



Dr.-Ing. Günter Beckmann, Leiter der Abteilung *Neue Entwicklungen* der Hüls AG, Marl.

Foto: Tilo Karl

*Seit Hunderten von Millionen Jahren verändert sich die Luftzusammensetzung der Erde. Der Kohlendioxidgehalt der Luft ist dabei allmählich geringer geworden, während der Sauerstoffgehalt entsprechend stieg. In den letzten 200 Jahren nahm der Anteil an Kohlendioxid in der Troposphäre wieder zu – nun jedoch in einer atemberaubenden Geschwindigkeit im Vergleich zur erdgeschichtlichen Entwicklung. Schreitet diese, auf menschlichen Einfluß zurückgehende Veränderung in ihrem bisherigen Tempo fort, muß nicht nur mit Klimaänderungen, sondern vor allem auch mit schwerwiegenden Schädigungen der Biosphäre gerechnet werden. Folgen menschlichen Handelns, die mit technischen Mitteln nicht mehr zu revidieren sein werden.*

## Die Antwort der Evolution

**Auswirkungen des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Anstiegs auf die Biosphäre  
Von Günter Beckmann und Burkhard Klopries**

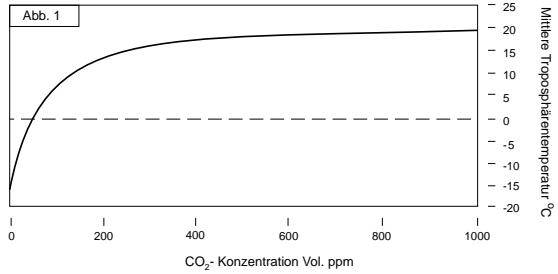
Die Auswirkungen des Anstiegs der Kohlendioxidkonzentration in der Troposphärenluft werden von Wissenschaftlern in aller Welt sehr unterschiedlich beurteilt. Die meisten Diskussionsbeiträge beziehen sich dabei auf ein zentrales Thema: die gefährliche Änderung des globalen Klimas. Andere und unter Umständen erst sekundär eintretende Folgen werden kaum in ähnlicher Weise problematisiert.

Natürlich muß man nach dem Stand der gegenwärtigen Erkenntnisse davon ausgehen, daß der An-

stieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre zu einer Aufwärmung der Troposphäre führen und somit das Klima beeinflussen wird. Es gibt jedoch Gründe, um deretwegen man den CO<sub>2</sub>-Anstieg, für sich gesehen, als das ernstere der beiden Probleme ansehen sollte.

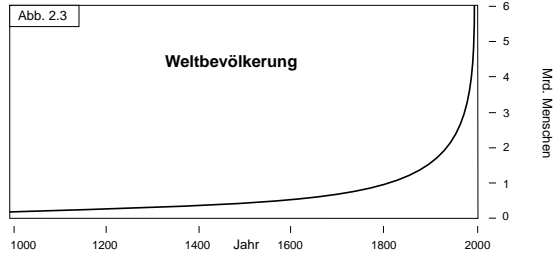
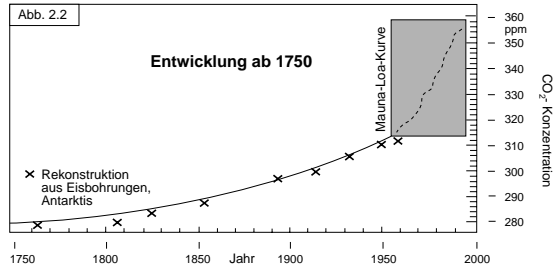
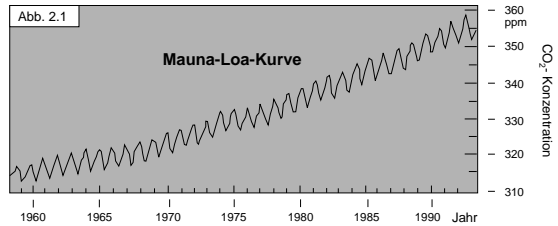
Etwa 150 bis 300 Millionen Jahre vor unserer Zeit, in denen der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft bei mehreren tausend Vol. ppm lag, herrschten zwar wärmere, aber durchaus säugetierfreundliche Klimabedingungen. Der Grund hierfür ist rein physikalischer

Natur. Die Isolationswirkung der klimawirksamen Gase in der Atmosphäre steigt nicht linear mit der Konzentration. Bei höheren als den heutigen Konzentrationen ergibt sich eine deutliche Abflachung der Wirkung (Abb. 1). Hiermit soll nicht bestritten werden, daß Klimaänderungen und ein Meeresspiegelanstieg auftreten werden. Gewiß werden die Klimaänderungen Konsequenzen nach sich ziehen, die sich in direkter oder indirekter Weise schädlich auf unsere Zivilisation auswirken und die Opfer fordern



(1) Abflachung der Treibhauswirkung mit zunehmendem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Troposphäre.

Grafik: F.G. Lucas



(2) Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre (nach Schönwiese, 1992) und Entwicklung der Weltbevölkerung. Grafik (2.1) gibt die direkten Kohlendioxidmessungen seit 1958 (Mauna-Loa-Kurve) mit ihren typischen Begrünungswechseln wieder. Grafik (2.2) interpoliert, gestützt durch die Ergebnisse von Eiskernbohrungen in der Antarktis, den gemessenen Anstieg der letzten Jahrzehnte in die Vergangenheit (Ausgleichskurve). Zum Vergleich der Prozesse zeigt Grafik (2.3) den Anstieg der Weltbevölkerung. Grafik: F.G. Lucas

werden. Sie werden uns aber nicht in unserer Existenz bedrohen.

Der erwartbare Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in den nächsten 1500 Jahren von zur Zeit 360 auf über 1.000 Vol. ppm (um etwa 0,1 bis 0,2 Volumenprozent) jedoch wird aufgrund der chemisch-biologischen Beeinflussung von Lebensvorgängen in Pflanzen-, Pilz- und Tierzellen existenzbedrohende Folgen haben, und zwar nicht wegen der absoluten Höhe des CO<sub>2</sub>-Gehaltes, sondern wegen des großen *Veränderungsgradienten*. Dieses Risiko wurde bisher kaum wahrgenommen.

### Der Anstieg des Kohlendioxids

Der troposphärische CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft steigt seit rund 200 Jahren, aber erst vor einigen Jahren wurde das wirkliche Ausmaß festgestellt. Die sogenannte Mauna-Loa-Kurve (Abb. 2.1) zeigt den Anstieg des Kohlendioxidgehaltes seit 1958<sup>1</sup>. Die weiter in die Vergangenheit reichende, aus den Ergebnissen von Eiskernbohrungen rekonstruierte Kurve zeigt den Anstieg seit 1750. Die Zunahme der Kurvensteigung mit der Zeit deutet auf einen Zusammenhang mit der ebenfalls wachsenden Weltbevölkerung hin.

Die Zacken der *Mauna-Loa-Kurve* werden durch die im Jahreslauf zu- und abnehmende Erdbegrünung verursacht. Hat die Nordhalbkugel Sommer, befindet sich die gesamte Erde wegen der riesigen Wälder in Sibirien, Kanada und Nordeuropa in einem Begrünungsmaximum. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft sinkt, weil mehr Kohlenstoff durch die *Photosynthese* in Pflanzen eingebunden wird. Hat die Südhalbkugel Sommer, befindet sich die gesamte Erde in einem Begrünungsminimum, da entsprechend große Waldflächen auf der Südhalbkugel fehlen. Indessen führt auf der Nordhalbkugel die winterliche Verrottung von Pflanzenmasse zu CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Kurvenzacken beruhen also auf der *Unsymmetrie* der Erdbegrünung.

Daß der Unterschied zwischen Sommer und Winter immerhin rund sechs ppm ausmacht, zeigt, wie prompt und wie stark der atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gehalt auf Begrünungsunterschiede reagiert.

Die interpolierte Kurve, die den ansteigenden CO<sub>2</sub>-Gehalt über eine mehr als 200jährige Zeitspanne ausweist, verdeutlicht die Massivität und Kontinuität des globalen Vorgangs. Allein dies macht klar, daß mit kurzatmigen und national beschränkten Maßnahmen keine Gegenwirkung erreicht werden kann. Initiativen werden ohne Erfolg bleiben, die nur kleine Teile der bewohnten Erde betreffen, ebenso technische Maßnahmen, die nur in kleinen Sektoren emissionsmindernd wirken.

Die Kurve zeigt auch, daß die natürlichen Kräfte der Selbstregulierung und Dämpfung den Anstieg nicht verhindern. Die zweifellos vorhandene Stimulierung der Photosyntheseaktivität durch steigenden CO<sub>2</sub>-Gehalt wurde ja gewissermaßen bereits „mitgemessen“. Ebenso die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> im Ozeanwasser, die mit steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft zunimmt und dazu führt, daß ein Teil des Kohlendioxids im Ozean deponiert wird. Daß diese Selbstregulierungskräfte in Zukunft ihre Wirksamkeit verbessern, ist nicht zu erwarten. Eher ist das Gegenteil zu fürchten, da die Stimulierung der Photosynthesewirkung oberhalb bestimmter Konzentrationen nachläßt, die, je nach Pflanzenart, bei 700 ppm bis 1.000 ppm liegen.

Die CO<sub>2</sub>-Kurve wird weiter ansteigen, mit sich beschleunigender Geschwindigkeit. Als vorläufigen Maximalwert könnte man diejenige CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft definieren, die erreicht wird, wenn alle gewinnbaren fossilen Reserven verbrannt und aller an der Erdoberfläche gebundener Kohlenstoff – in Pflanzen, Mutterboden, Holz, Kunststoff, Papier usw. – durch Verbrennung, Verrottung oder Verfaul-

lung in CO<sub>2</sub>-Gas überführt würde. Dieser Maximalwert liegt wahrscheinlich in der Nähe von 5.000 ppm. Ein weiterer Anstieg wäre nur möglich, wenn nicht gewinnbare und tiefliegende Kohlenstoffmengen aus der Erdkruste mit Hilfe der Hunderte von Millionen Jahren dauernden tektonischen Umwälzung ans Tageslicht kämen. Erst wenn aller so an die Oberfläche beförderte Kohlenstoff verrotten würde, ohne daß eine erneute Fossilierung von Kohlenstoff durch Pflanzen erfolgt, könnte der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft vielleicht auf das vorgeschichtliche Niveau steigen, das er zum Ende des Prækambriums mit etwa sieben Volumenprozent hatte. Aber ein solches Szenario dürfte den Menschen nicht mehr betreffen.

