
ESSENER UNI-KATE

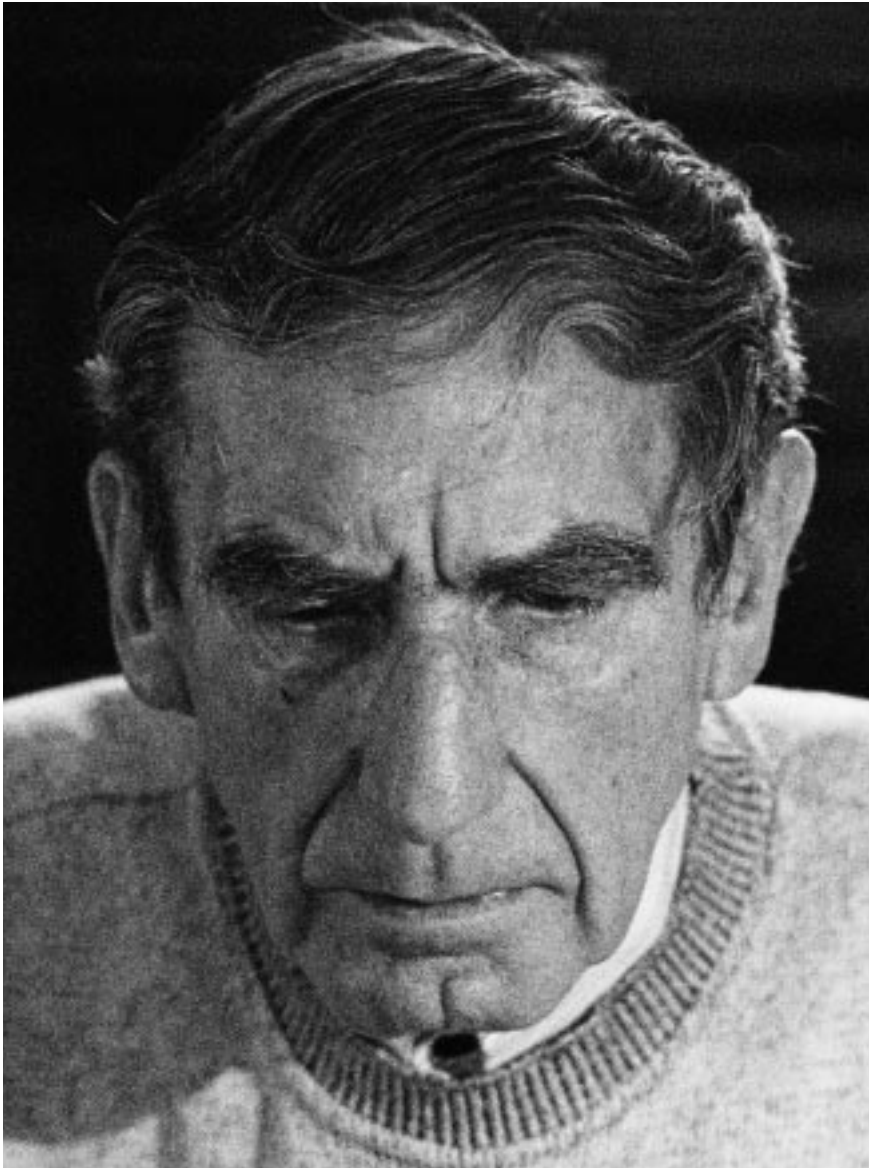
Berichte aus Forschung und Lehre

Naturwissenschaft

4/5

Umweltforschung: Globale Risiken

Herbert Schriefers	8	Von den natürlichen Wurzeln der prekären Lage der Spezies Mensch
Carl Friedrich Gethmann	20	Handeln unter Risiko
Günter Beckmann / Burkhard Klopries	30	Die Auswirkungen des atmosphärischen CO ₂ -Anstiegs auf die Biosphäre
Dieter Schmitt	48	CO ₂ – ein energiewirtschaftliches Dilemma?
Robert Guderian	58	Zur Erforschung von Luftverunreinigungen
Reinhard Zellner	76	Ozonabbau in der Stratosphäre: Ausmaß, Ursachen und Folgen
Christian Streffer	89	Strahlenbelastung: Wirkungen und Schutzstandards
Klaus Norpoth	107	Krebsrisiko Natur?



Von der Medizin zum evolutionsbiologischen Menschen- und Weltbild: Prof. Dr. Dr. h.c. Herbert Schriefer.

Foto: M. Löcker

„Ich hoffe das Beste und
bereite mich auf das Schlimmste vor.“
Dennis Meadows, *Club of Rome*

Das riskante Wesen

Von den natürlichen Wurzeln
der prekären Lage der Spezies Mensch / Von Herbert Schriefer

Es geht die Rede, der Menschheit stehe das Wasser bis zum Hals, und manche glauben, die Zeichen des bevorstehenden Untergangs bereits erkennen zu können. Die Umweltforscher weisen auf Daten hin, die, wenn nicht gerade Allerbösestes, so doch jedenfalls nichts Gutes ahnen lassen.

Wir suchen nach Ursachen für die drohende Katastrophe und finden von Tag zu Tag neue. Nur *eine*

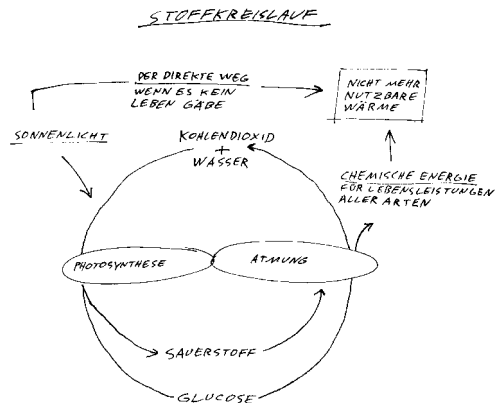
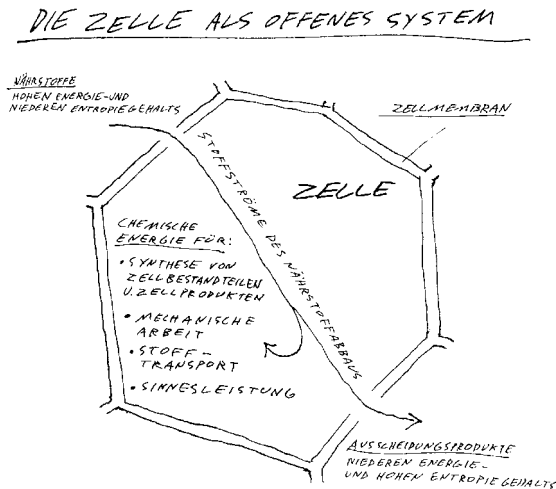
Ursache, die Urursache unterschätzen wir ständig, die nämlich, die aus der Tatsache resultiert, daß der Mensch kein über den Wassern der Wirklichkeit schwebendes Geisteswesen ist, sondern, von seiner Verfassung her, immer noch zu den unter distinkten Naturzwängen stehenden *Lebewesen* zählt und alle für das Leben grundlegenden Eigenschaften mit ihnen teilt. Von diesen Kardinal-eigenschaften und wie deren ur-

sprünglich lebensdienliche, ja, lebensnotwendige Funktionen mit Auftreten des Kulturwesens „Mensch“ die Menschheit in Bedrängnis brachten, soll im folgenden die Rede sein.

Lebewesen sind offene Systeme

Leben ist kein Zeit und Raum seit eh und je unveränderlich erfüllender Hauch; es ist *entstanden* und tritt in klar abgegrenzten, einfach ansprech-

(1) Die Zelle nimmt kontinuierlich Materie hohen Energie- und niederen Entropiegehaltes aus der Umwelt in sich auf und führt Materie niederen Energie- und hohen Entropiegehaltes an die Umwelt ab. Hieraus resultieren: Ständige Arbeitsfähigkeit, Aufrechterhaltung dynamischer Ordnungszustände, Evolutionsfähigkeit.



(2) Sauerstoffatmer „verbrennen“ zur Energiegewinnung Glucose. Die dabei anfallenden „Abfallprodukte“ Kohlendioxid und Wasser werden von den grünen Pflanzen unter Nutzung von Sonnenlichtenergie wieder zu Glucose resynthetisiert. Den bei der Resynthese frei werdenden Sauerstoff nutzen wiederum die Sauerstoffatmer für ihre Verbrennungsprozesse. Gäbe es kein Leben, so ließe die Erde das, was sie als Energie von der Sonne empfängt, direkt als Wärme ins Weltall verströmen.

Griffen (2): F. G. Lucas

baren Gebilden auf. Man schätzt die Zahl der verschiedenen Tier-, Pflanzen- und Mikrobenarten der Erde unserer Tage auf 5 bis 40 Millionen.

So bunt die Erscheinungen und Verhaltensweisen dieser Wesen auch sein mögen, alle sind sie molekulare Organisationen und als solche Systeme im stationären Nichtgleichgewichtszustand. Um diesen Begriff bildhaft zu machen, vergegenwärtige man sich eine aus einem Springbrunnen aufsteigende Fontäne. Aus der Ferne betrachtet, sieht sie aus wie etwas fest Umrissenes, etwas durchaus Stationäres. Und doch ist sie, wenn man sie näher in Augenschein nimmt, nichts als ein im Fließgleichgewicht gehaltenes Dahinströmen von Wasserteilchen, ein wohl organisiertes Dahinströmen. Wovon dieses wohlorganisierte Dahinströmen „lebt“, ist die *Verschwendung* von Energie. Hineingesteckt ins System *Springbrunnen* wird wertvolle elektrische Energie zum Antrieb der Pumpen. Heraus kommt ein energetisch wertloser Abwasserfluß.

Ein Prozeß stellt sich dar als Struktur, und eine Struktur entpuppt sich als Prozeß. Genau das gilt auch für alle Organismen. Ihre dem Anschein nach fest gefügte Gestalt, ihre Strukturiertheit, schlicht: ihre *Existenz* basiert auf Molekülströmen, auf Stofftransportvorgängen und auf Stoffumsetzungen abbauenden (*katabolen*) wie aufbauenden (*anabolen*) Charakters.

In einem gegenüber seiner Umwelt *isolierten* System kommen durch Stoffumsetzungen betriebene Molekülströme nach einer gewissen Zeit zum Erliegen, dann nämlich, wenn sich das thermodynamische Gleichgewicht eingestellt hat. Diesen Zustand bezeichnet man als einen Zustand maximaler Entropie und damit größtmöglicher Unordnung. Das System leistet nichts mehr, es ist „tot“.

Einem solchen, in größtmöglicher Unordnung endenden Zusammenbruch entgegen lebende Systeme, weil sie als *offene* Systeme ange-

legt sind (Abb. 1). Ein offenes System nimmt fortlaufend Materie *hohen* Energie- und *niederen* Entropiegehaltes von außen in sich auf, schleust die Energieträger, die Nährstoffe, in die chemische Energie entbindenden und chemische Energie nutzenden Stoffwechselfießbänder ein und führt das am Ende der Prozesse nicht mehr Verwertbare in Form von Materie *niederen* Energie- und *hohen* Entropiegehaltes an die Umwelt ab. Hierdurch bleibt das System ständig fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht und ist in der Lage, bestehende Ordnungszustände aufrechtzuerhalten und neue Ordnungszustände herzustellen.

Strukturen, die auf diese Weise realisiert werden, bezeichnet man als *dissipative Strukturen*. Das altlateinische Wort *dissipare* übersetzen wir mit verschleudern, verschwenden, vernichten. *Dissipativ* sind diese organismischen Strukturen, weil sie eine Folge der Dissipation von Energie sind, weil ihnen molekulare Prozesse zugrundeliegen, die um nichts als um ihres eigenen Daseins willen Energie pausenlos verschwenden.

Wer trägt die Kosten für eine solche Art des Daseins? Die *Umwelt*. Ihr werden die hochwertigen Nährstoffe entrissen, und sie muß es sich gefallen lassen, die minderwertigen Ausscheidungsprodukte aufzunehmen. Alle Organismen sind Umweltausbeuter und Umweltverschmutzer und nicht, wie mancher es sich träumt, auf Bewahrung der Natur bedacht. Auch jeder *Zuwachs* an biologischer Ordnung wird durch *Zunahme* der Entropie in der Umwelt erkaufte.

Im großen Ganzen natürlicher Zusammenhänge bemerken wir diese Phänomene nicht; denn das Leben hat im Laufe seiner Geschichte gelernt, sich an die vorläufig unversiegbare Energiequelle des Sonnenlichts anzukoppeln und Stoffkreisläufe der Abfallnutzung und Ressourcenrenewierung zu entwickeln (Abb. 2). Seit dies gelungen ist, imponiert die

Biosphäre als eine Insel minimaler Entropie und damit höchster Ordnung, eingebettet in den Energiestrom der Sonne und von ihr gespeist, bevor er unrückrufbar im Weltall versickert.

Leben als Umweltausbeuter und Umweltverschmutzer, dieser essentielle Charakterzug des Organismischen trat in der Erdgeschichte erst wieder offen zu Tage, als sich ein Lebewesen der Biosphäre zum Kulturwesen wandelte. Fast vier Millionen Jahre blieben unsere Vorfahren, die menschlichen Primaten (*Australopithecus afarensis*, *Homo habilis*, *Homo erectus*), noch eingebunden in die natürlichen Kreisläufe der Biosphäre. Dann vollzog sich, gegen Ende der Mittelsteinzeit, um das Jahr 10.000, eine Umwälzung: Der Mensch – er hat mittlerweile alle Biotope der Erde erobert – befreit sich aus der Abhängigkeit von den natürlichen Gegebenheiten; er beginnt, seinen Nahrungsbedarf aus Ackerbau und Tierzucht zu decken, und mit diesem Schritt schert er aus den Kreisläufen der Biosphäre und den regelnden Zwängen der Evolution aus.

Das hat schwerwiegende Folgen: Die Zahl der Menschen steigt, begünstigt obendrein von der bei allen Primaten anzutreffenden ganzjährigen Fortpflanzungsfähigkeit. Das Bevölkerungswachstum ruft nach mehr landwirtschaftlicher Leistung. Jedes Mehr an Produktion verstärkt seinerseits den Bevölkerungsdruck. Nach und nach geht es dann auch nicht mehr nur um die Sicherung der elementaren Bedürfnisse, um Nahrung und Schutz vor den Unbilden der Natur, es ändert sich der Lebensstil, es melden sich zusätzliche Ansprüche ans Leben, und die Ansprüche steigen ins Unkalkulierbare. Jeder neue Anspruch verlangt Schaffung neuer Einrichtungen kultureller, wirtschaftlicher und sozialer Art, die im Lauf der Geschichte den Rang der Unentbehrlichkeit erringen. Komplizierte und komplizierter werdende Gesellschaftssysteme

„*»Sprich, wie werd ich die Sperlinge los?«, so sagte der Gärtner:*

»Und die Raupen dazu, ferner das Käfergeschlecht,

Maulwurf, Erdflö, Wesp, die Würmer, das Teufelsgeziht?« –

»Laß sie nur alle, so frißt einer den anderen auf.«

Goethe, Weissagungen des Bakis

wachsen heran, die, da sie wie die aus der biologischen Evolution hervorgegangenen Gebilde nur als offene Systeme fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht existieren können, mehr und mehr Energie kosten und mehr und mehr Abfall erzeugen. Nicht anders als in der Natur haben wir es auch bei gesellschaftlichen Systemen mit dissipativen Strukturen zu tun, mit ganz und gar der Umwelt zur Last fallenden, energieverwendungsbedürftigen, um nicht zu sagen: verschwendungs-süchtigen Organisationsformen.

Von den Zwängen des biologischen Imperativs

Einen der Urgründe für die Notlage der Menschheit haben wir als die physikalischen Zwänge kennengelernt, denen offene Systeme als unabdingbar umweltabhängige Systeme generell unterliegen. Die zweite Wurzel, die es auszugraben gilt, ist rein biologischer Art. Auf sie stoßen wir, wenn wir uns klar machen, daß mit dem Auftreten der ersten Lebensformen etwas bisher nie Dage-wesenes in die Welt kam: Der Zweck. Planeten und Sterne, Erde, Feuer, Wasser, Luft, mit einem Wort: die unbelebte Natur hat keinen Zweck, es sei denn das Leben stellt sie in seine Dienste.

Lebewesen hingegen haben eine *innere Finalität*. Die ihr spezifische Organisiertsein tragenden Stoffströme und jede der damit verbundenen Funktionen sind auf ein für alle Organismen gültiges Ziel gerichtet. Auf seinen einfachsten Nenner gebracht, heißt es: *Leben und Überleben*. Der französische Zellbiologe Pierre Grassé hat diese Finalität „das Leben selbst“ genannt.

Das Leben- und Überleben-Sollen, dem alles Lebendige unterworfen ist, gipfelt in der Fortpflanzung. Was bei diesem Akt substantiell überlebt, ist aber nicht das Individuum selbst, es sind seine Gene, es ist sein Genom. Somit ist der *Letzt-zweck* des Lebendigeins eines jeden

Individuums, der *biologische Imperativ*, dem es zu folgen hat, der, sein Genom an die jeweils nächste Generation weiterzugeben und es so weit, wie es eben geht, in möglichst zahlreicher Nachkommenschaft zu verbreiten – ohne Rücksicht auf alle anderen Lebewesen. Dieses Programm hat, noch bevor der Mensch aufkam, ein Vielfaches von dem an Arten verdrängt, die heute leben.

Nun ist aber Fortpflanzung im Sinne von Vermehrung ein Prozeß, der ins Uferlose ausarten würde, wenn er nicht an Grenzen stieße. Die Erde wäre beispielsweise überschwemmt mit Spatzen, stünden Spatzen nicht beständig unter dem Druck der Umwelt. Abgesehen davon, daß sie Räubern, Krankheiten und Naturkatastrophen ausgesetzt sind, konkurrieren sie als Individuen miteinander um Nahrungsquellen, Schlupfwinkel, Brutplätze und Geschlechtspartner. In diesem Wettbewerb überleben nur die, die von ihrer genetischen Ausstattung her geeignet sind, sich unter den jeweiligen Lebensumständen als leistungsfähig zu behaupten. Sie, die besser Angepaßten und deshalb leistungsfähigeren und deshalb evolutionsbiologisch besser Geeigneten erkennt man daran, daß ihr Fortpflanzungserfolg größer und mithin der Anteil ihrer Gene am Genbestand der Population höher ist als der ihrer Konkurrenten. Die weniger Tüchtigen sterben unter diesen Bedingungen allmählich aus; denn nirgendwo sind die Ressourcen unbegrenzt.

Die natürliche Auslese zählt und kanalisiert den allen Lebewesen innewohnenden biologischen Imperativ, sich hemmungslos zu verbreiten. Wir müssen folglich nicht fürchten, daß Spatzenschwärme eines Tages den Himmel verdunkeln werden.

Fazit: Lebewesen *müssen* alles daransetzen, nicht nur sich fortzupflanzen, sondern sich zu *vermehren*, da sie unter Druck stehen. Der Druck jedoch trägt dafür Sorge, daß die Vermehrung nicht über das

Niveau des Ausgleichs der Verluste, nicht über die „Ersatzbeschaffung“ hinausgeht.

Wie aber steht es mit dem Menschen? Der Mensch ist dem biologischen Imperativ – den Begriff hat im übrigen der Konstanzer Biologe Hubert Markl eingeführt – nicht durch irgendeinen Kunstgriff entkommen. Wohl aber hat er es als Kulturwesen verstanden, sich der Wirksamkeit der natürlichen Auslese mehr und mehr zu entziehen. Das Nicht-loskommen-Können vom biologischen Imperativ, das Sich-naturngemäß-verhalten-Müssen auf der einen und das Freiwerden vom Selektionsdruck auf der anderen Seite haben, unterstützt durch allmählich zur Übermacht gewordene kulturelle, gesundheitsfürsorgliche, technische und sozioökonomische Effekte, die Mitgliederzahl der Spezies Mensch, zu Beginn der *neolithischen Revolution*, dem Zeitpunkt der „Unabhängigkeitserklärung“ des Menschen von der Natur, noch bei einer Million liegend, innerhalb der seither vergangenen 10.000 Jahre auf mehr als fünf Milliarden gesteigert.

Eine Vorstellung vom historischen Verlauf des Prozesses gibt die Tabelle (3). Der Prozeß stellt sich, so weit wir auf das *Kulturwesen* Mensch zurückblicken können, als unbehindert fortschreitend dar. Allerdings ist die *Wachstumsrate* (Tab. 4), ausgedrückt in Prozent des jährlichen Zuwachses, über die weitaus größte Zeitstrecke hinweg sehr niedrig geblieben. Erst mit Beginn des Industriezeitalters schnellte sie hoch und klettert innerhalb von nur 135 Jahren auf das Fünffache. Im Jahre 1990 lag sie zwar wieder deutlich niedriger, gibt aber keinen Anlaß zu einer optimistischen Prognose; denn bliebe es bei der gegenwärtigen Wachstumsrate, dann hätten wir im Jahre 2100 mit 34 Milliarden Menschen zu rechnen, einer Menschenmenge, die die Erde mit Sicherheit nicht zu tragen vermag. Bei einem solchem Wachstum ist mit der Ver-

nichtung unserer Lebensgrundlagen bereits weit vor dem Jahre 2100 zu rechnen.

Wir werden demnach immense Anstrengungen zu unternehmen haben, diese Wachstumsrate schnellstens und drastisch zu drücken. Hierzu haben die Vereinten Nationen und andere Institutionen Zielprojektionen entwickelt. Die letzten drei Zeilen der Tabelle (4) geben eine solche *Zielprojektion* wieder. Sie gilt in Fachkreisen als sehr optimistisch; denn sie setzt ein geradezu radikales familien- und sozialpolitisches Handeln voraus. In den Ländern der dritten Welt geht es hierbei um die Regulierung des generativen Verhaltens von mindestens zwei Seiten her, also nicht nur um Kontrazeption und Aufklärung, sondern ebenso dringend auch um umwälzende Verbesserungen von Lebensstandard und Sozialstatus. Man mache sich klar, was in naher Zukunft geleistet werden muß: Im Verlauf von nur 30 bis 40 Jahren soll die Wachstumsrate *um mehr als 40 Prozent fallen*, und in der Zeitspanne von weiteren 50 bis 70 Jahren gar *auf weniger als 10 Prozent des heutigen Wertes zurückgehen*. Selbst wenn dies alles gelänge, wird die Weltbevölkerung im kommenden Jahrhundert noch erheblich weiter ansteigen und erst ab dem Jahr 2150 mit etwa 11 Milliarden Erdenbewohnern stationär werden. Man hofft davon aus, oder besser: man geht davon aus, daß die Erde diese Menschenmasse menschenwürdig beheimaten kann.

Von der *Geburtenrate* her gesehen, bedeutet *stationär werden*, daß jede Frau im globalen Durchschnitt 2,13 Kinder zur Welt bringt. Die Reproduktion wäre damit auf das sogenannte Ersatzniveau der Fertilität eingestellt, woraufhin das Wachstum der Weltbevölkerung mit einer zeitlichen Verzögerung zum Stillstand käme. Was geschieht, wenn wir nicht schon in den nächsten Jahrzehnten zu dieser Geburtenrate kommen, zeigt eine andere Prognose (Tab. 5).

Weltbevölkerung

Historische Entwicklung¹

Zeit (Jahre)	Bevölkerung (Mio.)
10000 v. Chr.	1
3500 v. Chr.	50
2000 v. Chr.	250
um 1650 n. Chr.	500
um 1850 n. Chr.	1.000
um 1930 n. Chr.	2.000
1990 n. Chr.	5.272
-	-
2100 n. Chr.	33.800

(3) Die Zahl 33.800 Millionen gilt für den Fall, daß sich die derzeitige Wachstumsrate von 1,7 Prozent (zu den Einzelheiten siehe Tab. 4) bis zum Jahre 2100 nicht ändert.

Historische Entwicklung und Zielprojektion der jährlichen Wachstumsraten²

Zeit	Jährl. Wachstumsrate (% des jährl. Zuwachses)
bis zum Jahre 1800 n. Chr.	minimal
1850 n. Chr.	0,4
1950	0,5
1965	0,8
1975	1,8
1985	2,0
1990	1,7
Zielprojektion der Vereinten Nationen:	
2025 - 2030	1,0
2075 - 2100	0,13
2150	0,0

(4) Wenn die projizierten Rückgänge der Wachstumsraten sich in die Praxis umsetzen ließen, läge die Weltbevölkerung im Jahre 2100 immerhin noch bei 11,3 Milliarden.

Alternative Bevölkerungsprojektionen³

Wenn eine Geburtenrate von 2,13 Kindern je Frau im Welt Durchschnitt erreicht wird - im Jahr...	...dann steigt die Weltbevölkerungszahl bis zum Jahr 2150 noch auf
noch vor 2060	ca. 11 Mrd.*
2060	13,9 Mrd.
2080	16,8 Mrd.
2090	18,5 Mrd.
2100	20,3 Mrd.
2120	24,3 Mrd.
2140	26,5 Mrd.

(5) Entwicklung der Weltbevölkerung bei einer Verzögerung des Rückgangs der Geburtenziffer auf das vorgesehene Ersatzniveau der Fruchtbarkeit von 2,13 Kindern je Frau.

*Die Prognose der Vereinten Nationen, die einen wesentlichen Rückgang des Wachstums bereits vor dem Jahr 2060 annimmt (vgl. Tab. 4), wurde zum Vergleich hinzugefügt.

..... es gab in der Vergangenheit des Abendlandes Epochen spektakulärer Wissensvermehrung und technischen Fortschritts, die nicht zu einer Verwüstung des Planeten führten. Das Elend unserer Welt hat einen anderen Grund: die demographische Explosion der Gattung Mensch.“

Claude Lévi-Strauss

Das unerhörte Bevölkerungswachstum ist wahrhaftig unser größtes Problem. Seine Lösung können wir nicht, wie in der Geschichte des Lebens bis vor 10.000 Jahren, den naturgesetzlichen Regelmechanismen überlassen.

Von den Zwängen des Denkens in mesokosmischen Dimensionen

Weshalb fällt es dem Menschen so schwer, der Gefahren, in die er sich selbst gebracht hat, Herr zu werden? Unsere Antwort: Sein Vermögen, die Gefahren in vollem Umfang und mit allen Konsequenzen auch nur zu erkennen, ist von Natur aus eingeschränkt. Wenn überhaupt, dann erfaßt er seine Lage immer nur im Kleinen und auf sich ganz persönlich bezogen und nicht, wie es nötig wäre, global und mit dem Blick auf künftige Generationen.

Mit der Behauptung, die Natur des Menschen halte seine Erkenntnisfähigkeit in Grenzen, betreten wir den Boden der *Evolutionären Erkenntnistheorie*, um deren Fundierung und Ausformung sich der Physiker und Philosoph Gerhard Vollmer nicht hoch genug einzuschätzende Verdienste erworben hat.

Die Kantsche Frage, „Was können wir wissen?“, sucht die evolutionäre Erkenntnistheorie im Licht der Tatsache zu beantworten, daß der Mensch, wie jede andere Kreatur auch, aus dem historischen Prozeß

der Evolution hervorgegangen ist und von ihm geprägt wurde.

Um zu verstehen, was gemeint ist, rekapitulieren wir ein paar evolutionsbiologische Fakten: Die Theorie der natürlichen Auslese erklärt das Angepaßt-Sein der Lebewesen an ihre Umwelt. Die Umwelt ist jene Instanz, welche über das Schicksal der Organismenvarianten entscheidet, die in jeder Reproduktionsrunde als Folge von immer wieder neuen Genkombinationen entstehen. Sie, die Umwelt, liest aus, so als stelle sie jeder neu auf gekommenen Variante die Frage, welche mit ihr mehr in Einklang stehe, welche mit ihr erfolgreicher in Stoff- und Informationsaustausch zu treten vermöge, kurz, welche an sie besser angepaßt sei, diese Spielart oder jene. Diejenige, die verlässlichere Beziehungen zu ihrer Umwelt hat, wird sich schneller vermehren als die weniger angepaßten und diese letztlich verdrängen.

Ein überlebenstaugliches Verhältnis zur Umwelt zu haben, bedeutet für jede aus dem Ausleseprozeß erfolgreich hervorgegangene Lebensform, daß in sie *Kenntnisse* von der sie umgebenden Realität eingegangen sind. Denn was sonst als der Besitz von Kenntnissen kann beispielsweise ein Eichhörnchen dazu befähigen, vor den Aufgaben, die ihm die Umwelt lebenslang stellt, nicht kapitulieren zu müssen?

So gesehen lehrt die Evolution ihre Kinder die Welt kennen, und daß sie diese Welt kennengelernt haben, kann man bei jeder Art an ihren Strukturen und an ihren Verhaltensmustern buchstäblich ablesen; denn da die Strukturen und Verhaltensweisen der Anpassung an die äußere Wirklichkeit entstammen, *enthalten* sie äußere Wirklichkeit.

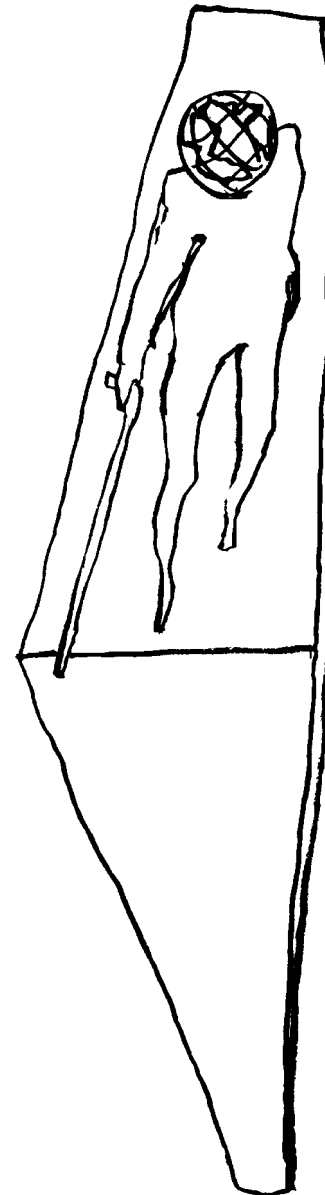
Das Auge ist ein Organ der Anpassung an elektromagnetische Wellen der Wellenlänge 400 bis 800 nm, das Ohr ein Organ der Anpassung an Schallwellen, der Gleichgewichtsapparat ein Organ der Anpassung an den dreidimensionalen Raum, die

Feinstruktur des Knochens eine Anpassung an das Schwerefeld der Erde, das Hämoglobinmolekül eine Anpassung an den Luftsauerstoff. Da dem so ist, können wir den gleichen Sachverhalt auch anders formulieren: Das Auge *bezeugt* die Existenz von elektromagnetischen Wellen der Wellenlänge 400 bis 800 nm, das Gleichgewichtsorgan die Existenz eines dreidimensionalen Raumes, und der rote Blutfarbstoff und seine besonderen Eigenschaften *geben Auskunft* über den Sauerstoffgehalt der Atmosphäre.

Wir spiegeln unsere Welt, und die Welt spiegelt sich in uns; sie bringt sich in uns und durch uns zur Darstellung, gleichgültig, ob wir den Bau und die Funktion von Organen oder Moleküleigenschaften betrachten.

Die Gesamtheit der in jedem Organismus versammelten Strukturen und Funktionen hat der mit dem Nobelpreis ausgezeichnete Verhaltensbiologe Konrad Lorenz auf den Namen *Weltbildapparat* getauft. Der *Weltbildapparat Organismus* ist danach aufzufassen als eine Inkarnation, als eine Verleiblichung der *besonderen* Erfahrungen, die die Vorfahren und Urvorfahren des einen und des anderen Lebewesens in der Auseinandersetzung mit ihrer jeweils *besonderen* Umwelt gemacht haben.

Was Johann Gottfried Herder von der Sprache gesagt hat, als er sie ein System der Weltaneignung und Weltauslegung nannte, das gilt auch für Lebewesen: Alle müssen sie die Fähigkeit besitzen, sich die Welt anzueignen, um sie sich in jeder Situation situationsgerecht auslegen zu können; denn anders ist der Überlebenswettbewerb nicht zu bestehen. Nur – und das ist das Entscheidende – es legt sich jede Spezies von ein und derselben Welt lediglich das aus, wozu sie in dem ihr eigenartigen Lebensraum und unter den ihr eigenartigen Lebensbedingungen überlebensbedeutsame Beziehungen hat aufnehmen müssen. Was die Welt



„Wer will, daß die Welt so bleibt,
wie sie ist, will nicht, daß sie
bleibt.“

Erich Fried

sonst noch bietet, interessiert nicht.

- Pantoffeltierchen kennen von der Welt nichts als Wasser und zu Nahrungsquellen führende Wasserstoffgradienten.
- Die von Warmblüterblut sich ernährende Zecke ist darauf angewiesen, Landsäugetiere zu erkennen, und sie erkennt sie *pauschal* an den Buttersäuremolekülen, die ihre Schweißdrüsen absondern. Mehr braucht sie über die vielen Arten von Landsäugetieren nicht zu wissen.
- Die Welt der Ultraschall aussendenden Fledermäuse besteht einzig und allein aus Objekten, die einen Echoimpuls liefern. Also bleibt ihnen vieles von dem unbekannt, was wir Menschen als Wissen über die Natur für unentbehrlich erachten. Aber auch das Umgekehrte gilt: Manches, auf dessen Kenntnis wir gut und gerne verzichten können, zählt für Fledermäuse zu den Grundlagen ihrer Existenz, so die Vertrautheit mit dem Dopplereffekt, dessen sie sich zur Geschwindigkeitsbestimmung bedienen. Das zugrundeliegende Gesetz, das erklärt, weshalb der Ton aus der Sirene eines Polizeiautos beim Näherkommen ansteigt, kennen Fledermäuse zum Unterschied von Besuchern der gymnasialen Oberstufe aus dem Effeff und kannten es schon, als an den Physiker Christian Doppler noch kein Denken war.

Fazit: Organismen sind Systeme speziesspezifisch eingeschränkter, oder sagen wir besser: *beschränkter* Weltanschauung.

Dieser Satz bedarf noch einer ihn verschärfenden Ergänzung: Wenn wir sehen, daß die Zecke nicht erst *lernt*, Buttersäuremoleküle zu entdecken, vielmehr Buttersäuremoleküle bereits *kennt*, noch bevor sie mit dieser Realität zum ersten Mal Berührung gehabt hat, und wenn wir sehen, daß Fledermäuse keiner Schulung zum Umgang mit dem Dopplereffekt bedürfen, sondern von Geburt an schon wissen, was es mit diesem physikalischen Phänomen auf sich hat, so kommen wir unter

Hinzuziehung noch unzähliger anderer Beispiele dieser Art zu einem Schluß von größter Tragweite:

Organismen sind, erstens, Systeme *speziesspezifisch beschränkter Weltanschauung*, in denen, zweitens, der individuellen Erfahrung *vorausgehende* Urteile über die Welt stecken. Jedes Wesen wird mit *Vorurteilen* geboren.

Diesem besonderen Sachverhalt war übrigens schon Darwin auf der Spur. In einem seiner Notizbücher heißt es: „Platon ... sagt im Phaidon, unsere notwendigen Ideen entstammen der Präexistenz der Seele. – Lies Affen für Präexistenz.“







Als Spitzenprodukt der durch die Evolution erzwungenen Anpassung an die Wirklichkeit gilt unser Hirn. Was ist an diesem aus einer 600 Millionen Jahre alten Geschichte hervorgegangenen Organ so bewundernswert? Daß es die Relativitätstheorie hervorgebracht hat – dessen können wir wohl sicher sein. Weniger in Erstaunen versetzt uns jedoch etwas, was sich erst bei eingehender Betrachtung als erstaunlich entpuppt: Die Virtuosität, mit der dieses Organ eine, wissenschaftlich gesehen, unüberschaubar komplizierte Realität tagaus tagein meistert. Wir kommen zur Welt, wir haben ein paar Begegnungen mit einem winzigen Bruchteil aus der Überfülle von Dingen und Ereignissen, die uns bis zu unserem Tod erwarten, und finden uns mit nur fünf Jahren schon spielend zurecht.

Wie ist das zu erklären? Nicht anders als über den Satz, den wir vorhin schon formuliert haben: Jedes Lebewesen ist begabt mit *überlebenswichtigen* Kenntnissen von seiner Welt, mit Anschauungsformen und Weltbewältigungsroutinen, die der individuellen Erfahrung vorausgehen.

So kommt auch des Menschen Hirn nicht, wie manche immer noch lehren möchten, leer zur Welt, im Gegenteil, es greift von der ersten Minute seines irdischen Lebens an auf eine von der Evolution einge-

Der Mesokosmos⁶

Die Welt der dem Menschen anschaulichen Dimensionen

	GRÖSSE	UNTERGRENZE	BEISPIELE	OBERGRENZE	BEISPIELE
	Zeit	Sekunden	Herzschlag	Jahrzehnte	Lebensdauer
	Abstände	Millimeter	Staub Haar	Kilometer	Horizont, Tagesmarsch Hörweite
	Geschwindigkeiten	Ruhe		v = 10 m/sec v = 200 m/sec	Sprinter Pfeilgeschöß
	Massen, Gewichte	Gramm		Tonnen	Felsen, Bäume, Tiere
	Temperaturen	-10 °C	Frostkälte	100 °C	Siedepunkt des Wassers
	Komplizierte Systeme	Komplexität Null	Isolierte Systeme	Lineare Systeme	Lineare Kausalität

(6) Verständnissgrenzen nach G. Vollmer.

prägte und von ihr strukturierte *vorbewußte* Vernunft zurück, für die der Wahrnehmungstheoretiker Egon Brunswik die Bezeichnung *Ratiomorpher* Apparat fand.

Den *Ratiomorphen* Apparat erkennt man an seinen Leistungen. Wir sparen uns, sie aufzuzählen; es genügt festzuhalten, daß sie nicht auf wissenschaftliche Erkenntnisse aus sind, sondern allesamt das biologisch einzig „lohnenswerte“ Ziel verfolgen, den Bestand unseres Lebens zu sichern, und dies auf die allereinfachste Weise.

