart, H.*: «The Evolution of the atmosphere», *Icarus*, 33, 1978, p. 23.
- [2] *Dansgaard, W. et al.*: «Climatic record revealed by the Camp Century ice core», *The late Cenozoic glacial ages*, K.K. Turekian (ed.), 1971, pp. 37-56.
- [3] *Jouzel, J. et al.*: «Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160 000 years)», *Nature*, 329, October 1987, pp. 403-408.
- [4] *Barnola, J.M. et al.*: «Vostok ice core provides 160 000 year record of atmospheric CO₂», *Nature* 329, October 1987, pp. 408-413.
- [5] *Lorius, C. et al.*: «A 150 000-year climatic record from Antarctic ice», *Nature*, 316, August 1985, pp. 591-596.
- [6] *Covey, C.*: «The Earth's orbit and the ice ages», *Scientific American*, February 1984, pp. 42-50.
- [7] *Keeling, C.D. et al.*: «Measurements on the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii», *Carbon Dioxide Review*, 1982, Clark, W. C. (ed.), pp. 377-384.
- [8] *Revelle, Roger*: «Carbon Dioxide and World Climate», *Scientific American*, 247, August 1982, pp. 33-41.
- [9] *Fischer, G.*: «Atmospheric lifetime of Carbon Dioxide», *Population and Environment*, 10, Spring 1989, pp. 177-181.
- [10] *Holland, W.R.*: «The role of the upper ocean as a boundary layer in models of oceanic general circulation», *Modelling and prediction of the upper layers of the ocean*, E.B. Kraus (ed), Pergamon Press, Oxford, 1975, pp. 7-30
- [11] *Kerr, Richard A.*: «The weather in the Wake of El Niño», *Science*, 240, May 1988, p. 883.
- [12] *Broecker, W.S. and Denton, H.D.*: «What drives glacial cycles?», *Scientific American*, January 1990, pp. 42-50.
- [13] *Giovannini, Bernard*: «Wie den Treibhauseffekt verringern?», *NZZ*, 18.10.89, S.29
- [14] *Kerr R.A.*: «Volcanoes can muddle the greenhouse», *Science* 245, July 1989, pp. 127-128.
- [15] *Fischer, Gaston*, «Le climat moyen à la surface du globe», *Ingénieurs et architectes suisses*, No. 9, avril 1989, pp. 133-137, No. 11, mai 1989, pp. 279-283, No. 12, mai 1989, pp. 299-303, No. 13, juin 1989, pp. 315-320.

4 °C und in den Polarregionen bis zu 8 °C. Das hätte zur Folge, dass ein Teil der grossen Eisschilder der beiden Halbkugeln schmelzen und der Wasserspiegel der Ozeane um mehrere Meter ansteigen würde. Man hat abgeschätzt, dass der Meeresspiegel seit 1900 bereits um 8 bis 10 Zentimeter gestiegen ist und dass er immer schneller steigt.

Wann wird die Atmosphäre den Gehalt von 550 ppmv (eine Verdoppelung gegenüber dem Gehalt um 1850) CO₂ erreicht haben? Es ist schwierig, einen Zeitpunkt dafür anzugeben, sicher jedoch ist, dass es heute keinerlei Anhaltspunkte für eine Stabilisierung des gegenwärtigen Wertes gibt, ganz im Gegenteil, der Prozess scheint sich weiterhin zu beschleunigen. Trifft dies zu, dann wird sich der Stand von 1850 im Jahre 2050 verdoppelt haben.

Dürfen wir hoffen, dass diese Entwicklung abgebremst werden kann? Leider kaum. Die Industrieländer müssten mit grossem Aufwand die erneuerbaren

Energieformen fördern und den Verbrauch von fossilen Brennstoffen drastisch einschränken. Damit könnte ihr Beitrag zur Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration wesentlich reduziert werden. Es stünde aber den Industriestaaten schlecht an, von den Entwicklungsländern zu verlangen, ihren Brennstoffverbrauch im gleichen Massse (wie wir müssten) zu reduzieren und damit ihre Entwicklung zu bremsen.

Unserer Ansicht nach sind die Zukunftsaussichten daher eher düster, und es scheint unwahrscheinlich, dass es uns gelingt, die verheerenden klimatischen Folgen für gewisse Teile der Erde, insbesondere für tiefgelegene Küstenebenen und die halbtrockenen Zonen von Afrika und Nordamerika, zu verhindern.