### Die gegenwärtige Kohlenstoffbilanz

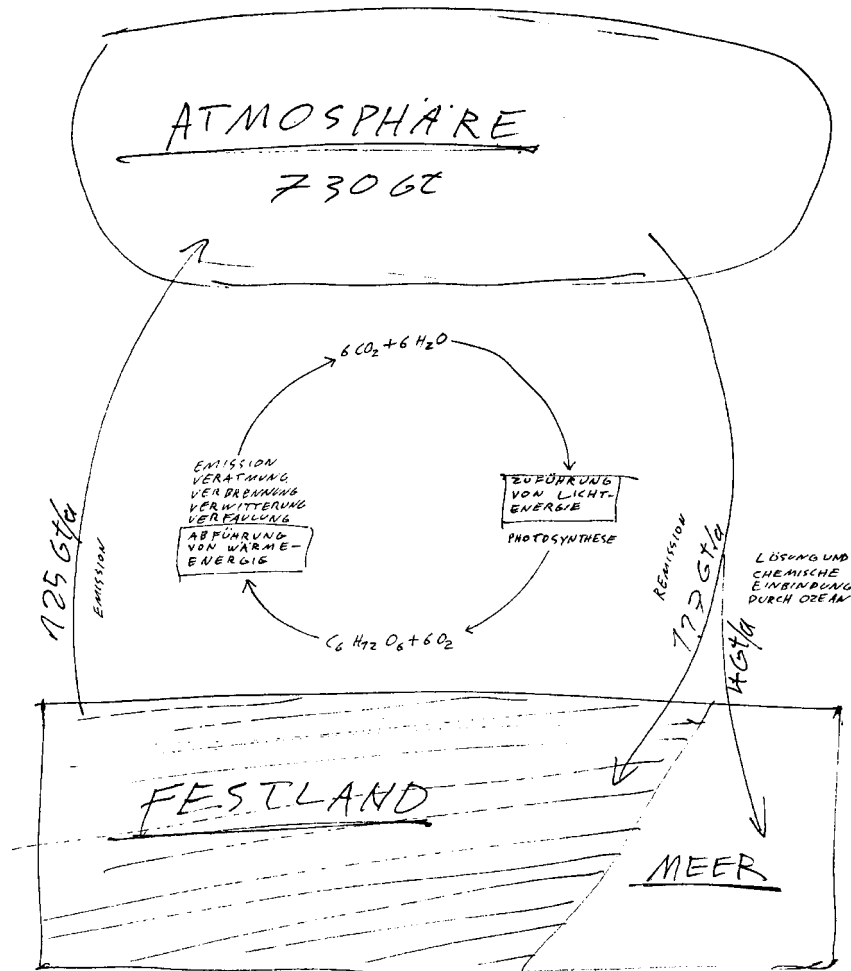
Kohlenstoff befindet sich in der troposphärischen Luft, hauptsächlich in Form von Kohlendioxid, also CO<sub>2</sub>. Zur Zeit beträgt die Konzentration etwa 360 ppm (vgl. Abb. 2). Neben CO<sub>2</sub> sind, in weit geringeren Anteilen, auch andere kohlenstoffhaltige Gase in der Luft enthalten: CO, CH<sub>4</sub> und andere größere Kohlenwasserstoffmoleküle. Sie alle wandeln sich unter den in der Atmosphäre herrschenden Bedingungen in relativ kurzen Zeiträumen von maximal zehn Jahren in CO<sub>2</sub> um, wobei ihre jeweilige Konzentration im wesentlichen vom Nachschub abhängt. Für die folgende Betrachtung wird nur das CO<sub>2</sub> berücksichtigt.

CO<sub>2</sub> gehört – wie auch O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und Ar – zu den Gasen, die sich relativ rasch in der Troposphäre verteilen. Deshalb bauen sich weder regional noch zeitlich größere Konzentrationsunterschiede auf. CO<sub>2</sub> ist ein *ubiquitäres* Gas.

Daß die Erde, im Gegensatz zu ihren beiden Nachbarplaneten, Venus mit 96 und Mars mit 95 Prozent, einen niedrigen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt hat, liegt unter

anderem daran, daß sie lebt ist. Vor der Verbreitung des Lebens, vor etwa vier Milliarden Jahren, hatte auch die Erde eine kohlendioxidreiche Atmosphäre. Die Abnahme des CO<sub>2</sub>-Gehaltes erfolgte bereits, als die Erde noch sehr jung war, vielleicht während der ersten 500 Millionen Jahre ihrer Geschichte. Der Rückgang dürfte auf geologische Vorgänge, die mit dem Rückgang der tektonischen Umwälzung der Erdkruste zurückzuführen sein. Anschließend aber verringerte sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre – von über zwei Volumenprozent auf das heutige Niveau – durch die photosynthetische Einbindung und Fossilierung von Kohlenstoff, deren Wirkung nun stärker geworden war als die der immer noch vorhandenen geologischen Quellen und Senken. Daß die irdische Luft Sauerstoff enthält und atembar ist, wurde erreicht durch den vor dreieinhalb Milliarden Jahren einsetzenden und seitdem fortschreitenden Pflanzenwuchs im Meer und später an Land. Im dynamischen Prozeß von Leben und Sterben entziehen Pflanzen der Luft Kohlenstoff und binden diesen in ihre Biomasse ein. Nur derjenige – kleine – Anteil, der später nicht verrottet, verbrannt oder veratmet wird, wird dauerhaft in den Boden eingebunden und letztlich fossilisiert. Der Kohlenstoff befindet sich also in einem Kreislauf zwischen Luft und Boden. Der einzige Weg aus der Luft in den Boden ist die Photosynthese, Rückwege gibt es mehrere: *mitochondriale* Veratmung in der Zelle, Verrottung und Verbrennung. Abbildung (3) zeigt – neben den grundlegenden chemischen Reaktionen des Kohlenstoffkreislaufs – eine stark vereinfachte Darstellung der Kohlenstoffbilanz mit Zahlenwerten in *Gigatonnen* Kohlenstoff, die die heutigen Verhältnisse in etwa repräsentieren<sup>2</sup>.

1992 befanden sich 730 Gt Kohlenstoff in der Atmosphäre, was etwa 360 ppm CO<sub>2</sub> entspricht. Jähr-



(3) Chemische Grundreaktionen der Veratmung und Photosynthese und jährliche Kohlenstoffbilanz (1992) der Atmosphäre (Kohlenstoffmengen in Gigatonnen bzw. Gigatonnen pro Jahr; vereinfachte Darstellung).  
Grafik: F.G.Lucas

lich werden, wie der links nach oben weisende Pfeil verdeutlicht, 125 Gt Kohlenstoff vom Boden in die Atmosphäre emittiert, davon 119 Gt durch natürliche Verrottung, Verbrennung und Veratmung und sechs Gigatonnen durch menschengemachte, hauptsächlich industrielle Verbrennung. Der nach unten weisende Pfeil sagt aus, daß 117 Gt Kohlenstoff jährlich durch Photosynthese aus der Luft zum Boden zurückfließen, also acht Gigatonnen weniger als emittiert werden.

Der auf den Ozean weisende Pfeil deutet die wahrscheinliche Aufnahme von vier Gigatonnen Kohlenstoff durch die Meere an, über seine physikalische Lösung und seine anschließende chemische Einbindung in die Kalklösereaktion (Kalziumcarbonat +  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$  Kalziumhydrogencarbonat). Durch die  $\text{CO}_2$ -Zufuhr säuert der Ozean auf, und die Grenze, ab der sich absinkende Kalkteile in der Tiefe des Ozeans auflösen (Lysoklinengrenze), steigt. Es verbleiben jedoch jedes Jahr vier Gigatonnen Kohlenstoff in der Luft, was einen Anstieg der Konzentration von derzeit knapp zwei ppm bedeutet. Der letztgenannte Wert läßt sich auch aus der Mauna-Loa-Kurve ablesen.

Die Unausgeglichenheit dieser Bilanz bewirkt den Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Kurve. Was besonders bedenklich stimmt, ist, daß der Anstieg von Jahr zu Jahr größer wird. Die menschengemachten Emissionen steigen um schätzungsweise drei Prozent pro Jahr, was mit der Zunahme der Erdbevölkerung von etwa zwei Prozent pro Jahr und einem durchschnittlichen Konsumzuwachs von rund einem Prozent pro Jahr erklärt werden kann. Der letztgenannte Wert könnte allerdings bereits zu niedrig angesetzt sein, angesichts der enormen Zunahme der Kohleverbrennung in China, dem bevölkerungsreichsten Land der Erde.

Noch unerfreulicher erscheint die Bilanz hinsichtlich des Rückgangs der Photosynthese und der

Einbindung von Kohlenstoff in Pflanzen. Die Wüstenbildung, die Bodenerosion, der Rückgang der Bewaldung haben dramatisch an Geschwindigkeit zugenommen. Jährlich wird eine Fläche in der Größe Bayerns entwaldet. Die Bilanzstörung aufgrund des Rückgangs der Photosyntheseleistung wird in einigen Jahrzehnten größer sein als die aufgrund steigender industrieller Emissionen. Aber auch der Rückgang der Photosyntheseleistung hängt in erster Linie mit der Überbevölkerung zusammen, mit Zersiedelung, Umweltbelastung, Zertrampelung und Übernutzung der Grünflächen.

#### Der Weg zur Biosphäre

Die Uratmosphäre der Erde enthielt keinen oder höchstens Spuren von Sauerstoff. Kohlendioxid, Stickstoff und Wasserdampf waren die Hauptkomponenten der Luft vor vier Milliarden Jahren. Der Gesamtdruck und die Temperatur waren wesentlich höher als heute. Der Erdboden war heiß, jedoch blieb die Temperatur unterhalb der Siedetemperatur des Wassers, so daß es stets flüssiges Wasser auf der Erdoberfläche gab. Der Himmel muß zum großen Teil aber nicht vollständig - mit Wolken bedeckt gewesen sein.

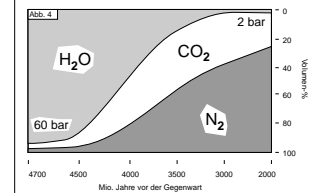
Vor etwa 3,8 Milliarden Jahren entstand das Leben. So alt sind die ältesten Fossilien, die in Grönland gefunden wurden. Zu dieser Zeit war die Ozeantemperatur auf weniger als  $50^\circ\text{C}$  abgesunken. Entsprechend war auch der Wasserdampfdruck der Atmosphäre gefallen.

Die Frühzeit der Erde war geprägt durch starke Regenfälle - eine Folge des Auskondensierens des Wasserdampfes. Es regneten etwa 250 Millionen Kubikmeter Wasser auf die Erde, die Weltmeere stiegen um mehrere hundert Meter. Starke Gewitter begleiteten diesen Zeitabschnitt. Die in der Troposphäre und im Ozean transportierten Wärmemengen pro Jahr mögen

wohl um das Zehnfache höher gewesen sein als heute. Die normale Windstärke war wahrscheinlich Sturm. Die Farbe des Himmels war nicht blau, sondern - wegen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration von etwa noch 30 Volumenprozent - eher grünlich<sup>3</sup>.