Damit wir in der ungeheuer vielfältigen und unübersehbar ereignisvollen Wirklichkeit nicht ver-

kommen, gebietet uns die *vorbewußte* Vernunft, mit Vereinfachungen zu operieren und bringt uns deshalb eine extrem simplifizierte physikalische Welt zur Anschauung. Gerhard Vollmer nennt diese Welt *Mesokosmos*, die Welt der moderaten Dimensionen. Der Mesokosmos ist die zum Erkennen der Welt und zum Alltagsumgang mit ihr auf das Lebensnotwendige zugeschnittene *kognitive Nische* des Menschen. Vollmer hat unsere mesokosmische Wohnung beschrieben, und zwar durch Auflistung der Unter- und Obergrenzen dessen, was wir ohne Zuhilfenahme von Instrumenten und ohne wissenschaftliche Ablei-

tungen, mithin als uns direkt zugänglich erkennen können (Tab. 6). Jenseits dieser Grenzen liegt *das für uns Unanschauliche*. Dem Unanschaulichen messen wir für unser Leben und unsere Entscheidungen keine Bedeutung zu, ja, wir sind sogar geneigt, die Existenz des Unanschaulichen zu leugnen. Im Mesokosmos, in der dem Menschen eigentümlichen Welt, an die wir auf Grund unserer evolutionären Geschichte adaptiert sind, gibt es weder Lichtgeschwindigkeit, noch Lichtjahre, weder Mikrometer, noch Nanogramm, nicht Sonnenkern- und nicht Weltraumtemperaturen, nicht Zahlen und Größenordnungen, „zu

„Den reinen Unsinn zu glauben,
ist ein Privileg des Menschen.“

Konrad Lorenz

denen“, so Thomas Mann, „der Menschengestalt gar kein Verhältnis mehr hat und die sich ... im völlig Unsinnlichen, um nicht zu sagen Unsinnigen verlieren.“ Genau so ist es: Das Unsinnliche, das für die uns eingestanzte Alltagsweltanschauung nicht Zugängliche, trägt für uns den Charakter des Unsinnigen.

In welche Verlegenheiten sähen wir uns gestürzt, hätten wir auf Schritt und Tritt mit der von der Relativitätstheorie wohl begründeten Wirklichkeit des vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuums zu rechnen; wie kämen wir zurecht, wenn uns zu bedenken gegeben wäre, daß räumliche Distanzen und Zeitstrecken, die unser Hirn wohlweislich unter ein Unveränderlichkeitspostulat gestellt hat, geschwindigkeitsabhängig veränderlich sind?

Können wir uns das Wachstum der Erdbevölkerung, den Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre, den Ozonabbau in der Stratosphäre, das globale Problem der Luftverunreinigung, die Belastung des Menschen mit krebs-erzeugenden Stoffen und unsichtbaren Strahlen *anschaulich* machen, so lange uns die Folgen noch nicht direkt spürbar auf den Leib rücken? Wir können es nicht, und da wir es nicht können, ist es so ungeminein schwer, die doch nur dem *wissenschaftlichen* Denken zugänglichen Fakten ins Alltagsbewußtsein aufzunehmen. Dahin jedoch müssen sie verpflanzt werden, ins Alltagsbewußtsein; denn dieses bestimmt unser Handeln.

Aus dem Gefangensein im Mesokosmos resultiert auch unsere Behinderung, Verständnis aufzubringen für die Dynamik komplizierter Systeme: Zellen, Zellverbände, Organismen, Ökosysteme, Biosphäre, vom Gesamtsystem „lebende, bevölkerte, kultivierte und industrialisierte Erde“ erst gar nicht zu reden. Für den in den Dimensionen des Mesokosmos Denkenden gilt das Prinzip „Gleiche Ursachen haben immer und überall die exakt gleichen Wirkungen“.

Diese Denkweise ist auf Verhältnisse wie die in den oben aufgezählten Systemen nicht anwendbar; denn dort herrscht Nicht-Linearität. Wir haben es hier also mit Ereignisfolgen zu tun, die allenfalls bedingt vorhersagbar sind wie das Wetter oder der Verkehrsfluß auf den Autobahnen.

Aufs nur bedingt Vorhersagbare hat uns die Natur nicht eingestellt. In der nackten Lebensführung sind wir darauf angewiesen, alle Ereignisfolgen dahingehend zu interpretieren, ihnen liege eine *lineare Wenn-dann-Beziehung* zugrunde. Diese Art von Weltbewältigungsroutine hat sich in der Geschichte der Hominiden großartig bewährt: Sie schuf als Resultat der Anpassung an die einfachen Lebensbedingungen unserer Urrahnen die Fundamente für vorausschauendes Handeln. Daß wir als Frau und Herr Jedermann immer noch auf diesen Fundamenten stehen und nur allzu geneigt sind, dort auch, aller wissenschaftlichen Aufklärung zum Trotz, zu verharren, hat heute jedoch böse Folgen: Wir erliegen immerzu der Versuchung, komplizierte Interaktionen in lineare Kausalketten zu pressen und „kultivieren“ damit den Boden, auf dem unter anderem die kurzsichtigen Schuldzuweisungen in den öffentlichen Auseinandersetzungen üppig wuchern. In solche Gefahren können Gans und Kamel nicht kommen. Wohl können sie getäuscht werden, aber sie täuschen sich über ihre Situation nicht selbst. „Den reinen Unsinn zu glauben“, so Konrad Lorenz, „ist ein Privileg des Menschen.“

Haltepunkt

Die Beiträge dieser Ausgabe der ESSENER UNIKATE haben sich daran gemacht zu zeigen, wie man, wissenschaftlich erarbeitete Daten zur Kenntnis nehmend und mit ihnen operierend, dieses fragwürdige Privileg abbauen kann und welcher geistigen, weit über unsere Natur hinaus gehenden Anstrengungen es hierzu bedarf.

Der Mensch darf sich nicht weiterhin naturgemäß verhalten; denn eben das muß er fürchten: sein Verkettensein mit der Natur. Er ist – so sieht ihn Konrad Lorenz – eine Art von *missing link*, eine Verbindung zwischen dem Menschen, wie ihn die Evolution hervorgebracht hat, und dem eigentlichen Menschen, dem Menschen, der er sein soll.

Was ist zu tun? Der Humangenetiker und Anthropologe Christian Vogel gibt eine Antwort: Wir müssen uns lösen „von allen biogenetischen Fitness-Anweisungen, aus allen bisher so selektionswirksamen Egozentrismen, Sippenegoismen, Nationalismen, Ethnozentrismen, Anthropozentrismen und reinen Gegenwartsbezogenheiten“.

Wir müssen also viel, viel mehr über uns lernen, um uns Einhalt gebieten zu können.

Summary

Humans are not supernaturals, they are living beings and with all living beings they share some natural properties contributing to the risks which have endangered mankind since homo sapiens acquired the state of civilized man. Three of living beings properties, which generally sustain life but now threaten the existence of mankind, are discussed.

- Living systems are open systems. Open systems maintain structure and function at the expense of their environment in so far as they deprive their environment of highly ordered and energized material and burden it with waste products. Not only human beings but also all human created institutions are condemned to exactly the same behaviour.

- Living systems are reproducing systems. They are bound to maximize their reproductive success. Under natural conditions this in-born imperative is counterbalanced

by natural selection. The civilized mankind, however, has learned to escape the limiting forces of the natural selection. This fact largely contributes to the demographic explosion we now observe.

- Living systems are adapted to the world which they live in. This means: evolution has every species provided with a speciespecific knowledge of its own world. Since this knowledge serves no other purpose than to maintain life, it is limited. The everyday knowledge of human beings makes no exception in this and so we find it extremely hard to surmount the boundaries of the restrictive cognitive niche, named mesocosmos, that evolution has assigned to us. No wonder that we have no natural access to all the dimensions and relationships which have nothing to do with the pure maintenance of our personal life in the everyday world. That's, finally, why we have great difficulties taking cognisance of the global and highly complex dangers threatening the next generation.

Der Autor:

Herbert Schriefers studierte Medizin und Naturwissenschaften an der Universität Bonn, promovierte 1951 zum Dr. med. und habilitierte sich 1960 für das Fach Physiologische Chemie. 1965 wurde er apl. Professor, von 1966 bis 1969 leitete er die Abteilung für Experimentelle Endokrinologie am Institut für Physiologische Chemie der Universität Bonn. 1969 wurde er auf den Lehrstuhl für Biochemie der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm berufen, 1975 folgte er dem Ruf auf den Lehrstuhl für Physiologische Chemie an der Medizinischen Fakultät der Universität Essen. 1989 wurde Professor Herbert Schriefers emeritiert. 1992 verlieh ihm die Universität Ulm den Ehrendoktor für das Fach Humanbiologie. In der Zeit seiner wissenschaftlichen Tätigkeit war Schriefers dreimal Dekan, einmal in Ulm und zweimal in Essen. 1972/73 bekleidete er das Amt des Präsidenten der Deutschen Gesellschaft für Endokrinologie; 1993 wurde er deren Ehrenmitglied. Spezialisiert hat er sich insbesondere auf experimentelle Arbeiten zum Stoffwechsel und zur Wirkung und Wirkungsweise der

Hormone sowie auf Studien zum evolutionsbiologischen Menschen- und Weltbild.

Quellennachweise:

- 1) H. Markl: Überbevölkerung – die ökologische Perspektive. 1993. / Futura, Informationen aus dem Boehringer Ingelheim Fonds. Heft 1, Seiten 4–12. Hippokrates Verlag, Stuttgart. / H. Birg: Der überfüllte Planet. Lebenserwartung, generatives Verhalten und die Dynamik der Weltbevölkerung. 1993. / Funkkolleg. Der Mensch. Anthropologie heute. Studieneinheit 27, Seite 24. Deutsches Institut für Fernstudien der Universität Tübingen. Beltz Verlag, Hemsbach.
- 2) H. Birg, l. c. 1), Seiten 22 und 24.
- 3) H. Birg, l. c. 1), Seite 40.
- 4) G. Vollmer: Kann der Evolutionsgedanke erkenntnistheoretische und ethische Probleme lösen helfen? In: G. Patzig (Hg.): Der Evolutionsgedanke in den Wissenschaften. Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, Jahrgang 1991, Nr. 7, Seiten 321–346. Vandenhoeck u. Ruprecht, Göttingen.

Literatur:

- P. P. Grassé: Das Ich und die Logik der Natur. Die Antwort der modernen Biologie. List, München, 1973.
- K. Immelmann, K. R. Scherer, Ch. Vogel (Hg.): Funkkolleg Psychobiologie. Verhalten bei Mensch und Tier. Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen. Beltz Verlag, Weinheim, Basel, 1986.
- K. Lorenz: Die Rückseite des Spiegels. Versuch einer Naturgeschichte menschlichen Erkennens. Piper, München, 1973.
- E. Mayr: Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt. Vielfalt, Evolution und Vererbung. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984.
- H. Meier (Hg.): Die Herausforderung der Evolutionsbiologie. Piper, München, Zürich, 1988.
- G. Nicolis, I. Prigogine: Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften. Piper, München, 1987.
- R. Riedl: Biologie der Erkenntnis. Die stammesgeschichtlichen Grundlagen der Vernunft. Paul Parey, Berlin u. Hamburg, 1981.
- W. Schiefenbühl, G. Vollmer, Ch. Vogel (Hg.): Funkkolleg. Der Mensch. Anthropologie heute. Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen. Beltz Verlag, Hemsbach, 1992.
- H. Schriefers: Was ist Leben? Schattauer, Stuttgart, New York, 1982.
- H. Schriefers, M. Rehm: Biochemie der Entstehung des Lebens. Eine Bibliographie. Schattauer, Stuttgart, New York, 1976.
- G. Vollmer: Was können wir wissen? Die Natur der Erkenntnis. Hirzel, Stuttgart, 1988.
- G. Vollmer: Was können wir wissen? Die Erkenntnis der Natur. Hirzel, Stuttgart, 1988.

In der Diskussion über die Risiken der modernen technischen Zivilisation wird der Begriff „Risiko“ in unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Für die Verständigung über die Verteilung von Umweltrisiken bedarf es einer Klärung dieses Begriffs, um uns unser zunehmend unter „Risiko“ stehendes Handeln zugänglich zu machen. Für diese Aufgabe kann die Ethik als Kunstlehre diskursiver Konfliktbewältigung Lösungsansätze bereitstellen.

Handeln unter Risiko

Probleme der Verteilungsgerechtigkeit Von Carl Friedrich Gethmann

Soweit wir kulturgeschichtlich blicken können, ist der Mensch schon immer darauf angewiesen, gerätgestützt, d. h. „technisch“ zu handeln, wenn er in gewünschter Qualität leben oder auch nur überleben will. Über lange historische Räume hinweg warfen die Geräte, derer sich der Mensch zur Lebensbewältigung bediente, keine besonderen moralischen Probleme auf. Zwischen dem Mord mit bloßen Händen und dem mit Hilfe eines Geräts besteht grundsätzlich weder ein moralischer noch ein rechtlicher Unterschied. Eine Technik, gegenüber der diese Einstellung moralisch adäquat ist, kann als „vor-moderne“ Technik bezeichnet werden. „Moderne“ Technik ist demgegenüber wenigstens durch eine zweifache Komplikation ausgezeichnet:

- Die gerätgestützte Handlung erfüllt als Mittel ihren Zweck nur noch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, unter anderem deshalb, weil zwischen Ausgangssituation und Endzweck sehr viele Vermittlungsstufen mit unübersehbaren Folgen liegen (*Handeln unter Bedingungen der Unsicherheit*);

- die Gefahresträger technischer Installationen sind nicht selbstverständlich auch deren Nutznießer (*Handeln unter Bedingungen der Ungleichheit*).

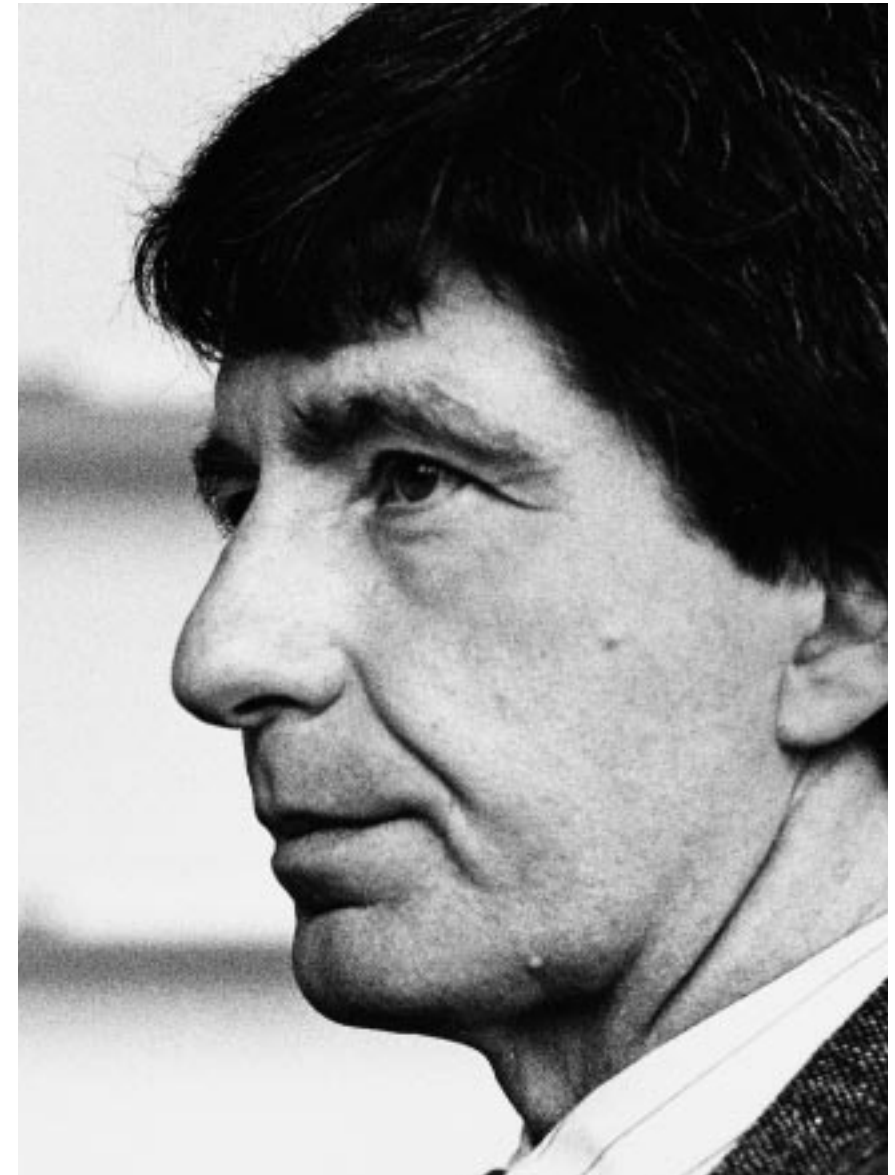
Damit sind durch die moderne Technik als solche moralische Fragen aufgeworfen, die sich im Rahmen eines vor-moderne Technikverständnisses nicht gestellt haben; beispielsweise die, ob man eine Gefahr angesichts eines unsicheren Erreichens des Zwecks der Handlung auf sich nehmen darf oder ob man gar anderen Gefahren zumuten darf, die sie nicht gewählt haben und von deren Zweck sie nicht einmal mit Sicherheit profitieren.

Während das vor-moderne Technikverständnis – das in vielen Zusammenhängen freilich immer noch relevant ist – unterstellt, Geräte seien so zu kontrollieren, daß die intendierten Handlungsfolgen auch die tatsächlichen sind, hat das moderne Technikverständnis dem Umstand Rechnung zu tragen, daß auch nichtintendierte Folgen eintreten können (*Nebenfolgen*), die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Schäden bewirken, und zwar auch bei solchen

Menschen, die in den unmittelbaren Kontext des Handelns nicht involviert sind (*Fernfolgen*). Modernes technisches Handeln läßt sich damit gegenüber Handeln im Rahmen vor-moderne Technik zusammenfassend als *Handeln unter Risiko* bestimmen.

Das Handeln unter Risiko ist allerdings nicht in jedem Fall ethisch relevant, sondern nur dann, wenn ein Akteur anderen die Folgen des eigenen risikobehafteten Handelns zumutet. Betreffen die Folgen des riskanten Handelns dagegen nur den Akteur selbst, oder sind Folgen für andere nicht erkennbar, oder sind die von der Handlung Betroffenen nicht als moralisch gleichrangige Subjekte anerkannt, sind die moralischen Probleme des Handelns unter Risiko von denen des Handelns mit determinierten Folgen nicht zu unterscheiden.

Weil demgegenüber im Fortschritt technischen Könnens unsere Handlungsmöglichkeiten qualitativ und quantitativ erheblich erweitert worden sind, weil – außerdem – durch die Entwicklung der Wissenschaften die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen unserem Handeln und dessen Folgen erheblich vergrößert



Dr. phil. Carl Friedrich Gethmann, seit 1991 Professor für Angewandte Philosophie an der Universität GH Essen.

worden ist, und weil – schließlich – die Entwicklung in Richtung einer Weltzivilisation die praktische Überzeugung von der moralischen Gleichberechtigung aller Betroffenen gefestigt hat, ist das Handeln unter Risiko zum zentralen Thema der Ethik geworden. Die spezifisch ethischen Implikationen, die bei der Anwendung moderner Technik gegeben sind, beziehen sich nicht – wie bei der vor-modernen Technik – auf die Feststellung der Tauglichkeit von Mitteln für bestimmte Zwecke, sondern darauf, wie Handeln unter Risiko, das in vielen Fällen unweigerlich Folgen für andere hat, ethisch zu rechtfertigen ist (vgl. nebenstehenden Erläuterungstext „Ethik“).

Über den Ursprung des Sollens

In der philosophischen Disziplin *Ethik* geht es grundsätzlich darum, Handlungsorientierungen herauszufinden, die verallgemeinerbar, d. h. grundsätzlich jedermann zumutbar sind. Auf dem Hintergrund des gegenwärtigen Entwicklungsstandes der technischen Zivilisation stellt sich dabei die in historischer Perspektive recht neue Aufgabe, verallgemeinerbare Regeln für das Handeln unter den Bedingungen von Unsicherheit und Ungleichheit zu formulieren. Die folgenden Überlegungen sollen zeigen, daß es möglich ist, solche Regeln zu benennen und zu rechtfertigen.

Wenn der philosophische Laie von einer derartigen Aufgabenstellung hört, wird er nicht selten in eine Art Abwehrhaltung übergehen: Mit welchem Recht mutet mir überhaupt jemand zu, dieses oder jenes zu tun oder zu unterlassen? In der Tat könnte man es jedem überlassen, nach seinen eigenen Maximen zu handeln, wenn dies nicht in hinreichend vielen Fällen zu Konflikten mit anderen Akteuren führen würde. Die Erfahrung des Handlungskonflikts ist daher der lebensweltliche Ansatzpunkt für die Notwendigkeit ethischer Reflexion. Durch sie muß sich auch zei-

gen, wieso die Erfahrung des Konfliktes zu einem Sollensanspruch führen kann. Eine grundlegende Voraussetzung dazu ist die Möglichkeit, menschliches Handeln so zu verstehen, daß es – einmal – überhaupt echte Konflikte geben kann, und – zum andern –, daß es Strategien gibt, Konflikte gewaltfrei zu lösen (vgl. Erläuterungstext „Handeln“).

Menschen können erfahrungsgemäß verschiedene Zwecke anstreben. In manchen Fällen versuchen Akteure Zwecke zu verwirklichen, die untereinander unvereinbar sind und sich nicht zugleich verwirklichen lassen; dies ist die Situation des *Konflikts*. Konflikte können auf vielerlei Weise bewältigt – vermieden, beseitigt oder ausgeglichen – werden. Grundsätzlich lassen sich dabei nondiskursive von diskursiven Strategien unterscheiden. *Non-diskursive* Strategien reichen vom einfachen Überreden, von seinen Zwecken abzulassen, bis zur Liquidation des opponierenden Akteurs; grundsätzlich stellen sie also mehr oder weniger subtile Einsätze von Gewalt dar. *Diskursive* Strategien zielen auf die gewaltfreie Überzeugung der Akteure, von ihren Zwecken abzulassen oder sie in konfliktvermeidende Zielausprägungen zu überführen. Die Unterscheidung von Zwecken und Zielen erlaubt nämlich, in eine Argumentation darüber einzutreten, ob sich die gewünschten Ziele nicht durch andere oder veränderte Zwecksetzungen erreichen lassen. Haben die Akteure ein Interesse an diskursiver Konfliktbewältigung (wozu sie freilich nicht wiederum diskursiv „gezwungen“ werden können), dann wird es wichtig, Regeln derartiger argumentativer Reden um Zwecke und Ziele zu rekonstruieren. Die Rekonstruktion von Handlungen als Befolgungen von Aufforderungen dient auch dem Zweck, Handlungen diskursiv zugänglich zu machen, denn Aufforderungen können als Konklusionen von Argumentationen rekonstruiert werden. Die Aufgabe der Ethik ist es also näherhin, die Regeln

diskursiver Konfliktbewältigung zu rekonstruieren.

In Diskursen um Ziele und Zwecke (*Rechtfertigungsdiskursen*) streben die Diskursparteien die diskursive Verständigung über Zwecke an. Gelingt eine solche Verständigung, dann ist sie für die Parteien gültig: Die Akteure beziehen aus dem Diskursergebnis ihre *Berechtigung*, aber auch ihre *Verpflichtung*, bestimmte Handlungen zu vollziehen. Berechtigungen und Verpflichtungen sind also an die grundsätzliche Möglichkeit diskursiver Konfliktbewältigung gebunden. Bestehen dagegen keine Konflikte oder sind die Akteure davon überzeugt, daß nondiskursive Strategien, beispielsweise aufgrund höherer Effektivität, vorzuziehen seien, kann man ersichtlich nicht von Berechtigung und Verpflichtung sprechen.

Das Gelingen von Rechtfertigungsdiskursen hängt von einer Reihe von Voraussetzungen ab. Besonders wichtig ist die Vor-Entscheidung, welchen Akteuren überhaupt das Recht zur Diskursteilnahme zugesprochen wird. Grundsätzlich sind hierzu drei Antworttypen denkbar. Man könnte der Überzeugung sein, die Berechtigung zur Diskursteilnahme und auch die Übernahme entsprechender Verpflichtungen nur sich selbst zuzugestehen (*Egoismus*). Diese Position führt höchstens dann zu einer Konfliktbewältigung, wenn der Akteur einen Konflikt mit sich selbst austrägt. Obwohl der ethische Egoismus die Position vieler Menschen darzustellen scheint, scheidet er aus der ethischen Reflexion als ernstzunehmende Position aus. Wichtiger ist dagegen die Auffassung, daß an Rechtfertigungsdiskursen nur die Angehörigen einer bestimmten Gruppe teilnehmen können (*Partikularismus*). Fast alle bekannten Moralen sind partikularistisch orientiert, weil sie die Diskursteilnahme auf Menschen beschränken, die nach bestimmten Gesichtspunkten (der Zugehörigkeit zu Stamm, Stand, Bekenntnis, Rasse,

Ethik

Die Ethik (Moralphilosophie) ist eine akademische Disziplin der Philosophie mit den dazugehörigen kognitiven und institutionellen Attributen wie Lehrsätzen und Methoden, Lehrbüchern und Bibliotheken, Kongressen und Kontroversen. Den Gegenstand der Ethik bilden die Handlungsweisen und Handlungsgewohnheiten von Menschen, ihr Ethos (die Moral). Ein Ethos besteht zunächst nicht primär aus Sätzen, sondern eben aus Handlungsweisen und -gewohnheiten. Im Interesse der Verständigung über Ethosysteme (Moralen) hat sich jedoch die methodische Konstruktion bewährt, Handlungen als –

meistens implizite – Regelbefolgungen aufzufassen. Moralische Regeln lassen sich wiederum als bedingte Aufforderungen rekonstruieren, und zwar solche, die der direkten Handlungsanleitung dienen. Beispielsweise könnte ein Satz einer Familienmoral lauten: „Bei uns soll es eine gemeinsame Mahlzeit pro Tag geben!“, eine Wirtschaftsmoral könnte den Satz enthalten: „Man soll schlechtem Geld kein gutes hinterherwerfen!“, der Satz: „Du sollst nicht begehren deines Nächsten Weib!“ kann die Handlungsgewohnheit einer Großgruppe sein.

Im Unterschied zum Ethos besteht die Ethik primär aus Sätzen, nämlich solchen, die Aufforderungen an jedermann richten. Im Gegensatz zu den Sätzen der Moral dienen diese aber nicht der Handlungsanleitung, sondern der Handlungsbeurteilung. Ein bekannter ethischer Satz ist die goldene Regel: „Was du nicht willst, das man dir tu“, das füg' auch keinem andern zu!“ Diese Aufforderung sagt ja nicht, was zu tun ist, sondern wie Handlungen zu beurteilen sind: Man soll nur solche Handlungen mit Folgen für andere ausführen, die man sich auch von anderen gefallen lassen würde. Andere ethische Aufforderungen sind beispielsweise die utilitaristische Regel: „Handle so, daß du durch deine Handlung das größte Glück der größten Zahl verwirklichst!“ oder der kategorische Imperativ: „Handle so, daß die Maxime deines Handelns jederzeit eine (allgemeine) Norm werden könnte!“ Es ist Aufgabe der Ethik, Moralen auf die in ihnen implizierten Regeln hin zu rekonstruieren, diese moralischen Regeln anhand ethischer Beurteilungsinstanzen zu überprüfen und schließlich diese Beurteilungsinstanzen nach allgemeinen Gesichtspunkten wie Funktionalität und Konsistenz zu untersuchen. In der Ethik werden also Regeln zur Beurteilung des Handelns erfunden und – unter dem Gesichtspunkt der Verallgemeinerbarkeit – geprüft.

Klasse, Geschlecht u. a.) charakterisiert sind. Partikularistische Moralen können die gruppeninterne Konfliktbewältigung durchaus zufriedenstellend regeln, sie finden jedoch immer dann ihre Grenzen, wenn es zu Konflikten zwischen Gruppen kommt. Legt man daher vorsorglich Wert darauf, Konfliktlösungsmöglichkeiten im vorhinem maximal auszuschoöpfen, muß man dagegen *jeden* als Diskursteilnehmer zulassen (*Universalismus*). Vor allem mit Blick auf die entstehende Weltgesellschaft ist daher der ethische Universalismus die Position, die von der Ethik bevorzugt wird. Dies ist der funktionelle Grund, warum die ethischen Regeln immer auf Verallgemeinerbarkeit abheben.

Werden Moralen einer ethischen Kritik unterzogen, ist daher zu prüfen, ob die Maximen, die diese Moral ausmachen, verallgemeinerbar sind. Beurteilt die Ethik Moralen als nichtuniversalisierbar, ist zu klären, wie die inhärenten Maximen verändert werden müssen, damit sie universalisierbar und damit konfliktfrei werden. Am moralischen Diskurs soll jeder teilnehmen können, der durch das Äußern einer Aufforderung einen Anspruch geltend machen kann – und damit potentiell Konflikte erzeugt. Die Universalität der ethischen Imperative umfaßt *alle*, die sich auf das Auffordern verstehen.

Ethische Aspekte des Handelns unter Risiko

In der Diskussion über Risiken der modernen technischen Zivilisation wird das Wort „Risiko“ in unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Für die Verständigung über die Verteilung von Umweltrisiken bedarf es einer begrifflichen Rekonstruktion von „Risiko“, die das Handeln unter Risiko Verteilungsgesichtspunkten zugänglich macht. Zweckmäßig ist diese Rekonstruktion, wenn sie ermöglicht, über Risiken so zu sprechen, daß sie untereinander vergleichbar sind.

Handeln

Eine entscheidende Voraussetzung zur Durchführung eines ethischen Prüfverfahrens ist die Verständigung über menschliches Handeln in einem sehr elementaren Sinn: Grundlage der Ethik ist die Pragmatik. In ihr wird festgelegt, welche grundlegenden Kategorien der Handlungsdeutung welchem Zweck adäquat sind. Handlungen lassen sich beispielsweise als Wirkungen von Ursachen deuten (Kausalismus). Dieses Handlungsverständnis wird relevant, wenn man nach den Ursachen von Handlungsstörungen sucht, beispielsweise wenn ein Arzt Schizophrenie als Ursache für paradoxes Handeln diagnostiziert. Andererseits lassen sich Handlungen als Ursachen von Wirkungen deuten (Finalismus). Diese Deutung ist dort relevant, wo wir nach der Zurechenbarkeit von Folgen fragen, etwa im Kontext richterlicher Handlungsbeurteilung. Für die Ethik ist grundsätzlich nur eine finalistische Handlungsdeutung adäquat. Ethische Regeln sind nämlich (generelle) Aufforderungen. Aufforderungen werden sinnvoll nur dann an Adressaten gerichtet, wenn es diesen grundsätzlich möglich ist, Aufforderungen zu folgen oder nicht zu folgen. Für das Projekt der Ethik liegt es auf der Hand, Handlungen als Befolgungen von Aufforderungen zu rekonstruieren.

Wir verständigen uns nämlich über Deutungen, indem wir die zu deutende Wirklichkeit (das Aufeinanderfolgen von Ereignissen) gliedern, sie also mit Hilfe von Wörtern unterscheiden. Ausgehend von diesem Grundgedanken kann man eine genauere Handlungsdeutung vornehmen, wenn man über eine entsprechende pragmatische Terminologie verfügt. In dieser spielen fünf Begriffe eine besondere Rolle: Mit Handlungen versuchen Menschen, Zustände zu verwirklichen, die als (vermeintliche) Folgen (von Folgen) des Handelns eintreten. Derartige Zustände sollen Zwecke heißen. Die Realisierung von Zwecken wird angestrebt, weil in ihnen (vermeintlich) bestimmte Attribute verwirklicht sind, an deren Zustandekommen dem Akteur bei der Handlungsplanung liegt; diese Attribute sollen Ziele heißen. Mittel sind diejenigen Handlungen, die der Akteur (vermeintlich) ausführen muß, um bestimmte Handlungsfolgen zu erreichen. Güter sind Gegenstände, die wiederum vom Akteur (vermeintlich) gebraucht werden, um über geeignete Mittel zu verfügen.

Verteilbarkeit setzt Vergleichbarkeit voraus.

Soll der Vergleich zwischen riskanten Handlungen zu Ergebnissen führen, die nicht bloß subjektiv, also individuell oder gruppenspezifisch gültig sind, muß ein Reden über Verteilungsfragen möglich sein, das sich an Kriterien der Verallgemeinerbarkeit messen läßt.

Vergleichbarkeit setzt Verallgemeinerbarkeit voraus.

Ein Risikobegriff, der die Forderungen nach Verallgemeinerbarkeit, Vergleichbarkeit und Verteilbarkeit von riskanten Handlungen erfüllt, heiße ein „rationaler“ Risikobegriff. Damit ist nicht unterstellt, daß es nur einen rationalen Risikobegriff gibt. Allerdings fallen eine Reihe von Bedeutungen, die mit dem Wort „Risiko“ gelegentlich verbunden werden, als unzweckmäßig aus. Faktoren wie die anlässlich einer riskanten Handlung erlebten Ängste oder Aversionen gehen nicht in den rationalen Risikobegriff ein. Die anlässlich einer Handlung oder Handlungsvorstellung empfundene Angst sagt etwas über die subjektive Wahrnehmung einer Handlung aus, kann jedoch nicht als verallgemeinerbarer Indikator für das Risiko dienen. Das bedeutet, daß sich ein entsprechender Risikobegriff auch nicht in Situationen transsubjektiver Beratung kontrolliert verwenden lassen könnte.

Im Idealfall handeln wir so, daß wir Folgen (1. bis n-ter Ordnung) herbeiführen bis zu einem Zweck, in dem die angestrebten Ziele realisiert sind. Lebensweltliche Erfahrung lehrt jedoch, daß dieser Idealfall ständig durch „Störungen“ gefährdet ist. Dabei gibt es verschiedene Typen von Störungen:

- Weil wir nicht wissen, ob die Folgen unserer Handlungen, vor allem die Folgen höherer Ordnung, auch mit Gewißheit eintreten, ist unser Handeln durch *Unsicherheit* bestimmt.

- Selbst wenn die geplanten Folgen eintreten, ist nicht ausgeschlossen, daß sich auch unerwünschte Zustände als Handlungsfolgen ergeben. Je höher der Ordnungsgrad der Folgen ist, desto mehr ist zu befürchten, daß solche *Nebenfolgen* eintreten. Allerdings sind die Nebenfolgen nicht immer unerwünscht; bei der Risiko-Chancen-Abwägung muß daher auch die Möglichkeit erwünschter Nebenfolgen eine Rolle spielen.
- Manchmal folgen auf unser Handeln Ereignisse, die wir durchaus nicht als Folgen unseres Handelns verstehen können – etwa weil keine Kausalbeziehung zwischen Handlungsfolge und dem Ereignis besteht oder, was pragmatisch gleich ist, das entsprechende Kausalwissen fehlt. Die beiden Ereignisse, die Handlung und das daneben eingetretene Ereignis, gehören einer anderen Gattung von Ereignissen an, so daß wir das Ereignis als *Zufall* einschätzen.
- Schließlich vollziehen wir Handlungen, die Bedingungen, aber nicht hinreichend für das Eintreten bestimmter Folgen sind. Das ist der Fall, wenn es zu den erwünschten Zuständen erst bei Vorliegen weiterer Bedingungen kommt; hier sprechen wir vom „*Geschick*“, das sich im erwünschten Fall als *Glück*, im unerwünschten als *Unglück* erweist.

Gegenüber dem Geschick kann man sich idealtypisch auf zwei Weisen verhalten: *resignativ*, da man über die zusätzlichen „zufälligen“ Bedingungen nicht verfügt, oder *konfident*, da man eine Möglichkeit sieht, die Bedingungen teilweise zu realisieren. Letztere Einstellung ist durch die Zuversicht charakterisiert, daß es unter Umständen möglich sei, die Unsicherheit des Geschicks zu *bewältigen*: die Unsicherheit zu *vermeiden*, zu *beseitigen* oder im Unglücksfall – ganz oder teilweise – *auszugleichen*. Die konfidente Haltung angesichts eines Geschicks drückt sich somit in der Bereitschaft aus, ein Wagnis einzugehen, das eine Chance ebenso wie ein Risiko mit

sich bringen kann. Die Betrachtung des Lebens unter Geschick-Bewältigungs-Gesichtspunkten ist ein Element des neuzeitlichen Selbstverständnisses des (abendländischen) Menschen. Der Mensch der Neuzeit und der Aufklärung, der durch eine konfidente Lebensauffassung ausgezeichnet ist, versucht, Wagnisbewältigung durch Vorsorge zu betreiben. Paradigmen, in denen sich die nicht-resignative Einstellung gegenüber den Unwägbarkeiten des Geschicks zeigt, sind die Versicherung gegen Unglücksfälle wie Feuer, Krankheit, Tod sowie das rationale Wettverhalten bei Glücksspielen. Beide Beispiele zeigen, daß die Genese der Risiko-beurteilung in menschlich-kulturellen Handlungskontexten liegt und nicht primär eine Kategorie für die Beurteilung von Geräten, Maschinen und Anlagen darstellt. Der neuzeitliche Risikobegriff hat einen durchaus anthropomorphen und keinen technomorphen Ursprung.

Das Sich-Versichern und Wetten waren die gesellschaftlichen Bedürfnislagen, die für die Entstehung der Wahrscheinlichkeitstheorie auslösend gewesen sind. Seit man über ein Verfahren zur Berechnung von Wahrscheinlichkeiten verfügt, ist es möglich, den Risikobegriff dadurch zu präzisieren, daß man den Grad eines Risikos numerisch bestimmt:

Der Grad eines Risikos ist gleich dem Produkt aus (numerisch ausgedrücktem) Schaden und (numerisch ausgedrückter) Wahrscheinlichkeit für den Eintritt des Ereignisses.

Dieser rationale Risikobegriff ist sozusagen die *Hochstilisierung lebensweltlicher Handlungsgeschickbewältigung*.

Die *Risiko-beurteilung* ist nicht zu verwechseln mit der subjektiven, individuellen oder kollektiven *Gefahrenwahrnehmung*. Im Gegensatz zur Wahrnehmung einer Gefahr versucht die Risiko-beurteilung die Ge-

fahr für einen Handlungstyp zu bestimmen, unabhängig von der jeweiligen Situation. Während die Gefahr ein Moment des konkreten Ereignisses ist, das einem Individuum oder einem Kollektiv bevorstehen kann, wird mit dem Risiko ein Situations-typ relativ zu einem typischen Situationsteilnehmer charakterisiert. Der situativ gebundenen Gefahr steht damit das Risiko als das typisierte Unglück, die Chance als das typisierte Glück gegenüber.

Die Unterscheidung von Risiko-beurteilung und Gefahrenwahrnehmung macht verständlich, daß beispielsweise der Glücksspieler glauben kann, unmittelbar vor dem glücklichen Gewinn zu stehen, während doch die Chancen aus der Sicht der Bank immer gleich verteilt sind. Ebenso hat die Wahrnehmung einer Gefahr, beispielsweise bei der Angst vorm Fliegen, keinen bestimmenden Einfluß auf das tatsächlich bestehende Risiko – wie das eines Absturzes. So fließt in die Festlegung der Versicherungsprämie denn auch nicht die individuelle Gefahrenwahrnehmung ein, sondern das Risiko. Die Gefahrenvorsorge durch die Beurteilung des Risikos ersetzt nicht die Gefahrenabwehr, wie umgekehrt die Gefahrenabwehr nicht die Risikovorsorge ersetzt: Die Unfallversicherung ersetzt nicht den Sicherheitsgurt, und ebensowenig ersetzt der Sicherheitsgurt die Unfallversicherung.