Es ist sehr bedauerlich, dass wir diese Gedanken über die Mechanismen, welche unser Klima bestimmen, mit so pessimistischen Folgerungen schliessen

müssen. Aber es wäre unaufrichtig, diese Vorhersagen zu unterschlagen, beruhen sie doch auf wissenschaftlichen Erkenntnissen, die wir ohne jede Sensationshascherei zu interpretieren versucht haben.

Adresse der Autoren: *G. Fischer*, Professor am kantonalen Observatorium, 58, rue de l'Observatoire, 2000 Neuchâtel; *J. Joss*, Observatorio Ticinese di Locarno Monti, 6605 Locarno

Die französische Originalfassung dieses Beitrages ist in der Zeitung «L'Impartial», La Chaux-de-Fonds, und in der Zeitschrift «Ingénieurs et architectes suisses» erschienen [15]. Die sorgfältige Übersetzung in die deutsche Sprache wurde von Peter Lendi, Mosogno, besorgt und von der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften finanziell unterstützt.

Die FVC – Fachgruppe für Verfahrens- und Chemieingenieur-Technik des SIA

Es ist das erste Mal, dass die Fachgruppe für Verfahrens- und Chemieingenieur-Technik einen Beitrag im Rahmen der SIA-Zeitschrift publiziert. Die Fachgruppe besteht zurzeit aus rund 400 Einzelmitgliedern und 50 Mitgliedfirmen, denen allen daran gelegen ist, in den Ingenieurwissenschaften der Verfahrenstechnik das Beste für Wirtschaft, Umweltschutz und Allgemeinheit zu geben.

Wir sind der Meinung, dass eine solche Publikation, aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet, sinnvoll, ergänzend und für die Belange des SIA, als eines Vertreters der Technik in der Schweiz, notwendig ist. Sinnvoll und notwendig erscheint es uns deshalb, weil heute die Technik stark angezweifelt wird. Die Glaubwürdigkeit der Technik wird manchenorts zum Teil

mit einem gewissen Recht in Frage gestellt. Wir möchten deshalb mit unseren Veröffentlichungen beweisen, dass es nicht unser Bestreben ist, die Ingenieurwissenschaften zum Selbstzweck zu betreiben. Andererseits möchten wir auch unsere Resultate auf speziellen Forschungsgebieten einer breiteren Öffentlichkeit vorstellen und uns damit auch dem Dialog stellen.

Wir hoffen, damit einen echten Beitrag zum besseren Verständnis unserer Anliegen leisten zu können.

Für die Fachgruppe für Verfahrens- und Chemieingenieur-Technik,

*Ulrich Lattmann,
Präsident FVC*

Biotechnologie: eine Schlüsseltechnologie der Zukunft

Der folgende Artikel gibt einen Einblick in die Biotechnologie, wobei der Autor sich auf die Biotechnologie «sensu strictu» konzentriert. Es werden die Bioprozesse besprochen, die in sogenannten Submerskulturen (wässrigen Flüssigphasen) und in Fermentoren (Bioreaktoren) durchgeführt werden.

Definition der Biotechnologie

Die OECD-Definition der Biotechnologie lautet: «Biotechnologie ist die Anwendung wissenschaftlicher und technischer Prinzipien zur Stoffumwandlung durch biologische Agentien mit

dem Ziele der Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen.»

Mit «biologische Agentien» können einerseits ganze lebende Organismen wie Bakterien, Hefen, Pilze oder auch Zellen von z.B. Säugern gemeint sein. Andererseits können für Bioprozesse akti-

ve Zellkomponenten von Mikroorganismen, v.a. Enzyme als Katalysatoren anstelle von ganzen lebenden Zellen verwendet werden.

Der graphische Versuch, die Biotechnologie zu beschreiben, ist in Bild 1 dargestellt. Wichtig ist dabei, sich vor Augen

**VON HANS-PETER MEYER,
VISP**

zu halten, dass der Begriff «Biologie» in Bild 1 eine Vielzahl von wesentlichen Wissenschaften wie z.B. Mikrobiologie, Zellbiologie, Molekularbiologie, Gentechnologie u.a.m. umfasst. Ebenso sind in der Menge Technologie,