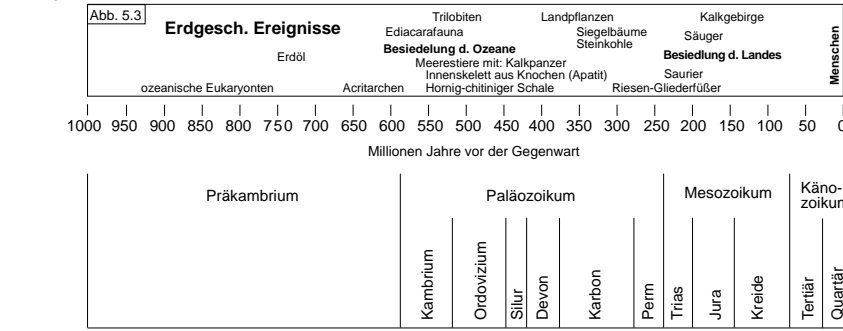
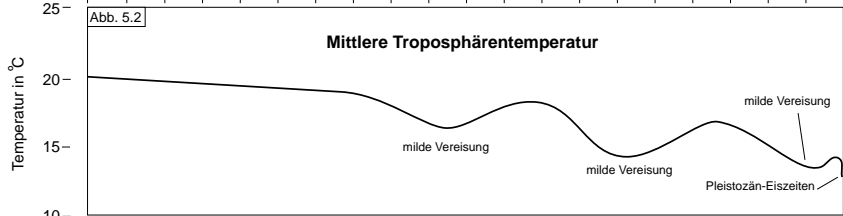
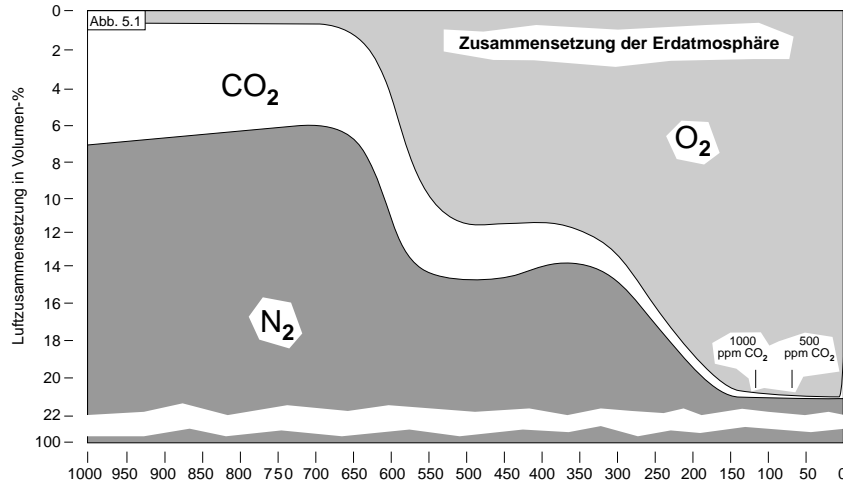
Nach unseren Rechnungen hatte der Ozean zu dieser Zeit an der Oberfläche einen pH-Wert von 6,5 und war damit für das heute bekannte Ozeanleben äußerst ungünstig. Kernlose Einzeller wie Blaualgen (Prokaryonten, Cyanobakterien) waren wahrscheinlich die ersten Lebewesen, die in dieser Umwelt existieren konnten. Auf Grund des hohen Kohlendioxidgehaltes der Luft und der aus den Vulkanen ausströmenden Dämpfe von Salzsäure und schwefeliger Säure war auch der Regen sauer. Die Flüsse dagegen waren, nachdem sie in ihrem Lauf vor allem Lavagestein ausgewaschen hatten, leicht alkalisch. Das Festland präsentierte sich vorerst als Wüste.

Das erste Leben spielte sich vermutlich im Ozean ab: in den oberen 30 Metern küstennaher Gewässer. Allerdings kaum an der Oberfläche des Meeres, denn da es noch keine schützende Ozonschicht gab, tötete die harte UV-Strahlung der Sonne



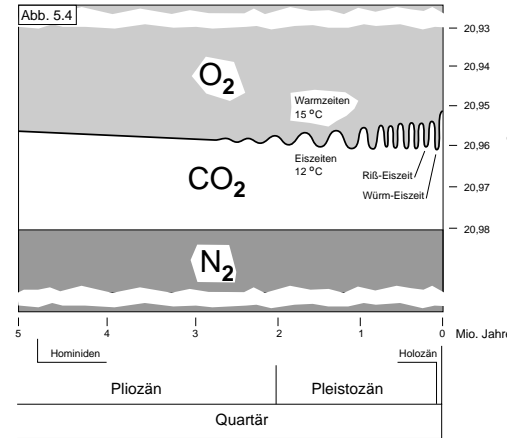
(4) Zeitliche Änderung der Zusammensetzung der Uratmosphäre. Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre blieb während der dargestellten Periode von 4.700 Millionen Jahren bis 2.000 Millionen Jahren vor der Gegenwart unter 0,5 Volumenprozent und wurde deshalb in der Grafik vernachlässigt. In dieser Periode sanken der durchschnittliche Atmosphärendruck von zunächst 60 auf 2 bar und die durchschnittliche Troposphärentemperatur von  $260^\circ\text{C}$  auf  $30^\circ\text{C}$ .

Grafik: F. G. Lucas

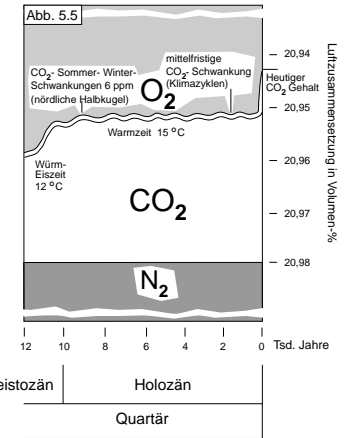


(5.1) Zusammensetzung der Erdatmosphäre in den vergangenen 1.000 Millionen Jahren (H<sub>2</sub>O unberücksichtigt, sonstige Gase wurden mit unter Stickstoff/N<sub>2</sub> gefaßt). Aus Platzgründen wurde die N<sub>2</sub>-Fläche oberhalb 22 Prozent gerafft.). (5.2) Entwicklung der mittleren Troposphärentemperatur auf der Erde. (5.3) Geologische und evolutionsbiologische Ereignisse in diesem Zeitraum. Ergänzend zur Zeitangabe

sind im Fuß der Grafik die Erdzeitalter (wie Paläozoikum, Mesozoikum) und die Systeme (Epochen wie Perm, Trias, Jura) dargestellt. Zur Verdeutlichung der unterschiedlich langen Veränderungsprozesse zeigen die Grafiken (5.4) und (5.5) die näher an der Gegenwart liegenden Veränderungen nochmals in vergrößerten Maßstäben.



(5.4) Die Entwicklung in den letzten 5 Millionen Jahren der Erdgeschichte, sowie in den letzten 12.000 Jahren (5.5). Besonders deutlich wird bei dieser Darstellung, daß die gegenwärtige, auf menschliche Einflüsse zurückgehende Zunahme des



Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre äußerst abrupt einsetzt und – gemessen an bisherigen erdgeschichtlichen Veränderungsprozessen – in sehr kurzer Zeit besorgniserregende Ausmaße angenommen hat.

Grafik: F.G. Lucas

alles Lebendige, das sich hier zeigte. Andererseits fehlte in Tiefen von mehr als 30 Metern das Licht für die Photosynthese. Außerdem war dort das Milieu wegen des sehr niedrigen pH-Wertes und der sehr hohen CO<sub>2</sub>-Konzentration lebensfeindlich. Abbildung (4) zeigt die aufgrund unserer Modellberechnungen geschätzte zeitliche Änderung der Uratmosphäre.

Viele Prokaryonten, kernlose Einzeller, sind photosynthetisch aktiv, binden also Kohlenstoff unter Abgabe von Sauerstoff in ihre Zellmasse ein. Nach der Entstehung des Lebens wuchs die Produktion von Sauerstoff durch diese Prokaryonten an. Der gebildete Sauerstoff gelangte aber nicht in die Atmosphäre, sondern wurde bereits im Meerwasser nach seiner Bildung zur Absättigung von im Wasser vorhandenen löslichen Eisensalzen (Fe(II)) zu Rost (Fe(III)) wieder verbraucht. Der Rost sedimentierte und bildete die dunklen Banden des sogenannten ge-

bänderten Eisensteins<sup>4</sup>. Letzterer ist eine geologische Erscheinung, die an vielen Stellen des ehemaligen Ozeangrundes in Hunderte von Metern mächtigen Schichten zu finden ist.

Die Bildung von gebändertem Eisenstein kam im letzten Abschnitt des Präkambriums zum Erliegen. Andere „sauerstoffhungrige“ Verbindungen, wie Uranit und Pyrit, wirkten übrigens in ähnlicher Weise wie Fe(II) als Sauerstoffsänke. So kam es, daß die Atmosphäre im Präkambrium weitgehend sauerstofffrei blieb, obwohl Sauerstoff produziert wurde – wenn man davon absieht, daß ein leichter Anstieg auf vielleicht ein Volumenprozent in der Mitte des Präkambriums einsetzte, nachdem das Maximum der Eisenreaktion vorüber war.

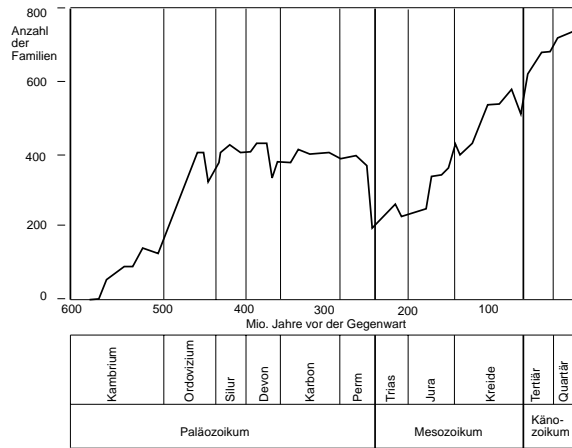
Dieser „kleine“ Anstieg des Sauerstoffgehaltes könnte die Ursache für eine wichtige biologische Entwicklung sein: In der Mitte des Präkambriums bildeten sich die ersten Einzeller mit Zellkern (Eukaryonten).

Man muß annehmen, daß diese höheren Lebewesen die Sauerstoffproduktion deutlich erhöhten – wegen ihres effektiveren Photosynthesystems<sup>5</sup>.

Im großen und ganzen war der Ozean mit einem pH-Wert von etwa 6,5 an der Oberfläche damals sehr sauer und sauerstoffarm. Dieser Zustand hat die Verrottung der abgestorbenen einzelligen Pro- und Eukaryonten wesentlich beeinflusst und anders gestaltet als die heutige Verrottung im Ozean. Wir glauben, daß die Bildung von Erdöl hiermit eng verbunden ist und damals schon begonnen hat.