Über die Regularitäten der Gefahrenwahrnehmung von Individuen und Kollektiven wissen wir durch psychologische und andere sozialwissenschaftliche Forschungen. Diese beschreiben das faktische Akzeptanzverhalten der Probanden gegenüber drohenden Gefahren, sagen aber nichts aus über die Akzeptabilität einer riskanten Handlung. *Akzeptabilität* ist ein normativer Begriff, der die Akzeptanz von risiko-behafteten Optionen mittels rationaler Kriterien des Handelns unter Risiko-bedingungen festlegt. Akzeptabel ist dasjenige Risikoverhalten, das ein kognitiv und operativ perfekter

Entscheider angesichts mehrerer Handlungsalternativen zeigen würde. Das bedeutet allerdings nicht, daß es möglich wäre, für die Akzeptabilität von Risiken *kategorische Imperative* zu formulieren, derart, daß von jedermann gefordert werden könne, ein bestimmtes Risiko, etwa das des Fliegens mit Linienmaschinen, auf sich zu nehmen. Jedoch ist es möglich, für das Handeln unter Risiko *hypothetische Imperative* zu formulieren, die den Risikograd bereits akzeptierter Risiken in bezug zu einer zur Debatte stehenden Handlungsoption setzen. Ein solcher hypothetischer Imperativ könnte beispielsweise lauten: „Wer das Risiko des Bergsteigens für sich akzeptiert, der soll auch bereit sein, das Fliegen mit Linienmaschinen zu riskieren!“ Mit Hilfe der hypothetischen Imperative ist auch den subjektiven Risikobereitschaften Rechnung zu tragen. Selbst wenn über Schadenseinschätzung und Eintrittswahrscheinlichkeit nichts Verbindliches gesagt werden kann, läßt sich dennoch fordern, daß sich der einzelne oder die Gruppe einer bestimmten risikobehafteten Situation gegenüber so verhält, wie sie es in einer Situation mit vergleichbarem Risikograd bereits getan haben. Diese Forderung stellt ein Postulat der Verlässlichkeit dar, die durch die „Binnenrationalität“ des Individuums gewährleistet werden soll. Sie läßt sich zu einem *Prinzip der pragmatischen Konsistenz* verallgemeinern:

Hat jemand durch die Wahl einer Lebensform den Grad eines Risikos akzeptiert, so darf dieser auch für eine zur Debatte stehende Handlung unterstellt werden.

Gerechte Verteilung von Risiken und Chancen

Die Ethik – so wurde oben ausgeführt – ist die Kunstlehre der diskursiven Konfliktbewältigung. Spezifische ethische Fragen ergeben sich daher aus einer genaueren Rekon-

struktion von Konflikttypen. Bezogen auf die verschiedenen Aspekte des Handelns lassen sich grundsätzlich Zweckkonflikte von Güterkonflikten unterscheiden. Bei *Zweckkonflikten* handelt es sich um unterschiedliche Auffassungen hinsichtlich der Letztfolgen von Handlungen; sie lassen sich häufig durch einen Diskurs um die Notwendigkeit von Zwecken relativ zu gegebenen Zielen lösen. *Zielkonflikte* dagegen, mit denen die erwünschten Attribute der Letztfolgen von Handlungen ins Spiel kommen, sind eher selten und diskursiv schwer zu bewältigen. *Güterkonflikte* betreffen demgegenüber die Frage, wem dasjenige Gut zukommt, das als Instrument eingesetzt direkt oder indirekt zum Zweck führt. Dagegen gibt es um die Wahl von Mitteln keine Konflikte, sondern Dissense: Die Frage der Adäquatheit eines Mittels ist ein Wahr/Falsch-Problem, während die Frage der Wahl von Zwecken und Gütern ein Richtig/Unrichtig-Problem ist.

Durch die Entscheidung von Güterkonflikten wird häufig darüber mitentschieden, wer überhaupt die Chance erhält, den Zweck zu realisieren. In dramatischen Fällen, in denen wichtige Güter knapp sind, geht es letztlich um Realisierungsmöglichkeiten für ein Ensemble von Zwecken, das wir mit dem Begriff des „guten Lebens“ fassen.

Güterkonflikte dieser dramatischen Art sind definitionsgemäß *Verteilungskonflikte*. Stehen nämlich ausreichend viele Güter zur Verfügung, gibt es keinen Konflikt, gibt es dagegen nicht ausreichend viele Güter, stellt sich die Frage ihrer angemessenen Verteilung. Eine scheinbar naheliegende Antwort scheidet dabei als konfliktlösend aus: die Gleichverteilung. Das *Gleichverteilungsprinzip*, das im übrigen vom Prinzip der Rechtsgleichheit und vom Prinzip der Chancengleichheit unterschieden werden muß, ist in der Regel keine adäquate Antwort auf Güterkonflikte; stellt nämlich die Gleichverteilung eine adäquate Kon-

fliktlösung dar, gibt es wenigstens gerade hinreichend viele Güter und somit keinen Konflikt. Davon abgesehen ist das Gleichverteilungsprinzip auch unter den Bedingungen hinreichender Verfügbarkeit von Gütern nicht immer angemessen, weil keineswegs alle Betroffenen gleiche Bedürfnisse haben. Erst recht gibt es unter Bedingungen von Knappheit keine angemessene Orientierung, weil Menschen generell *praktisch ungleich* sind, also ungleiche Ziele anstreben, oder gleiche Ziele anstreben, aber diese in ungleichen Zwecken realisiert sehen wollen, oder gleiche Zwecke realisieren wollen, aber dazu ungleiche Mittel wählen und schließlich ungleiche Güter für die Wahl ihrer Mittel einzusetzen versuchen. Vor dem Hintergrund praktischer Ungleichheit ist die Gleichverteilung nur in weniger interessanten Grenzfällen die adäquate Lösung eines Güterkonflikts; generell kann ein Diskurs um eine Verteilung von Gütern nur sinnvoll sein, wenn eine ungleiche Verteilung auch ein konfliktbewältigendes Diskursergebnis sein kann. Eine Güterverteilung, die in Orientierung am Prinzip des ethischen Universalismus durch einen Diskurs gerechtfertigt ist – sein Ergebnis mag in Gleich- oder Ungleichverteilung liegen – heiße „gerecht“ (im Sinne der Verteilungsgerechtigkeit [*iustitia distributiva*], nicht der Tauschgerechtigkeit [*iustitia commutativa*] oder der Gerechtigkeit vor dem Gesetz [*iustitia legalis*]).

Für eine gerechte Güterverteilung lassen sich zunächst keine unmittelbaren allgemeinen Regeln aufstellen, da die Rechtfertigung von der individuellen und kollektiven Bedürfnisabwägung in Diskursen abhängt, über die sich a priori nichts sagen läßt. Die materiale Verteilung ist eine Sache der Moral und nicht eine Frage ethischer Regeln. Bedürfnisseinschätzungen und deren Bekundung unterliegen keiner moralischen „Jurisdiktion“; sie sind faktisch zur Geltung und mit anderen

Ein Modell gerechten Risiko-Chancen-Ausgleichs

Als Beispiel für ein solches Modell sollen hier die Überlegungen von Charles Fried skizziert werden, die mit den vorstehenden Überlegungen gut in Einklang zu bringen sind.

Nach Fried ergibt sich die Risikobereitschaft des Individuums bei Einzelentscheidungen aus einem „Lebensplan“, d. h. einem kohärenten System von individuell gesetzten Zwecken. Dieser Lebensplan beinhaltet ein individuelles Risikobudget, das eine Zuordnung von als erstrebenswert erachteten Zielen zu den dafür in Kauf zu nehmenden Risiken enthält. Im Laufe des Lebens werden die zweckgerichteten Handlungen, die Risiken mit sich bringen, aus dem Budget abgebucht, Handlungen mit Chancen dem Budget gutgebracht. Ist das Budget erschöpft, werden keine riskanten Handlungen mehr eingegangen.

Für die Interaktion zwischen den Akteuren in großen Gruppen geht Fried – in Übereinstimmung mit dem Prinzip der pragmatischen Konsistenz – davon aus, daß eine Person grundsätzlich das Recht hat, einer anderen ein Risiko zuzumuten, wenn jedermann sich das Risiko zumuten lassen würde – einschließlich der handelnden Person selbst. Dem Risikobudget entspricht auf sozialer Ebene der Begriff des risk-pools, vorstellbar als eine allgemeine Risikokasse. Bei jeder Handlung, mit der jemand einem anderen ein Risiko zumutet, zahlt er entsprechend dem Risikograd ein, bei jeder Handlung, die ihm von jemand anderem zugemutet wird, hebt er vom Konto ab. In bezug auf Chancen erfolgt dieser Vorgang umgekehrt. Eine gerechte Risiko- und Chancenverteilung besteht dann, wenn die Konten paarweise ausgeglichen sind. Dabei können die Konten paarweise relativ zu den individuellen Risikobudgets durchaus ungleich sein.

Modelle dieser Art sind selbstverständlich Idealisierungen, die eine Reihe schwieriger Fragen – etwa das Problem einer multiattributiven Risiko-„Währung“, des Wandels der Risikoeinstellung bei Individuen und Kollektiven, „pathologische“ Risikoeinstellungen wie Tollkühnheit oder Feigheit, Risikobereitschaft zugunsten oder zu Lasten Dritter, Probleme der Risiken und Chancen bei Verteilung kollektiver Güter u. v. m. – offenlassen.

Bedürfnissen in Einklang zu bringen. Im Hinblick auf die Berechtigung der Teilnahme an solchen Verteilungsdiskursen und die Verpflichtung, den dort erreichten diskursiven Einverständnissen nachzukommen, ist es allerdings möglich, eine Gleichheitsregel auf „Meta-Ebene“ zu formulieren. Eine Aussicht auf verlässliche Konfliktlösung besteht nämlich nur dann, wenn allen, die sich auf das Geltendmachen von Bedürfnissen verstehen, die gleiche Chance der Diskursteilnahme zugestanden wird, und wenn außerdem alle, die an Diskursen teilnehmen, in gleicher Weise auf Verteilungskonsense zu verpflichtet sind.

Damit zeigt sich, daß der präskriptive Gehalt von „Gerechtigkeit“ zwei klar zu unterscheidende Momente aufweist: ein *Moment der Gleichheit*, das sich auf die prädiskursiven Berechtigungen und Verpflichtungen bezieht, sowie ein *Moment der gerechtfertigten Ungleichheit*, das auf die *intra*-diskursiv herausgefundenen Verteilungen selbst zielt. Entsprechend lassen sich zwei Postulate als Explikation des präskriptiven Gehalts von „Gerechtigkeit“ formulieren:

GLEICHHEITSPOSTULAT
Handle so, daß jeder, der einschlägige Bedürfnisse hat, gleiche Berechtigungen und Verpflichtungen bei der Teilnahme an Diskursen erhält!

VERTEILUNGSPOSTULAT
Verteile so, daß jede Verteilung diskursiv gerechtfertigt ist!

Diese Postulate beziehen sich auf das Schema von Verteilungsdiskursen und können insoweit als „formal“ bezeichnet werden. Mehr „materiale“ Regeln der Verteilungsgerechtigkeit erhält man, indem man sich mit bestimmten Typen von Gütern und deren gerechter Verteilung auseinandersetzt, etwa mit „Chancen“ und „Risiken“.

Aus dem Prinzip der pragmatischen Konsistenz ergibt sich zunächst un-mittelbar die

REGEL DER RISIKOBEREITSCHAFT
Sei bereit,

*Risiken zu übernehmen,
wenn du ähnliche Risiken bereits
in Kauf genommen oder
anderen zugemutet hast und
sie somit für tragbar hältst!*

Weitere Regeln lassen sich leicht
im gegebenen Rahmen rechtfertigen:

REGEL DER CHANCENTEILHABE
Handle so,

*daß du die Risikoträger an den
Chancen so weit wie möglich
teilhaben läßt!*

REGEL DER RISIKOZUMUTUNG

*Entscheide Risikooptionen so,
daß die bisher am
wenigsten durch Chancen
Begünstigten den
größten relativen Vorteil
haben!*

REGEL DER RISIKOVORSORGE

*Handle so,
daß du die Risikoträger
deiner Chancen im Schadensfall
so weit wie möglich
entschädigen kannst!*

Derartige Regeln, so plausibel sie sein mögen, führen jedoch sofort zu erheblichen operativen Schwierigkeiten, wenn Interaktionen einer schnell erreichten Komplexitätsstufe betrachtet werden, vor allem aber dann, wenn das Interaktionsnetz einer ganzen Gesellschaft betrachtet wird. Auch wenn man für die individuellen Akteure optimale Unterstellungen hinsichtlich ihrer Einsichtsfähigkeit und Handlungsabsichten macht, ist auf kollektiver Ebene daher durchaus unklar, wie eine gerechte Chancen- und Risikoverteilung gedacht werden kann. Philosophen, Ökonomen, Juristen und andere mit diesem Problem befaßte Wissenschaftler arbeiten seit einigen Jahren an forma-

len Modellen, die das Funktionieren von Verteilungsdiskursen, bezogen auf chancenreiche und risikobehaftete Handlungen, deutlich machen können – wie etwa das auf der Vorderseite dargestellte Modell eines gerechten Risiko-Chancen-Ausgleichs (vgl. Erläuterungstext zum „Risiko-Chancen-Ausgleich“).

Modelle dieser Art zeigen die Richtung an, in der die Entwicklung von Instrumenten weiter betrieben werden muß, um einen *rationalen gesellschaftlichen Risikodiskurs* zu ermöglichen, auf den die Menschheit heute dringender denn je angewiesen ist.

Summary

In the current debate about the risks of our modern technological civilisation, the concept of risk is used in different meanings. In order to reach a common understanding about a just distribution of environmental risks, it is necessary to clarify this concept. Philosophical ethics can teach the art of discursive conflict resolution by offering rational approaches for the evaluation of actions involving a risk.

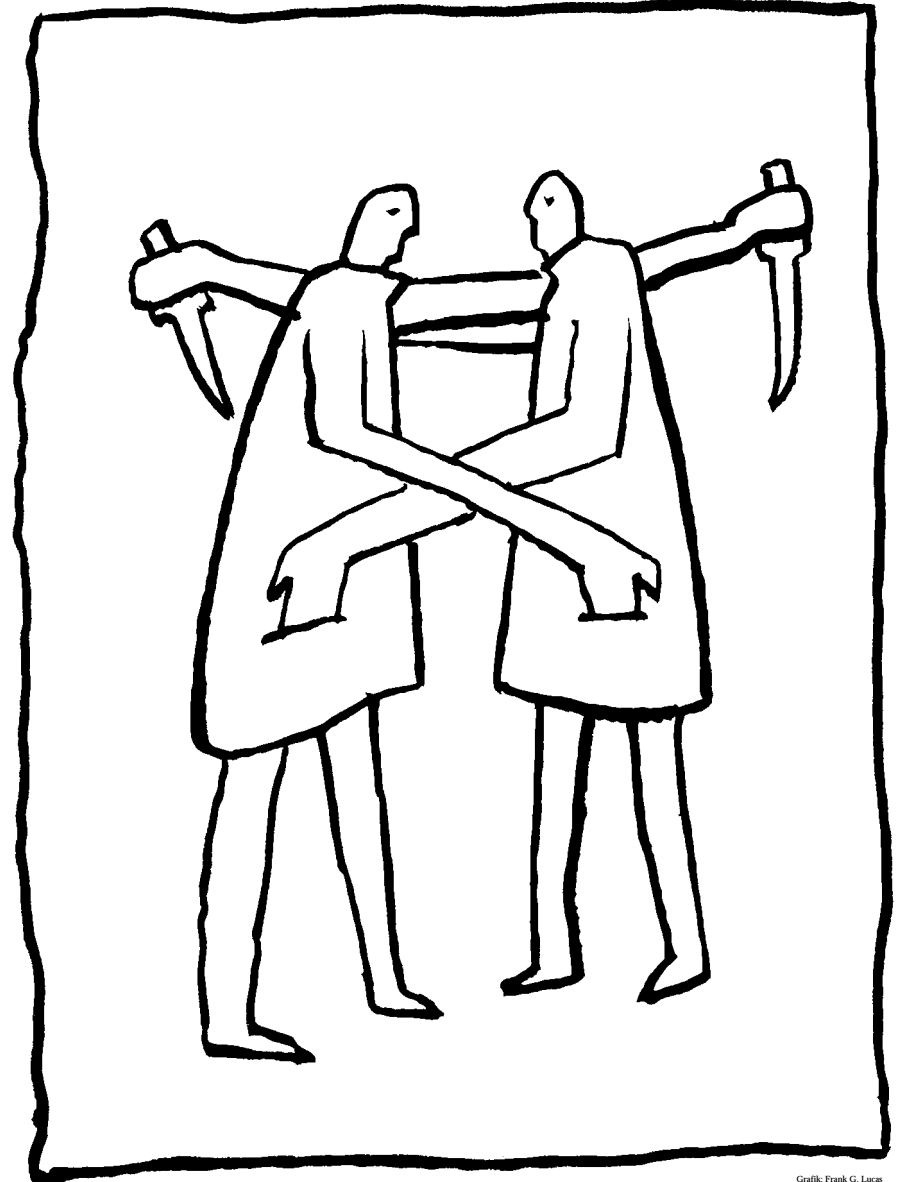
Der Autor:

Nach dem Studium der Philosophie in Bonn, Innsbruck und Bochum sowie der Promotion zum Dr. phil. an der Ruhr-Universität habilitierte sich Carl Friedrich Gethmann für *Philosophie* an der Universität Konstanz. Er ist seit 1979 als Professor für Philosophie an der Essener Universität und mit weiteren Lehrtätigkeiten an den Universitäten Düsseldorf und Göttingen tätig. 1991 übernahm er mit seiner Berufung auf die ordentliche Professur an der Universität Essen den in Nordrhein-Westfalen einzigartigen Lehrstuhl zum Schwerpunkt *Angewandte Philosophie*. In zahlreichen Veröffentlichungen hat er sich seit 1974 vor allem mit Fragen der Sprachphilosophie und Philosophie der Logik, der Phänomenologie, der Wissenschaftsforschung und in besonderem Maße mit den Problemen der Technikfolgenabschätzung im Rahmen einer modernen, praktischen Philosophie auseinandergesetzt. Carl Friedrich Gethmann ist Mitglied der

Academia Europaea (London) und Direktor der Abteilung für *ethische Fragen der Technik* am von ihm mitinitiierten Bonner Institut für *Wissenschaft und Ethik*. Unter seiner Leitung sind viele Drittmittelprojekte erfolgreich abgeschlossen worden, unter anderem zu Themen wie *Umweltstandards* (Akademie der Wissenschaften, Berlin), *Umweltstaat* (Gottlieb-Daimler- und Karl-Benz-Stiftung, Ladenburg), *Technikfolgenabschätzung am Beispiel bemannter Raumfahrt* (BMFT und DLR, Köln-Porz), *Gentechnik bei Pflanze und Tier* (Ministerium für Wissenschaft und Forschung NRW) sowie *Ethische Probleme von Keimbahnmanipulationen* (Karl Heinz Beckurts-Stiftung, mit J. Fey). Zur Zeit bearbeitet er im Rahmen eines DFG-Projekts die Fragen der *Natürlichkeit der Natur* und *Zumutbarkeit von Risiken im Bereich der Gentechnik bei Pflanze und Tier*.

Literatur:

- Ulrich Beck: *Risikogesellschaft*. Auf dem Weg in eine andere Moderne. Frankfurt a. M., 1986.
- Charles Fried: *An Anatomy of Values. Problems of Personal and Social Choice*. Cambridge, Mass., 1971.
- Carl Friedrich Gethmann: *Lebensweltliche Präsuppositionen praktischer Subjektivität. Zu einem Grundproblem der angewandten Ethik*. In: H. M. Baumgartner/W. G. Jacobs (Hg.): *Philosophie der Subjektivität? Zur Bestimmung des neuzeitlichen Philosophierens*. Akten des 1. Kongresses der Internationalen Schelling-Gesellschaft 1989. Stuttgart, 1993. S. 150–170.
- Carl Friedrich Gethmann: *Universelle praktische Geltungsansprüche. Zur philosophischen Bedeutung der kulturellen Genese moralischer Überzeugungen*. In: P. Janich (Hg.): *Entwicklungen der methodischen Philosophie*. Frankfurt a. M., 1992. S. 148–175.
- Carl Friedrich Gethmann: *Zur Ethik des Handelns unter Risiko im Umweltstaat*. In: Ders./M. Kloepper (Hg.): *Handeln unter Risiko im Umweltstaat*. Berlin, Heidelberg, 1993. S. 1–54.
- Carl Friedrich Gethmann: *Ethische Probleme der Verteilungsgerechtigkeit im Umweltstaat*. In: Ders./M. Kloepper (Hg.): *Verteilungsgerechtigkeit im Umweltstaat*. Bonn, 1994 (in Vorb.).
- Otfried Höffe: *Über John Rawls' Theorie der Gerechtigkeit*. Frankfurt a. M., 1977.
- Helmut Jungermann/Paul Slovic: *Die Psychologie der Kognition und Evaluation von Risiko*. In: G. Bechmann (Hg.): *Risiko und Gesellschaft*. Opladen, 1992. S. 167–208.
- Chaim Perelman: *Über die Gerechtigkeit*. München, 1967.
- John Rawls: *Eine Theorie der Gerechtigkeit (A Theory of Justice)*. Frankfurt a. M., 1988.
- Nicholas Rescher: *Distributive Justice. A Constructive Critique of the Utilitarian Theory of Distribution*. Indianapolis/New York, 1966.
- Nicholas Rescher: *Risk. A Philosophical Introduction to the Theory of Risk Evaluation and Management*. Washington D.C., 1983.





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 CO₂-Anstiegs auf die Biosphäre
Von Günter Beckmann und Burkhard Klopries

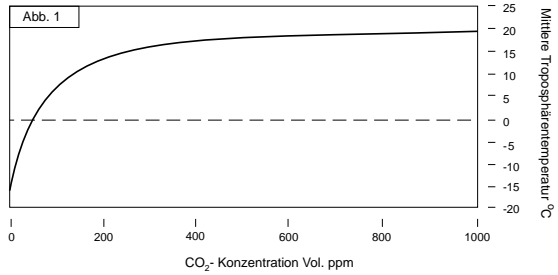
Die Auswirkungen des Anstiegs der Kohlendioxidkonzentration in der Troposphärenluft werden von Wissenschaftlern in aller Welt sehr unterschiedlich beurteilt. Die meisten Diskussionsbeiträge beziehen sich dabei auf ein zentrales Thema: die gefährliche Änderung des globalen Klimas. Andere und unter Umständen 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 CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre zu einer Aufwärmung der Troposphäre führen und somit das Klima beeinflussen wird. Es gibt jedoch Gründe, um deretwegen man den CO₂-Anstieg, für sich gesehen, als das ernstere der beiden Probleme ansehen sollte.

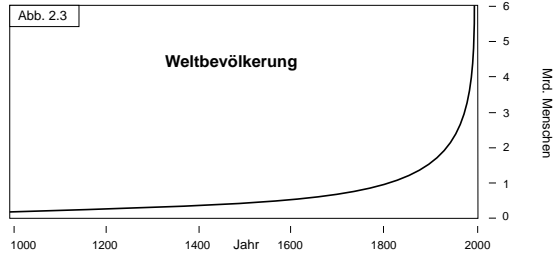
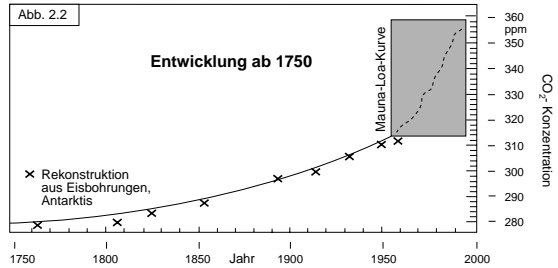
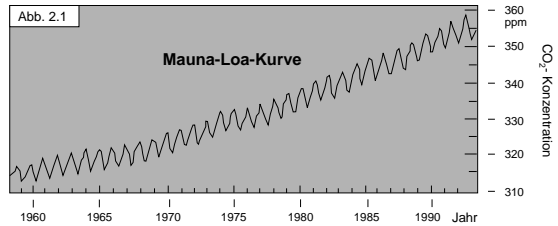
Etwa 150 bis 300 Millionen Jahre vor unserer Zeit, in denen der CO₂-Gehalt der Luft bei mehreren tausend Vol. ppm lag, herrschten zwar wärmere, aber durchaus säugetierfreundliche Klimabedingungen. Der Grund hierfür ist rein physikalischer

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 Klimaveränderungen und ein Meeresspiegelanstieg auftreten werden. Gewiß werden die Klimaveränderungen 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Gehaltes, sondern wegen des großen *Veränderungsgradienten*. Dieses Risiko wurde bisher kaum wahrgenommen.

Der Anstieg des Kohlendioxids

Der troposphärische CO₂-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 1958¹. 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Gehalt auf Begrünungsunterschiede reagiert.

Die interpolierte Kurve, die den ansteigenden CO₂-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 CO₂-Gehalt wurde ja gewissermaßen bereits „mitgemessen“. Ebenso die Löslichkeit von CO₂ im Ozeanwasser, die mit steigender CO₂-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 CO₂-Kurve wird weiter ansteigen, mit sich beschleunigender Geschwindigkeit. Als vorläufigen Maximalwert könnte man diejenige CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Gehalt in der Luft vielleicht auf das vorgeschichtliche Niveau steigen, das er zum Ende des Präkambriums mit etwa sieben Volumenprozent hatte. Aber ein solches Szenario dürfte den Menschen nicht mehr betreffen.

Die gegenwärtige Kohlenstoffbilanz

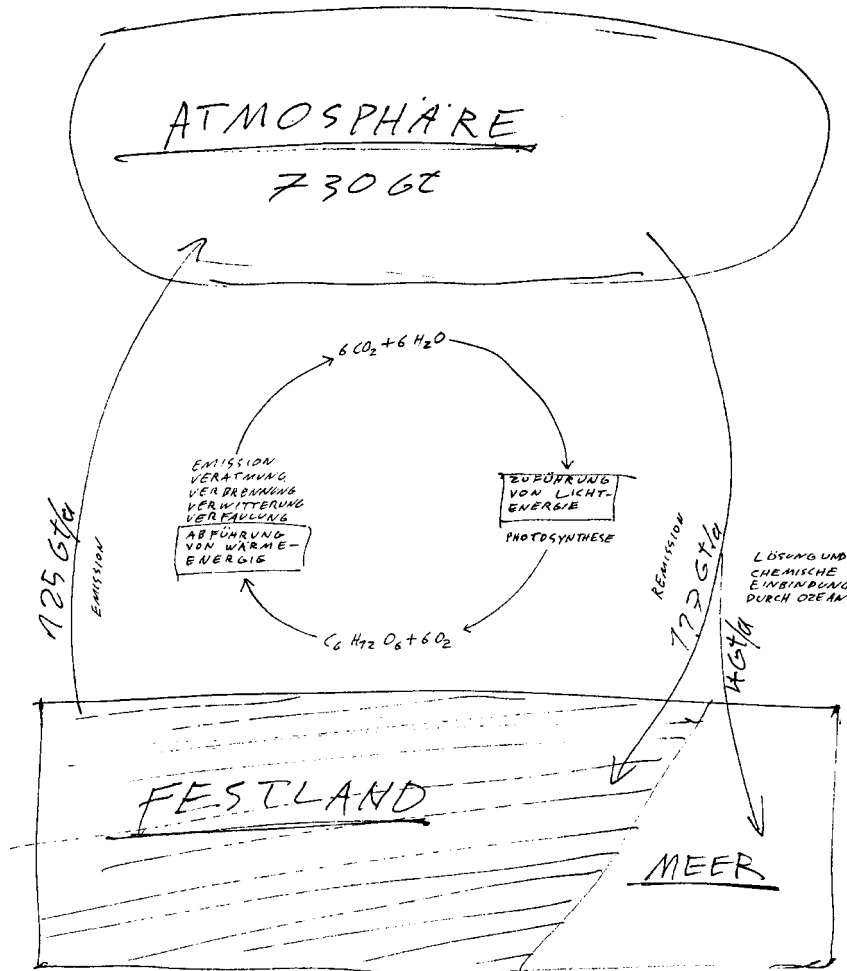
Kohlenstoff befindet sich in der troposphärischen Luft, hauptsächlich in Form von Kohlendioxid, also CO₂. Zur Zeit beträgt die Konzentration etwa 360 ppm (vgl. Abb. 2). Neben CO₂ sind, in weit geringeren Anteilen, auch andere kohlenstoffhaltige Gase in der Luft enthalten: CO, CH₄ und andere größere Kohlenwasserstoffmoleküle. Sie alle wandeln sich unter den in der Atmosphäre herrschenden Bedingungen in relativ kurzen Zeiträumen von maximal zehn Jahren in CO₂ um, wobei ihre jeweilige Konzentration im wesentlichen vom Nachschub abhängt. Für die folgende Betrachtung wird nur das CO₂ berücksichtigt.

CO₂ gehört – wie auch O₂, N₂ und Ar – zu den Gasen, die sich relativ rasch in der Troposphäre verteilen. Deshalb bauen sich weder regional noch zeitlich größere Konzentrationsunterschiede auf. CO₂ ist ein *ubiquitäres* Gas.

Daß die Erde, im Gegensatz zu ihren beiden Nachbarplaneten, Venus mit 96 und Mars mit 95 Prozent, einen niedrigen atmosphärischen CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 repräsentieren².

1992 befanden sich 730 Gt Kohlenstoff in der Atmosphäre, was etwa 360 ppm CO₂ 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 + CO₂ + H₂O → Kalziumhydrogencarbonat). Durch die CO₂-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 CO₂-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.

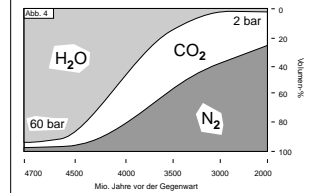
Vor etwa 3,8 Milliarden Jahren entstand das Leben. So alt sind die ältesten Fossilien, die in Grönland gefunden wurden. Zu dieser Zeit war die Ozeantemperatur auf weniger als 50 °C abgesunken. Entsprechend war auch der Wasserdampfdruck der Atmosphäre gefallen.

Die Frühzeit der Erde war geprägt durch starke Regenfälle - eine Folge des Auskondensierens des Wasserdampfes. Es regneten etwa 250 Millionen Kubikkilometer 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

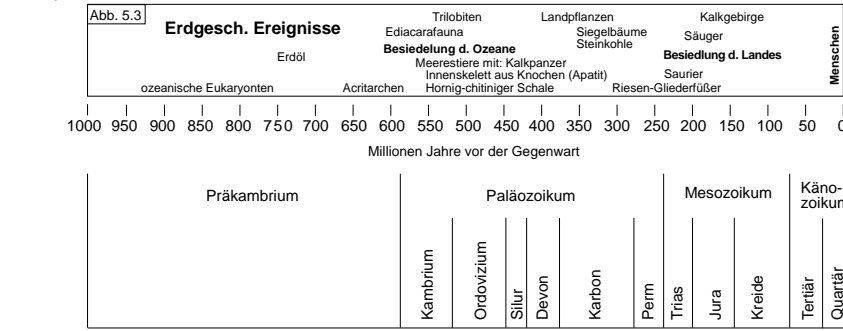
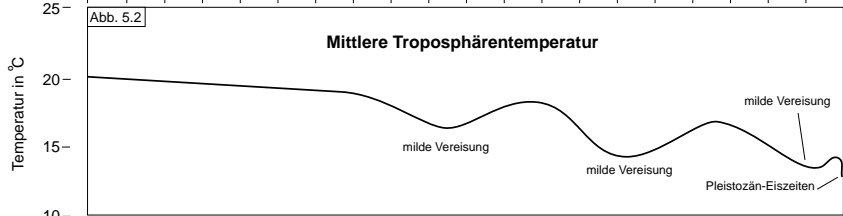
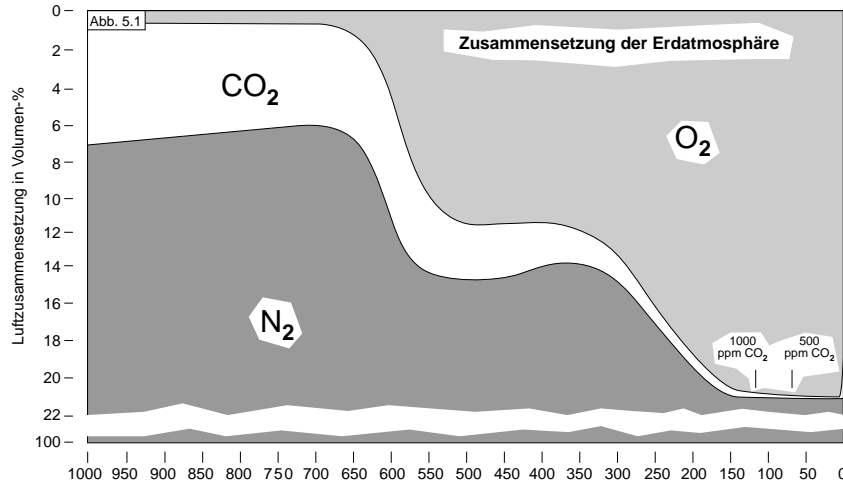
wohl um das Zehnfache höher gewesen sein als heute. Die normale Windstärke war wahrscheinlich Sturm. Die Farbe des Himmels war nicht blau, sondern - wegen der CO₂-Konzentration von etwa noch 30 Volumenprozent - eher grünlich³.

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

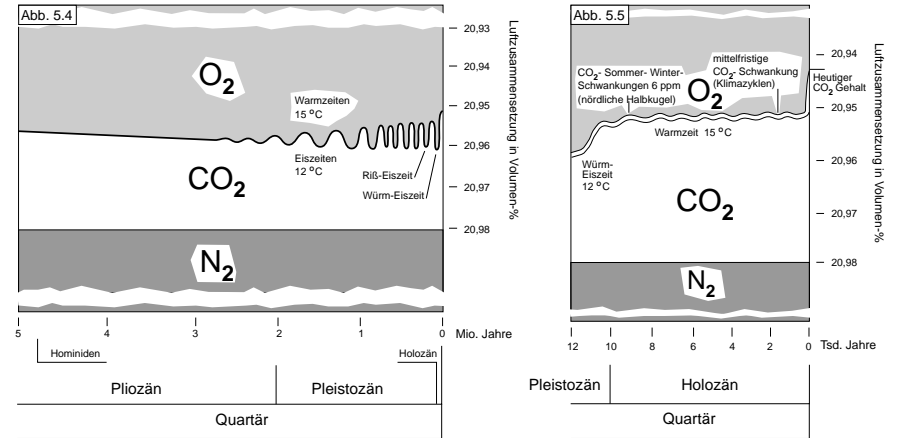


(4) Zeitliche Änderung der Zusammensetzung der Uratmosphäre. Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre blieb während der dargestellten Periode von 4.700 Millionen Jahren bis 2.000 Millionen Jahren vor der Gegenwart unter 0,5 Volumenprozent und wurde deshalb in der Grafik vernachlässigt. In dieser Periode sanken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



(5.1) Zusammensetzung der Erdatmosphäre in den vergangenen 1.000 Millionen Jahren (H₂O unberücksichtigt, sonstige Gase wurden mit unter Stickstoff/N₂ gefaßt). Aus Platzgründen wurde die N₂-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.

Graph: 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 CO₂-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 Eisensteins⁴. 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.

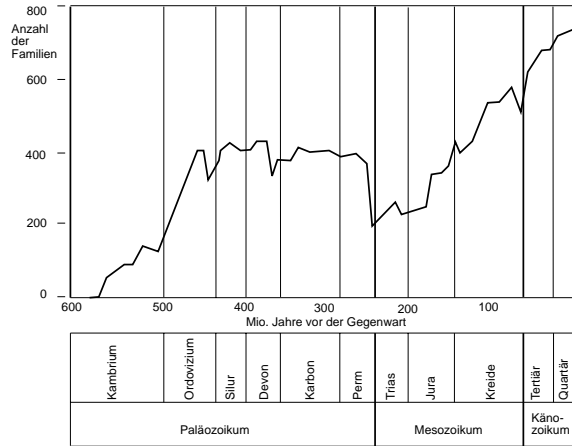
Dieser „kleine“ Anstieg des Sauerstoffgehaltes könnte die Ursache für eine wichtige biologische Entwicklung sein: In der Mitte des Präkambriums bildeten sich die ersten Einzeller mit Zellkern (Eukaryonten).

Man muß annehmen, daß diese höheren Lebewesen die Sauerstoffproduktion deutlich erhöhten – wegen ihres effektiveren Photosynthesystems⁵.

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. Graph: F. G. Lucas

beiten aus den Bereichen Physik, Chemie, Biologie, Paläontologie, Astronomie zusammengetragen, um ein plausibel erscheinendes Gesamtbild zu erstellen⁶. 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 Kohlendioxid⁷.
- Die *photolytische* Zersetzung von Wasserdampf, ausgelöst durch Lichtstrahlen, lieferte und liefert noch heute freien Sauerstoff – doch in geringer, für die Massenbilanz unbedeutender Menge⁸.
- 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 „sauerstoffhungerigen“ Verbindungen im Meerwasser – wie zum Beispiel Eisen-[III]-Verbindungen, Uranitit und Pyrit – verbraucht wurde und sich deshalb zunächst nicht in der Atmosphäre anreichte⁹.
- 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/m² auf 1,4 kW/m² zugenommen¹⁰. 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 heute¹¹. Eine Abnahme des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre zog einen Rückgang der Kohlendioxidkonzentration im Ozeanwasser nach sich und eine Ausfällung von Karbonaten (Absinken der *Karbonatlysookline*). Umgekehrt führt ein CO₂-Anstieg zur Auflösung von Karbonatgestein (Ansteigen der Karbonatlysookline).
- *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 CO₂ 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 CO₂-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 O₂-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 Fossilfinden 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 konnten¹². 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 CO₂-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 Fossilfinden zeitlich recht genau datierbar ist, folgte der sich verändernden Atmosphäre und des sich entsauernden Ozeanwassers mit einem bemerkenswerten Entwicklungsschub¹³. Die beginnende Sauerstoffzunahme in der Atmosphäre (Abb. 5.1, links oben) signalisiert aber auch, daß die Absättigung der im Ozean vorhandenen sauerstoffhungerigen 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 CO₂ durch die Photosynthese der Ozeanflora stärker als die Leistungsfähigkeit aller

dann noch vorhandenen Sauerstoffsenken und Kohlendioxidquellen. Der Sauerstoffgehalt stieg an, und der CO₂-Gehalt fiel ab.