#### Die Entwicklung der Atmosphäre

Um ein möglichst genaues Modell der erdgeschichtlichen Entwicklung der Troposphärenluft zu zeichnen, insbesondere für den letzten Zeitalter von einer Milliarde Jahren, haben wir Daten und Angaben aus einer Reihe wissenschaftlicher Ar-



(6) Zunahme der biologischen Formenvielfalt während der letzten 600 Millionen Jahre. Deutlich erkennbar sind der Rückgang der Arten im Perm („Permsterben“) sowie die evolutionäre Krise im ausgehenden Mesozoikum, der unter anderem auch die Saurier zum Opfer fielen. Graphik: F. G. Lucas

beuten aus den Bereichen Physik, Chemie, Biologie, Paläontologie, Astronomie zusammengetragen, um ein plausibel erscheinendes Gesamtbild zu erstellen<sup>6</sup>. Die Annahmen und Randbedingungen, auf die sich unser Modell stützt, sind gegenwärtig kaum noch umstritten:

- Die Erstatmosphäre der Erde enthielt – nach Abkühlung auf 50 °C – keinen freien Sauerstoff und bestand überwiegend aus Stickstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid<sup>7</sup>.
- Die *photolytische* Zersetzung von Wasserdampf, ausgelöst durch Lichtstrahlen, lieferte und liefert noch heute freien Sauerstoff – doch in geringer, für die Massenbilanz unbedeutender Menge<sup>8</sup>.
- Die photosynthetische Sauerstoffproduktion durch einzellige Lebewesen im Ozeanwasser setzte früh ein, vor etwa 3,5 Milliarden Jahren, und lieferte rasch hohe Ausbeuten an Sauerstoff, der jedoch sofort zur Absättigung von „sauerstoffhungrigen“ Verbindungen im Meerwasser – wie zum Beispiel Eisen-[III]-Verbindungen, Uranitit und Pyrit – verbraucht wurde und sich deshalb zunächst nicht in der Atmosphäre anreichte<sup>9</sup>.
- Eine der wichtigsten Quellen des Kohlendioxids, der Vulkanismus, nahm im Lauf der Erdgeschichte ab.
- Während der Erdgeschichte gab es stets tektonische Bewegungen der Erdkruste, bei der „frische“ Gesteinsmassen aus dem Erdinneren freigelegt wurden, die immer wieder Sauerstoff aufnehmen und damit eine – schwache – Sauerstoffsenke verursachten.
- Die auf die Erdatmosphäre auftreffende Strahlungsleistung der Sonne in Kilowatt pro Quadratmeter (*Insolation*) hat im Laufe der Erdgeschichte aufgrund der zunehmenden Leuchtkraft der Sonne von 1,0 kW/m<sup>2</sup> auf 1,4 kW/m<sup>2</sup> zugenommen<sup>10</sup>. Diese Zunahme überweg bei weitem die kleineren Schwankungen der Insolation aufgrund der *Erdachspräzession*, der *Eklptik* und *Exzentrizität* der Erdbahn.

- Solange das Festland in der Erdgeschichte wüstenartigen Charakter hatte, war das Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Sonnenstrahlung (*Erdalbedo*) hoch. Mit dem Einsetzen der Festlandbegrünung sank die Albedo wegen der Strahlungsabsorption durch die dunklen, mit Pflanzen bewachsenen Flächen. Erst als sich großflächige Polkappenvereisungen bildeten, stieg die Albedo wieder an.
- Das Ozeanwasser war zu Anfang der Erdgeschichte wegen des hohen Kohlendioxidgehaltes der Luft wesentlich saurer als heute<sup>11</sup>. Eine Abnahme des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre zog einen Rückgang der Kohlendioxidkonzentration im Ozeanwasser nach sich und eine Ausfällung von Karbonaten (Absinken der *Karbonatlysokline*). Umgekehrt führt ein CO<sub>2</sub>-Anstieg zur Auflösung von Karbonatgestein (Ansteigen der Karbonatlysokline).
- *Karbonat-Silicat-Minerale* (z. B. Feldspat) aus Festlandgebirgen werden durch Regenwasser teilweise aufgelöst, wobei das im Regenwasser gelöste Kohlendioxid als Lösevermittler dient. Die Flüsse tragen daher *Hydrogenkarbonate* und lösliche *Silicate* in den Ozean. Dort werden diese Salze ausgefällt oder in die Kalkpanzer und -skelette von Tieren „eingebaut“, wobei der größte Teil des CO<sub>2</sub> wieder freigesetzt wird. Dieser Vorgang ist – für sich betrachtet – eine schwache, relativ gleichmäßige Senke für Kohlendioxid.
- Die Photosynthese der Wasserpflanzen wirkt sich auf den Kohlendioxid-Sauerstoff-Haushalt in gleicher Weise aus wie die der Landpflanzen.

Das Resultat unserer Modellüberlegungen ist in den Schaubildern der Abbildung (5) dargestellt. Die obere Fläche in Abbildung (5.1) läßt die Zunahme des Sauerstoffgehaltes der Erdatmosphäre während der letzten 1.000 Millionen Jahre der Erdgeschichte erkennen. Diese Erhöhung fand in zwei großen Stufen

statt: im *Kambrium* sowie im *Karbon* und im *Perm*. Hinzu kommt ein weiterer mäßiger Anstieg in der *Trias* und im *Jura*.

Die Fläche darunter verdeutlicht die Entwicklung des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre. Während der Sauerstoffgehalt in mehreren Stufen zunahm, verminderte sich der Kohlendioxidgehalt entsprechend. Abbildung (5.2) veranschaulicht den von uns unter Berücksichtigung von *Erdalbedo* und Strahlungsgleichgewicht errechneten Verlauf der mittleren Troposphärentemperatur. Man erkennt einen allgemeinen Trend der Abkühlung für die Zeit nach dem Präkambrium, jedoch ist der Abfall nicht stetig, sondern wellenförmig. Jeweils am Ende der kambrialen Verminderung und der Karbon-Perm-Verminderung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes sowie im *Oligozän* – also etwa 30 Millionen Jahre vor der Geschichte – sind milde Vereisungen in den Polkappenregionen zu verzeichnen.

Während des Präkambriums (vgl. Abb. 5.1), als der atmosphärische O<sub>2</sub>-Gehalt aufgrund der bereits beschriebenen Absättigungsvorgänge auf einem niedrigen, verhältnismäßig gleichmäßigen Plateau von unter einem Volumenprozent blieb, bestand die Ozeanpopulation, wie schon erwähnt, aus Prokaryonten und später aus den auf einer höheren Entwicklungsstufe stehenden Organismen mit Zellkern. Größere Lebewesen gab es nicht, wenn man davon absieht, daß für eine relativ kurze Zeitperiode gegen Ende des Präkambriums Riesenzellen – bestimmte Arten von *Acritarchen* – die Meere bevölkerten, was man als den ersten Versuch der Natur zur Größe ansehen kann.

Im letzten Abschnitt des Präkambriums entwickelten sich die ersten vielzelligen Meereslebewesen, sehr kleine Pflanzen und Tiere. Zu Beginn des Kambriums, vor rund 650 Millionen Jahren, begann sich dann die sogenannte *Ediacara-Fauna* – benannt nach den Fossilfunden in

*Ediacara Hills*, Australien – auszubilden. Dies waren vermutlich qualienartig weiche Organismen mit Abmessungen von einigen Dezimetern und in verschiedenen Formen, die keine Hartteile, Knochen oder Kalkpanzer hatten. Wegen ihrer relativ großen Körperoberfläche brachten sie günstige Voraussetzungen für die Resorption von Sauerstoff mit. Man kann schließen, daß sie in einem „saurer“ Ozean mit recht niedrigem Sauerstoffgehalt leben konnten<sup>12</sup>. Anschließend, im Kambrium, kamen die ersten Tiere mit kalk- und phosphathaltigem Außenskelett auf. Sie verfügten wegen ihres Außenskeletts über deutlich weniger Resorptionsfläche für Sauerstoff. Aus diesen, mit fossilen Funden zu belegenden Tatsachen ist zu schließen, daß die ozeanische Kambriumtierwelt bereits in einem weniger „saurer“ und sauerstoffreicheren Milieu lebte.

Zu Beginn und während der Kambriumzeit müssen fundamentale Änderungen der Ozeanwasserzusammensetzung stattgefunden haben. Der Sauerstoffgehalt stieg bei gleichzeitiger Abnahme des CO<sub>2</sub>-Gehaltes drastisch an. Dies hatte zur Folge, daß der pH-Wert von seinem präkambrialen Niveau von etwa 7,0 deutlich auf Werte zwischen 7,3 im *Ordovizium* und 7,4 im *Karbon* anstieg. Die Evolution des Meereslebens, die aus Fossilfunden zeitlich recht genau datierbar ist, folgte der sich verändernden Atmosphäre und des sich entsauernden Ozeanwassers mit einem bemerkenswerten Entwicklungsschub<sup>13</sup>. Die beginnende Sauerstoffzunahme in der Atmosphäre (Abb. 5.1, links oben) signalisiert aber auch, daß die Absättigung der im Ozean vorhandenen sauerstoffhungrigen Verbindungen gerade zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen war. Man kann diesen Zusammenhang auch so sehen: Während des Kambriums war die Produktion an freiem Sauerstoff und der entsprechende Verbrauch an CO<sub>2</sub> durch die Photosynthese der Ozeanflora stärker als die Leistungsfähigkeit aller

dann noch vorhandenen Sauerstoffsenken und Kohlendioxidquellen. Der Sauerstoffgehalt stieg an, und der CO<sub>2</sub>-Gehalt fiel ab.

Die milde Vereisung gegen Ende des Kambriums, welche wahrscheinlich hauptsächlich die am Südpol liegende Region des Kontinents *Gondwana*<sup>14</sup> betraf (vgl. Abb. 5.2), sehen wir als Signal für das – vorläufige – Ende des Sauerstoffanstiegs. Ein erstes Minimum der Isolationswirkung der irdischen Kohlendioxidhülle wurde erreicht, was – angesichts des damals im Vergleich zu heute immer noch hohen Restgehaltes an CO<sub>2</sub> – nur deshalb zur Vereisung führte, weil die Sonneneinstrahlung in jener Zeit noch niedriger und die Albedo stärker war als heute.

Die O<sub>2</sub>-Kurve mündet nun in ein neues Plateau bei etwa zwölf Volumenprozent ein. Es scheint damit dasjenige Niveau an Sauerstoffkonzentration in der Luft erreicht zu sein, welches erforderlich war, um sauerstoffhungrige Verbindungen auf dem damals wüstenartigen Festland abzusättigen und der beispielsweise zur Bildung von Rot-sandstein geführt hat. Dieser Vorgang, der vermutlich in seiner stärksten Ausprägung 200 bis 250 Millionen Jahre anhielt, hat für den längsten Teil dieser Zeit die Weiterentwicklung der Atmosphäre behindert. Die Besiedelung des Festlandes mit Fauna und Flora kam während des *Ordoviziums*, *Silurs* und *Devons* nicht in Gang, so daß man diese Periode – was die Evolutionsgeschichte des Landes betrifft – als ereignisarm im Vergleich mit den nachfolgenden Zeiten bezeichnen kann.

Während des Devons und besonders zu Beginn des Karbons verstärkte sich die Ozonschicht in der Stratosphäre derart, daß die solare UV-Strahlung die Verbreitung des Lebens auf dem Festland nun nicht mehr behinderte. Wenige Millionen Jahre vorher, im oberen Devon, war die UV-Wirkung vermutlich noch beträchtlich. Amphibien, die damals

das Wasser verließen und die Uferzonen des Festlandes besiedelten, waren zu dieser Zeit an Land der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt und entwickelten durchweg eine UV-undurchlässige Rückenpanzerung<sup>15</sup>. Oder, andersherum ausgedrückt, es sind bis heute keine Tiere, etwa Schnecken, bekannt, die Teile ihrer Haut direkt der Sonne ausgesetzt haben. Analoges ist auch bei der Entwicklung der Landpflanzen festzustellen: Schilfähnliche, aus dem Wasser wachsende Pflanzen aus der Übergangszeit vom Silur zum Devon (*Rhyniales*) sowie die ersten Landpflanzen aus dem Devon waren durch harte und UV-beständige äußere Zellstrukturen gegen die star-

---

**Zu Beginn des Karbons verstärkte sich die Ozonschicht in der Stratosphäre, so daß die solare UV-Strahlung die Verbreitung des Lebens auf dem Festland nicht mehr behinderte.**

---

ke Sonneneinstrahlung geschützt, während die Pflanzen des Karbons diesen Schutz nicht mehr nötig hatten. Der damalige Ozonaufbau, der diese Entwicklungen erst ermöglichte, muß selbstverständlich mit einer *Zunahme* des Sauerstoffgehaltes der Atmosphäre zusammengehangen haben – er wäre kaum vorstellbar, wenn der O<sub>2</sub>-Gehalt konstant gewesen wäre und schon weit vor dem Devon sein heutiges Niveau gehabt hätte.