Die milde Vereisung gegen Ende des Kambriums, welche wahrscheinlich hauptsächlich die am Südpol liegende Region des Kontinents *Gondwana*¹⁴ 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 CO₂ – nur deshalb zur Vereisung führte, weil die Sonneneinstrahlung in jener Zeit noch niedriger und die Albedo stärker war als heute.

Die O₂-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 Rückenpanzerung¹⁵. 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 O₂-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 CO₂-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“¹⁶. 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 CO₂-O₂-Verhältnis von etwa 1:14 nicht lebensfähig gewesen¹⁷.

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 CO₂ 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 CO₂-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 CO₂ 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 CO₂-Messungen aus Eiskernbohrungen belegt. Der Kurvenverlauf legt den Gedanken nahe, daß das Wechselspiel zwischen CO₂ und O₂ vielleicht nicht die Folge, sondern die Ursache der Pleistozänezeiten gewesen sein könnte.

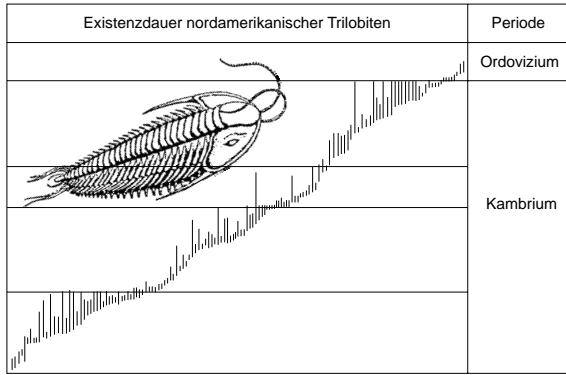
Die heute am häufigsten genannte Theorie über die Ursache der Eiszeiten stammt von Milankovic¹⁸. Die Theorie führt letztlich als Ursache der Eiszeiten die in bestimmten Zyklen schwankende Sonneneinstrahlung – also Insolationsveränderungen aufgrund von Präzession, Ekliptik und Exzentrizität der Erde – 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 CO₂-Gehalt auf 200 ppm abgesunken war, wurden – wegen der sehr gering gewordenen Wärmeisolation durch die „CO₂-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 Auftüftung 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*) entstand¹⁹.
- 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 CO₂ 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 CO₂-Gehalt wieder auf 270 ppm an. Da der Antarktische 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 CO₂ 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 CO₂-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 CO₂. 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 CO₂-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 CO₂ oder die mit dem Partialdruck steigende CO₂-Aufnahme des Ozeans, genügen offensichtlich nicht, den Anstieg zu stoppen. Mit steigen der Abweichung wird die Chance auf Selbstheilung geringer. Der bis heute erreichte CO₂-Gehalt von 360 ppm hatte vor etwa 35 Millionen Jahren schon einmal geherrscht. Ein CO₂-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 CO₂ 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 Schritten²⁰ 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 geführt²¹. *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 gibt²². Aber keine von ihnen weist ein vergleichbar großes und gleichmäßig gerichtetes Veränderungspotential auf. Die Existenz einer solchen Leitgröße erklärt die Zielgerichtetheit der Evolution²³.* Auf einer Erde, die von Anfang an immer die gleiche Luftzusammensetzung gehabt hätte, wären vermutlich andere Entwicklungen abgelaufen. Das Verhältnis von CO₂ zu O₂ hat, wie die erdgeschichtliche Entwicklung der Atmosphäre und der Erdpopulation zeigt, durch Selektionsdruck gestaltend gewirkt. Dies ist bemerkenswert, weil beide Komponenten, CO₂ und O₂, an sich weder giftig noch mutationsfördernd auf die jeweils bestehenden Populationen wirken.

Die Existenzdauer von Tier oder Pflanzenarten liegt – wie Paläontologieliteratur zeigt²⁴ – fast immer nur bei wenigen Millionen Jahren, das heißt, im Verhältnis zu den riesigen Zeiträumen des Erdmittleralters 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 Kambriums²⁵. 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 CO₂-Gehalt fiel etwa um als 1000 ppm ab, während der O₂-Gehalt um mehr als 2000 ppm anstieg. Dies ist aus der CO₂/O₂-Kurve (Abb. 5.1) in etwa abgreifbar. Die meisten Trilobiten verschwanden also nach Existenzzeiten, in denen der CO₂-Gehalt der Luft um circa 400 ppm fiel und der O₂-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 CO₂ oder O₂ 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 anpassenden 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 Jahren²⁶ – *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 oder Viren, passen sich, wegen ihres raschen Generationswechsels (Größenordnung Stunden), schneller an die neue Situation an als große Lebewesen mit Generationswechselzeiten in der Größenordnung von Jahren.

• Hieraus entsteht ein Anpassungsvorteil für die Mikrolebewesen.



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 „Lebephase“, 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 CO₂-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 CO₂ zu O₂. Das chemische Potential aller mit CO₂ 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 CO₂-Gehaltes in Relation zum O₂-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 CO₂-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 erfolgen²⁷.

• Es muß mit direkten Folgen des CO₂-Anstiegs auf Pflanzen gerechnet werden. Solange Pflanzen photosynthetisch aktiv sind – also tagsüber – tritt CO₂ 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 CO₂-verbrauchenden Pflanzen führt übrigens ein CO₂-Anstieg in der Luft generell zu einem überproportionalen Anstieg der CO₂-Konzentration in der Zelle.

Erfahrungen in Treibhäusern zeigen darüber hinaus, daß eine Anhebung des Kohlendioxidgehaltes – verbunden mit dem Treibhauseffekt – zwar zu erhöhter Wachstumsgeschwindigkeit führt²⁸, jedoch gleichzeitig auch zu einer deutlich erhöhten Bedrohung durch Pilze und Schädlinge und einer verminderten Fruchtqualität.

Was bedenklich stimmen muß, ist nicht die erhöhte CO₂-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 CO₂, 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 CO₂, doch immerhin verdeutlicht das Penicillinbeispiel die mögliche Entwicklung.

Bedenklich bei der Beurteilung der CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Konsumenten betreffendes Schädigungspotential durch die direkte Einwirkung der Kohlendioxidänderung. Diesem Problem wird von wissenschaftlicher Seite bereits viel Aufmerksamkeit geschenkt²⁹. 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 Systemgleichgewichte³⁰.

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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Anstieg wird mit weiterer Beschleunigung fortschreiten.

Summary

A steady increase has occurred in the tropospheric CO₂ concentration. Whereas the danger of the greenhouse effect has frequently been discussed, the question remains open whether the CO₂-rise can have a direct detrimental effect on the biosphere.

Considering the carbon cycle and the changes of the CO₂/O₂ 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 Umweltchemie*. 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:

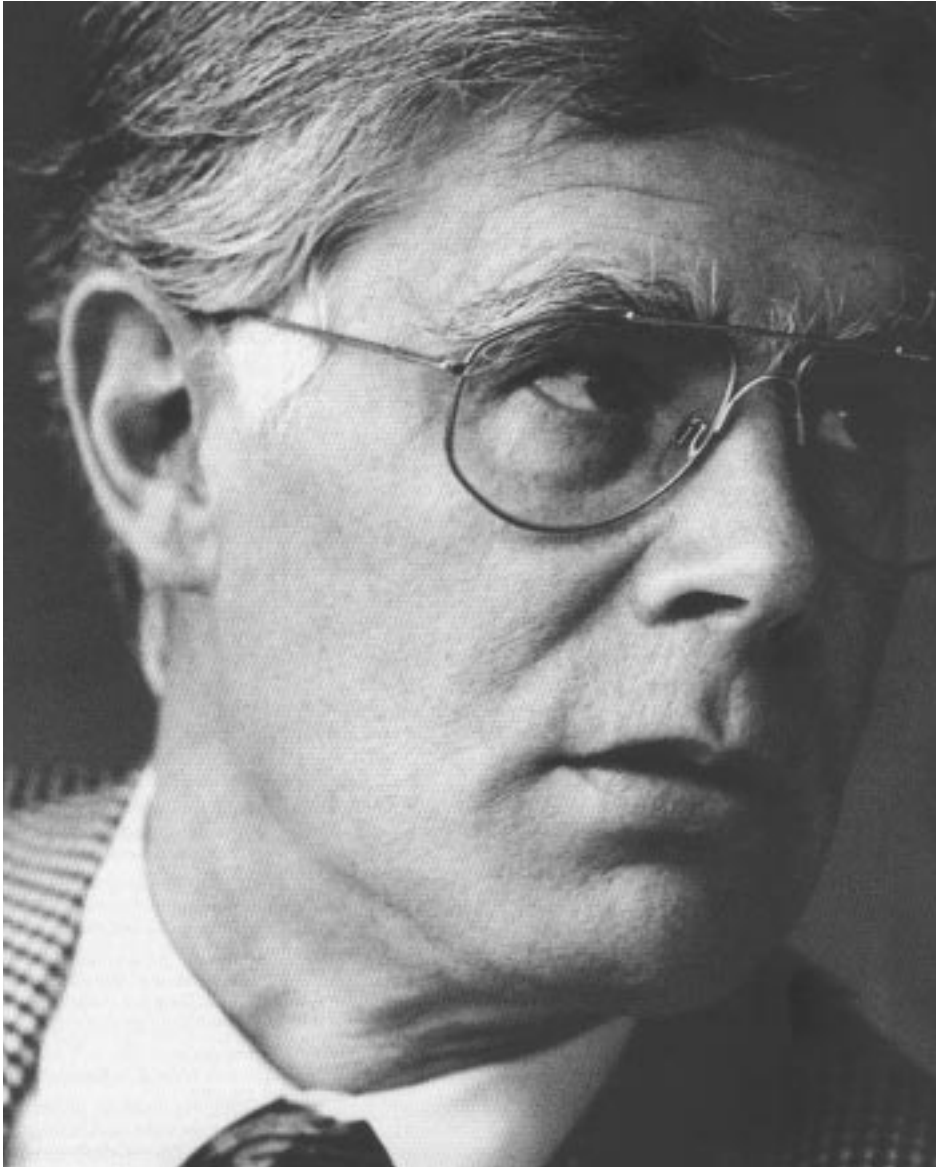
- 1) Vgl. [1,2,3].
- 2) Vgl. [4,5,6].
- 3) Vgl. [7].
- 4) Vgl. [8,9,10].
- 5) Vgl. [12].
- 6) Vgl. [11–12] und [17]. Andere Autoren haben ebenfalls Modelle hierzu vorgeschlagen, welche jedoch deutlich von unserem Bild abweichen. P. Cloud [13, S. 133] beispielsweise zeichnet ein Bild von der Sauerstoffanreicherung 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_S-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 Tracheatmer waren, angesichts eines noch niedrigen Sauerstoffgehaltes ihre Sauerstoffversorgung sicherstellen konnten, obwohl sie, im Vergleich zu heutigen Tracheatmern, riesige Dimensionen hatten. Dieses Problem wird ausführlicher diskutiert in: G. Beckmann, H. Hämmerle, O. Inacker, B. Klopries: Das Kardinalproblem. In: H. Neis (Hg): *Die CO₂-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, Arnolshain/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 CO₂-Anstiegs auf die Biosphäre*. *Energy-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-



Professor Dr. rer. pol. Dieter Schmitt, seit 1986 Inhaber des Lehrstuhls für Energiewirtschaft an der Universität GH Essen.

CO₂-Emissionen stellen kein lokales oder regionales, sondern ein globales Problem dar. Weder die Emissionen selbst noch die Auswirkungen von Maßnahmen zu ihrer Reduktion können lokal oder national begrenzt werden, betroffen ist stets die Atmosphäre schlechthin. Daher läßt sich der Nutzen nationaler Reduktionsmaßnahmen nicht auf den Kreis derer begrenzen, die mit ihrem Beitrag zur Lösung des Problems möglicherweise beträchtliche ökonomische Kosten und Zielverzichte in Kauf nehmen.

Ein energiewirtschaftliches Dilemma?

Ökonomische Dimensionen des CO₂-Problems
Von Dieter Schmitt

Jahrzehntlang beherrschte die Befürchtung um eine baldige Erschöpfung kostengünstig zu erschließender Energievorräte die energiepolitische Diskussion. Wegen des infrastrukturellen Charakters des Faktors Energie für Produktion und Konsum genoß die Zielsetzung einer stets sicheren und ausreichenden Energieversorgung höchste Priorität. Lange Jahre glaubte man sogar davon ausgehen zu müssen, daß zwischen Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch ein festes – ja sogar ein limitationales – Verhältnis existiere. Vor allem der immense Nachholbedarf der Entwicklungsländer (nur etwa 25 Prozent der Menschheit in der industrialisierten Welt verbrauchen rund 75 Prozent

aller Energie), das ungebrochene Bevölkerungswachstum und die auch für die Zukunft in den Ländern der dritten Welt für erforderlichlich angesehene wirtschaftliche Entwicklungsbedingung bedingten die Bereitstellung entsprechend steigender Energiemengen. Dabei basiert die Deckung des weltweit rasant steigenden Energiebedarfs – er hat sich seit dem zweiten Weltkrieg vervierfacht – zu über vier Fünfteln auf der Inanspruchnahme von endlich dimensionierten Lagerstätten fossiler Energieträger, die, in Jahrmillionen entstanden, nunmehr Gefahr liefen, innerhalb weniger Jahrzehnte aufgezehrt zu werden. Hieraus wurde zeitweise sogar auf eine von der Verfügbarkeit über Energie begrenzte weitere wirtschaftliche Entwicklung geschlossen. Vor diesem

Hintergrund ist nachvollziehbar, mit welcher großen Erwartungen die Möglichkeit zur friedlichen Nutzung der Kernenergie Ende der 50er Jahre begrüßt wurde. Hiermit schien sich schlagartig das insgesamt zur Verfügung stehende Energiepotential in seiner Größenordnung zu verdoppeln, vor allem aber versprach die Option des Brutreaktors die Erschließung einer quasi unerschöpflichen Energiequelle zu wettbewerbsfähigen Bedingungen.

Energieüberfluß statt Erschöpfung der Ressourcen?

Bislang haben sich die aus einer frühzeitigen Erschöpfung nicht regenerierbarer Energieträger abzuleitenden Probleme doch nicht als so gravierend erwiesen wie zunächst befürchtet, und dies obwohl die teilweise euphorischen Vorstellungen über die Geschwindigkeit und das Ausmaß, mit der die Kernenergie zu penetrieren vermag und erst recht über den Einsatz von Brutreaktoren alles andere als eingetreten sind. Auf der anderen Seite steigt jedoch der weltweite Energieverbrauch mit unvermindertem Tempo an, nicht zuletzt in den Ländern der dritten Welt – nach der jüngsten Prognose des Weltenergierats, der größten weltumfassenden Organisation von Energieanbietern und -nachfragern, in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten um weitere 50 Prozent. Gleichzeitig wird jedoch bezweifelt, ob es sich bei dieser prognostizierten Entwicklung um einen autonomen Trend handelt. Mit zunehmender wirtschaftlicher Entwicklung flacht aller Erfahrung nach das Bevölkerungswachstum schnell ab, die Länder der dritten Welt müssen nicht notwendigerweise den energieineffizienten Weg beschreiten, den die Industriestaaten durchgemacht haben, sondern können zumindest prinzipiell – insbesondere bei entsprechender Unterstützung durch die Industriestaaten – auf wesentlich effektivere Energietechnolo-

gien zurückgreifen, als sie früher zur Verfügung standen. Vor allem aber birgt das außerordentlich hohe Energieverbrauchsniveau der Industrieländer beträchtliche Potentiale zum rationelleren Umgang mit dem Faktor Energie, so daß hiermit auch ohne einen weiteren weltweiten Verbrauchsanstieg entsprechender Raum für die Befriedigung selbst wachsender Bedürfnisse der Entwicklungs- und Schwellenländer freigesetzt werden könnte. Gleichzeitig lagen die neu erschlossenen Energiereserven in den letzten Jahrzehnten zum Teil beträchtlich über dem jeweiligen Verbrauchsanstieg, so daß die sogenannte statische



Reichweite der Reserven – das Verhältnis Reserven zu laufender Förderung – sich noch erhöht hat. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Reserven lediglich die bereits bekannten, zu heutigen technischen und wirtschaftlichen Bedingungen als förderbar anzusehenden Vorkommen umfassen. Mit zunehmendem – kostensenkendem – technischen Fortschritt und bislang submarginale Vorkommen aufwerten die Energiepreiserhöhungen, vor allem aber mit entsprechenden Investitionserfolgen bei der Suche und ihrer technischen Weiterentwicklung erweisen sich die insgesamt vorhandenen Ressourcen als die ei-

gentlich relevante Kategorie. Diese jedoch übersteigen die Reserven um Größenordnungen und reichen selbst bei weiterem Verbrauchsanstieg für Jahrhunderte. Schließlich kann aus der bisherigen Erfahrung nicht abgeleitet werden, daß der autonome technische Fortschritt – erst recht wenn dieser durch entsprechende politische Maßnahmen flankiert wird – bereits abgeschlossen sei.

Wenn sich auch wegen der mit jeder Prognose verbundenen Ungewissheiten exakte Aussagen verbieten und jeder Versuch, angemessene Charakteristika von Zukunftsmärkten mit Hilfe der *Diskontierung* in heute anstehenden Verbrauchsentscheidungen zu *internalisieren*, schon im Hinblick auf eine geeignete *Diskontrate* von vorneherein erhebliche Zweifel aufwirft, bleibt dennoch die grundsätzliche Problematik jeder ausschließlich oder doch weitgehend auf endlichen Vorkommen basierten Energieversorgung bestehen: Selbst ein stagnierender, ja sogar ein – wenn nicht gerade auf Null – vermindertener Energieverbrauch kann lediglich über eine bestimmte, allenfalls unterschiedlich lange Zeit aus Beständen endlicher Lagerstätten gedeckt werden. Insofern können auch noch so ehrgeizige Energieeinsparstrategien die grundsätzliche Problematik einer bestandsbasierten Energieversorgung nicht lösen, sondern nur der schließliche Übergang auf regenerative, also sich ex definitione nicht erschöpfende Energiequellen. Hierfür erforderliche Technologien sind aber bereits heute vorhanden, zum Teil müssen sie jedoch noch im Markt eingeführt werden. Die Notwendigkeit, mittels entsprechender Strategien schon heute aus Gründen einer schon bald drohenden Erschöpfung der Lagerstätten fossiler Energieträger radikal einen weiteren Verbrauchsanstieg gegenzusteuern, wird jedenfalls aus heutiger Sicht überwiegend als nicht derart dringlich angesehen, daß hiermit verbundene Kostensteigerungen oder Zielverzicht auf weiteres ak-

zeptiert würden. Entscheidend ist jedoch die Tatsache, daß sich auf absehbare Zeit das Versorgungsproblem im wesentlichen als ökonomische Optimierungsaufgabe darstellt, nicht dagegen in dem Sinne, daß es bereits heute gilt, ohne jede Rücksicht auf hiermit gegebenenfalls verbundene Konsequenzen, den Energieverbrauch drastisch einzuschränken oder auch zu rationieren.

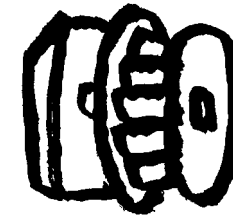
Engpaßfaktor Entsorgung

Die Sorgen über die Sicherung der Energieversorgung werden in den letzten Jahren jedoch zunehmend überlagert von den Problemen der Entsorgung; der Bewältigung der mit der Energiebereitstellung, der -umwandlung und auch dem -einsatz verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt, insbesondere der Emission von Schadstoffen und deren Eintrag in die Medien Luft, Wasser und Boden. Hierbei rücken in jüngerer Zeit immer stärker die mit jeder Verbrennung fossiler Energieträger zu verzeichnenden CO₂-Emissionen und die ihnen zugeschriebenen Klimawirkungen ins Blickfeld, auf die derzeit über vier Fünftel des Weltenergieverbrauchs entfallen. Eine ungebremste Fortsetzung der bisherigen Energieverbrauchsentwicklung und deren Deckung durch fossile Energieträger, so wird befürchtet, führt aufgrund der hiermit verknüpften anthropogenen CO₂-Emissionen schon in wenigen Jahrzehnten¹ zu einer derart gravierenden Verstärkung des Treibhauseffekts, also zu einem so starken generellen Anstieg der Temperatur in der Atmosphäre, daß lokale, regionale und selbst globale Änderungen des Klimas, der Klimazonen, der Häufigkeit von Klimaomnialien und auch der Niederschlagsverhältnisse zu erwarten wären. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf folgende Auswirkungen globaler Klimaveränderungen verwiesen:

- Klimabedingte Wetteränderungen mit einer Verstärkung der Gegen-

sätze zwischen humiden und ariden Gebieten sowie insbesondere in den Tropen und Subtropen einer Abfolge von Dürren und Starkniederschlägen;

- Meeresspiegelanstieg mit einer Häufung und Verstärkung von Flutkatastrophen sowie einer permanenten Überflutung niedrig gelegener Gebiete insbesondere an Flußmündungen und im pazifischen Raum;
- Gefahr des Zusammenbruchs ganzer Ökosysteme wegen deren begrenzter Anpassungsflexibilität;
- Versteppung, Versalzung und Erosion vor allem in semiariden Klimaten und hieraus abzuleitenden gravierenden Auswirkungen auf die Landwirtschaft und die Nahrungsmittelproduktion in diesen Gebie-



ten, möglicherweise sogar verstärkt durch die Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten und beschleunigten mikrobiellen Abbau organischer Substanzen.

Zwar wird inzwischen selbst bei Fortsetzung der derzeitigen Verbrauchstrends „nur“ noch mit einem Temperaturanstieg im globalen Durchschnitt von 1,5 – 4,5 °C in den nächsten 100 Jahren gerechnet, dennoch wird angesichts der oben skizzierten gravierenden Probleme ein radikales Umsteuern im Energiebereich mit dem Ziel einer baldigen Stabilisierung des CO₂-Ausstoßes und einer schon mittelfristig anzustrebenden absoluten Senkung der Emissionen bereits heute für unabdingbar erachtet. Dies gilt nicht zu-

letzt, weil die schlimmsten Auswirkungen möglicherweise erst zeitverzögert eintreten und auch eine plötzliche dramatische Beschleunigung der befürchteten Effekte nicht ausgeschlossen werden kann.

Komplexe Klimaproblematik

Eine genaue Analyse zeigt allerdings, daß sich die Verhältnisse noch weitaus komplexer darstellen als zunächst anzunehmen. Offenbar erweisen sich selbst leistungsfähigste Großrechner nicht in der Lage, das weltweite Klimageschehen eindeutig abzubilden. Hinzu kommt, daß bestimmte außerordentlich wichtige Elemente dieses komplexen Systems, so die CO₂-Absorptionsfähigkeit der Ozeane, die mit einem Anstieg der Temperatur einhergehende Erhöhung des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre und die verstärkte Wolkenbildung, die Auswirkungen des erhöhten Düngeeffekts auf das Pflanzenwachstum, die verstärkte Entgasung bisheriger Permafrostböden und anderes mehr überhaupt noch nicht hinreichend erfaßt oder prognostiziert werden können.

Daher sollte es auch nicht verwundern, wenn bislang eindeutige Aussagen bezüglich der von der Emission bestimmter klimarelevanter Spurengase ausgehenden Klimawirkungen immer noch nicht möglich sind. Dennoch ist sich der überwiegende Teil der Fachwelt inzwischen darin einig, daß den früher lediglich vermuteten Zusammenhängen eine hohe Wahrscheinlichkeit zukommt. Angesichts der gravierenden Größenordnung der von Klimaänderungen ausgehenden globalen Schäden besteht für den politischen Raum in einem immer kritischeren Umfeld trotz der verbleibenden Ungewissheiten überhaupt keine Möglichkeit mehr, sich der Konzipierung und Durchsetzung entsprechender Strategien zu widersetzen, auch wenn weder die Wahrscheinlichkeit noch der Zeitpunkt oder die Größenordnung des Eintretens der prognostizierten

Schäden hinreichend genau abgeschätzt werden können und hierfür teilweise wohl auch die traditionellerweise genutzten Bewertungskriterien versagen.

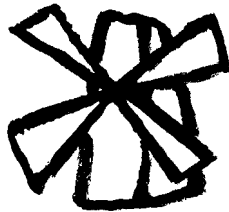
Dennoch sind vorab eine Reihe von Aspekten zu würdigen, die in die Entscheidung zugunsten einer nicht nur effektiven sondern auch effizienten Klimaschutzstrategie einfließen sollten.

Zunächst einmal gilt es zu konstatieren, daß CO₂-Emissionen zwar große Bedeutung für den Treibhauseffekt besitzen – unter allen sogenannten Treibhausgasen nehmen sie einen Anteil von rund 50 Prozent ein – dennoch darf nicht unberücksichtigt bleiben, daß immerhin die Hälfte auf andere Gase wie FCKW (17 Prozent), Methan (CH₄, 13 Prozent), Distickstoffoxid (N₂O, 5 Prozent), Ozon (O₃, 7 Prozent) und Vorläufersubstanzen wie die Stickstoffoxide (NO_x) und Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige organische Verbindungen entfällt. Auch ist zu berücksichtigen, daß die Emissionen klimarelevanter Gase zwar in hohem Maße, aber bei weitem nicht ausschließlich dem Energiesektor zuzuschreiben sind (insgesamt nur 50 Prozent; davon entfallen 40 Prozent auf das CO₂ sowie 10 Prozent auf CH₄ und O₃). Anderen Ursachen wie der Vernichtung der Tropenwälder durch Brandrodung einschließlich verstärkter Emissionen aus dem Boden (CO₂, N₂O, CH₄, CO, insgesamt 15 Prozent), dem Reisanbau und der Intensivtierhaltung, der Düngung, den Emissionen von Mülldeponien und von Zementwerken (CH₄, N₂O, CO₂, insgesamt 15 Prozent) und der Produktion sowie dem Einsatz chemischer Produkte (FCKW und Halone, insgesamt 20 Prozent) kommt hierbei ebenfalls erhebliche Bedeutung zu. Rationale Klimaschutzstrategien kommen daher nicht umhin, die Emissionen aller klimarelevanten Spurengase bei sämtlichen Emittenten in umfassender Überlegung einzubeziehen und geeignete Maßnahmen nach Maßga-

be ihrer Klimawirksamkeit insgesamt, wie der hiermit verknüpften Kosten-Nutzen-Relationen zu ergreifen.

Reduktion der CO₂-Emissionen

Dennoch bleibt die zentrale Bedeutung der Reduktion von CO₂-Emissionen, vor allem im Energiebereich, unbestritten. Dies gilt erst recht, wenn es gelingen sollte, schon bald weltweit einen Bann der die Ozonschicht zerstörenden FCKW-Emissionen durchzusetzen, die Überdüngung der Böden rückgängig zu machen oder die anthropogenen Methanemissionen durch entsprechende Auflagen (Reduzierung der Lecka-



gen im Transport- und Verteilungsnetz, Verzicht auf Abfackelung, Deponie- und Grubengasnutzung) entscheidend einzuschränken und damit schon rein statistisch die Rolle ungehindert weiter ansteigender CO₂-Emissionen für das zukünftige Klimageschehen weiter aufzuwerten. Ob die von einzelnen Wissenschaftlern vertretene Auffassung einer unabdingbaren Halbierung der CO₂-Emissionen schon bis Anfang des nächsten Jahrhunderts für erforderlich gehalten wird oder doch längere Anpassungszeiten für die Umstrukturierung des derzeitigen Weltenergieversorgungssystems als akzeptabel angesehen werden können, ist kaum abschließend und eindeutig zu beantworten. In der generellen Ziel-

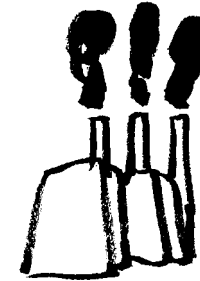
setzung einer notwendigen Unterbrechung des gerade in den letzten Jahrzehnten weltweit zu verzeichnenden und auch von jüngeren Prognosen des Weltenergieerates sowie der Internationalen Energieagentur für die Zukunft unterstellten Aufwärtstrends des Einsatzes fossiler Energieträger mit einem Zuwachs von 50 Prozent bis zum Jahre 2010 und den damit verknüpften CO₂-Emissionen, stimmt der bei weitem größte Teil der Experten jedenfalls überein. Immerhin hält die Staatengemeinschaft das CO₂-Problem für derart gravierend, daß auf der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen im Sommer 1992 in Rio de Janeiro 154 Staaten und die Europäische Gemeinschaft die sogenannte Klimarahmenkonvention unterzeichnet haben, mit der völkerrechtlich verbindliche Grundlagen für die internationale Zusammenarbeit zur Verhinderung gefährlicher Klimaänderungen und möglicher Auswirkungen geschaffen wurden. Sie beinhaltet unter anderem die Zielsetzung, die Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu stabilisieren, das eine gefährliche, vom Menschen verursachte Störung des Klimasystems verhindert. Unter den allen Staaten auferlegten Pflichten haben es die Industrieländer, auf die heute über 80 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen entfallen, akzeptiert, die Emissionen von CO₂ und anderen Treibhausgasen auf das Niveau von 1990 zurückzuführen. Entwicklungsländern hingegen werden realistischere als Basis für deren als unverzichtbar angesehene wirtschaftliche Entwicklung ein noch nennenswert steigender Energieverbrauch und, damit einhergehend, auch entsprechend steigende CO₂-Emissionen zugestanden werden müssen.

Nachdem inzwischen eine genügend große Zahl von Vertragsstaaten die Konvention ratifiziert haben, wird es Aufgabe der für 1995 nach Deutschland einberufenen ersten Folgekonferenz sein, vor allem mit

der Erarbeitung von Protokollen zur Begrenzung und Stabilisierung von CO₂-Emissionen innerhalb eines verbindlichen Zeitzeits voranzukommen. Dabei hat sich die Bundesrepublik Deutschland selbst per Kabinettschluß das international außerordentlich ehrgeizige Ziel gesetzt, die CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2005 um 25 Prozent gegenüber dem Niveau von 1987 zu senken.

Dieses Ziel wird von vielen Kritikern allerdings für nicht realisierbar erachtet. Die kritischen Einschätzungen basieren im wesentlichen auf der Erwartung, daß auch die Bundesregierung nicht willens sein wird, die für die Realisierung eines solchen Ziels erforderlichen einschneidenden Maßnahmen – notfalls im nationalen Alleingang – zu ergreifen und unter Inkaufnahme der hiermit verknüpften weitreichenden Implikationen auch umzusetzen. Hierbei wird nicht zuletzt darauf hingewiesen, daß die bisherigen CO₂-Reduktionserfolge (etwa 15 Prozent) im wesentlichen dem Einbruch der industriellen Produktion sowie der Ablösung der völlig veralteten Energieversorgungsstrukturen in den neuen Bundesländern zuzuschreiben seien, während die CO₂-Belastung in den alten Bundesländern noch angestiegen sei, so daß mit dem erwarteten wirtschaftlichen Aufschwung diese Minderungserfolge sogar wieder – zumindest teilweise – aufgezehrt werden könnten. Zwar wurde inzwischen eine Vielzahl – hier im einzelnen nicht darzulegen – Maßnahmen insbesondere zur Einsparung von Energie sowie zur Beschleunigung der Entwicklung und Markteinführung regenerierbarer Energieträger ergriffen, deren volle Wirkung sich möglicherweise erst im Laufe der Zeit entfalten wird; wirklich tragfähige CO₂-Minderungsstrategien wie etwa die Einführung einer CO₂- oder Energiesteuer mit entsprechender Lenkungswirkung, die ökologische Umgestaltung des Steuersystems oder auch das Setzen von CO₂-Min-

derungsstandards sind bislang unter Hinweis auf die hierfür als erforderlich angesehene Harmonisierung in der EG – besser: im Lager der Industrieländer – Ankündigung geblieben. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß auf die BRD insgesamt lediglich ein Anteil von etwa 4,5 Prozent an den weltweiten CO₂-Emissionen entfällt – was etwa einem Fünftel der CO₂-Emissionen der USA und lediglich einem Zehntel der der OECD-Staaten entspricht. Selbstnennenswerte Reduktionserfolge in unserem Lande vermögen daher nur einen mehr als begrenzten Beitrag zur Problemlösung zu erbringen. Gleichzeitig wäre ein solches Ziel le-



diglich mit einschneidenden Maßnahmen und erheblichen Kosten, Zielverzicht und unerwünschten Konsequenzen für sonstige wirtschafts- und gesellschaftspolitische Ziele zu realisieren, die derzeit kaum durchsetzbar erscheinen.

Reduktionsstrategien: Ansätze und Restriktionen

Überhaupt ist davon auszugehen, daß das vom Energiesektor verursachte CO₂-Problem sich durch eine Reihe von Merkmalen auszeichnet, die die Entwicklung geeigneter Reduktionsstrategien einerseits erschweren, andererseits jedoch zumindest im Prinzip – wie später

noch zu zeigen sein wird – auch die Lösung in den wirtschaftspolitisch relevanten nächsten zwei bis drei Jahrzehnten auch entscheidend erleichtern können.

Zunächst einmal gilt es zu konstatieren, daß für die Lösung des CO₂-Problems – im Gegensatz etwa zum SO₂ oder NO_x – keine sogenannten *end-of-pipe-Technologien* existieren, geeignete Rückhalte- oder Filtermethoden, die zur wirksamen Reduzierung der Emissionen eingesetzt werden könnten². Dasselbe gilt für geeignete Deponien, beispielsweise in der Tiefsee.

Eine Reduktion von energiebedingten CO₂-Emissionen ist bislang lediglich durch Erschließung folgender Alternativen denkbar: Substitution innerhalb des Energieträgermixes, rationellere Energienutzung sowie Verzicht auf Befriedigung von Energiedienstleistungen. Mögen die hiermit gebotenen Möglichkeiten zunächst vergleichsweise unbedeutend erscheinen, so zeigt eine nähere Analyse jedoch, daß sich hinter diesen Kategorien jeweils eine durchaus beachtliche Palette unterschiedlichster Alternativen verbirgt:

- Substitution CO₂-reicher durch CO₂-ärmere Energieträger (Kohle durch flüssige Kohlenwasserstoffe und Erdgas);
- Verstärkter Übergang auf CO₂-freie Energieträger (Kernenergie, Solarenergie, geothermische Energie) oder Energieträger ohne Nettobeitrag zu CO₂-Emissionen (Biomasse);
- Rationellere Energienutzung (durch Abbau von Energieverschwendung, Wirkungsgradsteigerungen mit verbesserter Wartung und Instandhaltung sowie vermehrtem Einsatz von Kapital und Information) sowie stoffliche wie energetische Recyclingwirtschaft (Kreislaufwirtschaft, wirtschaftliche Wärmerückgewinnung, Deponiegasnutzung, Müllverbrennung);
- Verzicht auf Befriedigung von Energiedienstleistungen (Reduzierung der Innentemperatur oder des Warmwasserverbrauchs, Geschwindig-

keitsbeschränkung, Begrenzung der Motorenleistung, Ersatz des Individualverkehrs durch öffentlichen Verkehr, des Straßen- durch Schienen- und Schiffstransport, Einschränkung des Verbrauchs energieintensiver Produkte und Verfahren, stoffliches und energetisches Recycling über die von der Wirtschaftlichkeit gezogenen Grenzen hinaus u. a. m.).

Daneben bieten sich noch Möglichkeiten der Kompensation energiebedingter CO₂-Emissionen durch Nutzung natürlicher CO₂-Senken (Wiederaufforstungsprogramme, Düngung der Ozeane?) sowie durch Verzicht auf Brandrodung.

Dennoch darf nicht verkannt werden, daß der Nutzung dieser vielfältigen Möglichkeiten in der Realität zum Teil erhebliche Restriktionen entgegenstehen:

- Die Ablösung kohlenstoffreicher Energieträger wie der Kohle, auf die heute weltweit etwa ein Drittel des gesamten Energieverbrauchs entfällt, durch weniger CO₂-emittierende Kohlenwasserstoffe würde bedeuten, auf den bei weitem größten Teil der Energiereserven (und voraussichtlich auch der Ressourcen) zu verzichten, was automatisch die Knappheitsverhältnisse entschieden zugunsten der Eigner von Kohlenwasserstoffreserven verschieben und, wenn nicht Kartellierungs-, so aber doch zumindest gravierende Preiserhöhungsspielräume eröffnen würde. Ob die Länder mit entsprechenden Kohlenreserven überhaupt bereit wären, ihre eigene Ausbeutepolitik zu ändern, ist fraglich.

- Die verstärkte Nutzung der Kernenergie, der, bei für außerordentlich niedrig gehaltenen Kosten, bis vor wenigen Jahren noch die Qualität einer *back stop technology* beigewiesen wurde – ein System also, das bei praktisch als konstant unterstellten Grenzkosten jeden Energiebedarf zu befriedigen und damit knappheitsbedingten Preissteigerungen auf dem Energiemarkt entschieden entgegenzuwirken vermag – scheidet derzeit

nicht nur in Deutschland an Akzeptanzproblemen. Die Internationale Atomenergieagentur in Wien hat soeben erst einen mehr als verhaltenen Ausblick auf die zukünftige weltweite Nutzung der Kernenergie veröffentlicht. Eine Stagnation der nuklearen Stromerzeugung wäre in vielen Ländern bereits als eher optimistische Variante anzusehen.

- Ein schnell wachsender Beitrag regenerativer Energieträger in den meisten Ländern der nördlichen Hemisphäre dürfte nicht zuletzt an den natürlichen Bedingungen scheitern, aber auch an den für die meisten Systeme auf absehbare Zeit zu unterstellenden Kosten und dem damit verbundenen Widerstand der an wirtschaftlicher Versorgung interessierten Verbraucher im konsumtiven wie produktiven Bereich.

- Eine rationellere Energienutzung vollzieht sich im wesentlichen über entsprechende Re- und Neuinvestitionen in Verbrauchsaggregate und Produktionsanlagen. Das hiermit gebotene Potential ist als bei weitem noch nicht als erschöpft anzusehen. Ein großer Teil des sich hierin manifestierenden energietechnischen Fortschritts ist sogar als autonom anzusehen und kann durch staatliche Maßnahmen kaum – es sei denn über entsprechende nur bis zu einem bestimmten Maße finanzierbare Investitionsanreize – beschleunigt werden. Dem alles andere als einfachen Abbau vielfältiger Hemmnisse und zum Teil gravierender Restriktionen kommt gleichwohl beträchtliche Bedeutung zu. Entscheidendes Kriteri-



um für die Nutzung der hiermit gebotenen Potentiale bleibt realistisch gesehen deren Wirtschaftlichkeit. Dasselbe gilt für die vielfältigen in zwischen diskutierten Ansätze eines stofflichen und energetischen Recyclings.