Das üppige Pflanzenwachstum, das zu Beginn des Karbons einsetzte, wurde also einerseits erst möglich durch die Abnahme der UV-Strahlung, ist jedoch andererseits die Ursache für den Sauerstoffanstieg. Dieses „Henne-Ei-Problem“ ent-

puppt sich also als eine „Hand-in-Hand-Leistung“ der Natur.

Während des Karbons stieg die Sauerstoffkonzentration der Luft nun durch Photosynthese und die fossile Einspeicherung von Kohlenstoff als Kohle von 12 auf etwa 15 Volumenprozent an. Entsprechend sank der Kohlendioxidgehalt ab, wobei der abnehmende CO<sub>2</sub>-Partialdruck eine weitere Entsäuerung der Luft und des Ozeanwassers bewirkte. Der Anstieg erstreckte sich, wie Abbildung (5.1) zeigt, über das Karbon hinaus in das Perm und in das *Mesozoikum*, wobei die Kurve im Perm einen maximalen Steigungsgradienten zeigt.

Hier liegt unseres Erachtens der wesentliche Grund für das sogenannte „Permsterben“<sup>16</sup>. Es setzte zum Ende der Karbonzeit ein und führte zu einer vorübergehenden, aber drastischen Steigerung des Aussterbens von Meerestieren, Amphibien, Landtieren und Pflanzen während des Perms und brachte schließlich, gegen Ende des Zeitalters, einen vorübergehenden, aber deutlichen Rückgang der Zahl auf der Erde existierender Tier- und Pflanzenfamilien (Abb. 6). Daß der Anstiegsgradient Ursache der hohen Sterberate unter den Arten ist, liegt einerseits an der durch ihn bewirkten Abkühlung der Troposphäre (Abb. 5.2), andererseits an den im folgenden beschriebenen Anpassungsproblemen durch die Evolutionsunsymmetrie.

Blicken wir zunächst jedoch noch einmal in die Karbonzeit zurück. Diese Welt war wegen ihrer Andersartigkeit und Dynamik faszinierend. In einer extrem kurzen erdgeschichtlichen Zeitraum eroberte üppiger Grünwuchs das Festland. Die Begrünung erreichte vorübergehend ein Ausmaß, das seitdem nie wieder erreicht worden ist. Eine Konsequenz war ein erheblicher Rückgang der Erdalbedo bis zu ihrem Minimum, verbunden mit einem Temperaturanstieg in der Trias und im Jura.

Zu bedenken ist weiterhin, daß die Vegetation bei der Erstbesiedelung von Ödland ohne Mutterboden auskommen mußte. Siegelbäume, Riesenfarne und Riesenschachtelhalme wuchsen in Wasserlachen, quasi hydrokulturarartig. Ihre Gestalt und Lebensfunktionen unterschieden sich teils graduell, teils sehr deutlich von Gestalt und Funktionsweise der heutigen Pflanzen. Im Laufe der Zeit verwandelten sich durch Ansammlung von Verrottungsprodukten die Wasserlachen in Sümpfe. Diese boten einer uns heute fremd erscheinenden Tierwelt Lebensraum: Riesenarthropoden, Gliederfüßer wie etwa Tausendfüßer mit bis zu 180 Zentimetern Länge und Libellen mit einer Flügelspannweite von einem halben Meter stellen das, was wir an Entsprechendem aus unseren heutigen Tropen kennen, weit in den Schatten. Diese Welt hatte ein anderes Luft- und Wassermilieu als die heutige. Menschen wären in dieser Atmosphäre mit einem CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Verhältnis von etwa 1:14 nicht lebensfähig gewesen<sup>17</sup>.

Insgesamt betrachtet brachte die Zeit vom Karbon bis zum Ende des Mesozoikums den entscheidenden Entwicklungsschub der Evolution. Ihr Ende in *Jura* und *Kreidezeit* ist gekennzeichnet durch den weiteren Verlust von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre und im Ozeanwasser, was mit der massiven Bildung von Karbonaten, also von Kalk und *Dolomit* in den Meeren, einherging. Kalkausfällungen sind eine Folge der Entsäuerung von *kalziumhydrogenkarbonathaltigem* Meerwasser. Diese lassen sich daher in allen Zeiten feststellen, in denen ein Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration gegeben war – beispielsweise auch im Kambrium. Im Mesozoikum jedoch erreichten sie ihr absolutes Maximum.

Die gewaltigen Kalkgebirge aus dem Mesozoikum sind daher nur mit der Entsäuerung des Ozeanwassers, die zu diesem Zeitpunkt einen Anstieg des pH-Werts von 7,4 auf 8,0 mit sich brachte, zu erklären.

Der Entzug von CO<sub>2</sub> aus dem Wasser liefert somit einen weiteren Hinweis für die Veränderung der Luftzusammensetzung während dieser Zeit.

Im *Neozoikum* erreicht der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre sein heutiges Niveau, während der Kohlendioxidgehalt in den „ppm-Bereich“ absank. Diese Vorgänge im letzten Zeitabschnitt, dem *Quartär*, sind auf Abbildung (5.1) nicht mehr erkennbar. Der Kurvenverlauf wurde deshalb vergrößert.

Die Darstellung der Abbildung (5.4) zeigt den Kurvenverlauf in seinem letzten Abschnitt in vergrößertem Maßstab. Zu erkennen ist, daß der Kohlendioxidgehalt im *Pliozän*

---

**Alle Lebewesen mußten sich im Prozeß der Evolution durch Mutation und Selektion in vielen kleinen Schritten an die sich verändernde Atmosphäre anpassen.**

---

kontinuierlich bis auf etwa 200 ppm absank, verursacht durch die immer weiter fortschreitende Begrünung der Erdoberfläche und der mit ihr verbundenen Kohlenstoffbindung in Pflanzen, Mutterboden und fossilisierten Stoffen. Diese Entwicklung leitete die erste *Pleistozänezeit* ein. Nun begann der Kohlendioxidgehalt zwischen 200 und 270 ppm zu schwanken, jeweils zu Beginn einer Eiszeit lag er bei 200 ppm, zu Beginn einer Warmzeit bei 270 ppm. Die letzten Schwingungen der Wellenlinie sind durch CO<sub>2</sub>-Messungen aus Eiskernbohrungen belegt. Der Kurvenverlauf legt den Gedanken nahe, daß das Wechselspiel zwischen CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> vielleicht nicht die Folge, sondern die Ursache der Pleistozänezeiten gewesen sein könnte.

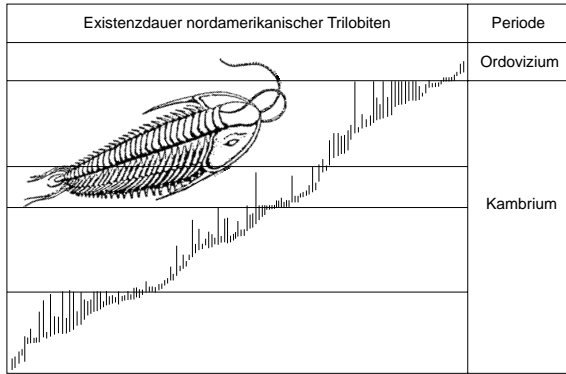
Die heute am häufigsten genannte Theorie über die Ursache der Eiszeiten stammt von Milankovic<sup>18</sup>. Die Theorie führt letztlich als Ursache der Eiszeiten die in bestimmten Zyklen schwankende Sonneneinstrahlung – also Insolationsveränderungen aufgrund von Präzession, Ekliptik und Exzentrizität der Erde – an.

Die Theorie hat nach unserer Ansicht zwei Schwachpunkte:

- Die Insolationschwankungen sind extrem gering. Man kann bezweifeln, daß sie derartige Temperaturänderungen ausgelöst haben.
- Solche typischen Kälteschwankungen wie die Pleistozänezeiten müßten schon viel früher stattgefunden haben, da die entsprechenden Erd- und Erdbahnbewegungen sich bereits bald nach der Erdentstehung ausgebildet haben dürften. Dafür aber fehlt der Nachweis.

Unsere Hypothese dagegen zielt auf einen Zusammenhang mit der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre. Erst als der CO<sub>2</sub>-Gehalt auf 200 ppm abgesunken war, wurden – wegen der sehr gering gewordenen Wärmeisolation durch die „CO<sub>2</sub>-Decke“ – Temperaturverhältnisse erreicht, welche die Eiszeiten einleiten konnten:

- Die Erde kühlte ab, wovon die Polarzonen, also die Dunkelgebiete, besonders stark betroffen waren.
- Die große Temperaturdifferenz zwischen äquatorialen und polaren Zonen äquilierte die Meeresströmungen vom Äquator zu den Polen aufgrund der sogenannten *Thermosiphonwirkung*. Das wichtigste Beispiel hierfür ist der Golfstrom. Wir nehmen an, daß er kräftig genug wurde, um in das Nördliche Eismeer vorzudringen.
- Das warme Golfstromwasser im Nördlichen Eismeer und die darüber liegende sehr kalte Luft führten zu einem „Waschkücheneffekt“ – zu Eisnebel- und Schneebildung in ungewöhnlichem Umfang.
- Nur so – durch viel Schnee – ist die Auftürmung gigantischer Gletschermassen in der Nordpolregion zu er-



(7) Existenzdauer von etwa 150 nordamerikanischen Trilobitenarten während des Kambriums.  
Grafik: F. G. Lucas

klären. Kalte Witterung allein hätte hierzu nicht genügt.

- Die durch die Reflexion des Sonnenlichtes wachsende Albedo der Gletscher verstärkte den Effekt.
- Der Meeresspiegel sank aufgrund des Wasserentzugs durch die Schneefälle. Der weitere Zustrom von Golfstromwasser in das Nördliche Eismeer kam zum Erliegen, damit dem Absinken des Wasserstandes zwischen den Shetlandinseln und Island eine Strömungsbarriere (*Island-Färöer-Schwelle*) entstand<sup>19</sup>.
- Allmählich wurde wegen der mittleren Abkühlung der Erdatmosphäre und wegen der Eisbedeckung großer Flächen die Erdbegrünung, die vorher ein Maximum erreicht hatte, wieder geringer. Die gebundene Kohlenstoffmenge ging zurück, und ein größerer Anteil an CO<sub>2</sub> erreichte wieder die Atmosphäre. Die Erde wärmte sich also wegen der wieder erhöhten Isolationswirkung der Atmosphäre auf, der Eiszeit folgte eine Warmzeit. Es ergab sich eine Art „Winter-Sommer-Effekt“, wie er sich in ähnlicher (allerdings etwa zwölfmal schwächeren) Weise an den „Winterzacken“ der Mauna-Loa-Kurve ablesen läßt. Dabei stieg der CO<sub>2</sub>-Gehalt wieder auf 270 ppm an. Da der Antarktis ein Äquivalent zum Nördlichen Eismeer fehlt, waren die Eiszeiten dort entsprechend weniger deutlich entwickelt.

Nach dieser Hypothese sind die Pleistozäneiszeiten also direkt und primär mit dem Pflanzenwachstum gekoppelt. Das eiszeitliche Pendeln stellt eine Art Regelpendeln eines im dynamischen Gleichgewicht befindlichen Regelsystems zwischen Kohlendioxid und Sauerstoff dar, bei dem die photosynthetische Assimilationsleistung die Funktion des Reglers übernommen hat.

Ein geradezu zwingender Grund für die hier beschriebene Verursachung der Pleistozäneiszeiten ergibt sich aus einer einfachen physikalischen Betrachtung: Gesetzt den – unmöglichen – Fall, eine immer weiter fortschreitende Erdbegrünung

und Kohlenstoffossilierung hätte die Atmosphäre vollständig von CO<sub>2</sub> befreit. Dann wäre die Erde zu einem Eisblock geworden mit einer Troposphärenmitteltemperatur, die um rund 30 °C niedriger läge als die heutige Mitteltemperatur von +15,5 °C (vgl. Abb. 1). Dies errechnet sich für die dann gegebene Isolationswirkung aus den ein- und abgestrahlten Wärmemengen. Da die Abkühlung der Erde den Begrünungsschritt begrenzt, muß hier eine Selbsthemmung vorliegen, die im Dauerzustand in eine Schwingung übergeht.

Betrachten wir nun den allerletzten Teil der Kurve, nämlich den Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes im letzten Abschnitt des *Holozäns*. Diese Periode ist in Abbildung (5.5) nochmals vergrößert dargestellt, die Abszisse wurde gestreckt. Links ist die letzte Halbschwingung der Würmeiszeit mit der ihr folgenden neuzeitlichen Warmzeit zu erkennen. Der leicht wellenförmige Linienverlauf soll den „Rauschpegel“ verdeutlichen, das heißt, den Einfluß natürlicher Klimaänderungen. Der übliche Sommer-Winter-Unterschied ist durch die Doppellinie angedeutet.

Der plötzliche, steil nach oben weisende Verlauf der Scheidelinie zwischen Sauerstoff und Kohlendioxid am Ende des Holozäns zeigt die vom Menschen verursachte Atmosphärenveränderung: den Abfall des Sauerstoffgehalts und den entsprechenden Anstieg des CO<sub>2</sub>. Auf den ersten Blick erkennt man die Abruptheit und das Ausmaß der Entwicklung, die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre steigt Jahr für Jahr meßbar um 1,6 bis 2,0 ppm. Die CO<sub>2</sub>-Kurve verläßt die Bandbreite der eiszeitlichen Regelschwankungen. Für eine natürliche Konzentrationsänderung von 180 ppm während einer Eiszeit auf 270 ppm zu Zeiten einer Warmperiode vergingen in der Regel einige 10.000 Jahre. Die gegenwärtig vom Menschen verursachte Zunahme des atmosphärischen Kohlendioxids

wird die gleiche Konzentrationsänderung in nur 40 Jahren herbeiführen, also etwa tausendmal schneller.

Das System wird instabil. Die im Naturhaushalt vorhandenen Selbstregulierungskräfte, wie die Stimulanz des Pflanzenwachstums durch CO<sub>2</sub> oder die mit dem Partialdruck steigende CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans, genügen offensichtlich nicht, den Anstieg zu stoppen. Mit steigender Abweichung wird die Chance auf Selbstheilung geringer. Der bis heute erreichte CO<sub>2</sub>-Gehalt von 360 ppm hatte vor etwa 35 Millionen Jahren schon einmal geherrscht. Ein CO<sub>2</sub>-Gehalt von 500 ppm gemäß unserer Kurve würde in eine Atmosphäre zurückführen, die vor etwa 60 Millionen Jahren vorzufinden war. Ein Kohlendioxidgehalt von 1.000 ppm entspräche einem Rückschritt von 120 Millionen Jahren. Er würde die „Saurieratmosphäre“ wiedererstanden lassen. Unsere „Reisegeschwindigkeit“ in die Vergangenheit ist dabei jetzt schon atemberaubend: Jedes Jahr, in dem wir weiterhin die Atmosphäre mit CO<sub>2</sub> um die heute meßbare Menge anreichern, führt uns um 180.000 Jahre zurück.

#### Evolutionenbiologische Folgen

Bereits durch das bisher Dargestellte dürfte deutlich geworden sein, daß Qualität und Ausmaß des Pflanzen- und Tierwachstums immer wieder zu Atmosphärenveränderungen geführt haben. Im Laufe der Jahrtausende folgte die Atmosphäre dem biologischen Leben – und letzteres wiederum der sich entwickelnden Atmosphäre in einem eng verknüpften und, wie wir vermuten, nicht reversiblen Wechselspiel.

Alle Lebewesen, Flora und Fauna, aber auch Mikrolebewesen wie Bakterien, Pilze und Viren mußten sich im Prozeß der Evolution durch Mutation und Selektion in vielen, jeweils kleinen Schritten<sup>20</sup> an die sich

verändernde Atmosphäre anpassen. Da während mehr als 99 Prozent der Zeit der Erdgeschichte der Sauerstoffgehalt anstieg, mußten in der Regel Arten mit geringerer Sauerstoff-Verträglichkeit solchen Platz machen, die einen höheren Sauerstoffgehalt vertrugen – und die schließlich auf ihn angewiesen waren. Bei den Tieren hat die Erhöhung des Sauerstoffpartialdruckes im Blut wahrscheinlich eine Tendenz zu einer höheren Körpertemperatur, zu individueller Temperaturregulation, einer höheren Stoffwechsellage, zu lebhafteren Gehirnfunktionen und insgesamt zu komplizierteren Lebensformen geführt<sup>21</sup>. *Das sich im Lauf der Erdgeschichte verändernde Verhältnis von Kohlendioxid zu Sauerstoff in der Troposphärenluft war – wie wir meinen – die primäre und wichtigste Leitgröße für die Evolution der Tier- und Pflanzenwelt. Hierbei bleibt unbestritten, daß es natürlich auch andere Triebkräfte der Evolution gab und gibt<sup>22</sup>. Aber keine von ihnen weist ein vergleichbar großes und gleichmäßig gerichtetes Veränderungspotential auf. Die Existenz einer solchen Leitgröße erklärt die Zielgerichtetheit der Evolution<sup>23</sup>.* Auf einer Erde, die von Anfang an immer die gleiche Luftzusammensetzung gehabt hätte, wären vermutlich andere Entwicklungen abgelaufen. Das Verhältnis von CO<sub>2</sub> zu O<sub>2</sub> hat, wie die erdgeschichtliche Entwicklung der Atmosphäre und der Erdpopulation zeigt, durch Selektionsdruck gestaltend gewirkt. Dies ist bemerkenswert, weil beide Komponenten, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>, an sich weder giftig noch mutationsfördernd auf die jeweils bestehenden Populationen wirken.

Die Existenzdauer von Tier oder Pflanzenarten liegt – wie Paläontologieliteratur zeigt<sup>24</sup> – fast immer nur bei wenigen Millionen Jahren, das heißt, im Verhältnis zu den riesigen Zeiträumen des Erdmittelalters lebte eine Art in unveränderter Form nur kurze Zeit. Es gab ein

dauerndes Kommen und Gehen. Da die fossilen Belege notwendigerweise unvollständig, lückenhaft sind und meist nur Knochen und Kalkpanzer, also harte Bestandteile des Körpers wiedergeben, bleibt im Dunklen, wie rasch sich die Arten wirklich verändert haben – vermutlich rascher als paläontologische Spuren es ausweisen. Das Aussterben der Saurier mit einem Meteoriteneinschlag zu erklären (Alvarez-Hypothese), also auf einen Zeitpunkt festzulegen, trifft sehr wahrscheinlich nicht die Wirklichkeit.

Aufschlußreich ist hier die Geschichte der *Trilobiten*. Sie lebten als Bewohner der Schelf- und Uferregionen der Meere in der Zeit vom Kambrium bis zum Beginn des Perms, also über knapp 300 Millionen Jahre. Es gab unterschiedliche Formen, mit Größen von Zentimetern bis zu einigen Dezimetern. Die Trilobiten gehören zu den Gliederfüßern (*Arthropoden*) und damit zu den Vorfahren der heutigen Gliederfüßer, der Insekten, der Krebse, Pfeilschwänze, Spinnen und Tausendfüßer.

Während der 300 Millionen Jahre ihrer Existenz gab es nicht weniger als 10.000 verschiedene Arten von Trilobiten. Diese lebten unverändert jeweils nur die relativ kurzen Zeiten von wenigen Millionen Jahren. Abbildung (7) zeigt, als senkrechte Striche, die Existenzzeiten von etwa 150 nordamerikanischen Trilobitenarten während des Kambriums<sup>25</sup>. Sie liegen fast alle zwischen einer bis drei Millionen Jahren, die meisten zwischen einer bis zwei Millionen Jahren. Die gestaffelte Nacheinanderfolge einer so hohen Anzahl an Arten legt den Schluß nahe, daß hier eine allmähliche Milieuveränderung durch Selektionsdruck gewirkt hat. Die damals wichtigste weltweite Milieuveränderung war die Veränderung der Luftzusammensetzung und die damit verbundene Wasserentsäuerung. In der in Abbildung (7) an der senkrechten Koordinate dargestellten Zeitspanne von fünf Millio-

nen Jahren veränderte sich das Verhältnis von Kohlendioxid zu Sauerstoff deutlich: Der CO<sub>2</sub>-Gehalt fiel etwa um als 1000 ppm ab, während der O<sub>2</sub>-Gehalt um mehr als 2000 ppm anstieg. Dies ist aus der CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Kurve (Abb. 5.1) in etwa abgreifbar. Die meisten Trilobiten verschwanden also nach Existenzzeiten, in denen der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft um circa 400 ppm fiel und der O<sub>2</sub>-Gehalt um mehr als 800 ppm anstieg.

Falls die Hypothese richtig ist, daß die Existenzdauer vieler Trilobitenarten durch Veränderung der Luft- und Wasserqualität begrenzt wurde, so ergibt sich die Frage, wie so eine solch geringe Änderung, die

**Es ist mit dem vermehrten Auftreten neuer Krankheiten und Seuchen, sowie einem zunehmendem Aussterben von Arten zu rechnen.**

sicher weit unterhalb der *Toxizitätsgrenze* liegt, so große Auswirkungen haben konnte. Das Aussterben muß daher einen Grund haben, der nichts mit einer toxischen Wirkung von CO<sub>2</sub> oder O<sub>2</sub> zu tun hat.