- Der Verzicht auf die Befriedigung von Energiedienstleistungen schließlich greift eradiet elementar in Verbrauchsgewohnheiten, Wertvorstellungen und Präferenzen, gegebene Strukturen und überkommene Verhaltensmuster ein, daß lediglich über eine längere Zeit nachhaltige Veränderungen erzielbar erscheinen.

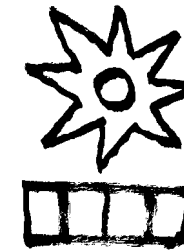
Hieraus ist als Fazit abzuleiten, daß abgesehen von eher als bescheiden anzusehenden quasi zum Nulltarif zu erschließenden CO₂-Minderungspotentialen nennenswerte Reduktionsstrategien mit voraussichtlich erheblichen Kosten und Zielverzicht verbunden sind. Durch eine *Internalisierung* der mit der Verbrennung fossiler Energieträger und der Nutzung der Kernenergie verbundenen, sich nicht in den derzeitigen Preisen niederschlagenden Kosten ließen sich die Bedingungen für regenerative Energieträger und auch für die rationellere Energieverwendung zweifellos erheblich verbessern. Abgesehen von den vielfältigen hiermit verknüpften offenen Fragen der Quantifizierung und vor allem der Bewertung kann jedoch kaum davon ausgegangen werden, daß hiermit *allein* anspruchsvolle CO₂-Minderungsziele realisiert werden. Erhebliche Zweifel scheinen vor allem angezeigt bei der Frage, ob die für eine Nutzung dieser Potentiale erforderlichen Strategien im politischen Raum angesichts der hiermit verknüpften Implikationen für den privaten wie den gewerblichen Bereich, und hierbei insbesondere wirtschaftspolitische Ziele wie Vollbeschäftigung und Wirtschaftswachstum, durchgesetzt werden könnten. Dies gilt vor allem, wenn nicht ein Mindestmaß an Abstimmung im Lager der Industrieländer erfolgt.

Der Kollektivgutcharakter des CO₂-Problems

Gerade im Kollektivgutcharakter dokumentiert sich das eigentliche Dilemma des CO₂-Problems. CO₂-Emissionen stellen kein lokales oder regionales, sondern ein globales Problem dar. Es können weder die Emissionen noch die Auswirkungen von Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen lokal oder national begrenzt werden, betroffen ist stets die Atmosphäre schlechthin. Daher läßt sich die Nutzenstiftung nationaler Maßnahmen nicht auf den Kreis derer begrenzen, die möglicherweise beträchtliche Kosten und/oder Zielverzicht in Kauf genommen haben. Damit wird jedoch der Ergreifung jedweder *free-rider-Position* Vor-schub geleistet, zumal keinerlei Sanktionsmöglichkeiten existieren, dies zu verhindern, und allenfalls freiwillige Lösungen vorstellbar wären. Gerade im internationalen Bereich scheinen derzeit jedoch die Aussichten für eine abgestimmte Vorgehensweise mehr als zweifelhaft. Haben schon bisher einzelne europäische Länder und auch Japan, ebenso wie viele Schwellenländer Südostasiens und Lateinamerikas, eine reservierte Einstellung zu gemeinsamen CO₂-Reduktionsmaßnahmen eingenommen, so gilt dies zweifellos in noch stärkerem Maße, nachdem sich nunmehr die amerikanische Administration für eine eher „weiche“ Vorgehensweise – mit freiwilligen Selbstverpflichtungen der Industrie – und damit zumindest vorläufigem Verzicht auf den Einsatz global wirkender Instrumente wie etwa einer CO₂-/Energiesteuer oder einer Lizenzlösung entschieden hat. Aber auch die am stärksten für eine Steuer eintretenden europäischen Länder haben dies stets unter dem Vorbehalt der Konditionalität gestellt, also an die Bindung an ein entsprechendes paralleles Vorgehen in Übersee.

Der Grund für das stark unterschiedliche Eintreten für internatio-

nal abgestimmte CO₂-Reduktionsstrategien darf jedoch nicht ausschließlich in einem Mangel an Umweltproblembewußtsein oder an mangelnder Verantwortung seitens der ein radikaleres Vorgehen ablehnenden Länder gesehen werden. Es gilt zumindest auch die völlig unterschiedlichen Ausgangs- und Interessenlagen zu berücksichtigen. Hinzu kommt, daß offenbar die Dringlichkeit einschneidender Maßnahmen zur CO₂-Reduktion in anderen Ländern weniger hoch veranschlagt wird. Hierin drückt sich möglicherweise nicht nur eine andere Einschätzung der vom weiteren Einsatz fossiler Energieträger ausgehenden



Klimagefahren aus, sondern eventuell auch eine unterschiedliche Beurteilung der zukünftigen Entwicklung des weltweiten Energieverbrauchs, der Substitutionsmöglichkeiten sowie des in Zukunft zu unterstellenden technischen Fortschritts – möglicherweise sogar im Hinblick auf die rechtzeitige Bereitstellung von CO₂-Rückhaltetechnologien oder auf die Erwartung effizienterer Klimaschutzbeiträge im Bereich sonstiger klimarelevanter Spurengase. Diese Haltung dokumentiert unter Umständen eine Einstellung, die von vielen Nichtökonomem in dieser Form nicht geteilt werden dürfte: Die Behandlung des CO₂-Problems unter rein ökonomischen Kriterien, wie sie angesichts des

Nichtvorliegens einer sogenannten *hot-spot-Problemik* angemessen wäre. Da beim CO₂-Problem nicht einer unmittelbar drohenden Gefahr zu begegnen ist, kommt lediglich das Vorsorgeprinzip zum Tragen. Hier-nach sind die mit CO₂-Minderungsstrategien zu erzielenden Erfolge gegen die Kosten abzuwägen, die die Konzeption und Umsetzung derartiger Strategien bedingen. Auch Kompensationszahlungen zur Befriedigung entsprechender Ansprüche sind denkbar. Werden jedoch die Kosten – vor allem vorschnell – ergriffener Maßnahmen nur hoch genug eingeschätzt und der Nutzen entsprechender Erfolge relativ niedrig, so resultiert hieraus eine negative Entscheidung für Konzipierung und Umsetzung entsprechend gewichtiger Maßnahmen heute. Es ist offenkundig, daß die hiermit aufgeworfenen Bewertungsprobleme lediglich im politischen Raum gelöst werden können.

Fazit

Als Ergebnis ist damit festzuhalten, daß die Behandlung des CO₂-Problems als eine eminent wichtige politische Aufgabe anzusehen ist. Es ist bereits heute abzusehen, daß die hiermit verbundenen Aspekte in der zukünftigen energiepolitischen Diskussion einen immer breiteren Raum einnehmen werden, aber gleichwohl immer im Kontext mit strategischen Optionen auch bei den sonstigen klimarelevanten Spurengasen, vor allem aber stets in größerem Zusammenhang mit anderen wirtschafts- und gesellschaftspolitischen Zielen angegangen werden sollten. Es spricht vieles dafür, daß es kurz- bis mittelfristig kaum zu einer ehrgeizigen international abgestimmten Vorgehensweise kommen wird, sondern eher bescheiden formulierte Ziele im nationalen Alleingang verfolgt werden. Hierbei werden sicherlich zu Recht zunächst *no-regret-* oder zumindest *minimal-regret-Strategien* gefordert. Hierunter

sind solche Programme zu verstehen, deren Berechtigung schon aus anderen Begründungen abgeleitet werden kann, wie etwa Strategien zur stärkeren *Penetration* umweltfreundlicher Energieträger, zur rationaleren Bereitstellung und Nutzung von Energie oder zur schrittweisen Umstrukturierung unseres Wirtschaftssystems im Hinblick auf eine stärkere Berücksichtigung ökologischer Aspekte. Eine nicht unbedeutende Bedeutung könnte jedoch mittelfristig auch der sogenannten Kompensationsstrategie (*joint implementation*) zukommen. Diese vermag als *add-on-Strategie* das gegebene wirtschaftspolitische Instrumentarium von Steuern, Abgaben oder ordnungsrechtlichen Vorgaben erheblich zu flexibilisieren, insofern als eine nationale Minderungsverpflichtung nicht mehr unbedingt an der einzelnen Anlage oder beim jeweiligen Emittenten zu erbringen ist, sondern durch den Nachweis entsprechender Minderungserfolge an anderer Stelle substituiert werden kann. Dies eröffnet breiten Spielraum für die Suche nach den jeweils kostengünstigsten Lösungen im nationalen wie im internationalen Kontext. Die Effektivität umweltpolitischer Strategien kann dadurch mit ökonomischer Effizienz verbunden werden. Gerade die Ausschöpfung der in erheblichem Maße in den Entwicklungsländern, aber auch in den sogenannten Transformationsstaaten des früheren Ostblocks vermuteten kostengünstigen CO₂-Reduktionspotentiale durch die Nachrüstung vorhandener Anlagen mit niedrigem Wirkungsgrad, die Unterstützung des Baus modernster Kraftwerke, die Nutzung regenerativer Energieträger, durch Wiederaufforstung sowie die Möglichkeit zur Reduzierung von Emissionen sonstiger klimarelevanter Spurengase – durch Abbau von Methanverlusten und Verzicht auf FCKW-Einsatz – verspricht hierbei, auch wenn nicht zu unterschätzende Detailfragen noch der Lösung bedürfen, eine geradezu

ideale Verknüpfung von entwicklungspolitischen und umweltpolitischen Zielsetzungen.

Hiermit könnte gleichzeitig während einer Übergangszeit zu insgesamt tragbaren und auch eher akzeptierten Bedingungen der notwendigen Umstrukturierungsprozeß in Energieerzeugung, -umwandlung und -verbrauch eingeleitet werden. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird sich das Klimaproblem in seiner ganzen Tragweite aber erst zu Beginn des nächsten Jahrhunderts stellen, wenn die kostengünstig zu erschließenden Einsparpotentiale genutzt, die Substitutionsmöglichkeiten ausgeschöpft und die Deckung des wachsenden Bedarfs der Entwicklungsländer immer intensiver eingefordert wird. Dies gilt vor allem, wenn es nicht gelingt, die einer breiten Nutzung regenerativer Energiequellen entgegenstehenden technischen, ökonomischen und institutionellen Restriktionen ebenso zu überwinden wie die Akzeptanzprobleme im Kernenergiebereich. Die dann unvermeidbar erscheinenden Verzichtsleistungen und die hieraus abzuleitenden Implikationen wären als das eigentliche CO₂-Dilemma anzusehen.

Summary

Irrespective of the fact that even today the last scientific evidence for the climate impact of increasing CO₂-emissions has not yet been found, CO₂ is regarded not as the only but as one of the most important green house gases. Methane, ozone, FCC's, etc. are responsible for another 50 %. In addition, energy processes as the basis of CO₂-emissions and their climatic impacts are supplemented by other sources like fertilizing, fire clearing and intensive stock breeding. Nevertheless, the politicians – at least in the FRG – have agreed on rather ambitious CO₂-reduction targets for the energy sector as a "no-regret"-approach.

With respect to the fact that efficient end-of-pipe-technologies are (still) not available, CO₂-reductions can basically only be achieved by:

- the substitution of "CO₂-rich" for "CO₂-poor" energy forms or processes (e.g. gas and oil for coal)
- the increased use of energy forms not emitting CO₂ (nuclear; renewables)
- the more rational use of energy
- the use of CO₂-sinks like reforestation
- the abandonment of energy services.

On the one hand, a broad variety of instruments like taxes, subsidies and standards are available to use these options. On the other hand, the dilemma for CO₂-related strategies emerges out of the global character of CO₂ as an important but not exclusive GHG and the lack of an international agreement on firm objectives and measures of a CO₂-reduction policy.

A rational strategy for climate protection in principle would have to take into account all GHG from all origins and all options. Under short term consideration a realistic strategy mix would consist of no-regret resp. minimal-regret-approaches combined with measures of joint implementation. In the long run the urgency of energy-related climate problems will probably even increase, last but not least because of the enforced energy use by the LDC's.

Should efforts to develop end-of-pipe-technologies and an economical use of renewables fail, only nuclear energy, actually so severely linked by problems of social acceptance, and/or the abandonment of energy use would be the remaining options.

Der Autor:

Dieter Schmitt studierte Wirtschaftswissenschaften und Energiewirtschaft an den Universitäten München und Köln und promovierte 1970 in Köln zum Dr. rer. pol. über die

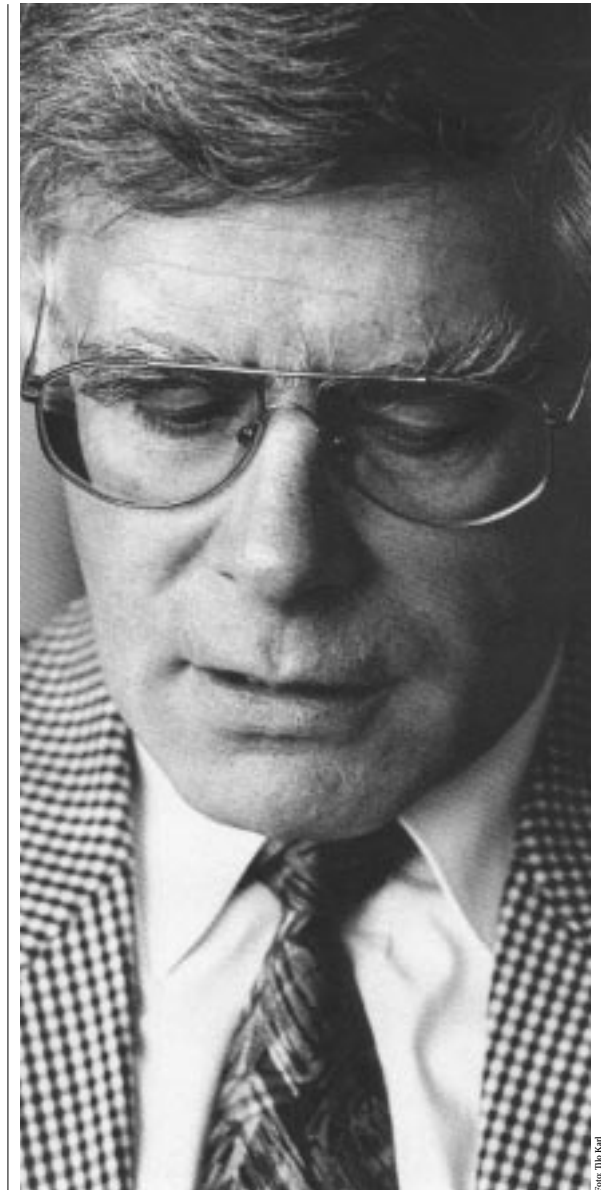
Probleme der wachsenden Importorientierung der deutschen Energiewirtschaft. Seit Frühjahr 1966 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Energiewirtschaftlichen Institut der Universität Köln, wurde er 1970 zum geschäftsführenden Direktor des Instituts und Dozent in Energiewirtschaft ernannt. 1986 erhielt er den Ruf an den Lehrstuhl für Energiewirtschaft an der Universität GH Essen (Stiftungsprofessur der Alfred-Krupp-von-Bohlen-und-Halbach-Stiftung). In den Jahren 1991 bis 1993 amtierte er hier als Dekan der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät. In seinen zahlreichen Veröffentlichungen beschäftigte sich Prof. Dr. Dieter Schmitt unter zahlreichen anderen mit folgenden Themenkomplexen: Ökonomische und ökologische Aspekte dezentraler Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen; Strategieüberlegungen zur Lösung des CO₂-Problems in der Energiewirtschaft; Kosten und Erlöse in der deutschen Mineralölwirtschaft; Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen direkter Endlagerung und Wiederaufbereitung; Internationaler Vergleich der Stromerzeugungskosten in Kohle- und Kernkraftwerken; Herausforderungen und Probleme der Binnenmarktharmonisierung im Energiebereich; Ökonomische Ansätze zur Lösung des Steinkohleproblems in der Bundesrepublik Deutschland; Möglichkeiten zur Intensivierung des Wettbewerbs im Bereich der leistungsbundenen Energiewirtschaft sowie mit vielen Einzelfragen aus dem Themenbereich *Energie und Umwelt*. Über seine im engeren Sinne wissenschaftliche Arbeit hinaus war er kontinuierlich als Berater für Bundes- und Länderministerien, die Europäische Gemeinschaft, die OECD/IEA sowie für verschiedene Verbände und Unternehmen tätig.

Anmerkungen:

- 1) Nach Schätzungen der Enquete-Kommission ist bei Fortsetzung des Verbrauchstrends mit einer Verdopplung der energiebedingten Emissionen bis zum Jahre 2050 zu rechnen.
- 2) Dies gilt zwar nicht im strengen Sinne, aber der Einsatz entsprechender grundsätzlich durchaus bekannter Technologien wäre – heute noch – mit derart hohen Kosten und Energieverlusten verbunden, daß diese aus heutiger Sicht realistischere als Alternative ausscheiden müssen.

Literatur:

- Deutscher Bundestag (Hrsg.): Dritter Bericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ zum Thema „Schutz der Erde“. Drucksache 11/8030 vom 24.5.1990.
- OECD (Hrsg.): The Economics of Climate Change – proceedings of an OECD/IEA Conference, Paris, 1994.
- OECD (Hrsg.): OECD Environmental Performance Review: Germany, Paris, 1993.
- Umweltbundesamt (Hrsg.): Jahresbericht 1993, Berlin, 1994.



Luftverunreinigungen – Stoffe, die die natürliche Zusammensetzung der Luft verändern und nachhaltige Wirkungen auf den Menschen und seine Umwelt haben können – waren bis zum Ende des vorigen Jahrhunderts im wesentlichen eine lokale Erscheinung. Inzwischen treten einzelne Komponenten zivilisationsbedingter Luftverunreinigungen in gefährdenden Konzentrationen sogar weltweit auf. In besonderem Maße sind die Pflanzen bedroht, die auf einzelne, weitverbreitete Komponenten empfindlicher reagieren als Mensch und Tier.

Von lokaler Belastung zum globalen Problem

Zur Erforschung von pflanzenschädlichen Luftverunreinigungen
Von Robert Guderian

Luftverschmutzungen waren bereits zu Beginn des 18. Jahrhunderts ein Problem – im Sinne des Nachbarschaftsrechts: „In vorigen Zeiten hat man so wohl in Königlich Böhmischen als auch in denen Meißnischen Erzt-Gebürgen von Rauch-Fängen nichts gewusst/ sondern es ist der wilde giftige Rauch von Brenn Oefen weg und in die freye Luft geflogen/dabey aber denen anliegenden Feldern und Viehe-Weiden merklicher Schaden geschehen...“

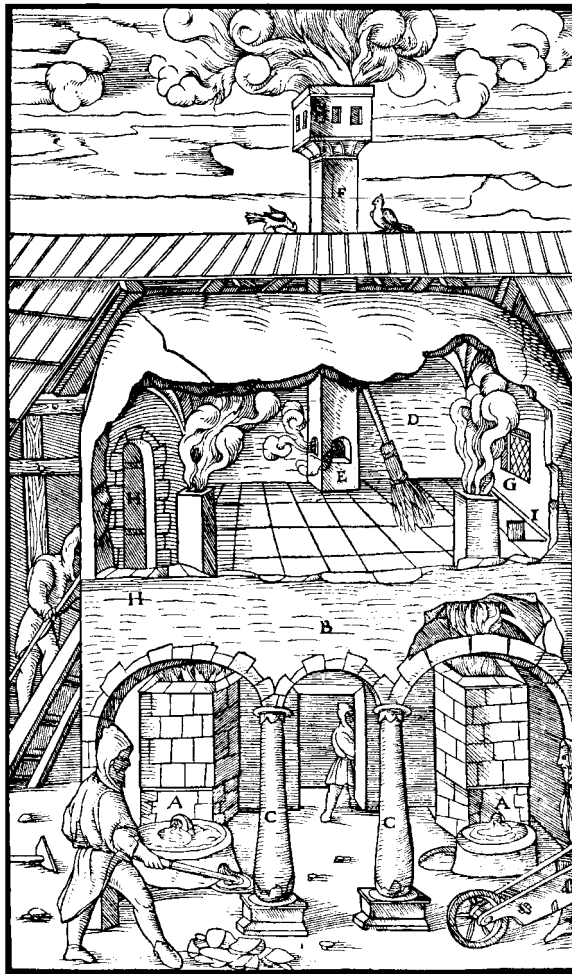
Diese Schäden in der Nähe von Röstöfen zur Arsenikgewinnung führten zu Beschwerden der betroffenen Bauern. Der kurfürstlich-sächsische Bergmeister Balthasar Rößler¹ empfahl daher die „Einrichtung“ der angesprochenen „Rauch-Fänge“, eine frühe Rückhaltetechnik, die bereits 1556 von Georg Agricola beschrieben worden war (Abb. 1).

Lokal begrenzte Belastungen der Luft markieren den Beginn einer

Entwicklung, die mit fortschreitender Industrialisierung zu einem grundlegenden Umweltproblem wurde. Sofern damals Produktionsprozesse Schäden vor allem in der Landwirtschaft nach sich zogen, führte dies häufig zu Konflikten – solange, wie die Agrarwirtschaft noch als der Stützfeiler der vorindustriellen Gesellschaft galt. Durch die Erfindung der Dampfmaschine, des mechanischen Webstuhls und der Spinnmaschine Mitte des 18.



Robert Guderian, seit 1978 ordentlicher Professor auf dem Lehrstuhl für Angewandte Botanik an der Universität GH Essen.



(1) Aus dem Jahr 1556 überlieferte Abbildung einer Flugstaubkammer im Erzgebirge. Diese Kammern dienten sowohl der Rückgewinnung von Metallstäuben als auch dem Schutz der umliegenden Felder und Weiden. Im Text der Überlieferung näher spezifiziert wurden: A - Die Öfen, B - Das Gewölbe, C - Die Pfeiler, D - Die Flugstaubkammer, E - Die Öffnung, F - Der Rauchfang, G - Das Fenster, H - Die Tür, I - Der Kanal.

Quelle: F. Spieglberg: Reinhaltung der Luft im Wandel der Zeit. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft. Düsseldorf 1984. Die Überlieferung geht auf Georg Agricola: De re metallica, 1556, zurück.

Jahrhunderts änderte sich das Bild. Das wirtschaftliche Geschehen wurde zunehmend von der Entwicklung der Industrie dominiert, „rauchende Schornsteine“ bedeuteten nun vor allem eines: die wirtschaftliche Stärke der sich konstituierenden Nationalstaaten sowie neue Arbeitsplätze und Einkommen für diejenigen, die von den Umwälzungen in der Produktionstechnik in eine ungewisse Zukunft entlassen worden waren². In dieser Zeit waren Industriebetriebe vor allem Keimzellen sich ankündigenden Wohlstands, die sich mit ihren hohen Kaminen nahezu malerisch in die Natur einzugliedern schienen.

Mit der Entwicklung von wirtschaftlichen Ballungsräumen – wie beispielsweise in den Revieren Oberschlesiens und an der Ruhr – dehnten sich die zunächst nur punktuell entstandene Belastungsgebiete im regionalen Maßstab aus. Nach dem Zweiten Weltkrieg schließlich erreichte die Entwicklung dann neuartige Dimensionen: Das überexponentielle Wachstum der Weltbevölkerung und der damit ansteigende Bedarf an Energie, Nahrungsmitteln und Industrieerzeugnissen ließ weltweit großräumige Gebiete mit hoher Dichte an stationären und – in Form des Kraft- und Luftverkehrs – beweglichen Luftverunreinigungsquellen entstehen. Regionale und überregionale Belastungen mit komplexen Verunreinigungstypen aus Gasen, Stäuben und Aerosolen charakterisieren die gegenwärtige Situation.

Naturgemäß haben sich mit der Änderung der Bedingungen, unter denen Schadstoffe abgegeben (*Emission*) und auf Organismen einwirken (*Immission*) auch die Wirkungen entschieden verändert – hinsichtlich ihrer Art, der räumlichen Verbreitung und ihrer Ursachen. Welche Folgerungen sich daraus für die Wirkungsforschung ergeben haben, kann am Beispiel der Immissionswirkungen auf Pflanzen gut skizziert werden: Da Art und Ausmaß

der Wirkungen vor allem durch die Zusammensetzung und Höhe der Belastung (*Immissionskonstellation*) bestimmt werden, sollen zunächst die gegenwärtig bei uns vorherrschenden Immissionsbedingungen in ihrer Bedeutung für terrestrische Ökosysteme knapp charakterisiert werden.

Langzeitbelastungen durch komplexe Verunreinigungen

Als Folge der zunehmenden Quellendichte und des steigenden Kraftverkehrs einerseits, aber auch aufgrund der inzwischen erfolgten Bemühungen um die Reinhaltung der Luft andererseits haben sich während der letzten Jahrzehnte in den industriell entwickelten Ländern die Emissions- und Immissionsbedingungen wesentlich verändert. Die für frühere Verhältnisse typischen lokalen Belastungen mit hohen, vornehmlich akut schädigenden Konzentrationen sind weitgehend verschwunden, und auch auf regionaler weiträumige Belastungen, die zu meist auf mehrere und entferntere Schadstoffquellen zurückgehen.

In diesem Zusammenhang ist besonders das Ozon als wichtigste sekundäre Luftverunreinigungs-komponente herauszustellen. Die gegenwärtige Immissions-situation in Mittel- und Westeuropa wird vor allem bestimmt durch

- komplexe Verunreinigungstypen, die durch das Auftreten von mehreren *trophisch*, ökologisch und *ökotoxikologisch* relevanten Stoffen gleichzeitig gekennzeichnet sind;
- langanhaltende oder dauernde Belastungen;
- relativ niedrige Schadstoffkonzentrationen bei steigender Belastung mit unter Lichteinwirkung entstandenen Verunreinigungen (*Photooxidantien*) und
- großräumige Belastungen.

Verursacht wird dieses Immissionsklima durch den Ausstoß großer

Mengen an sauerstoffhaltigen Schwefel- und Stickstoffverbindungen im industrialisierten Gürtel Europas, der sich von Südostengland über Nordostfrankreich, Belgien, die Niederlande und die westdeutschen Industrieregionen bis hin zu Südostdeutschland und die angrenzenden Gebiete der Tschechischen Republik und Polens erstreckt. Der Auswurf an Schwefeldioxid konnte in den letzten beiden Jahrzehnten in Westeuropa stark vermindert werden, in der alten Bundesrepublik auf ein Viertel der jährlichen Emission von 3,75 Millionen Tonnen zu Anfang der 70er Jahre. Auch in den neuen Bundesländern ist die Belastung mit Schwefeldioxid inzwischen stark rückläufig; schließlich sind auch in Polen und Tschechien Fortschritte zu verzeichnen.

Diesem starken Rückgang beim Schwefeldioxid stehen als Folge des weiter ansteigenden Kraftverkehrs unverändert hohe Emissionen an Stickstoffoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen (*Volatile Organic Compounds* = *VOC*) gegenüber. Sie belasten die Umwelt nicht nur als Primärkomponenten, vielmehr stellen sie zugleich die Vorläufersubstanzen dar, aus denen unter Sonnenlichteinwirkung in der Troposphäre sekundäre Luftverunreinigungen entstehen, eben die genannten *Photooxidantien* (Abb. 2). Deren Leitkomponente, das Ozon, tritt inzwischen weitverbreitet und weltweit in für Pflanzen giftigen (*phytotoxischen*) Konzentrationen auf. Auf der Nordhalbkugel hat sich der Troposphärengehalt an Ozon seit dem letzten Jahrhundert verdoppelt bis verdreifacht und steigt weiterhin an.

Damit werden die *Produzenten* – Pflanzen, die mit Hilfe des Chlorophylls unter Ausnutzung der Lichtenergie aus anorganischen Stoffen organische Substanzen zu bilden vermögen (*photoautotrophe* Pflanzen) – einem doppelten Streß ausgesetzt: direkt durch die Einwirkung der gasförmigen Komponenten

Schwefeldioxid (SO_2), der Stickstoffoxide (NO_x) und des Ozons (O_3) auf die oberirdischen Pflanzenorgane, indirekt durch abgelagerte Verunreinigungs-komponenten im Boden. Langanhaltende Einwirkungen säurehaltiger Luftverunreinigungen führen zur Herabsetzung des *pH-Wertes* und zur Freisetzung von *Al-Ionen* (Al^{3+} , AlOH^{2+}) aus Tonmineralen. Mögliche Folgen sind Wurzelschäden sowie Störungen im *Streuabbau* durch die Bodenlebewesen, die *Destruenten*. Mit fallendem *pH-Wert* steigt außerdem die Auswaschung, das *Leaching* von essentiellen Pflanzennährstoffen aus dem Boden an. Die erhöhte Auswaschung von bestimmten Nährstoffen einerseits und der hohe Stickstoffeintrag andererseits führen speziell auf mineralstoffarmen Standorten zu Disharmonien in der Nährstoffversorgung der Pflanzen.

Die *Konsumenten* pflanzlicher Nahrung werden dann vornehmlich über die Nahrungskette mittelbar geschädigt, hier wirken sich hauptsächlich Luftverunreinigungen mit akkumulierbaren Eigenschaften – wie beispielsweise Schwermetalle – aus.

Gefahren für das gesamte Ökosystem

Die langanhaltenden Belastungen mit komplexen Immissionstypen wirken sich auf alle Teile des Ökosystems aus, auf Boden und Klima, Produzenten, Konsumenten und Destruenten ebenso wie auf die biogeochemischen und atmosphärischen Stoffkreisläufe (vgl. Abb. 2) – mit der möglichen Folge, daß Struktur und Funktion des gesamten Systems einschließlich seiner Befähigung zur Selbstregulation betroffen sein können³. Charakteristisch für die derzeitige Wirkungssituation sind:

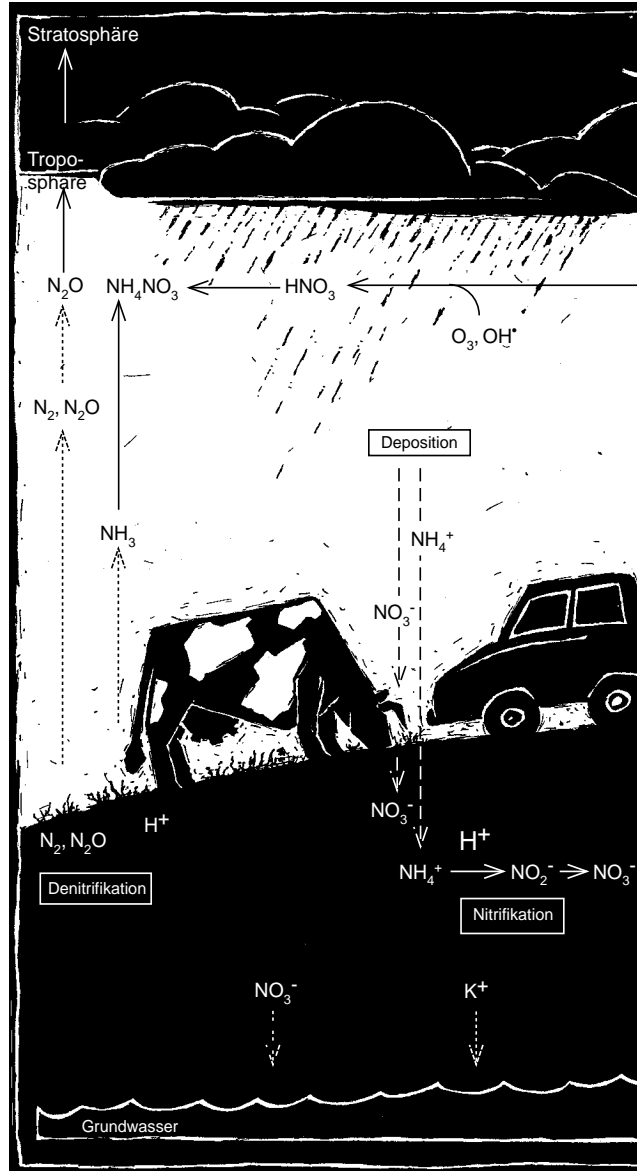
- Kombinationswirkungen zweier oder mehrerer Komponenten;
- direkte und indirekte Wirkungen auf den Organismenbestand;

- Akkumulation von Schadstoffen oder der Ernährung dienenden (*trophisch* wirkenden) Substanzen;
- latente Wirkungen, die sich im Lauf der Zeit addieren und zu starken Leistungs- und Funktionsminderungen führen können und
- Kombinationsstreß durch Luftverunreinigungen in Verbindung mit anderen ungünstigen Milieufaktoren, Krankheitsregern und tierischen Schädlingen.

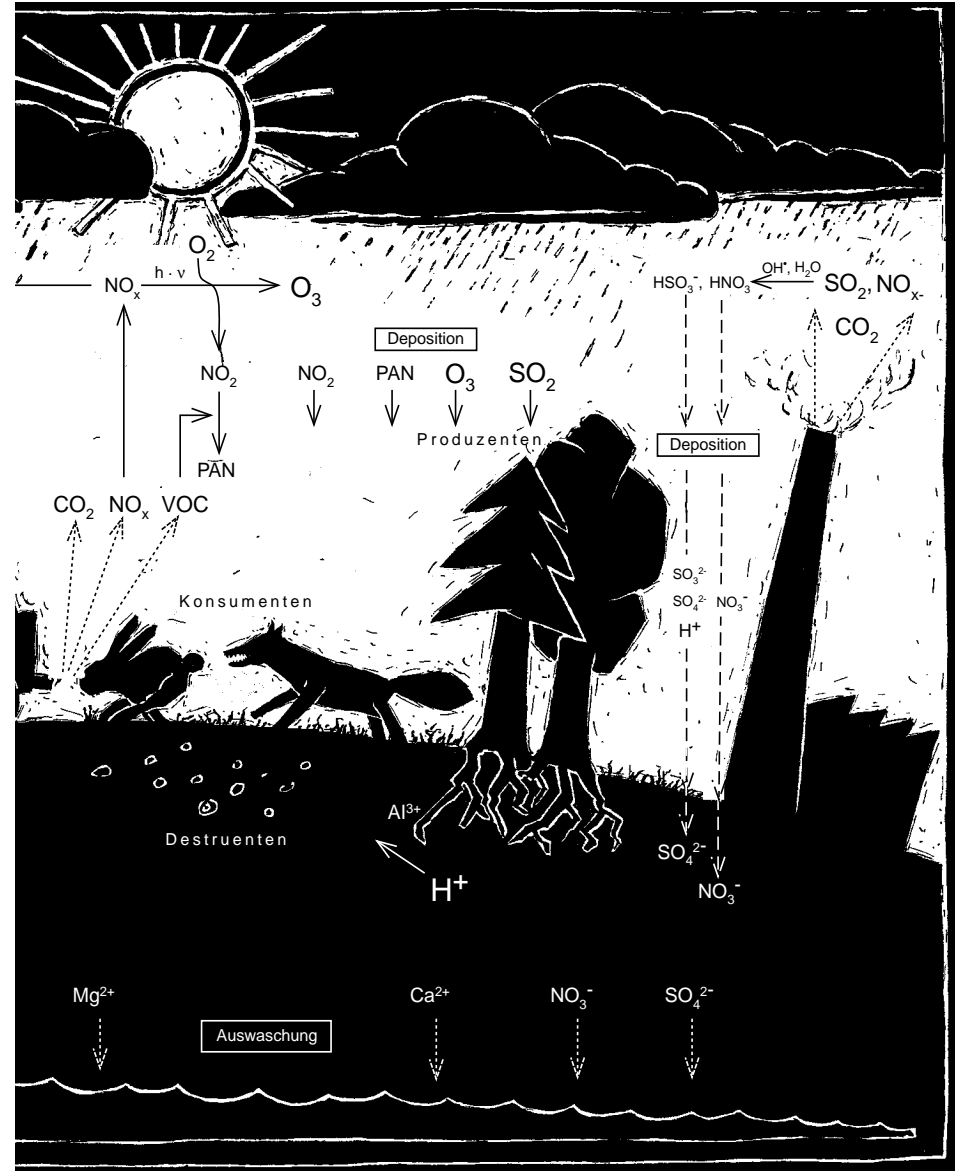
Diese Situation erfordert neue Forschungsansätze, da es angesichts dieser Befunde nicht genügt, die Auswirkungen einzelner Luftverunreinigungskomponenten jeweils *isoliert* zu untersuchen. Am Beispiel eigener experimenteller Untersuchungen über Wirkungen auf Pflanzen, die auf weitverbreitete Luftverunreinigungskombinationen besonders empfindlich reagieren, soll das erweiterte Aufgabengebiet der gegenwärtigen Immissionsforschung umrissen werden.

Folgen für die Wirkungsforschung

Aus der gegenwärtigen und künftig zu erwartenden Immissionssituation resultieren vielfältige neue Aufgaben für die Wirkungsforschung bei der Aufdeckung von Wirkungsabläufen auf den verschiedenen Organisationsstufen im Ökosystem, bei der Diagnose von Schadwirkungen und bei der Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen. Letzten Endes geht es darum, immissionsbedingte Abweichungen von der „Norm“, von der unbeeinflussten Kontrolle, zu ermitteln. Da aus der Sicht des praktischen Immissionsschutzes Untersuchungen über Immissionswirkungen Unterlagen für Abhilfemaßnahmen bieten sollen, kann als „Norm“ nur die Pflanze oder Pflanzengemeinschaft gelten, wie sie uns in den natürlichen und Produktionsökosystemen begegnet. Hiernach wären also vor allem epidemiologische, also biogeologische Untersuchungen vorzunehmen, da sich mit deren Hilfe Immissionswirkungen



Grafik: Rolf Schüngeler



(2) Einwirkungsorte von Luftverunreinigungen im terrestrischen Ökosystem.



(3) Open-Top-Anlage des Instituts für Angewandte Botanik. System zur Exposition von Pflanzen gegenüber Luftverunreinigungen unter naturnahen Bedingungen.

Foto: T. Kart

an Pflanzen in ihren jeweiligen Biotopten ermitteln lassen. Hier gewonnene Ergebnisse sind repräsentativ für praktische Verhältnisse. Allerdings läßt sich über Freilanduntersuchungen unter den derzeitigen vorherrschenden Immissionsbedingungen vielfach die Ursache für festgestellte Wirkungen nicht ermitteln, wie das Beispiel der neuartigen Waldschäden nachhaltig belegt. Im Hinblick auf die kausalanalytischen Anforderungen und auch zur Gewinnung von Zahlenwerten zwischen Immission und Wirkung sind zusätzlich zu den Untersuchungen in belasteten Gebieten Experimente unter mehr oder weniger kontrollierten Bedingungen notwendig. Klimakammern mit ihren streng reproduzierbaren Bedingungen einerseits sowie sogenannte Open-Top-Kammern (open top chambers = OTC) mit ihrem recht naturnahem Milieu andererseits haben daher in der Immissionsforschung eine besondere Bedeutung erlangt.