Er ist, wie wir meinen, in einem evolutionsbiologischen Mechanismus zu suchen, den wir Evolutionsunsymmetrie nennen:

- Die Atmosphärenzusammensetzung einer so hohen Anzahl an Arten legt den Schluß nahe, daß hier eine allmähliche Milieuveränderung durch Selektionsdruck gewirkt hat. Die damals wichtigste weltweite Milieuveränderung war die Veränderung der Luftzusammensetzung und die damit verbundene Wasserentsäuerung. In der in Abbildung (7) an der senkrechten Koordinate dargestellten Zeitspanne von fünf Millio-

• Je rascher sich die Atmosphärenzusammensetzung ändert, desto wahrscheinlicher wird auch das Entstehen neuer Arten unter den Mikrolebewesen.

• Hieraus folgt – rein statistisch – eine Zunahme von Inkompatibilitäten bei sich evolutiv langsamer adaptierenden Arten in Form von Krankheiten und Seuchen.

Nach unserer Hypothese folgte die Evolution der Pflanzen- und Tierwelt bisher der Atmosphärenzusammensetzung. Sie wird auch in Zukunft nicht anders funktionieren. Eine abrupte Veränderung der Atmosphärenzusammensetzung, wie sie derzeit erfolgt, fällt wegen ihrer unnatürlichen Richtung, vor allem aber wegen ihres enormen Änderungsgradienten, völlig aus dem Rahmen der bisherigen Entwicklung. Während Mikrolebewesen und Viren, mit Generationsfolgen in der Größenordnung von Stunden, keine Schwierigkeiten haben, sich – beispielsweise innerhalb eines Zeitraumes von zehn Jahren<sup>26</sup> – *mutativ* und selektiv an eine neue Umgebung anzupassen, fehlt den großen Tieren und Pflanzenarten hierzu die Zeit. Die bessere Anpassungsfähigkeit der Mikrolebewesen bringt jedoch in der Konkurrenz der Arten spezifische Nachteile für Lebewesen mit längeren Anpassungszeiten: Die Wahrscheinlichkeit der Entstehung neuer, durch Mikrolebewesen verursachter Krankheiten wird also steigen.

Wir haben, ganz bewußt, Viren in die Gruppe der Mikrolebewesen einbezogen, obwohl sie eigentlich „Halblebewesen“ sind. Bei evolutionsbiologischen Vorgängen verhalten sich Viren wie andere Mikrolebewesen, beispielsweise wie Bakterien: Sie unterliegen dem genetischen Wandel, der durch Selektionsdruck hervorgerufen wird. Für das Virus ist die Gastzelle quasi der Lebensraum. Von dem dort gegebenen Milieu ist das Virus in besonderem Maße abhängig, da es sich Lebensfunktionen von der Zelleorgt. Ist



Im Gespräch über die langfristigen Risikopotentiale atmosphärischer Veränderungen (v. l.): Burkhard Klopries (Hüls AG, Marl), Prof. Günter Schmid (Universität GH Essen), Günter Beckmann (Hüls AG, Marl) und Norbert Weigend (Essener Unikate). Foto: Tilo Karl

die Veränderung des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes in der Zelle spürbar, dann ist auch das Virus betroffen. Es wird durch milieubedingten Selektionsdruck genetisch beeinflusst. Schließlich muß man auch in Betracht ziehen, daß das Virus in seiner „Leblosphase“, das heißt, auf seinem Transport von Zelle zu Zelle, von einem „Gastgeber“ zum anderen, beeinflussbar (selektierbar) ist, wobei in manchen Fällen sogar eine direkte Auswirkung der Luftzusammensetzung denkbar ist.

Man mag hier argumentieren, die diskutierte Änderung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes wäre zu gering, um Lebewesen und deren Weiterentwicklung beeinflussen zu können. Dieser Argumentation müssen zunächst drei Faktoren entgegengestellt werden:

- Die relative Änderung des Kohlendioxidgehaltes von beispielsweise 270 ppm auf 360 ppm bedeutet eine etwa dreißigprozentige Veränderung des Verhältnisses CO<sub>2</sub> zu O<sub>2</sub>. Das chemische Potential aller mit CO<sub>2</sub> verbundenen Chemiereaktionen ändert sich hierdurch signifikant – um etwa vier Prozent. Und das chemische Potential ist maßgebend für die physiologischen Wirkungen.
- Selbst der absolute Wert der Änderung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in Relation zum O<sub>2</sub>-Gehalt ist nicht unbedeu-

tend. Er liegt immerhin in der gleichen Größenordnung wie die klimawirksamen Änderungen der absoluten Temperatur.

• Mikrolebewesen (Einzeller) haben nur geringe Chancen, Milieuveränderungen adaptiv – also ohne genetische Anpassung – zu kompensieren. Das liegt daran, daß eine Barriere zwischen Außenwelt und Zellinnerem nur eine Zellwand zur Verfügung steht und nicht mehrere Zellwände wie bei höheren Lebewesen. Außerdem fehlen Puffermechanismen, die den pH-Wert im Zellinneren bei variablem CO<sub>2</sub>-Zutritt konstant halten. Mikrolebewesen sind deshalb dem umgebenden Milieu ausgeliefert. Ihre Verteidigungswaffe ist die genetische Anpassung. Wegen des raschen Generationswechsels kann eine solche Anpassung in wenigen Jahren erfolgen<sup>27</sup>.

• Es muß mit direkten Folgen des CO<sub>2</sub>-Anstiegs auf Pflanzen gerechnet werden. Solange Pflanzen photosynthetisch aktiv sind – also tagsüber – tritt CO<sub>2</sub> durch die Stomatöffnungen in die Blätter ein und gelangt durch verschiedene Zellwände diffundierend schließlich in die Zellen, wo es den pH-Wert beeinflusst. Änderungen des pH-Wertes und der Pufferaktivitäten im Zellinneren, wenn sie über lange Zeiten und viele

Generationen wirken, werden in sehr komplexer Weise den Stoffwechsel und das Enzymssystem belasten und, sofern das Adaptationsvermögen nicht ausreicht, auch schädigen. Für die CO<sub>2</sub>-verbrauchenden Pflanzen führt übrigens ein CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Luft generell zu einem überproportionalen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Zelle.

Erfahrungen in Treibhäusern zeigen darüber hinaus, daß eine Anhebung des Kohlendioxidgehaltes – verbunden mit dem Treibhauseffekt – zwar zu erhöhter Wachstumsgeschwindigkeit führt<sup>28</sup>, jedoch gleichzeitig auch zu einer deutlich erhöhten Bedrohung durch Pilze und Schädlinge und einer verminderten Fruchtqualität.

Was bedenklich stimmen muß, ist nicht die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration als solche, sondern die evolutionsbiologischen Folgen der unnatürlich schnellen Veränderung unserer Erdatmosphäre.

#### Schadenspotentiale

Die hier dargelegten Sachverhalte, Zusammenhänge, Hypothesen und Argumente wurden in der bisherigen, hauptsächlich auf die Klimafragen gerichteten Diskussion um die Auswirkungen des globalen An-



stiegs von Kohlendioxid in der Atmosphäre gar nicht oder nicht genügend berücksichtigt. Was bedeuten sie für unsere Zukunft?

Aus der enormen Veränderungsrate des atmosphärischen CO<sub>2</sub>, die wir gegenwärtig beobachten, und angesichts der Perspektive, daß die Rate noch steigen wird, ist mit dem vermehrten Auftreten neuer Krankheiten und Seuchen, mit Variationen in bestehenden Krankheitsbildern und mit dem vermehrten Aussterben von Arten zu rechnen. Leider gibt es schon jetzt Indizien für diese Tendenzen. Es ist unbestreitbar, daß in der Gegenwart eine extrem hohe Anzahl an Arten bereits ausgestorben ist. Eine kaum überschaubare Vielzahl neuer oder veränderter Krankheits-erregere wird in der medizinischen und biologischen Literatur beschrieben; in der Öffentlichkeit wahrgenommene „neue“ und noch kaum erforschte Krankheiten wie die Immunschwächekrankheit AIDS und der Erreger des sogenannten „Rinderwahnsinns“ BSE markieren möglicherweise nur die Spitze des Eisbergs. Aggressivität, Virulenz und Resistenz der Mikroben scheinen zuzunehmen. Man denke nur an die Erfahrungen mit der Bekämpfung der Malaria: Die nachlassende Wirkung verschiedener Penicillintypen verdeutlicht nicht nur, wie rasch sich Mikroben an ein für sie „giftiges“ Milieu genetisch anpassen, sondern auch, daß überlebende Stämme gewissermaßen gestärkt aus der Auseinandersetzung hervorgehen. Gewiß ist Penicillin ein wesentlich anderer Stoff und ein stärkeres Bakterizid als CO<sub>2</sub>, doch immerhin verdeutlicht das Penicillinbeispiel die mögliche Entwicklung.

Bedenklich bei der Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Milieuveränderung stimmt nicht nur die Tatsache, daß Kohlendioxid in allen lebenden Zellen an der pH-Wert-Einstellung beteiligt ist, sondern auch der Umstand, daß die CO<sub>2</sub>-Veränderung ubiquitär ist, den gesamten Lebensraum der Erde lückenlos umfaßt und die gesamte

Biosphäre betrifft. Medizin und Pflanzenschutz sind die – schwachen – Waffen, die der Mensch gegen eine Flut neuer Krankheiten einsetzen könnte. Selbst wenn es gelänge, den Menschen selbst und die wichtigsten Nutzpflanzen zu verteidigen, so erscheint es doch hoffnungslos, die gesamte Biosphäre mit allen ihren Arten zu schützen.

Neben der evolutionsbiologischen Bedrohung existiert ein, vor allem die Pflanzen als CO<sub>2</sub>-Konsumenten betreffendes Schädigungspotential durch die direkte Einwirkung der Kohlendioxidänderung. Diesem Problem wird von wissenschaftlicher Seite bereits viel Aufmerksamkeit geschenkt<sup>29</sup>. Weitgehend Einigkeit besteht dabei darüber, daß ein Schädigungspotential vorhanden ist, welches zu einer schwer überschaubaren Veränderung der Biosphäre führt. Festgestellt wurden beispielsweise erhöhte Streifenanfälligkeit, zunehmender Schädlingsfraß, Abnahme der Spaltöffnungen mit Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Pflanzen, Änderungen im Konkurrenzverhalten sowie gestörte Systemgleichgewichte<sup>30</sup>.

Obwohl Wissenschaftler in der ganzen Welt diese – gewissermaßen von außen sichtbaren – Phänomene bereits sorgfältig verfolgen, muß eine wesentliche Ursache im Hintergrund, die prinzipielle Wirkung des Kohlendioxidgehaltes der Luft auf Zell- und insbesondere Enzymfunktionen, jedoch noch genauer als bisher untersucht werden. Weitgehend unklar ist ebenfalls noch, welche Synergien zwischen dem alle größeren Lebewesen – Tiere und Pflanzen – bedrohenden, evolutionsbiologischen Schadenspotential einerseits und dem hauptsächlich Pflanzen betreffenden direkten Wirkungen des CO<sub>2</sub>-Anstiegs andererseits bestehen.

Die von uns postulierten evolutionsbiologischen und direkten Wirkungen betreffen die Biosphäre in ihrer ganzen Breite. Sie werden in den kommenden 100 oder 200 Jahren sichtbar werden, einer – erd-ge-

schichtlich gesehen – extrem kurzen Zeit. Für die heute lebenden Menschen allerdings ist dies eine eher lang erscheinende Periode. Der Einzelne wird, in absehbarer Frist jedenfalls, kaum eine Dramatik spüren, trotz mannigfaltiger Nachrichten über das Fortschreiten des Waldsterbens, das Auftreten neuer Krankheiten und das Aussterben von Arten. In einer kürzeren Zeit von wenigen Jahren wird jedoch klar werden, daß die international vereinbarten Sparziele (Toronto-Konferenz) bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen keine Chance haben, realisiert zu werden. Eine der zentralen Ursachen, die Überbevölkerung der Erde, scheint ebensowenig zu stoppen zu sein. Im Gegenteil, nicht nur der Wachstumstrend ist ungebrochen, hinzu kommt noch der Konsumnachholbedarf der Entwicklungsländer.

Der CO<sub>2</sub>-Anstieg wird mit weiterer Beschleunigung fortschreiten.

## Summary

A steady increase has occurred in the tropospheric CO<sub>2</sub> concentration. Whereas the danger of the greenhouse effect has frequently been discussed, the question remains open whether the CO<sub>2</sub>-rise can have a direct detrimental effect on the biosphere.

Considering the carbon cycle and the changes of the CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> ratio in the air during geological times, two hypotheses have been developed: one about the correlation of global photosynthetic action and ice ages, and another about the effect of varying air composition on the evolution of animals, plants, and microbes that live together. Microbes, because of their rapid generation change, adapt easily to a changing environment, whereas large plants and animals need much more time for genetic adaptation. The current rapid change in air composition spells an advantage for microbes and thus results in an

increased risk of diseases and pests for plants and animals. Countermeasures include more rational use of energy, expanded application of non-fossil energy, as well as afforestation. Bringing population growth under control is clearly of overriding importance.

## Die Autoren:

Dr.-Ing. Günter Beckmann studierte Maschinenbau in Aachen und Stuttgart. Seit 1959 ist er bei der Hüls AG in verschiedenen Bereichen im In- und Ausland – insbesondere in den USA, in Frankreich und in der damaligen Sowjetunion – tätig; zur Zeit leitet er die Abteilung *Neue Entwicklungen* in Marl. Dr. rer. nat. Burkhard Klopries studierte in Essen Chemie mit den besonderen Schwerpunkten *Technische Chemie und Umwelt-Chemie*. Er ist seit 1985 bei der Hüls AG in den Bereichen *Verfahrenstechnik und Neue Entwicklungen* beschäftigt. Seit 1993 ist er Betriebsleiter der Ethylenoxidfabrik des Unternehmens in Marl.

## Anmerkungen:

- 1) Vgl. [1,2,3].
- 2) Vgl. [4,5,6].
- 3) Vgl. [7].
- 4) Vgl. [8,9,10].
- 5) Vgl. [12].
- 6) Vgl. [11–12] und [17]. Andere Autoren haben ebenfalls Modelle hierzu vorgeschlagen, welche jedoch deutlich von unserem Bild abweichen. P. Cloud [13, S. 133] beispielsweise zeichnet ein Bild von der Sauerstoffanreicherung in der Erdatmosphäre, bei der der Zuwachs vor zwei Milliarden Jahren plötzlich einsetzt, der Sauerstoffgehalt dann etwa gleichmäßig steil ansteigt bis – vor etwa 300 Millionen Jahren – dann das heutige Niveau erreicht wird. Bei P. Fabian [14, S. 24] wird eine steile Anstiegsschwelle des freien Sauerstoffs vor etwa 300 Millionen Jahren angedeutet. Bei Schildowski [15] steigt der Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre in Stufen, jedoch wird – ähnlich wie von P. Cloud – ein frühzeitiges Ansteigen des Sauerstoffgehaltes auf hohe Werte angenommen.

- 7) Vgl. [3].
- 8) Vgl. [16].
- 9) Vgl. [14].
- 10) Vgl. [17].
- 11) Vgl. [18,19].
- 12) Vgl. [13].
- 13) Die Entsäuerung des Wassers ist im übrigen der physikalische Grund, weshalb während des Kambriums Knochen und Kalkpanzer gebildet werden konnten – entsprechend den pH-Wert-abhängigen Löslichkeiten von Kalziumhydroxiphosphat und Kalziumkarbonat (pK<sub>S</sub>-Werte). Diese Fallprozesse, die gelöste Stoffe in feste überführen, werden zwar auch durch die Membranwirkung der Zellwände beeinflusst, diese Abkapselungswirkung ist jedoch nur begrenzt.
- 14) Vgl. [20].
- 15) Beispielsweise Ichthyostega [21].
- 16) Vgl. [22].
- 17) Es gibt verschiedene Ansichten zur Frage, wie die oben erwähnten Tiere, die Tracheenatmer waren, angesichts eines noch niedrigen Sauerstoffgehaltes ihre Sauerstoffversorgung sicherstellen konnten, obwohl sie, im Vergleich zu heutigen Tracheenatmern, riesige Dimensionen hatten. Dieses Problem wird ausführlicher diskutiert in: G. Beckmann, H. Hämmerle, O. Inacker, B. Klopries: Das Kardinalproblem. In: H. Neis (Hg): *Die CO<sub>2</sub>-Problematik*. Monographien des Forschungszentrums Jülich, Bd. 9. Jülich, 1993. S. 23f.
- 18) Vgl. [23].
- 19) Vgl. [24].
- 20) Vgl. [25].
- 21) Dies gilt übrigens nicht nur für Säugetiere, sondern auch für Saurier, deren späte Erscheinungsformen weitgehend warmblütig waren.
- 22) Vgl. [20,25].
- 23) Nach unserer Meinung war der Uhrmacher [25] doch nicht blind.
- 24) Vgl. [21].
- 25) Vgl. [20].
- 26) Man schätzt, daß eine signifikante genetische Änderung, die ausreicht, um eine neue Art zu schaffen, etwa 10.000 Generationen benötigt. Hierzu reichen bei Mikrolebewesen wenige Jahre.
- 27) Vgl. [26].
- 28) Vgl. [27].
- 29) Vgl. [28–34].
- 30) Vgl. dazu den Beitrag von R. Guderian in dieser Ausgabe.

## Quellennachweise:

- [1] C. D. Keeling, R. B. Bacastow, A. F. Carter, S. C. Piper, T. P. Whorf, M. Heimann, W. G. Mook und H. Roeloffzen, *Geophys. Monographs* 55 AGU, S. 305, Washington, 1989.
- [2] C. D. Schönwiese, K. Runge, *Der anthropogene Spurengaseinfluß auf das globale Klima*. Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt/Main, Eigenverlag, 1988.
- [3] A. Neftel, H. Oeschger, *Nature* 331, S. 609, 1988.
- [4] *Folienserie des Fonds der Chemischen Industrie zur Förderung der Chemie und Biologischen Chemie im Verband der Chemischen Industrie e.V.*, 22, Umweltbereich Luft, Frankfurt/Main, 1987.
- [5] R. Revelle, *Spektrum der Wissenschaft* 10, S. 16, 1982.
- [6] G. H. Kohlmaier, A. Janacek, J. Kindermann, G. Benderoth, A. Klautius, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt am Main. Zeitliche Entwicklung des globalen Kohlenstoff-Zyklus, Evangelische Akademie, Arnolshaus/Taunus, 09-24, 1988.
- [7] H. Volgel, *Physik*, Springer Verlag, Heidelberg, S. 404, 1977.
- [8] J. Eichler, *Handbook of Stratabound Deposits*, Ed. K. H. Wolf, Vol. 7, S. 157, Amsterdam Elsevier, 1976.
- [9] A. F. Trendall, *Unesco Earth Sciences Ser.* No. 9, S. 257, 1973.
- [10] H. L. James, A. F. Trendall, *Phys. Chem. Sci., Res. Rep.*, 3, S. 199, 1982.
- [11] S. Kempe, E. T. Degens, *Spektrum der Wissenschaft* 11, S. 28, 1986.
- [12] F. Strauch, *Brinkmanns Abriß der Geologie*, 2. Band, 14. Auflage, Enke-Verlag, S. 39.
- [13] P. Cloud, *Spektrum der Wissenschaft*, 11, S. 126, 1983.
- [14] P. Fabian, *Atmosphäre und Umwelt*, 2. Auflage, Springer, Berlin, 1987.
- [15] M. Schildowski, *Spektrum der Wissenschaft*, 4, S. 17, 1981.
- [16] *Encyclopaedia Britannica*, Development of Atmosphere, S. 313, 1973/74.
- [17] Y. F. Kasting, O. B. Toon und J. B. Pollack, *Spektrum der Wissenschaft*, 4, S. 46, 1988.
- [18] *Encyclopaedia Britannica*, Development of Oceans, S. 476, 1973/74.
- [19] W. S. Broecker, *Spektrum der Wissenschaft*, 11, S. 96, 1983.
- [20] S. M. Stanley, *Krisen der Evolution*, *Spektrum der Wissenschaft* Verlagsges. mbH + Co., Heidelberg, 1988.
- [21] R. L. Carroll, *Vertebrat Paleontology and Evolution*, W. H. Freeman and Company, 1988.
- [22] *Encyclopaedia Britannica*, Grassy Period, S. 693, 1973/74.
- [23] C. Covey, *Spektrum der Wissenschaft*, 4, S. 84, 1984.
- [24] F. Strauch, *Geol. History of the Ice-land Faeroe Ridge and its Influence on Pleistocene Glaciations*, in H. P. Bott et al., *Structure and Development of the Greenland Scotland Ridge*, New methods and concept, Pleenum Press, 1983.
- [25] R. Dawkins, *Der blinde Uhrmacher*, Kindler Verlag GmbH, München, 1986.
- [26] H. Hämmerle, O. Inacker, *Der Einfluß des CO<sub>2</sub>-Anstiegs auf die Biosphäre*. Energie-wirtschaftliche Tagesfragen 9, S. 640, 1990.
- [27] S. Nilzen, K. Hovland, C. Dons, S. P. Sletten, *Scientia Hortica* 20, S. 1, 1983.
- [28] F. A. Bazzaz et al., *Oecologia* 79, S. 223, 1989.
- [29] F. A. Bazzaz, K. Garbutt, *Ecology* 69, 4, S. 934, 1988.
- [30] B. R. Strain, J. D. Cure, *Direct Effect of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation*, US-Department of Energy, 1985.
- [31] E. D. Fajer et al., *Science* 243, S. 1198, 1989.
- [32] D. M. Gates, B. R. Strain, J. A. Weber, *Encyclopedia of Plant Physiology*, New Series, Vol. 12D, Springer Verlag, S. 503, 1983.
- [33] E. G. Reekie, F. A. Bazzaz, *Oecologia* 62, S. 196, 1989.
- [34] R. K. Dixon, *Project Leader Forest Effects Project*, EPA Global Change Research Programme, Personal Information.

Wir danken den Herren Professor Dr. F. Strauch und Dr. P. P. Smolka für die Durchsicht unserer Arbeit und die wertvollen Anre-