Open-Top-Kammern

Mit finanzieller Unterstützung durch das Umweltbundesamt und die Kommission der Europäischen Gemeinschaften konnte in Essen-Schuir eine Experimentalstation, bestehend aus 15 Open-Top-Kammern, aufgebaut werden (Abb. 3). Die Kammern bestehen aus einer zylindrischen Rahmenkonstruktion aus Aluminium-U-Profilen, die mit einer Polyäthylenfolie bespannt ist. Der Durchmesser der Kammer beträgt drei Meter, die Höhe dreieinhalb Meter. Gemeinsam ist diesen Kammern – auch denen mit einem Dach wie in unserem Falle – daß sie sich nach oben teilweise öffnen. Zwischen Zylinder und Dach ist ein offener Bereich, durch den die Luft austritt⁴. Der untere Kammerteil ist als Folienschlauch ausgebildet, der innen perforiert ist. Die über Spezialfilter gereinigte Außenluft – für die Kontrollgruppen – oder die verunreinigte Luft – für die Belastungs-

varianten – werden mit einem Gebläse in den Plastischlauch gedrückt, über dessen Perforationen sich die Luft gleichmäßig im Kammerinneren verteilt. Die unter dem Druck des Gebläses aufsteigende Luftsäule verhindert nicht nur weitgehend einen Fremdlufteneinfall vom oberen offenen Kammerende her, sondern führt auch die eingestrahle Wärme sehr gut ab. Folglich ist der Gewächshauseffekt in den OTC weit aus geringer als in geschlossenen Systemen.

Bei einem zweieinhalbfachen Luftwechsel pro Minute liegt je nach Jahreszeit die Temperatur in den Kammern nur 0,5 bis 2,0 °C über der der Außenluft (bei entsprechend verminderter Luftfeuchtigkeit). Im Hinblick auf die Schadstoffkontrolle weisen die OTC die Vorzüge einer geschlossenen Kammer auf, in bezug auf das Pflanzenwachstum annähernd die der freien Atmosphäre. Die OTC werden sowohl für Vergleichsuntersuchungen in gefilterter und ungefilterter Umgebungsluft als auch für Untersuchungen nach kontrollierter Zudosierung atmosphärischer Schadstoffgemische genutzt.

Eine Grundvoraussetzung zur Gewinnung von repräsentativen und praxisrelevanten Ergebnissen ist die Simulation, also die Herstellung möglichst „realistischer“ Immissionsbedingungen im Versuchssystem. Bisher konnten Begasungsversuche nur mit konstanter Konzentration während bestimmter Zeitspannen gefahren werden. Unter praktischen Verhältnissen unterliegen die Immissionskonzentrationen jedoch, abhängig von Emissionshöhe und den meteorologischen Parametern, starken tages- und auch jahreszeitlichen Schwankungen.

Angesichts dieser Forschungsdefizite hat Jan Boomers im Rahmen seiner Promotionsarbeit für unsere experimentelle Arbeit ein klimaabhängiges Begasungsprogramm⁵ zur Simulation realistischer Belastungsregime entwickelt (Abb. 4). Aus-

gangspunkt für die Simulation war ein Vergleich der Immissionsmeßdaten vergangener Jahre von den Stationen *Waldhof* in Langenbrügge (Lüneburger Heide) und in *Velmerstot* im *Eggegebirge* mit denen auf unserer Experimentalstation in Essen. Der Vergleich eines in den Open-Top-Kammern des Belastungstyps *Eggegebirge* nachgestellten O₃-Tagesganges mit der im *Eggegebirge* gemessenen O₃-Konzentration zeigt deutlich, daß die simulierte Tagesdynamik der O₃-Belastung weitgehend synchron mit dem tatsächlich im *Eggegebirge* gemessenen O₃-Tagesgang verläuft (Abb. 5). Pflanzen sind nur dann erhöhter Ozonbelastung ausgesetzt, wenn klimatische Bedingungen herrschen, die zu hoher Ozonproduktion führen.

Die Open-Top-Station ist ebenso wie unsere Klimakammeranlage mit computergesteuerten Einrichtungen zur Dosierung und Messung von Luftverunreinigungen ausgestattet. So können die Pflanzen nicht nur gegenüber Einzelkomponenten, sondern auch zur Ermittlung von Kombinationswirkungen gegenüber definierten Mischimmissionen ausgesetzt werden. Entsprechend den gegebenen Immissionsbedingungen finden gegenwärtig bei uns zwei Immissionstypen besondere Beachtung: die „klassische“ Belastung mit wirkungsbestimmendem Schwefeldioxidanteil und durch Ozon dominierte Mischimmissionen.

Schädigungen durch Mischimmissionen

Unsere hauptsächlich im Rahmen von Drittmittelprojekten durchgeführten Untersuchungen befassen sich mit der Wirkungsweise von Einzelkomponenten und Immissionsgemischen, quantitativen Zusammenhängen zwischen Immission und Wirkung sowie mit diagnostischen Fragen. Je nach Fragestellung werden dazu verschiedene Pflanzenarten als Versuchsobjekte ausgewählt

und die Wirkungen mit Methoden aus der Produktionsbiologie, der Physiologie und Biochemie sowie der Mikroskopie und Elektronenoptik erfaßt und bewertet.

Ein großer Teil unserer experimentellen Arbeit stand und steht im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden. Deren überregionale Verbreitung trotz unterschiedlicher Voraussetzungen wie Boden, Klima und der Bewirtschaftungsweise, die lange Schadensdauer und die starke Schädigung sowohl von Nadel- als auch von Laubbäumen haben multifaktorielle Ursachen. Luftverunreinigungen spielen dabei nach heute weitgehend allgemein geteiltem Urteil eine Schlüsselrolle als prädisponierende und auslösende Faktoren.

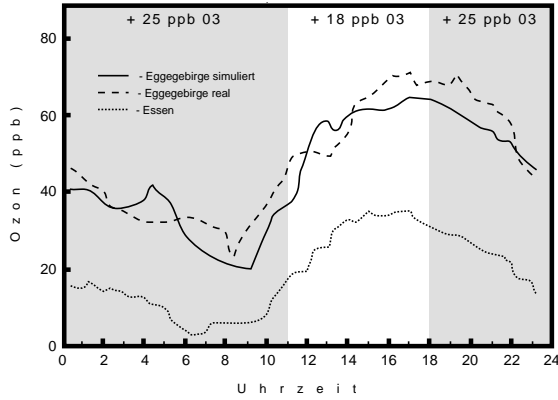
Innerhalb eines anteilig vom Umweltbundesamt und der Kommission der Europäischen Gemeinschaften geförderten Drittmittelprojektes wurden mehrere Experimente mit Mischimmissionen aus Ozon, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid durchgeführt, um zu prüfen, wie sich diese länger anhaltenden, realitätsnahen Belastungen auf unsere wichtigsten Laub- und Nadelholzarten auswirken⁶. Neben der Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen als Unterlage für die Abschätzung des Gefährdungspotentials vorliegender Immissionsbelastungen und des Resistenzverhaltens ausgewählter Baumarten haben wir untersucht, inwieweit die Syndrome von Bäumen aus geschädigten Beständen mit denen der Versuchspflanzen aus den Begasungsexperimenten übereinstimmen.

Am Beispiel eines Versuchs in der Open-Top-Anlage mit Sämlingen von Fichte (*Picea abies* Karst. L.), Weißtanne (*Abies alba* Mill. L.), Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.), Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) sowie Stilleiche (*Quercus robur* L.) sollen die Wirkungen niedriger Belastungen mit Mischimmissionen (Abb. 5) skizziert werden. Bereits nach einer Belastungsdauer von nur zwei Vegetationsperioden mit Verunreinigungs-

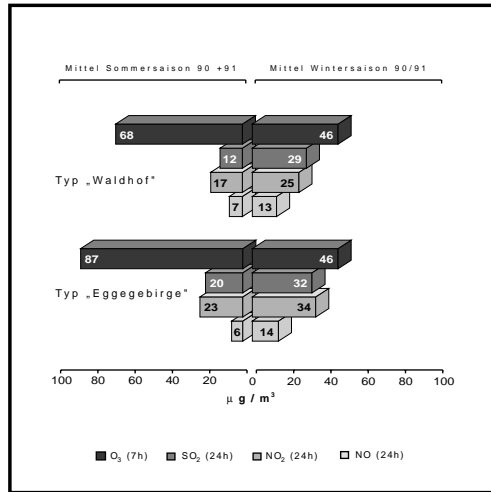
gemischen vom Typ *Eggegebirge* und *Waldhof* (Lüneburger Heide) waren Nadel-, Sproß- und Wurzelwachstum deutlich vermindert - besonders unter der relativ höheren Belastung (Abb. 6). Im zweiten Expositionsjahr wurde am Sproßwachstum die Intensität der Schädigung auch in der niedrigeren Belastungsstufe deutlich. Die für dieses Experiment gewählten Konzentrationen sind so niedrig, daß sie in Deutschland weitverbreitet überschritten werden. Dies gilt für Ozon vor allem in den alten, für Schwefeldioxid in den neuen Bundesländern.

Ohne daß äußere Schädigungsmerkmale an Blättern vorlagen, führte die Belastung mit dem Typ *Eggegebirge* bei den Pflanzen zunächst zu einem Anstieg der Atmungsintensität um etwa 25 Prozent gegenüber der Kontrollgruppe⁷. Zur gleichen Zeit waren Blattstärkegehalt und später auch der Stärkegehalt in Sproß und Wurzeln verringert. Ab Juli der zweiten Vegetationsperiode war auch eine Verringerung der Photosyntheseaktivität unter Einfluß des Schadstoffgemischs zu verzeichnen, die sich im August und September noch deutlicher ausprägte (Abb. 7). Insbesondere in den Mittags- und frühen Nachmittagsstunden mit hoher Strahlungsintensität war die Photosyntheseleistung signifikant reduziert. Parallel dazu war die Verdunstung abgesenkt.

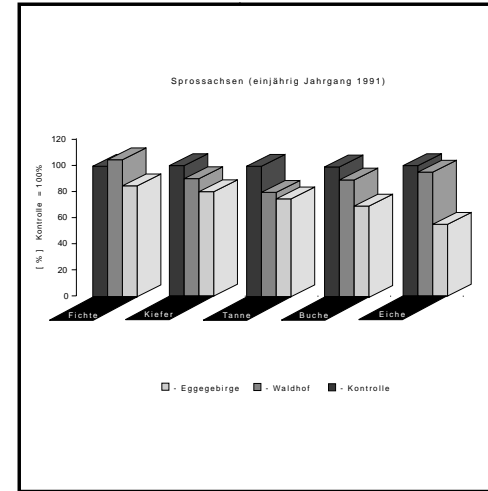
Frühere Experimente mit der Rotbuche und der Pappel haben gezeigt, daß unter einer Kombinationsbelastung gleicher Zusammensetzung frühzeitig eine Stimulation der photosynthetischen Lichtreaktion und damit eine erhöhte O₂-Produktion einsetzt. Zugleich nehmen abbaubauende Prozesse im Energiestoffwechsel zu⁸. Dieses unter Immissionsstreß eintretende Umschalten des Energiestoffwechsels von aufbauenden (*anabolischen*) hin zu abbauenden (*katabolischen*) Prozessen wird mit dem erhöhten Energiebedarf für Reparaturen immissionsbedingter Schäden auf der zellulären Ebene er-



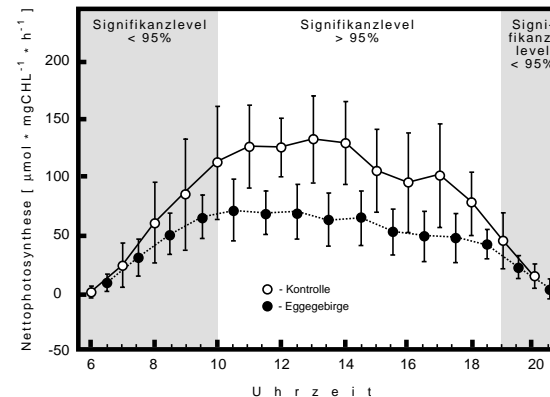
(4) Ozon-Tagesgangsimulation *Eggegebirge* vom 4. Juli 1991 im Vergleich zu den gemessenen O₃-Konzentrationen an den Versuchsstandorten Essen-Schuir und Velmertot, *Eggegebirge*.



(5) Typische Mischimmissionen aus den Gebieten der Meßstationen *Waldhof* und *Eggegebirge*. Hier dargestellt sind die O₃-, SO₂- und NO₂-Konzentrationen, wie sie im Open-Top-Kammerexperiment simuliert wurden.



(6) Einfluß der Immissionsbelastungen Typ *Waldhof* und Typ *Eggegebirge* auf die Biomasse (TS) der diesjährigen Sproßachsenabschnitte. Angaben in Prozent der Kontrolle.



(7) Nettophotosyntheserate an belasteten und unbelasteten Buchenblättern im Tagesverlauf (Mittel von 7 Versuchstagen).

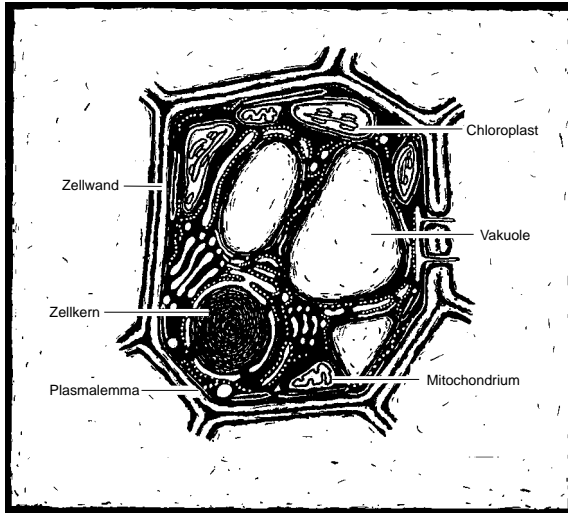
Grafiken (4): Rolf Schüngler

klärt. Letztlich führen die Einbußen bei der Primärproduktion zu beschleunigter Alterung, vorzeitigem Blattfall, verminderter Resistenz gegenüber biotischem und abiotischem Streß sowie zu reduzierter Biomasseproduktion.

Angriffsort Zelle

Unter den neuartigen Waldschäden ist die „montane Nadelvergilbung der Fichte“ ein speziell auf den basenarmen, stark sauren Böden der zentral-europäischen Mittelgebirge weitverbreiteter Schädigungstyp. Die auffälligen Verfärbungen der älteren Nadeljahrgänge und ihr vorzeitiges Absterben werden von nachhaltigen Störungen in der Nährstoffversorgung der Forstgehölze begleitet⁹. Als Ursache für die Mangelversorgung speziell mit Magnesium und Kalzium diskutiert man neben dem unzureichenden Angebot vom Boden her und den Störungen in Nährstoffaufnahme sowie Nährstofftransport die erhöhte Auswaschung von Ionen und organischen Verbindungen aus den belasteten Blättern. Luftverunreinigungen können die von Natur aus gegebene, selektive Durchlässigkeit von Biomembranen erhöhen mit der Folge, daß pflanzliche Inhaltsstoffe verstärkt aus dem Zellinneren in die Zellwand, den sogenannten freien Raum, austreten. Dort können sie durch Regen, Nebel oder Tau ausgewaschen werden, besonders stark unter der Einwirkung saurer Niederschläge.

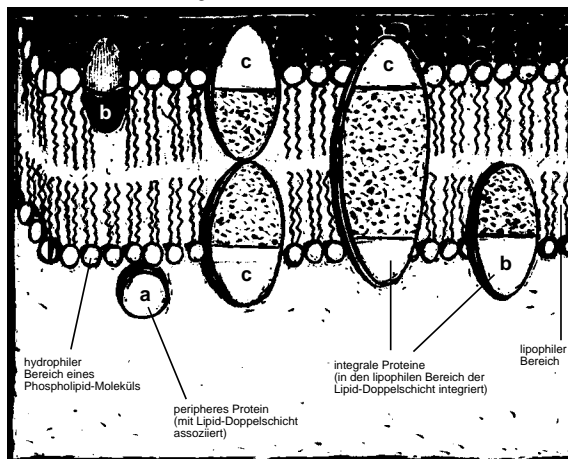
Die erhöhte Auswaschung sowohl von organischen Verbindungen als auch von Mineralstoffen ist vielfach belegt¹⁰. Auch über strukturelle und feinstrukturelle Veränderungen an Zellen und Zellorganellen unter Immissionseinfluß liegen inzwischen zahlreiche Ergebnisse vor. Weitgehend ungeklärt ist jedoch die molekulare und feinstrukturelle Basis dieser schädigenden Mechanismen. Für die Einsicht in diese, sich der Forschung stellenden Probleme



(8) Grundtyp einer Pflanzenzelle. Der von einer Biomembran, dem Plasmalemma, umgebene Zelleib (Protoplast) wird nach außen durch die Zellwand abgeschlossen. Gleichfalls von Biomembranen abgegrenzt sind Zellorganellen wie Zellkern, Chloroplasten oder Mitochondrien.

Grafiken (3): Rolf Schüngel

(9) Biomembranmodell nach Singer und Nicolson.



ist allerdings ein grundlegendes Verständnis des Aufbaus der pflanzlichen Zelle und der in ihr ablaufenden Vorgänge nötig.

Biomembranen und Reaktionsräume der Pflanzenzelle

Die pflanzliche Zelle stellt kein homogenes System dar; sie ist vielmehr durch Biomembranen in zahlreiche Reaktionsräume, sogenannte *Kompartimente* unterteilt (Abb. 8). Die nur 4 bis 10 Nanometer dicken, zähflüssigen Elementarmembranen umschließen einerseits den gesamten Inhalt einer Zelle, andererseits innerhalb des Zelleibs (Protoplasten) verschiedene in ihm liegende Organellen wie den Zellkern, die Plastiden – insbesondere die farbstofftragenden (Chromoplasten) – und die Mitochondrien, die für die Photosynthese, Atmung und andere Stoffwechselfvorgänge verantwortlichen Organe der Zelle.

Die Biomembranen stellen dabei Barrieren dar, die die einzelnen Reaktionsräume jedoch nicht hermetisch abschließen, sondern sich vielmehr durch eine jeweils spezifische, selektive Durchlässigkeit auszeichnen. Diese Struktur schafft die Voraussetzung für die vielfältigen Vorgänge des Grundstoffwechsels, der Energieverarbeitung sowie der Stoff- und Informationsübertragung in der Zelle.

Die spezifische Eigenschaft der Biomembranen erklärt sich aus ihrem Aufbau. Nach dem heute weitgehend akzeptierten Modell von Singer und Nicolson sind Biomembranen flächig ausgebreitete, dreidimensionale Strukturen aus fettartigen Substanzen, den Lipiden und Proteinen (Abb. 9). Tauchen die Proteine in die Membran ein, werden sie als integrale Proteine bezeichnet, als periphere, wenn sie auf der Lipiddoppelschicht aufliegen.

Zur Wirkungsweise von Ozon und Schwefeldioxid

In der Atmosphäre werden gasförmige organische Verbindungen (RH) tagsüber vor allem durch das OH-Radikal und Ozon abgebaut (Abb. 10). Hierbei entstehen neben Peroxiden (H_2O_2 und $ROOH$) vor allem Aldehyde¹¹. Der Abbau organischer Verbindungen wird maßgeblich durch radikale Kettenreaktionen unter Beteiligung von Stickstoffmonoxid (NO) bestimmt. Es wird vermutet, daß ähnliche radikalische Kettenreaktionen unter Ozonbelastung im pflanzlichen Gewebe ablaufen, besonders an den Biomembranen der Zelle.

Analog zur Oxidation von Kohlenwasserstoffen in der Gasphase können radikalische Kettenreaktionen durch Peroxidation die Struktur und damit die Funktionen von Biomembranen verändern. Neben diesem direkten Angriff von Immissionen auf Membranbestandteile lassen sich auch indirekte Wirkungen als Folge immissionsbedingter Veränderungen feststellen. Abhängig von Art und Höhe der Immissionsbelastung werden zur Zeit folgende Angriffspunkte von radikalischen Verbindungen diskutiert:

- Oxidation der Doppelbindungen in ungesättigten Fettsäuren;
- Oxidation der SH-Gruppen membranintegraler Proteine;
- Oxidation der Esterbindung von hydrophilen Kopfgruppen in Phospho- und Glucolipiden.

Als primärer Angriffsort von Luftverunreinigungen auf Biomembranen kommen, wie bereits erwähnt, die Lipiddoppelschicht bzw. die darin verankerten Proteine in Betracht. Um mögliche Auswirkungen auf die Proteinbestandteile zu erfassen, haben wir im Klimakammerexperiment Spinat und Fichte in realistischen Konzentrationen mit Schwefeldioxid, Ozon und Stickstoffdioxid als Einzelbelastung ausgesetzt¹². Das Probegut aus diesen Experimenten sowie Fichtennadeln

aus dem Belastungsgebiet *Enggebirge* wurden mit Hilfe bildgebender, biochemischer und immunologischer Methoden untersucht. Als Untersuchungsobjekt dienten die Membranen der Chloroplasten-Organellen, die besonders empfindlich auf Immissionsstreß reagieren.

Unter Einwirkung von SO_2 und O_3 traten – sowohl an Biomembranen, die die Chloroplasten als ganzes umschließen, als auch an den im Inneren befindlichen Stapeln – unterschiedliche Auswirkungen auf die membrangebundenen Proteine auf (Abb. 11). Elektronenmikroskopische Untersuchungen, bei denen neben immunhistochemischen Verfahren auch die Gefrierbruchtechnik eingesetzt wurde, zeigten, daß der Gehalt eines am Lamellensystem im Chloroplasteninneren angesiedelten Proteins mit steigender SO_2 -Konzentration abfiel – bis hin zu seinem völligen Verlust. Ozonabhängige Proteine traten nicht im Inneren der Chloroplasten auf, sondern in ihrer Hüllmembran. Während die Konzentration des einen Proteins mit zunehmender Ozonbelastung abfiel, wurde ein weiteres de novo erzeugt.

Die im Begasungsexperiment gewonnenen spezifischen Reaktionsmuster wurden anschließend an immissionsbelasteten Fichten aus dem Freiland mit gleicher Methodik untersucht. Die unter Immissionseinfluß veränderten Proteine ließen sich hier ebenso nachweisen, wobei deren charakteristisches Verhalten mit dem Schädigungsgrad der Fichten korrelierte. Die unter Immissionseinfluß ermittelten Reaktionen an den Chloroplastenhüllmembranen sowie an anderen Zellbestandteilen traten bereits auf, als die Pflanzen noch frei von visuell erkennbaren Schädigungen waren. Aus der Reaktionsart spezieller membranintegrolierter Proteine ist nicht nur auf Störungen in der Photosyntheseleistung zu schließen, sondern auch auf Veränderungen in der Durchlässigkeit der Biomembranen.

Ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit ist die Frage, welche chemischen Reaktionen auf zellulärer Ebene die Ozonschädigungen verursachen. Nach Eintritt von Ozon in das Pflanzeninnere kommt es zu einer erhöhten Biosynthese des auch in unbelasteten Pflanzen in geringen Mengen gebildeten Pflanzenhormons Ethylen. Durch die Reaktion von Ozon mit Ethylen kann es nach einer von Elstner et al. 1985 aufgestellten Hypothese zur erhöhten Bildung freier Radikaler kommen. Derartige chemische Spezies, die wegen ihrer ungepaarten Elektronen extrem reaktiv sind, werden als Ursache der Ozontoxizität angesehen. Mehlhorn konnte im Rahmen seiner Promotionsarbeit im Institute of Environmental and Biological Sciences der Universität Lancaster experimentell den Nachweis führen, daß die Streßethylenbildung den Grad der Ozontoxizität bestimmt¹³. Nur jene Ozonexpositionen erwiesen sich als stark phytotoxisch, die zu erhöhter Ethylenbildung im Blattgewebe geführt hatten. Wird die Ethylenbiosynthese in der Pflanze durch Einsatz der Chemikalie Aminoethoxyvinylglycin (AVG) gehemmt, vermindert sich der Phytotoxizitätsgrad des Ozons. In Abbildung (12) ist die Bildung von Radikalen unter Beteiligung von Ethylen sowie deren mögliche Angriffsorte in den Zellen schematisch dargestellt.

Diese hier nur grob skizzierten Erkenntnisse zum Wirkungsmechanismus von Ozon waren für die Kommission der Europäischen Gemeinschaften der Grund, ein Drittmittelprojekt zu dieser Thematik zu fördern. Unter der Koordination der Universität Essen versuchen Arbeitsgruppen aus Großbritannien, Irland, der Schweiz und Lettland, weitere Erkenntnisse über die der Ozontoxizität zugrundeliegenden chemischen Reaktionen auf zellulärer Ebene zu gewinnen. Erweitert sind diese Untersuchungen um die Frage, welchen Einfluß hohe Stick-

stoffeinträge über den Boden auf die Ozonwirkung haben und ob Spurenkonzentrationen von Stickstoffmonoxid für die Ozontoxizität mitverantwortlich sind.

Die Wirkung einer pflanzenschädlichen Luftverunreinigung wird nicht nur durch ihr phytotoxi-

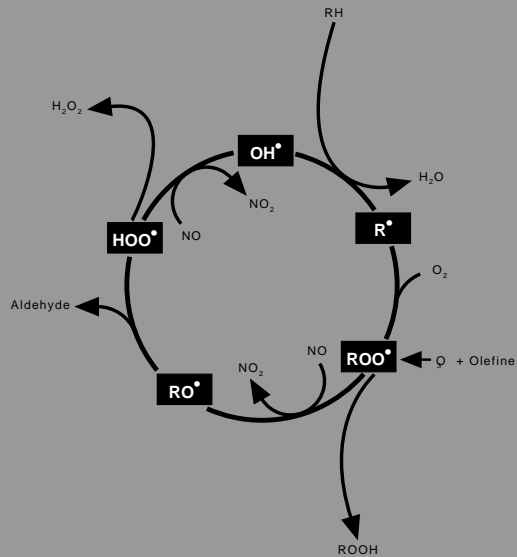
sches Potential bestimmt wird, sondern auch vom autonom und umweltbedingten art-, sorten- oder individualspezifischen Resistenzgrad der betroffenen Pflanze. Daher werden innerhalb des Gemeinschaftsvorhabens auch Untersuchungen über zelluläre Abwehrme-

chanismen durchgeführt, insbesondere über die Regulation antioxidativer Schutzsysteme in der Pflanze. Speziell soll geprüft werden, welche Bedeutung den Enzymen Ascorbatperoxidase, Gluthathionreduktase, Superoxiddismutase und Katalase bei der Entgiftung von Peroxiden in Pflanzen unter Ozonstress zukommt.

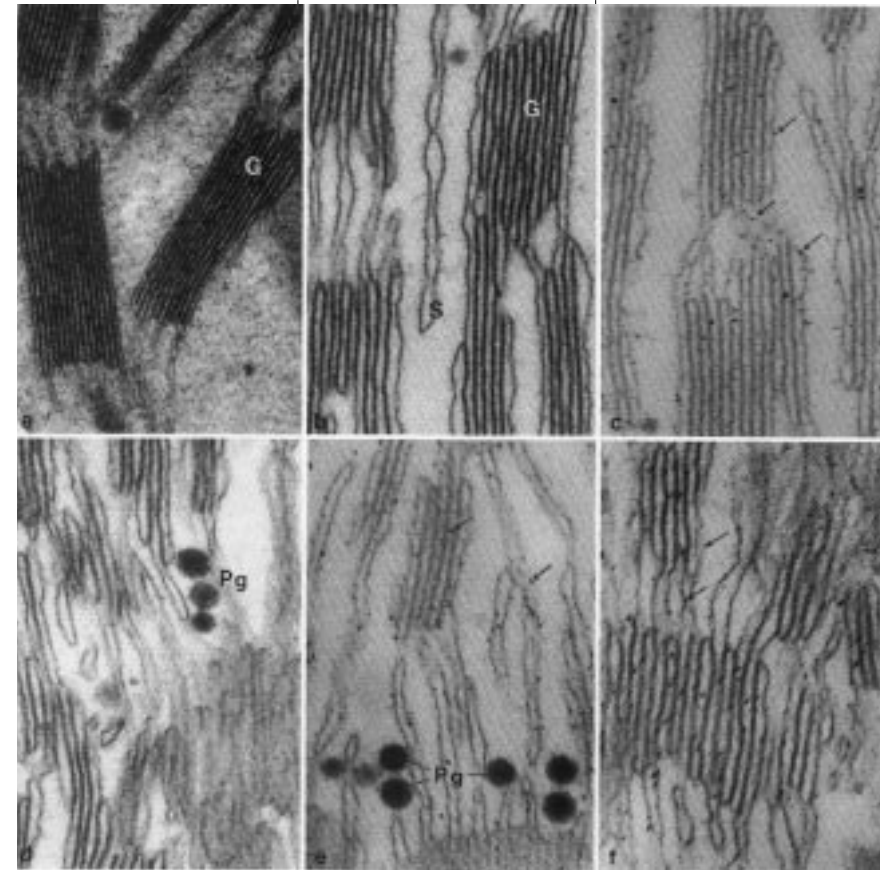
Biochemische Kriterien zur Indikation von Immissionswirkungen

Im Rahmen eines vom Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus geförderten Vorhabens war die Frage zu klären, welche Komponenten in den Abgasen der Wirbelschichtfeuerung mit Steinkohle ihre Phytotoxizität bestimmen¹⁴. Als Untersuchungsobjekt dienten die unterschiedlich immissionsresistenten Klone der Pappelvarietäten *Populus nigra* L. cv. LOENEN und *Populus maximowiczii* Henri X *Populus nigra* L. cv. ROCHESTER. Die Wirkungen wurden anhand der Veränderungen im Gehalt an Kohlenhydraten, Zuckeralkoholen und wasserlöslichen Phenolen in verschiedenen Pflanzenabschnitten wie Blattspreite, Blattstiel, Sproßabschnitte und Wurzeln charakterisiert. So ergaben sich 77 Wirkungskriterien. Ein Vergleich der Pflanzenreaktionen unter der Einwirkung verdünnter Gase der Wirbelschichtfeuerung mit jenen unter dem Einfluß der Hauptkomponenten Schwefeldioxid (SO_2) und Stickstoffoxiden ($\text{NO} + \text{NO}_2 = \text{NO}_x$) ergab keine Wirkungsunterschiede, weder beim empfindlichen noch beim unempfindlichen Pappelklon (Abb. 13, oben). Die Wirkung wird also offensichtlich durch den Gehalt der Wirbelschichtabgase an SO_2 und NO_x bestimmt. Auch bei zusätzlicher Anwesenheit von Ozon in niedriger, nicht phytotoxisch wirkender Konzentration lag ein gleichartiges Reaktionsmuster vor (Abb. 13, unten).

Mögliche Wirkungen von Radikalen auf Biomembranen



(10) Oxidation organischer Verbindungen in der Troposphäre durch das Zusammenspiel von Ozon und dem OH-Radikal in Gegenwart von NO und die Bildung von Hydroperoxiden durch Reaktionen von (organischen) Peroxyradikalen mit Hydroperoxyradikalen (nach Finlayson-Pitts und Pitts, 1986).



(11) Nachweis des SO_2 -empfindlichen Proteins in den Thylakoiden aus Spinachchloroplasten mit Hilfe des HRP-Reagenz. Das Reaktionsprodukt, bestehend aus dem SO_2 -empfindlichen Protein, dem spezifischen Antikörper und dem HRP-Reagenz, ist vergleichsweise selten in den SO_2 -exponierten Pflanzen nachzuweisen. (a) Thylakoide aus Kontrollpflanzen, unbehandelt (45000 X). (b) Thylakoide aus Kontrollen, behandelt, jedoch ohne Nachweisreagenz (70000 X). (c) Thylakoide aus Kontrollen, behandelt, mit Nachweisreagenz zeigen deutlich und häufig das HRP-Reaktionsprodukt (Pfeil, 70000 X). (d) Thylakoide mit SO_2 -Begasung, behandelt, mit Nachweisreagenz zeigen kein HRP-Reaktionsprodukt (70000 X). (e) und (f) Thylakoide aus O_3 - und NO_2 -Begasung zeigen ebenso wie die Kontrolle das HRP-Reaktionsprodukt (70000 X). Damit ist der Nachweis erbracht, daß nur SO_2 , nicht aber Ozon oder NO_2 ein spezielles Protein in den Thylakoidmembranen verändert. Foto: I. M. Willenberg

Auf Mischimmissionen aus Ozon und Stickstoffoxiden (ON) einerseits sowie Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden (SN) andererseits reagieren hingegen die beiden Pappelklone unterschiedlich stark (Abb. 14). Die Normalverteilung der Wirkungskriterien über dem Nullpunkt – also der gleichstarken Reaktion der beiden Klone – unter der SN-Belastung weist für dieses Gemisch den gleichen Resistenzgrad beider Pappelklone aus (Abb. 14, unten). Abweichend hiervon reagierte auf das Ozongemisch beim Klon LOENEN rund die Hälfte aller Kriterien empfindlicher als bei ROCHESTER (Abb. 14, oben). Besonders intensiv sprachen bei cv. LOENEN die Pools von Stärke, Raffinose und myo-Inositol an. Die hohe Empfindlichkeit gegenüber niedrigen Schadstoffkonzentrationen, die spezielle Reaktion auf Ozon sowie die großen Unterschiede in der Reaktionsintensität lassen das genannte Paar einheimischer Pappeln grundsätzlich geeignet erscheinen zur Bioindikation des phytotoxischen Potentials von Ozon in Mischimmissionen¹⁵.

Folgerungen

Der prophylaktische Immissionschutz nach dem Luftqualitätsprinzip ist auf verlässliche Erkenntnisse über Art, Intensität, räumliche Verbreitung und Ursachen von Schäden einerseits sowie über quantitative Zusammenhänge zwischen dem Gehalt der Luft an Luftverunreinigungen und auftretenden Schäden andererseits angewiesen. Die Gewinnung derartiger Informationen ist aber unter den derzeit vorherrschenden Immissionsbedingungen außerordentlich schwer. Die vornehmlich chronisch und latent wirkenden Belastungen verursachen kaum charakteristische Schädigungsmerkmale, und Mischimmissionen sowohl auf tropisch als auch toxisch wirkenden Komponenten wirken sich je nach Zusammensetzung und Kon-

zentrationshöhe negativ oder – jedoch mitunter nur vorübergehend – positiv aus. Schließlich sind durch Langzeit- und Kombinationsstress nicht nur die einzelnen Teile des Ökosystems betroffen, sondern auch die Leistungen des gesamten Systems. Damit hat sich der Aufgabenbereich für die Wirkungsforschung wesentlich erweitert bei:

- der Definition von Schutzobjekten und Schutzzielen,
- der Aufdeckung von Wirkungsabläufen auf verschiedenen Organisations Ebenen im Ökosystem,
- der Diagnose von Schädigungen und
- der Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen.

Neben biogeologischen Erhebungen in den Belastungsgebieten sind daher Versuche unter kontrollierten oder gar streng reproduzierbaren Bedingungen, wie sie Open-Top-Kammern und Klimakammeranlagen erlauben, ebenso dringend notwendig wie die Anwendung verschiedenartigster Methoden zur Erfassung und Bewertung von Wirkungen.

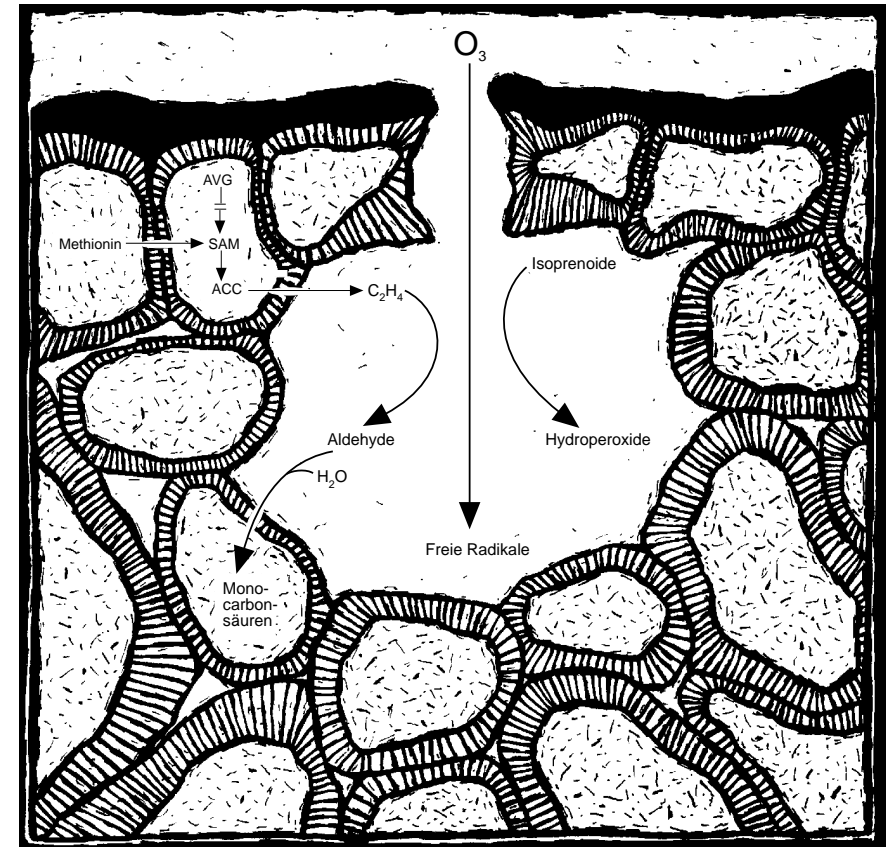
Unsere hier kurz dargestellten Untersuchungen unter naturnahen Bedingungen in Open-Top-Kammern ergaben, daß Mischimmissionen aus Ozon, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid in Konzentrationszeit-Mustern, wie sie gegenwärtig in der Bundesrepublik weitverbreitet auftreten, Schädigungen an Laub- und Nadelhölzern hervorrufen können. Die Untersuchungen mit biochemisch-physiologischen und elektrooptischen Methoden tragen darüber hinaus zum besseren Verständnis der Wirkungsweise dieser Schadstoffe – als Einzelkomponenten und im Immissionsgemisch – auf zellulärer und subzellulärer Ebene bei. Die zahlreichen Übereinstimmungen zwischen den Syndromen an Pflanzen aus Belastungsgebieten und aus experimentellen Untersuchungen stützen vorliegende Erkenntnisse, wonach Luftverunreinigungen als wesentliche auslösende und prädisponierende Komponen-

ten für die neuartigen Waldschäden anzusehen sind. Untersuchungen mit biochemischen Methoden erweitern zugleich die Möglichkeiten für Diagnose und Überwachung von Immissionswirkungen mit Hilfe von *Bioindikatoren*.

In den letzten Jahrzehnten wurden in Mittel- und Westeuropa die Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Pflanzen vornehmlich durch die regionalen und überregionalen Immissionsverhältnisse bestimmt; dementsprechend konzentrierte sich die Forschung auf die hier vorherrschenden Komponenten und Komponentengemische aus Schwefeldioxid, Stickstoffoxiden und Ozon. Künftige Untersuchungen werden die anthropogen verursachten, globalen Veränderungen berücksichtigen müssen, wie die Änderungen in der spektralen Zusammensetzung des Sonnenlichtes als Folge des Ozonabbaus in der Stratosphäre und insbesondere den steigenden Kohlendioxidgehalt in der Troposphäre. Innerhalb der letzten zweihundert Jahre ist insbesondere durch den Verbrauch von fossilen Brennstoffen sowie durch Raubbau an der Vegetation der CO₂-Gehalt von etwa 280 auf 355 ppm angestiegen. Mit einer Verdopplung des Ausgangswertes aus vorindustrieller Zeit im Verlaufe des kommenden Jahrhunderts wird gerechnet. Derartige Konzentrationsänderungen eines Luftbestandteils mit sowohl Nährstoff- als auch klimawirksamen Eigenschaften lassen weltweit gravierende Veränderungen in Wachstum und Zusammensetzung der Vegetation erwarten, darüber hinaus evolutionsbiologische Auswirkungen mit nicht vorausagbaren Konsequenzen für einzelne Arten ebenso wie für Lebensgemeinschaften.

Summary

Actual air pollution situations are characterized by regional as well as widespread loads of complex pol-



(12) Schematische Darstellung der möglichen Reaktion von Ozon mit Ethylen als Ursache der Ozontoxizität (nach Mehlhorn und Wellburn 1987).

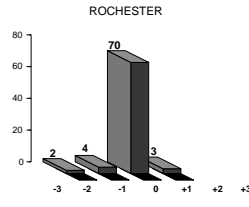
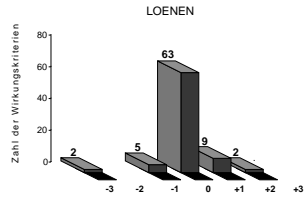
Grafik: Ralph Schingeler

lutant mixtures which are composed of gases, dusts, and aerosols. Meanwhile, single components appear at critical concentration even globally. Continuous exposure to mixtures of air pollutants can influence the different compartments of an ecosystem. The producing, consuming, and destroying organisms may

all be affected just as the soil, the climate and, finally, the biogeochemical cycles. Disturbances of the structure and function of ecosystems as well as of their mechanisms for self-adjusting are possible consequences.

Along with the changes of the air pollution situation the problems for

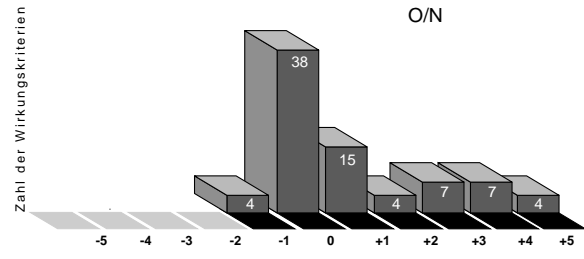
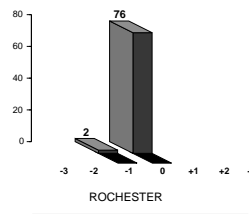
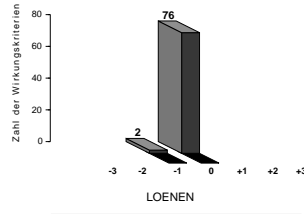
research have changed. Today investigations of the effects of long-term exposure to complex pollution types composed of several components are emphasized. Effects within the different degrees of organization – from the plant cell to the ecosystem – have to be detected and evaluated using methods of production bi-



(13) Vergleich der Effektivität von Abgasen aus der Wirbelschichtfeuerung und deren Hauptkomponenten SO_2 und NO_x bei den Pappelvarietäten cv. Loenen und cv. Rochester: Zahlenmäßige Verteilung der Wirkungskriterien auf folgende Gruppen der Reaktivitätsunterschiede:

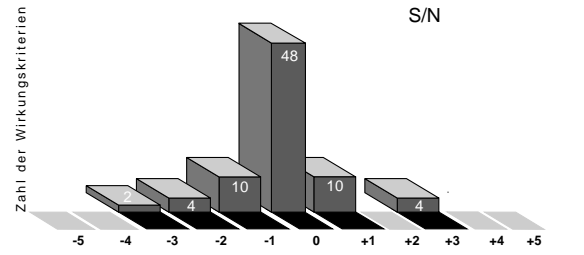
0 = kein Unterschied
 +1 = AGE 101-150% des HKE
 +2 = AGE 151-200% des HKE
 +3 = AGE 201-300% des HKE
 -1 = AGE 99-66% des HKE
 -2 = AGE 65-50% des HKE
 -3 = AGE 49-33% des HKE
 (AGE = Abgaseffekt, HKE = Hauptkomponenteneffekt)

oben: Abgase (S/N/+): S/N
 unten: Abgase + Außenluft (O/S/N/+): O/S/N



(14) Vergleich der Pappelvarietäten cv. Loenen und cv. Rochester bei den Belastungsvarianten O/N und S/N: Zahlenmäßige Verteilung der Wirkungskriterien auf folgende Gruppen der Reaktivitätsunterschiede:

0 = kein Unterschied
 +1 = LR 101-150 % der RR
 +2 = LR 151-200 % der RR
 +3 = LR 201-300 % der RR
 +4 = LR 301-500 % der RR
 +5 = LR > 500 % der RR
 -1 = LR 99-66 % der RR
 -2 = LR 65-50 % der RR
 -3 = LR 49-33 % der RR
 -4 = LR 32-20 % der RR
 -5 = LR < 20 % der RR
 (LR = Loenen-Reaktion, RR = Rochester-Reaktion)
 Grafik: Rolf Schillingeler



ology, biochemistry, physiology, and light- and electron microscopy.

Referring to parts of the work of the Institute for Applied Botany, an impression is given of actual questions of research as well as of the methods for processing. Mixtures of O_3 , NO_x , and SO_2 at realistic concentrations caused a reduced growth of deciduous trees and conifers almost within two growth periods. Investigations of plants exposed singly to O_3 and SO_2 delivered new results for the understanding of the mechanisms of O_3 -toxicity and of the mode of action of O_3 and SO_2 on plant membranes. Indigenous poplar varieties principally appear to be a suitable method for the bio-indication of O_3 in a mixture of pollutants, since changes in their carbohydrate households were found to be specific for a given air pollutant.

die laufenden Forschungsarbeiten hinaus an internationalen Projekten beteiligt, zur Zeit unter anderem an dem vom BMFT geförderten, deutsch-brasilianischen Gemeinschaftsvorhaben Serra do Mar in Sao Paulo. Auch nach seiner Emeritierung im Februar 1994 betreut Professor Guderian einzelne dieser Projekte weiter.

Als Vorsitzender und Mitarbeiter in verschiedenen nationalen und internationalen Fachgremien ist Robert Guderian seit vielen Jahren an der Aufbereitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen für die Belange des praktischen Immissionsschutzes beteiligt. Für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Immissionswirkungen und des Immissionsschutzes erhielt er die Heinrich-Cotta-Medaille sowie die Ehrenmedaille des Vereins Deutscher Ingenieure.

Anmerkungen:

- 1) Spiegelberg F: Reinhaltung der Luft im Wandel der Zeit. VDI. Düsseldorf 1984. S. 3f.
- 2) Ebenda, S. 7 ff.
- 3) Vgl. Guderian und Ballach 1989.
- 4) Vgl. Jäger et al. 1987.
- 5) Vgl. Boomers J.: Einfluß von ozonbetonten Immissionen, Trockenstreß und erhöhtem atmosphärischen CO_2 -Gehalt auf Physiologie und Wachstum junger Laubbäume. Diss., Universität GH Essen, 380 S.
- 6) Küppers und Hanstein 1993, Boomers 1993.
- 7) Zur Ermittlung der Ursachen für die starken Wuchsdepressionen in so kurzer Zeit wurde mit Hilfe eines Miniküvettsystems die Dynamik des $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Gaswechsels im Zusammenspiel mit Pigment- und Stärkegehalten untersucht.
- 8) Strobel 1991. Zugleich erhöht sich die Aktivität verschiedener katabolischer Enzyme (Fumarase, Glycerinaldehyd-3-phosphat-Dehydrogenase und Glucose-6-phosphat-Dehydrogenase) sowie der Nitratreductase.
- 9) Hüttl 1991.
- 10) Beispielsweise Klumpp und Guderian 1990.
- 11) Finlayson-Pitts und Pitts 1986.
- 12) Willenberg et al. 1994.
- 13) Mehlhorn und Wellburn 1987.
- 14) Bucker 1991.
- 15) Bucker et al. 1993.

Literatur:

- Boomers J, 1993 A: Einfluß realistischer Immissionstypen auf Forstpflanzen: Entwicklung eines unabhängigen Begasungsprogramms zur Simulation realistischer Begasungsregime. In: Schlußbericht zu den Forschungsaufträgen 106 07 046/27 und 108 03 046/27.
- Boomers J, 1993 B: Einfluß realistischer Immissionstypen auf Rotbuche und Stieleiche: Dynamik der Schädigungsprägung unter besonderer Berücksichtigung des CO_2/O_2 Gaswechsels. In: Schlußbericht zu den Forschungsaufträgen 106 07 045/27 und 108 03 046/27.
- Bucker J, 1991: Immissionsbedingte Stör-

gen im Kohlenhydrathaushalt junger Pappeln und Fichten. Diss., Universität GH Essen, 281 S.

- Bucker J, Guderian R, Mooi J, 1993: A novel method to evaluate the phytotoxic potential of low ozone concentrations using poplar cuttings. Water, Air, and Soil Pollution 66: 193-201.
- Finlayson-Pitts BJ, Pitts JN, 1986: Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques. John Wiley and Sons, New York.
- Guderian R, Ballach H-J, 1989: Aufgaben und Probleme der Wirkungsforschung als Grundlage für den praktischen Immissionsschutz. Verh. Gesellschaft Ökologie (Essen 1989) Bd. XVIII: 289-297.
- Guderian R, 1977: Air Pollution. Phytotoxicity of Acidic Gases and its Significance in Air Pollution Control. Ecological Studies, Vol. 22. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp 127.
- Guderian R (ed.): Air Pollution by photochemical oxidants. Formation, transport, control and effects on plants. Ecological Studies, Vol. 22. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp 346.
- Guderian R, Tingey TD, 1987: Notwendigkeit und Ableitung von Grenzwerten für Stickstoffoxide. In: Berichte 1/87, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 178 S.
- Hüttl RF, 1991: Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen Nr. 28.
- Jäger HJ, Weigel HJ, Guderian R, Arndt U, Seufert G, 1988: Methodological Approaches: Part I. Experiments with open-top chambers; Results, Advantages, and Limitations. In: Mathy P (ed.): Air Pollution and Ecosystem. D. Reidel Publishing Company: 327-337.
- Klumpp A, Guderian R, 1990: Leaching von Magnesium, Calcium und Kalium aus immissionsbelasteten Nadeln junger Fichten (Picea abies L. Karst.). I. Einfluß von O_3 und SO_2 auf die Kationenauswaschung in Abhängigkeit vom Nadelalter und der Azidität der Lösung. II. Jahreszeitlicher Verlauf der Ionenauswaschung O_3/SO_2 -belasteter Fichten unterschiedlicher Mg- und Ca-Versorgung. III: Wirkung einer regelmäßigen Benetzung auf die Mineralstoffgehalte immissionsbelasteter Fichtennadeln. Forstwiss. Centralblatt 109: 13-39.
- Küppers K, Hanstein S, 1993: Einfluß realistischer Immissionstypen auf Waldkiefer, Weißtanne und Rotfichte: Entwicklung von Schädigungsmerkmalen und Biomasseproduktion. In: Schlußbericht zu den Forschungsaufträgen 106 07 046/27 und 108 03 046/27.
- Mehlhorn H, Wellburn AR, 1987: Stress ethylene formation determines plant sensitivity to ozone. Nature 327: 417-418.
- Strobel P, 1991: Experimentelle Untersuchungen zur Wirkungsweise niedriger Konzentrationen von Ozon, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid auf Forstpflanzen. Diss. Universität GH Essen, 196 S.
- Willenberg I-M, 1994: Climatic chambers experiments with SO_2 , O_3 and NO_2 in combination on spinach. Environmental Pollution (in Vorbereitung).

Die Nachricht gehört schon fast zum Wetterbericht: Jahr für Jahr informieren uns die Medien im Oktober über die abnehmende Konzentration an Ozon in der Atmosphäre über der Südhalbkugel unserer Erde. Und alljährlich wird die vom Ozonmangel betroffene Fläche größer – ganz im Gegensatz zu unserer „Betroffenheit“. Doch das Risiko wächst weiter.

Das Loch

Ozonabbau in der Stratosphäre: Ausmaß, Ursachen und Folgen

Von Reinhard Zellner

Die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht ist eine der gravierendsten Veränderungen der Erdatmosphäre, die jemals beobachtet wurden. Am auffälligsten ist das sogenannte Ozonloch, eine jährlich in den Monaten September und Oktober wiederkehrende, starke Ausdünnung des Ozons über der Antarktis. Das Phänomen hat sich seit seiner Entdeckung im Jahre 1985 ständig verstärkt. In den letzten Jahren gingen zum Zeitpunkt der maximalen Ausbildung des Ozonlochs

mehr als 50 Prozent des Ozons verloren; seine Flächenausdehnung betrug etwa 20 Millionen Quadratkilometer oder etwa 8 Prozent der Gesamtfläche der Südhemisphäre. Hinzu kommt: Auch außerhalb der Südpolarregion zeigt die Ozonkonzentration negative Trends. Besorgniserregend ist besonders die relativ starke Abnahme von etwa 8 Prozent pro Dekade – also in jeweils zehn Jahren – in den Wintermonaten der mittleren Breiten der Nordhemisphäre, eingeschlossen die Bundesre-

publik. Nach neuesten Beobachtungen sind diese Ozonverluste auf die Auswirkungen eines winterlich verstärkten Ozonabbaus, ähnlich der Vorgänge während der Ausbildung des Ozonlochs über dem Südpol, zurückzuführen. Allein die Unterschiede im Klimageschehen haben die Nordhemisphäre bislang vor einem Ozonloch bewahrt.

Die Ursachen des stratosphärischen Ozonabbaus sind ausschließlich anthropogen – also im menschlichen Sinne „hausgemacht“. FCKWs und – in geringerem Ausmaß – Halone greifen in die Kettenmechanismen des photochemischen Ozonabbaus ein. Die Folge ist die Verminderung der stationären Ozonkonzentration. Inzwischen hat sich auch die Hoffnung auf natürlich ausgleichende Effekte, besonders auf eine verstärkte Nachbildung des Ozons in tieferen Schichten, zerschlagen: Solche kompensierende Effekte treten, im Gegensatz zu ursprünglichen Erwartungen, nicht auf.

Ein besonderer Beitrag zum Ozonverlust wird von verschiedenartigen Prozessen an Eisteilchen während der kalten Polarnacht erzeugt. Durch Reaktionen an diesen Teilchen werden Reservoirverbindungen chlorhaltiger Komponenten derart aktiviert, daß im Licht der aufgehenden Frühjahrssonne die Radikalkettenträger des Ozonabbaus verstärkt freigesetzt werden. Dieses Phänomen wurde bereits während der Ausbildung des Ozonlochs über der Antarktis gut dokumentiert. Nun zeigt auch die winterliche Nordpolarregion ähnliche Kopplungsvorgänge zwischen meteorologischer Vorbereitung und dem durch Chlor ausgelösten Ozonabbau.

Dieser Abbau der stratosphärischen Ozonschicht hat eine Reihe von Folgen für die Chemie und die Dynamik der Stratosphäre. Da Ozon ein infrarot-aktives Spurengas ist, hat seine Abnahme in der unteren Stratosphäre auch Auswirkungen auf das Klimasystem der Erde. Aus heutiger Sicht aber noch gravie-



Foto: Matthias Lecker

Seit 1988 Koordinator des Ozonforschungsprogramms des BMFT und Mitglied des Klimabeirats der Bundesregierung; Prof. Dr. Reinhard Zellner.

render ist die potentielle Auswirkung auf Menschen, Tiere und Pflanzen aufgrund einer Zunahme der Intensität der ultravioletten Strahlung (*UV-B-Strahlung*). Gegenwärtige Modelluntersuchungen zeigen, daß der beobachtete Ozonverlust bereits jetzt zu Zunahmen der UV-B-Intensität von etwa 7 Prozent pro Dekade in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre geführt haben sollte. Diese Zunahme kann jedoch noch nicht als experimentell gesichert gelten. Es ist auch wahrscheinlich, daß sie in den Kontinentalbereichen aufgrund der Verschmutzung der bodennahen Luftschichten noch maskiert ist.

Die Ozonschicht der Erde

Der Planet Erde wird von der Sonne erwärmt und mit Energie für das Le-

ben versorgt. Nur weil der Abstand zwischen Sonne und Erde „richtig“ ist, konnte sich Leben auf der Erde entwickeln. Die unmittelbaren Nachbarplaneten der Erde, Venus und Mars, empfangen entweder zuviel oder zuwenig Energie, um Leben in der uns bekannten Form und unter den gegebenen Bedingungen zu ermöglichen.

Einige wenige Prozent der Solarstrahlung, besonders ihr UV-Anteil, sind darüber hinaus so energiereich, daß sie chemische Bindungen spalten und Moleküle zerstören. Dies gilt auch für Proteine und Nucleinsäuren, die typischen Bausteine der lebenden Zellen. Nur wenn diese energiereichen Anteile herausgefiltert werden, kann die lebensspendende Kraft der Sonne wirksam werden. Die Natur hat einen solchen Schutzschirm für das Leben in Form

der Ozonschicht „erfunden“: Ozon ist das einzige bekannte Spurengas in der Atmosphäre, das die energiereiche Sonnenstrahlung absorbiert und damit von der Erdoberfläche fernhält. Der weniger energiereiche Anteil der Sonnenstrahlung dagegen bleibt unbeeinflusst. Entstehung und Fortbestand des Lebens auf der Erde sind daher ohne schützende Ozonschicht kaum denkbar.

Die Hauptmenge des Ozons, etwa 90 Prozent, befindet sich in der Stratosphäre, in Höhen zwischen 15 – 35 Kilometern (Abb. 1). Nur etwa 10 Prozent sind in der Troposphäre, den untersten 10 Kilometern, enthalten. Diese unterschiedliche Mengenverteilung ist verantwortlich für die Temperaturstruktur der Atmosphäre. Während in der Troposphäre die Temperatur mit steigender Höhe ständig abnimmt, ähnlich der Abnahme der Temperatur über einer Heizplatte, nimmt die Temperatur in der Stratosphäre mit wachsender Höhe zu. Die Ursache hierfür ist die Lichtabsorption durch das Ozon, durch die die Strahlungsenergie der Sonne in Wärmeenergie verwandelt wird. Die Temperatur bei 30 Kilometern Höhe unterscheidet sich kaum von der Temperatur eines kalten Wintertages (-20 °C), während in 10 Kilometern Höhe Temperaturen bis zu -50 °C regelmäßig vorzufinden sind.

Die Umkehr des Temperaturtrends mit steigender Höhe hat eine wichtige Konsequenz für die Dynamik der Atmosphäre: Sie verhindert, daß Spurengase schnell in die Stratosphäre eingemischt werden. Das Ergebnis ist eine Sperrschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre, die nur langsam, in einem Zeitraum von mehreren Jahren, durchdrungen werden kann. Da das Ozon für den Temperaturanstieg in der Stratosphäre verantwortlich ist, ist es auch die Ursache für die Ausbildung der Sperrschicht. Das Ozon schützt sich also sozusagen selbst vor den Spurengasen von der Erdoberfläche. Wenn seine Konzentration ab-

nimmt, wird also auch die Sperrwirkung geringer. Das Ozon gibt sich dann zunehmend dem schnellen Angriff der Spurengase von unten preis. Von keinen anderen Spurengasen der Atmosphäre kennen wir diese besondere Eigenschaft.

Ein vollständiger Verlust der Ozonschicht aufgrund der vom Menschen gemachten Emissionen ist glücklicherweise nicht in Sicht. Aber die Ozonschicht wird dünner und allein die von der Ausdünnung ausgehenden Gefahren sind Anlaß zu erheblicher Sorge.

Ein großes Krankheitsrisiko für den Menschen stellen derzeit die Krebserkrankungen dar, unter ihnen der Hautkrebs. Selbst bei den gegenwärtig bestehenden Strahlungsintensitäten ist die UV-B-Strahlung für zahlreiche Hautkrebskrankungen, einschließlich der gefährlichen Melanome, verantwortlich. Dieses Risiko wird von mehreren klimunabhängigen Faktoren, wie beispielsweise die Hautfarbe und die Exposition mit hoher Sonnenbestrahlung in der Jugend, bestimmt, nimmt aber im jedem Fall mit steigender UV-B-Intensität zu. Für eine Abnahme der Ozonschicht um 5 Prozent wird beispielsweise für die USA eine Erhöhung der jährlichen Neuerkrankungen mit Hautkarzinomen von derzeit 500.000 Fällen um weitere 80.000 erwartet.

Das Ausmaß des stratosphärischen Ozonabbaus

Die Ozonschicht der Stratosphäre ist auch ohne anthropogene Störungen keine unveränderliche Größe. Ihre Dicke – üblicherweise ausgedrückt in Dobson-Einheiten (DU, 1 DU = 1 matm cm) – zeigt starke natürliche Variationen in Raum und Zeit. Eine wesentliche Ursache hierfür ist der großräumige Transport des Ozons. Die Hauptquellregion des Ozons ist die Stratosphäre über den Tropen. Von hier aus „fließt“ das Ozon zu den Polen, wobei dieser Transportmechanismus im Früh-

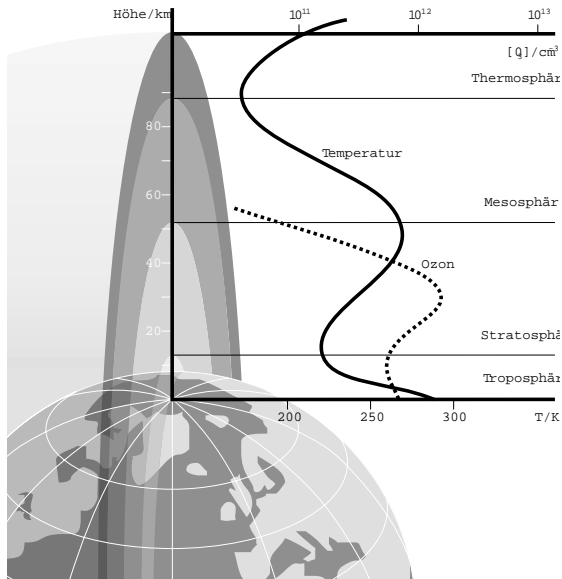
jahr besonders stark in der Nordhemisphäre ausgeprägt ist und sich im Herbst in Richtung Süden umkehrt. Die Folge ist, daß die Ozonschicht in mittleren Breiten in den Frühjahrsmonaten um ca. 30 Prozent „dicker“ ist als im Herbst. In der Südhemisphäre ist dieses Verteilungsmuster um 6 Monate phasenverschoben. Zusätzlich zu dieser Variation, die auf die globale horizontale Zirkulation zurückgeht, wird die Ozonschichtdicke auch regional durch Vertikalbewegungen der Luftmassen als Folge der troposphärischen Wettersysteme moduliert. Diese und andere natürliche Variationen in den Ozonmengen erschweren das Erkennen von anthropogenen Störungen. Der auf menschlichen Einfluß zurückgehende Anteil an den Veränderungen ist deshalb überhaupt nur über Mes-

sungen in längeren Zeitreihen zu identifizieren.

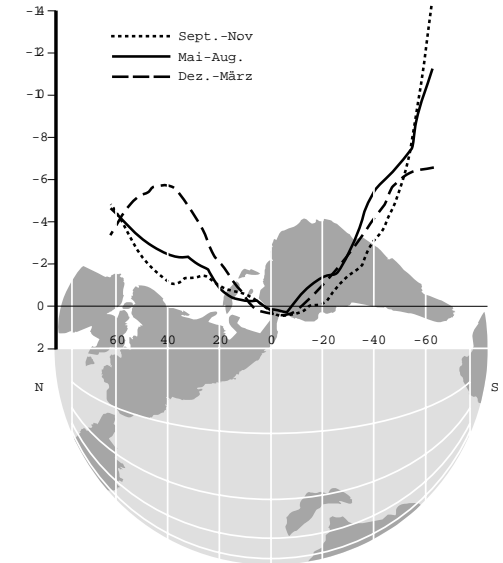
Messungen der Ozonschichtdicke werden bereits seit den 30er Jahren vorgenommen. Seit dem internationalen Geophysikalischen Jahr 1953 existiert ein weltweites Meßnetz von Bodenstationen; die ersten Satellitenbeobachtungen begannen 1978 (TOMS). Spätestens seit diesem Zeitpunkt gehört das stratosphärische Ozon zu den am besten vermessenen Spurengasen der Atmosphäre. Dies gilt sowohl für die Gesamtsäulendichte, als auch für die Vertikalverteilung.

Globale Ozonmengen: Der Trend seit 1980

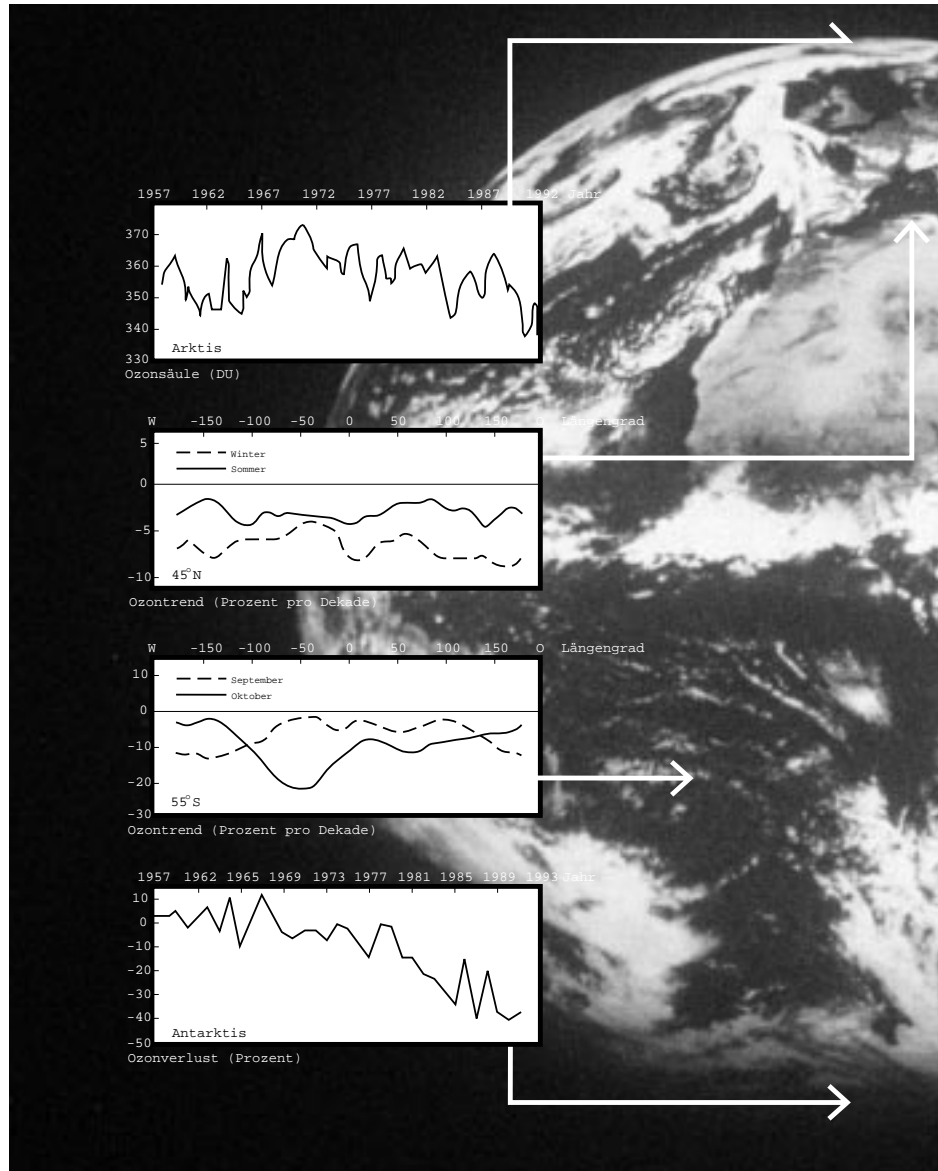
Die Meßreihen der globalen stratosphärischen Ozonschicht durch bodengebundene Instrumente und



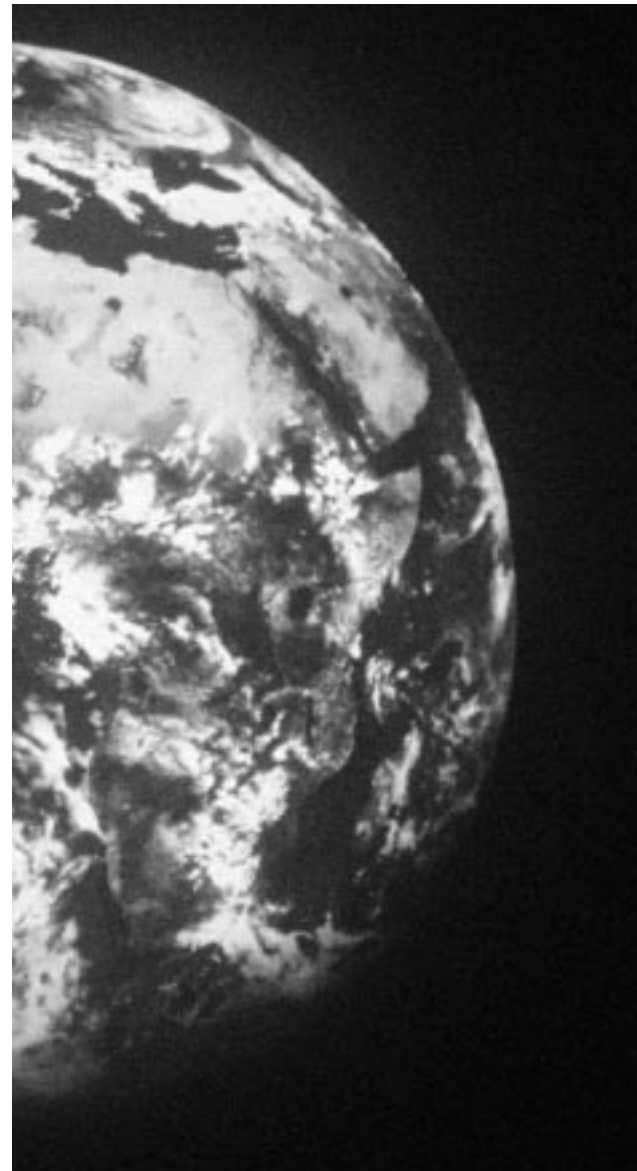
(1) Aufbau der Atmosphärenbereiche Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre und Vertikalprofile für Temperatur und Ozon. Die Einteilung der Atmosphärenbereiche wird in der Regel anhand des Temperaturprofils vorgenommen.
Grafik: Matthias Löcker



(2) Ozonverlust in Prozent pro Dekade in Abhängigkeit von der geographischen Breite und für verschiedene Jahreszeiten. Ergebnisse der TOMS-Meßreihe im Zeitraum von 1978 bis 1991 (WMO-25, 1992).
Grafik: Matthias Löcker



(3) Entwicklung der Ozonsäulendichten in mittleren und hohen Breiten der Nord- und Südhemisphäre, einschließlich der Antarktis (WMO, 1992).

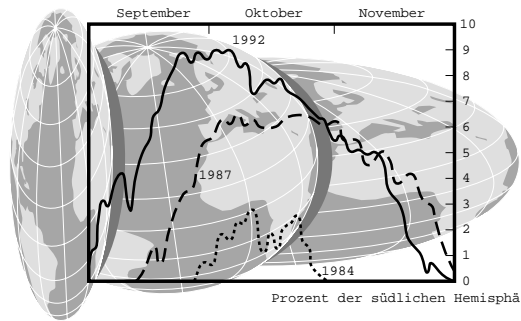


Satelliten wurden zuletzt 1991 in den Berichten der *World Meteorological Organization* (1992) systematisch analysiert. Dabei bestätigte sich zweifelsfrei, daß mit Ausnahme der tropischen Breiten (25° S bis 25° N) alle sonstigen Regionen deutliche negative Trends in den Ozonsäulendichten zeigen. Diese Trends sind aber nicht einheitlich, sondern regional und jahreszeitlich verschieden (siehe Abb. 2 und 3).

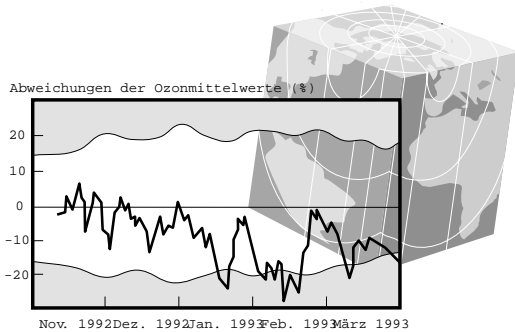
Die Ozonverluste in der Nordhemisphäre sind am stärksten während der Winter- und Frühjahrsmonate, bis zu einem Minus von 8 Prozent pro Dekade, und weniger stark – aber doch signifikant – während der übrigen Jahreszeit. Sie haben sich besonders im Verlauf der 80er Jahre verstärkt. In den mittleren Breiten der Südhemisphäre sind die Ozontrends nahezu unabhängig von der Jahreszeit; hier weisen sie ein Minus von etwa 5 Prozent pro Dekade auf, vergleichbar mit dem Wintertrend in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre. Die stärksten Trends überhaupt zeigen die hohen Breiten der Südhemisphäre im Zeitraum September bis November, in denen das Ozon mit einer Rate von mehr als 10 Prozent pro Dekade verlorenght.

Vertikale Analysen der Ozonverluste, die im wesentlichen mit Ballonsonden und mit dem Satelliteninstrument SAGE durchgeführt werden, zeigen eine bevorzugte Ausdünnung der Ozonschicht in der unteren Stratosphäre, in einer Höhe zwischen 13 und 25 Kilometer. Die lokalen Abnahmen betragen hier ebenfalls bis zu minus 10 Prozent pro Dekade. Verbunden mit diesen Ozonabnahmen ist eine geringfügige Kühlung der unteren Stratosphäre mit einem Trend von etwa 0,3 °C pro Dekade im globalen Mittel.

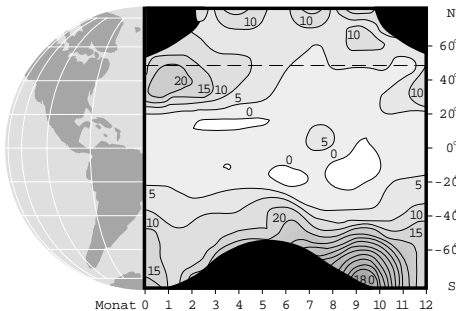
Die Gründe für die Stärke der jeweils beobachteten Ozontrends sind zur Zeit noch nicht vollständig aufgeklärt. Obwohl kaum ein Zweifel daran besteht, daß der Chlor- und Bromgehalt der Stratosphäre für die



(4) Zeitliche Entwicklung der Flächenausdehnung des Ozonlochs in den „extremen“ Jahren 1987 und 1992. Zum Vergleich ist die Ausdehnung in einem „normalen“ Jahr (1984) ebenfalls dargestellt.



(5) Abweichungen der Ozonmittelwerte im Breitenband 45° N bis 65° N im Zeitraum November 1992 bis März 1993 vom langjährigen Mittel (mittlere Kurve). Die langjährigen Standardabweichungen ($\pm 2\sigma$) werden durch die grauen Flächen begrenzt (Bojkov, 1993).



(6) Trends der effektiven täglichen UV-Dosis für DNA-Zerstörung in Prozent/Dekade berechnet auf der Basis von TOMS-Ozondaten (Madronich, 1992). Grafiken (5): Matthias Löffler

Ozonabnahmen verantwortlich ist, bestehen noch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Mechanismen. Gegenwärtige chemisch-dynamische Modelle, die neben der vollständigen Gasphasenchemie auch alle heute bekannten heterogenen Reaktionen berücksichtigen, können die Ozontrends in mittleren Breiten der Nordhemisphäre während der Sommermonate in etwa abbilden. Für die Wintermonate ergeben die Voraussagen im Vergleich zu den Beobachtungen jedoch nur halb so starke Trendwerte.

Das Ozonloch über der Antarktis

Das antarktische Ozonloch ist ein jährlich wiederkehrendes saisonales Phänomen mit gravierenden Ozonverlusten im Höhenbereich von 14 bis 22 Kilometern während der Monate September bis November. Seit seinem ersten Auftreten ab Mitte der 70er Jahre hat es sich in Tiefe und Ausdehnung verstärkt (siehe Abb. 3). Im Oktober 1992 betrug die Ozonminimalwerte 105 DU, was einem Verlust von etwa 65 Prozent gegenüber dem langjährigen Mittel der Ozongesamtsäule zu dieser Jahreszeit vor Mitte der 70er Jahre entspricht. Das antarktische Ozonloch des Jahres 1992 war in seiner Tiefe und Flächenausdehnung das extremste, was bislang beobachtet wurde (Abb. 4). Im Gegensatz zu den vorangehenden Jahren begann das Ozonloch sich 1992 bereits Mitte August auszubilden und umfaßte zum Zeitpunkt seines Maximums gegen Ende September eine Flächenausdehnung von fast 24 Millionen Quadratkilometern. Damit waren etwa 10 Prozent der Gesamtfläche der Südhemisphäre betroffen. Auch 1993 zeigte sich ein ähnliches Bild.

Aufgrund des noch weiter ansteigenden Chlor- und Bromgehalts der Stratosphäre muß auch für die kommenden Jahre jeweils mit einem stark ausgeprägten Ozonloch gerechnet werden. Mit einem vollständigen Verschwinden dieses Phäno-

mens ist auch bei stringenter Regulierung von FCKW- und Halonemissionen kaum vor Mitte des nächsten Jahrhunderts zu rechnen. Da die starken Ozontrends in mittleren und hohen Breiten der Südhemisphäre schon jetzt durch das Ozonloch mitbestimmt werden, sind für diese Regionen Ozonverluste von mehreren 10 Prozent innerhalb der nächsten Dekaden keinesfalls auszuschließen.

Der Zustand der Nordhemisphäre im Winter

Der stratosphärische Ozongehalt der Nordhemisphäre war in den letzten Wintern ungewöhnlich niedrig. Der im Dezember 1991 an der Station Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes gemessene Monatsmittelwert betrug 277 DU und lag damit gut 10 Prozent unter dem langjährigen Mittelwert für diesen Monat. Das TOMS-Instrument auf dem NIMBUS-7-Satelliten zeigte im Januar 1992 extrem niedrige Ozonwerte über weiten Teilen Europas, einschließlich der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks. Am 28. Januar 1992 betrugen die Ozonsäulendichten im Kern dieser Ausdünnung nur 200–220 DU und erreichten auch in Zentraleuropa nur Werte bis zu 260 DU. Zum Vergleich: die „Normalwerte“ für diese Jahreszeit liegen bei 350 DU.

Die extremen Ereignisse des Winters 1991/92 haben sich überraschenderweise im Winter 1992/93 wiederholt und teilweise auch noch weiter verstärkt. Abbildung (5) zeigt die im Breitenband 45° N bis 65° N gemittelten Ozonsäulendichten zwischen November 1992 und März 1993, gemeinsam mit den langjährigen Standardabweichungen (2σ) für diese Zeitperiode. Die aktuellen Daten unterschritten den langjährigen Mittelwert um 9 bis 20 Prozent und fielen im Januar und Februar 1993 auch deutlich unter die langjährigen klimatologischen Minima. Die großräumige Verteilung der Ozon-

defizite in der Nordhemisphäre vom März 1993 – relativ zum langjährigen Mittel – ist in der Polarprojektion (Abb. 7) erkennbar. Diese Darstellung zeigt eine starke Asymmetrie in den Ozonverlusten mit maximalen Effekten (minus 20 Prozent) in mittleren Breiten über Rußland/Sibirien. Im Bereich Zentraleuropas liegen die entsprechenden Werte bei einem Minus von 10 bis 15 Prozent.

Diese Beobachtungen von ausgeprägten, großräumigen Ozoniedrigwerten in der Nordhemisphäre sind allerdings noch nicht als Ozonloch zu bezeichnen. Dafür sind die Veränderungen zu klein und bewegen sich am Rande der klimatologischen Minima. Dennoch sind sie beunruhigend – weshalb sich die europäische Ozonforschung seit einigen Jahren auf die Aufklärung der winterlichen Ozonverluste in der Nordhemisphäre konzentriert.

Die zentrale Frage der derzeitigen Forschung bezüglich der Ozonveränderung in der Nordhemisphäre ist die Quantifizierung von dynamischen und chemischen Beiträgen. Eine Vielzahl von Erkenntnissen deutet darauf hin, daß die ungewöhnlichen Ozoniedrigwerte in den beiden letzten Wintern vornehmlich dynamisch verursacht waren, d. h., sie gehen auf eine Umverteilung aufgrund von Transportprozessen zurück. Die Gründe hierfür sind einerseits meteorologische Ereignisse der Troposphäre – beispielsweise das Entstehen von großräumigen und stagnierenden Hochdruckgebieten – und andererseits der Horizontaltransport von ozonarmen Luftmassen in der Stratosphäre aus niedrigen Breiten. Beide Prozesse führen zu Verringerungen der Ozonsäulendichte in einem prinzipiell zu erwartenden Ausmaß, wie es die Beobachtungen zeigen.

Dies ist die eine Seite. Auf der anderen Seite wird durch eine Vielzahl von Beobachtungen belegt, daß die Stratosphäre der Nordhemisphäre im Winter auch chemisch stark

gestört ist. Am auffälligsten dabei sind die Messungen des ClO-Radikals, dessen Konzentration als Maßstab für die chloridierte Störung der Ozonchemie genommen werden kann.

Abbildung (8) zeigt die großräumige Verteilung dieses Radikals in der Nordhemisphäre, gemessen am 14. Februar 1993 mit dem Mikrowelleninstrument MLS auf dem UARS-Satelliten. Die Verteilung und die Höhe der Konzentration von ClO sind in überraschendem Maße der entsprechenden Verteilung in der Südhemisphäre (am 14. August 1992) ähnlich. Aus diesen und anderen Beobachtungen läßt sich zweifelsfrei schließen, daß die Nordhemisphäre ähnlich wie die Südhemisphäre jeweils in den Wintermonaten präkonditioniert wird, ohne daß es allerdings – derzeit – zur Ausbildung eines Ozonlochs im Norden kommt.

Folgen des Ozonabbaus: Auskühlung der Stratosphäre und Treibhauseffekt

Aufgrund der einzigartigen Vielfalt der Wirkung des stratosphärischen Ozons für die Dynamik der Stratosphäre, für die Absorption der terrestrischen IR-Strahlung und der solaren UV-Strahlung, hat eine Abnahme des stratosphärischen Ozons mehrere Konsequenzen.

Die subtilste und bislang am wenigsten akzentuierte Konsequenz ist die *verminderte Heizungsrate der Stratosphäre*. Bei Abnahme des Ozons wird die Stratosphäre abkühlen und damit den positiven Temperaturgradienten abschwächen. Die Folge ist eine erhöhte Transparenz der Tropopause für den Stofftransport zwischen Troposphäre und Stratosphäre. Die ohnehin sehr verletzliche Stratosphäre würde in noch stärkerem Ausmaß dem Angriff von anthropogenen Spurengasen ausgesetzt. Andererseits würde aber auch die Lebensdauer von Spurenstoffen in der Stratosphäre be-

züglich Rücktransport in die Troposphäre verkürzt.

Ozon ist aufgrund seiner Infra-rotabsorption ein klimawirksames Spurengas. Nach heutigen Kenntnissen beträgt der auf das Ozon zurückgehende Beitrag zum zusätzlichen Treibhauseffekt etwa 8 Prozent. Diese Wirkung geht aber im wesentlichen auf das Ozon in der Troposphäre und der unteren Stratosphäre bis in etwa 25 km Höhe zurück. Das Ozon in der mittleren und oberen Stratosphäre ist praktisch nicht klimawirksam. Aus diesem Grund wird dem Anstieg des troposphärischen Ozons in der Klimadiskussion die meiste Aufmerksamkeit geschenkt.

Der Abbau des stratosphärischen Ozons erfolgt aber auch noch – und hauptsächlich – in solchen Höhen, in denen das Ozon normalerweise die Strahlungsenergiedichte verstärkt und damit den Erdboden erwärmt. Die Folge eines Ozonabbaus in dieser Höhe läuft deshalb auf eine Verringerung des Treibhauseffektes hinaus. Gegenwärtige Modellrechnungen lassen darauf schließen, daß der Ozonabbau durch FCKWs den Beitrag eben dieser Spurenstoffklasse zum Treibhauseffekt kompensiert haben könnte. Dies gilt zumindest für alle Regionen, die negative Ozontrends in der Stratosphäre zeigen; der Tropengürtel ist davon ausgenommen.

Folgen des Ozonabbaus: Zunahme der UV-Strahlung und Krebsrisiko

Die begründete Annahme, daß der Ozonabbau durch FCKWs sich hinsichtlich seines Beitrags zum Treibhauseffekt sozusagen selbst aufgehoben haben könnte, ist jedoch kein Grund zur Beruhigung. Eine weitere und im Gegensatz zur Änderung der Dynamik und dem Beitrag zum Treibhauseffekt intensiver diskutierte Konsequenz des stratosphärischen Ozonabbaus ist die Änderung der Sonneneinstrahlung

(UV-B-Intensität) in Bodennähe. UV-B-Änderungen sind naturgemäß am auffälligsten dort zu erwarten, wo starke Ozonverluste auftreten, wie etwa bei der Ausbildung des antarktischen Ozonlochs. Die Ozonminima über der Antarktis werden in der Regel im Oktober registriert. In dieser Zeit ist der Sonnenstand noch sehr niedrig, maximale UV-B-Flüsse sind erst später im Jahr zu verzeichnen. Veränderungen können daher nur bei einem stark ausgebildeten Ozonloch, das bis in den Dezember hinein existiert, nachgewiesen werden.

Dies war unter anderem 1990 der Fall. Die Kombination von niedrigem Sonnenstand erzeugte Strahlungsintensitäten, die die „Normalwerte“ um einen Faktor von 2 überstiegen. Vergleichende Messungen an einer anderen Antarktisstation zeigten sogar eine Verstärkung der biologisch gewichteten Veränderungen in der UV-B-Intensität um den Faktor 3.

Veränderungen der UV-B-Intensitäten wurden auch in mittleren Breiten der Südhemisphäre beobachtet. Messungen in Melbourne zeigten eine deutliche Antikorrelation zwischen der lokalen Ozonsäulendichte und der UV-B-Intensität. Dieser Effekt war besonders auffällig im Jahre 1987, als mit der Auflösung des antarktischen Polarwirbels besonders ozonarme Luft nach Norden floß. Die Südhemisphäre ist allgemein von UV-B-Änderungen am stärksten betroffen, da hier einerseits die Verluste des stratosphärischen Ozons am größten und andererseits kompensierende Effekte, wie die Zunahme des troposphärischen Ozons oder des troposphärischen Aerosols, am schwächsten ausgeprägt sind.

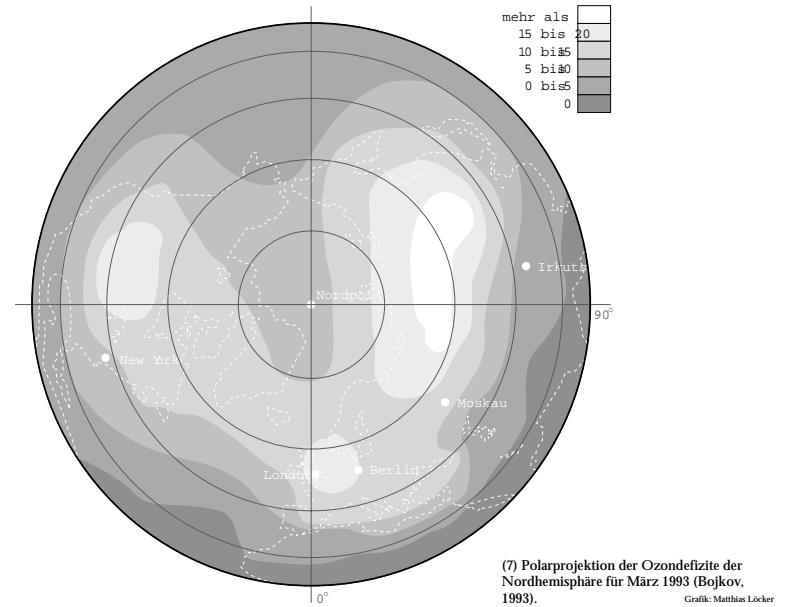
UV-B-Änderungen in der Nordhemisphäre sind trotz eines existierenden Meßnetzes praktisch noch nicht nachgewiesen worden. Dies ist vermutlich eine Folge der noch existierenden unzureichenden Qualität und Stabilität der Meßverfahren, als

auch der stärker kompensierenden Faktoren. Das Ausmaß der auf der Basis der beobachteten Ozonabnahmen in der Stratosphäre zu erwartenden Änderungen der UV-B-Intensität ist deshalb zur Zeit nur über Modellrechnungen feststellbar.

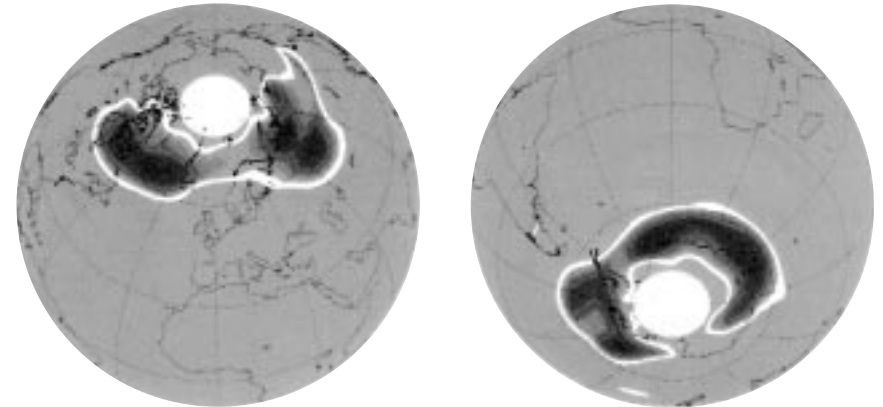
Das Ergebnis einer solchen Modellrechnung ist in Abbildung (6) dargestellt. Zur Grundlage der Berechnung von effektiven Dosisänderungen wurde in diesem Falle die biologische Responsfunktion der DNA-Zerstörung gewählt. Andere biologische Effekte wie die Erythemwirkung oder die Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums würden in Intensität und Ausdehnung eine andere Gewichtung zeigen. Die Ergebnisse sind aber nicht grundsätzlich verschieden.

Die gestrichelte Gerade in Abbildung (6) repräsentiert in etwa den Jahresverlauf der hinsichtlich der DNA-Zerstörung beobachteten Dosisänderung für die Bundesrepublik Deutschland. Danach beträgt die Zunahme der UV-Dosis im Januar/Februar bis zu 20 Prozent pro Jahrzehnt und geht im Juni/Juli auf einen Wert kleiner als 5 Prozent zurück. Im Jahresdurchschnitt beträgt die tägliche UV-Dosiszunahme etwa 7 Prozent pro Dekade. Aufgrund des Jahresgangs der absoluten Dosis, die ihr Maximum im Juni / Juli erreicht, leisten die Änderungen in den Sommermonaten den größten Beitrag zu einer erhöhten UV-B-Jahresdosis.

Die oben angeführten Berechnungen der UV-B-Änderung sind aber vermutlich in den belasteten Gebieten der Nordhemisphäre noch nicht wirksam. Sie werden durch den Zuwachs beim troposphärischen Ozon und beim Aerosol kompensiert. Beide sind unerwünschte Bestandteile der unteren Troposphäre; aber ihre Beseitigung würde mit großer Wahrscheinlichkeit die noch gefürchteteren UV-B-Änderung schneller wirksam werden lassen.



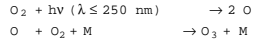
(7) Polarprojektion der Ozondefizite der Nordhemisphäre für März 1993 (Bojkov, 1993).
Grafik: Matthias Löcher



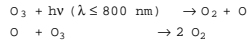
(8) Satellitenbeobachtungen des ClO-Radikals am 14. Februar 1993 in der Nordhemisphäre (links) und am 14. August 1992 in der Südhemisphäre (rechts), gemessen mit dem Mikrowelleninstrument MLS.
Quelle: Waters et al., 1993

Die Ursachen des stratosphärischen Ozonabbaus

Ozon wird in der Stratosphäre ausschließlich photochemisch gebildet. Die wesentliche Quelle ist die Sauerstoffphotodissoziation im Bereich des Herzberg-Kontinuums, gefolgt von der Rekombination der Sauerstoffatome mit molekularem Sauerstoff:

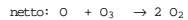
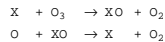


Hierbei ist M ein inerte Stoßpartner (N_2, O_2), der für die Stabilisierung des gebildeten Ozonmoleküls sorgt. Der alleinige Ablauf dieser Reaktionen würde zu sehr hohen Ozonkonzentrationen führen; nur durch die gleichzeitigen Abbaureaktionen



wird das Ozon auf das Niveau eines Spurengases begrenzt.

Mit diesem einfachen Modell ergeben sich Ozonverteilungen, die in ihrer Form der Realität nahekommen, deren Gesamtsäulendichte aber die beobachteten Mengen um einen Faktor 2 übersteigt. Der entscheidende Gedanke, die Ozonmengen richtig zu beschreiben, war das Postulat der katalytischen Zyklen, in denen das Ozon reduziert wird, ohne die Konzentration des „Katalysators“ zu beeinflussen, entsprechend des Zyklus:



Die erste Spurenstoffklasse, für die diese Eigenschaft entdeckt wurde, war die HO_x -Gruppe ($X = OH, XO = HO_2$). Diese Gruppe ist natürlichen Ursprungs. Sie wird gebildet

durch Reaktion von angeregten Sauerstoffatomen ($O(^1D)$) mit H_2O, H_2 und CH_4 .

Im Zusammenhang mit der beginnenden Diskussion über den Einfluß von Überschallflugzeugen auf die Stratosphäre wurde Anfang der 70er Jahre die katalytische Wirkung der NO_x -Gruppe ($X = NO, XO = NO_2$) entdeckt. Wenige Jahre später bereits kam die ClO_x -Gruppe ($X = Cl, XO = ClO$) hinzu, zunächst unter dem Aspekt der Chlorinjektionen durch die Booster von Träger raketen oder Orbitalflugobjekten und dann im Hinblick auf die Wirkung der anthropogenen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Die von den Halonen ausgehende Wirkung der BrO_x -Gruppe ($X = Br, XO = BrO$) wurde etwa zeitgleich vermutet. Für die Verbindungsklasse der FCKW wurde gegen Mitte der 70er Jahre erstmals nachgewiesen, daß alle bis dahin emittierten FCKWs sich praktisch in der Erdatmosphäre akkumuliert hatten und daß kein anderer Abbau als die Photolyse in der Stratosphäre möglich sein würde. Dies war der Beginn der intensiven Untersuchung der chemischen Vorgänge in der Stratosphäre.

Vollständige chemische Modelle des stratosphärischen Ozons behandeln heute etwa 30 verschiedene Spezies, die gemeinsam weit über 100 Reaktionen eingehen. Das Schema (1) zeigt beispielhaft den chemischen Zyklus der ClO_x -Spezies. Er ist gekennzeichnet durch die schnellen Interkonversionsreaktionen zwischen Cl und ClO, in denen – entsprechend dem allgemeinen Katalyseschema – O_x verbraucht wird. Über diese Interkonversionsreaktionen von ClO_x hinaus existieren Reaktionen, die ClO_x in temporäre Senken (HCl, $ClONO_2, HOCl$) überführen.

Das Konzentrationsniveau dieser „Senken“ ist erheblich höher, als das

der aktiven ClO_x -Spezies. Verbrauch und Reaktivierung von ClO_x erfolgen in Reaktionen mit HO_x und NO_x . Da diese aber selbst Katalysatoren des Ozonverbrauchs sind, ergibt sich eine starke Kopplung der Spurengaszyklen untereinander. Dies macht das System kompliziert und teilweise nichtlinear.

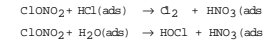
Eine Zunahme der katalytischen Spurengasgruppen des Ozonabbaus bedeutet eine Verringerung des Ozons. Innerhalb der letzten Jahrzehnte hat die stärkste Veränderung im Chlorgehalt stattgefunden. Während das natürliche Chlorniveau der Stratosphäre auf etwa 0,6 ppb abgeschätzt wird, betrug der tatsächliche Chlorgehalt im Jahre 1970 etwa 2 ppb und bereits 3 ppb im Jahre 1990. Das natürliche Niveau hatte sich bis zu diesem Zeitpunkt also bereits verfünffacht. Die Ursache ist die starke Zunahme der FCKW-Emissionen, insbesondere FCKW 11 (CCl_3F) und FCKW 12 (CCl_2F_2).

Starke Ozonverluste, wie sie im September bis Oktober eines jeden Jahres in der Stratosphäre über dem Südpol auftreten, können durch einen chemischen Zyklus wie in Schema (1) dargestellt nicht beschrieben werden. Die Chemie des „Ozonlochs“ hat andere Ausgangsbedingungen und Abläufe. Es ist eine Kombination von meteorologischer Konditionierung und anthropogener Störung der Ozonchemie.

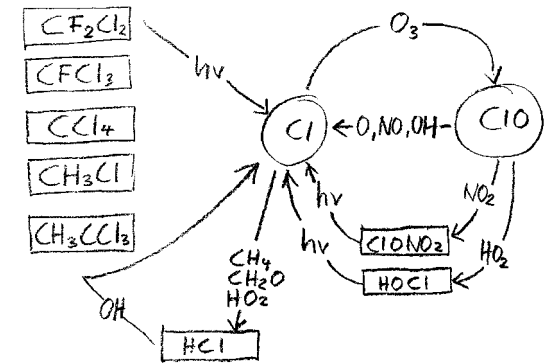
Die meteorologische Komponente ist der Einschluß der Luftmassen über dem Pol während des Winters, begleitet von extrem niedrigen Temperaturen bis zu minus 90 °C. Ein entscheidender begleitender Effekt, der mit der Temperaturabnahme verbunden ist, ist die Ausbildung von polaren stratosphärischen Wolken (PSCs); sie sind für den Ozonabbau von entscheidender Bedeutung. Dabei sind zwei verschiedene Arten von PSCs zu unterscheiden:

- Typ I: Salpetersäure/ H_2O -Aerosole mit der Stöchiometrie eines Trihydrats ($HNO_3 \cdot 3H_2O$). Sie entstehen bei Temperaturen von ≤ -80 °C; ihre Teilchengröße ist 1 μm . Während ihres Wachstums und bei tieferen Temperaturen wird weiteres Wasser und HCl in das Aerosol eingeschlossen.
- Typ II: Reine Wasser-Eis-Kristalle; sie entstehen bei ≤ -90 °C; ihre Teilchengröße ist ~ 10 μm . Aufgrund dieser Größe neigen Typ-II-PSCs zum Sedimentieren und damit zur Dehydratisierung der polaren Stratosphäre.

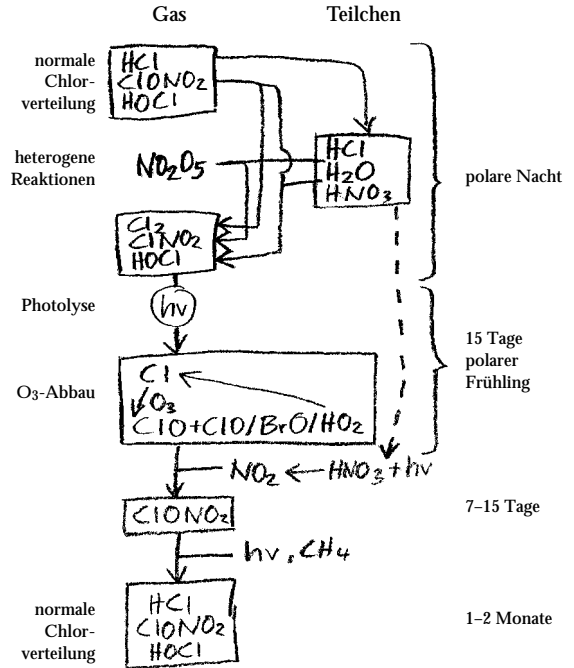
Das Auftreten der PSCs ist aus heutiger Sicht eine notwendige Voraussetzung für das Entstehen des Ozonlochs. PSCs sind chemisch nicht inert. Durch Reaktionen von $ClONO_2$, eine der bedeutendsten Senken von aktivem Chlor in der globalen Stratosphäre, mit HCl oder H_2O an den Oberflächen der PSCs, kommt es zur Bildung von Cl_2 bzw. HOCl.



Dieses entspricht einer Umverteilung von Chlor aus wenig aktiven Senken in aktivere Formen bei gleichzeitiger Auskondensation der Stickstoffkomponente. Diese Prozesse laufen im Dunkeln während des Polarwinters ab. Die relativ langwellige Strahlung der tiefstehenden Sonne zu Frühjahrsbeginn ist ausreichend, um Cl_2 und HOCl unter Bildung von Chloratomen zu dissoziieren. Die so freigesetzten Cl-Atome reagieren mit O_3 unter Bildung von ClO-Radikalen. Dies erklärt den beobachteten Anstieg von ClO zu Beginn der Ausbildung des Ozonlochs. Der eigentliche Ozonabbau kann aber über die konventionelle ClO_x -Kette (siehe oben) nicht geleistet werden, da praktisch keine Sauerstoffatome vorhanden sind, die über $O + ClO \rightarrow Cl + O_2$ die Cl-Atome zurückbilden und den

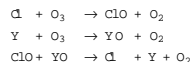


Schema (1): Darstellung des chlorinduzierten Ozonabbauzyklus.



Schema (2): Die chemische Entwicklung von Chlorverbindungen vor, während und nach Ausbildung des antarktischen Ozonlochs (Zellner, 1992).
Grafiken (2): Matthias Löcker

Katalysatorzyklus schließen. Es sind deshalb modifizierte Katalysatorzyklen von der Form



wichtig, wobei als Kettenträger $\text{Y} = \text{Cl}, \text{Br}$ und OH infrage kommen.

Die Sequenz von PSCs-Bildung, Aktivierung der Chlorkomponenten durch heterogene Reaktionen und ein Ozonabbaukatalysezyklus durch Disproportionierung der ClO -Radikale ist im Schema (2) zusammengefaßt. Diese Sequenz ist plausibel, konsistent mit den Beobachtungen und weitgehend durch neuere Laboruntersuchungen abgedeckt.

Summary

The depletion of the stratospheric ozone layer is one of the most severe changes of the Earth's atmosphere ever observed. The most notable phenomenon is the so-called ozone-hole, an annually recurring strong depletion of the ozone layer over the Antarctic during September/October. Since its first discovery in 1985 the ozone-hole has continuously grown. During the last few years more than 50 % of the total ozone content was lost at maximum evolution of the hole with its size spreading to more than 20 million km^2 or 8 % of the total area of the southern hemisphere. However, significant downward trends of the ozone concentration are also observed outside the South Polar Region. Of particular worry is the -8 % decadal trend during the winter months in mid-latitudes including the Federal Republic of Germany. According to recent observations these ozone losses are a result of an amplified ozone destruction mechanism during winter,

similar to the mechanism responsible for the ozone loss over Antarctica during the ozone-hole episode. Only meteorological differences between the hemispheres have prevented the formation of an ozone-hole over the Arctic so far.

The causes of stratospheric ozone depletion are exclusively of anthropogenic origin. CFC's and (to a lesser extent) halons tend to perturb the chain mechanisms of photochemical ozone destruction. As a consequence the stationary ozone concentration is reduced. Compensating effects due to increased ozone formation at lower altitudes have not been observed.

A particularly strong contribution to the ozone loss is induced by heterogeneous processes on ice particles during the polar night. As a result of reactions on the surface of these particles, chlorine containing reservoir species are activated to such an extent that additional chain-carrying radicals are produced once the sun re-appears during polar spring. This phenomenon is well documented to be the cause of the ozone-hole over Antarctica. However, in the northern hemisphere and during winter similar coupling processes between meteorology and chemistry have been observed.

The depletion of the stratospheric ozone layer has a number of consequences for the chemistry and the dynamics of the stratosphere. Since ozone is an infra-red active gas, its losses in the lower stratosphere also influence the Earth's climate. However, in the current view the most dramatic consequence of ozone depletion is its potential impact on humans and the biosphere due to increased UV-B radiation. Current model investigations show that the observed ozone losses in mid-latitudes of the northern hemisphere should have led to an increase of the UV-B intensity of +7 %/decade. This change, however, has as yet not been confirmed by experiment. Moreover, it cannot be excluded that

a change of this size is partially masked by air pollution, in particular in continental air masses.

Der Autor:

Reinhard Zellner studierte von 1965 bis 1971 Chemie und Physik an der Universität Göttingen und promovierte mit einer Arbeit über schnelle Wasserstoffatomreaktionen zum Dr. rer. nat. In den Jahren 1972 und 1973 war er Post-doctoral Research Fellow am Department of Physical Chemistry in Cambridge/England. 1979 und 1980 folgte eine Berufung als Visiting Associate Professor an das Department of Chemistry in Austin/Texas, USA. 1980 habilitierte sich Zellner für das Fach Physikalische Chemie im Fachbereich Chemie der Universität Göttingen mit dem Thema „Nicht-Arrheniusverhalten bimolekularer Elementarreaktionen“, 1982 wurde er zum Professor auf Zeit ernannt. Gleichzeitig erhielt er ein Heisenberg-Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft. 1985 wurde ihm der Titel eines Außerplanmäßigen Professors zuerkannt, 1988 wurde er zum Professor für Spezielle Physikalische Chemie an der Universität Hannover ernannt. 1991 wurde Reinhard Zellner auf die Stelle eines ordentlichen Professors für Physikalische Chemie an die Universität Essen berufen. Der Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen Arbeiten sind Reaktionskinetik und Photochemie mit spezieller Anwendung auf Fragen der Chemie der Atmosphäre. Er ist Mitglied der Deutschen Bunsengesellschaft und der Gesellschaft Deutscher Chemiker und Vorsitzender der Arbeitsausschüsse „Schutz der Erdatmosphäre“ und „Ökobilanzen“ der DECHEMA e.V. In den Jahren 1987 bis 1990 war er Mitglied der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages. Seit 1988 ist er Koordinator des Ozonforschungsprogramms des BMFT und Mitglied des Klimabeirats der Bundesregierung. Im Jahre 1992 wurde er zum Mitglied der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ berufen.

Literatur:

- R. D. Bojkow, 1993: WMO-Bulletin.
- S. Madronich, 1992: Geophys. Res. Lett. 19, 37.
- D. W. Waters, L. Froideveaux, W. G. Read, G. L. Manney, L. S. Elson, D. A. Flower, R. F. Jarnet, R. S. Harwood, 1993: Nature 362, 597.
- WMO-25 1992: *Scientific Assessment of Stratospheric Ozone 1991*. World Meteorological Organization, Report No. 25, Genf.
- WMO 1992: *WMO and the ozone issue*. World Meteorological Organization, Genf.
- R. Zellner, 1992 in *Orbital Transport: Meteorological and Chemical Aspects*, H. Oertel, H. Kömer (Eds.), Springer-Verlag.

Seit unser Planetensystem existiert, ist es ionisierender Strahlung ausgesetzt. Das Leben auf der Erde ist unter der Einwirkung dieser Strahlen entstanden. Strahlenbelastungen gehören also zur natürlichen Umgebung. Doch seitdem der Mensch mit strahlenden Substanzen im Rahmen von Technik und Medizin in enge und dauerhafte Berührung gekommen ist, ist offensichtlich auch das Risiko, strahlenverursacht an Krebs zu erkranken, angestiegen. Inzwischen kommt eine neue Bedrohung hinzu: Vieles deutet darauf hin, daß Hautkrebskrankungen mit der Abnahme des stratosphärischen Ozons und des damit verbundenen Anstiegs der UV-B-Strahlung zunehmen werden.

Belastungsfolge Krebs

Ionisierende Strahlen: Wirkungen und Schutzstandards

Von Christian Streffer

Bereits bevor die ionisierenden Strahlen mit dem Ende des 19. Jahrhunderts durch Wilhelm Conrad Röntgen (1895) und Henri Becquerel (1896, natürliche Radioaktivität) entdeckt und ihre physikalischen Eigenschaften beschrieben wurden, waren durch ionisierende Strahlung hervorgerufene Krankheiten in der Medizin bekannt. Bereits im 15. Jahrhundert berichten Quellen von typischen Strahlenerkran-

kungen, die bei sächsischen Bergleuten der Schneeberger Erzgruben festgestellt wurden. Doch erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erkannte man, daß es sich bei diesen Krankheiten um Lungenkrebs handelte; und etwa ab der Mitte dieses Jahrhunderts stand schließlich fest, daß diese Krebserkrankungen zu einem erheblichen Teil durch das radioaktive Radon und seine ebenfalls radioaktiven Folgeprodukte bei

den Bergarbeitern hervorgerufen wurden.

Bereits Becquerel hatte aufgrund einer Hautrötung am Oberschenkel, die durch das Tragen eines Radiumpräparates in der Hosentasche verursacht worden war, festgestellt, daß diese Strahlung biologische Effekte hervorruft. In den ersten Jahren und Jahrzehnten nach der Entdeckung der ionisierenden Strahlen sind dann Zug um Zug auch ihre Wirkungen

beschrieben worden; sowohl ihre Fähigkeit, Hautkrebs und Leukämien – vorwiegend bei Röntgentechnikern und Ärzten – auslösen zu können, wie auch ihre krebshilende Wirkung. Im Jahre 1927 wurde an der Tauffliege (*Drasophila*) nach Röntgenbestrahlung zum ersten Mal erkannt, daß durch äußere Einflüsse dieser Art das Erbmaterial verändert werden kann. So haben experimentelle Ergebnisse und klinische Erfahrungen zur Strahlenwirkung dazu geführt, daß bereits in den 20er Jahren die ersten Dosisricht- bzw. Dosisgrenzwerte festgelegt wurden. Dabei ging man davon aus, daß bereits kleinste Dosen Wirkungen haben und diese Wirkungen mit der Höhe der Dosierung zunehmen – also von einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis. Durch diese und ähnliche Befunde wurden die Konzepte des Strahlenschutzes für den Arbeits- und Umweltschutz entscheidend beeinflusst. Obwohl die biologisch-medizinische Forschung also bereits in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts viele Erkenntnisse über nutz- und heilbringende Anwendungen wie

auch Schädigungen von ionisierenden Strahlen zu Tage befördert hat, sind intensive systematische, quantitative Untersuchungen zum Risiko der Krebsentstehung beim Menschen durch Strahlung (*karzinogenes Strahlenrisiko*) jedoch erst nach den Katastrophen von Hiroshima und Nagasaki im August 1945 begonnen worden. Doch bevor diese Wirkungen beschrieben werden, sollen Art und Umfang der Strahlenbelastung, denen die Bevölkerung in unserem Land ebenso wie in anderen westlichen Industrieländern normalerweise ausgesetzt ist, umrissen werden.

Die alltägliche Strahlenbelastung

Obwohl ionisierende Strahlen heute in großem Umfang in Medizin und Technik angewendet werden, geht der größte Teil der Strahlenbelastung (*Strahlenexposition*) auf natürliche Quellen zurück (Tab. 1). Bei der natürlichen Strahlenexposition des Menschen kommt es zu einer Bestrahlung von außen und von innen. Die externe Strahlenexposition setzt sich zusammen aus einer kosmischen Strahlung, die mit der Höhe

des Standortes über dem Meeresspiegel korreliert, und aus einer terrestrischen Komponente, die von dem Gehalt natürlicher radioaktiver Stoffe in den Böden und im Gestein abhängt. Die Radionuklidkonzentrationen sind in einzelnen Regionen Deutschlands außerordentlich unterschiedlich (um den Faktor 5 und höher). So gibt es hohe Gehalte natürlicher radioaktiver Stoffe in den Böden des Schwarzwalds, im Bayerischen Wald, im Saarland und im südlichen Sachsen, sehr niedrige Gehalte in der Norddeutschen Tiefebene.

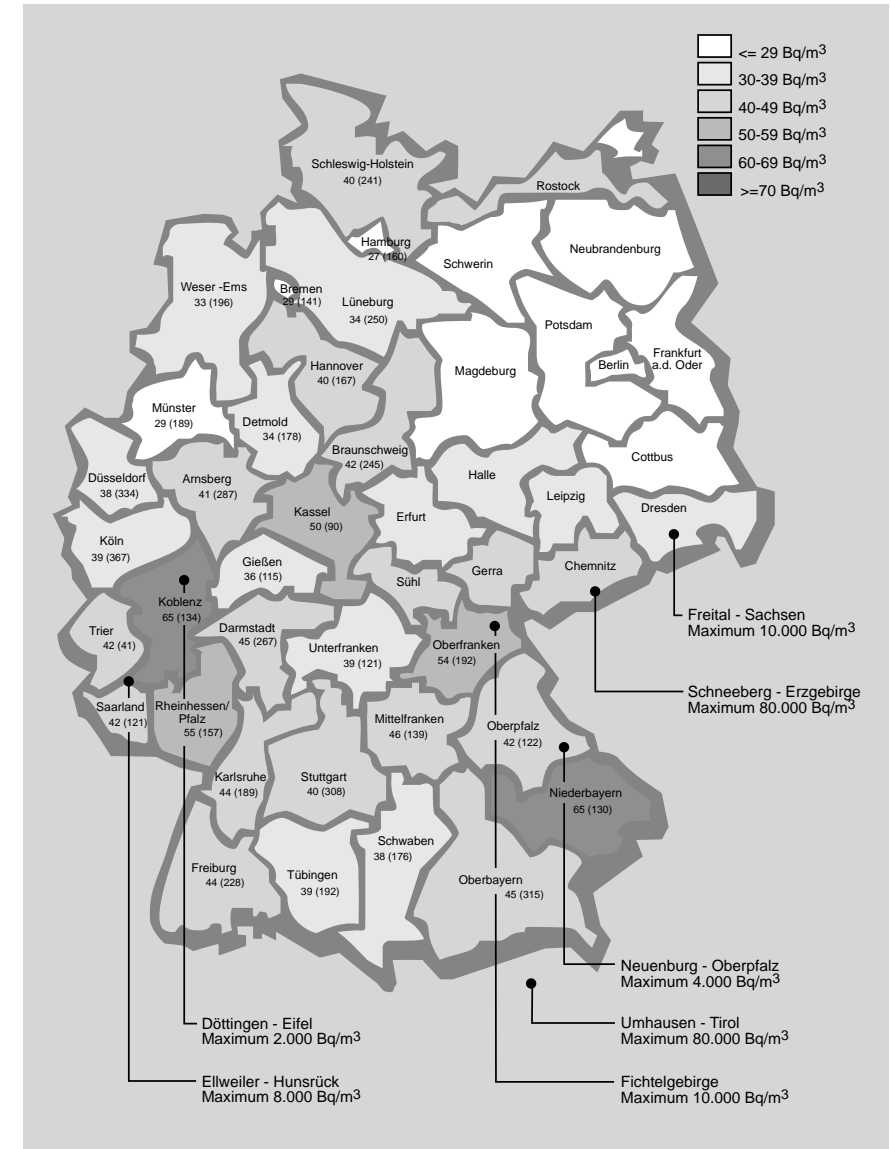
Die Bestrahlung von innen wird durch die Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung und der Atemluft verursacht (siehe Tab. 1). Auch hier gibt es erhebliche regionale Unterschiede. Sie sind besonders groß bei der Exposition des Menschen durch das radioaktive *Radon* und seine radioaktiven Folgeprodukte. Beim Zerfall dieser radioaktiven Stoffe entsteht *Alpha-Strahlung*, die in der Luft und im Gewebe rasch absorbiert wird und daher nur eine sehr geringe Reichweite hat. Eine nennenswerte Exposition tritt in den meisten Fällen erst ein, wenn diese radioaktiven Stoffe in den menschlichen Körper aufgenommen werden. Dieses gilt auch für das zur Zeit sehr stark diskutierte Plutonium-239.

Die Einnahme des Radons und seiner Folgeprodukte mit der Atemluft führt zu einer hohen örtlichen Exposition der Lunge und der Bronchien, die in dieser Höhe in keinem anderen Organ oder Gewebe durch natürliche Expositionen erreicht wird. Die mittlere Konzentration an Radon in der Raumluft deutscher Wohnungen liegt bei etwa 50 Bq (*Becquerel*) pro Kubikmeter. Es gibt jedoch auch Regionen in Deutschland, in denen ein Mehrfaches dieser Radonkonzentration im Mittel gemessen werden kann. In einzelnen Häusern können extrem hohe Konzentrationen von einigen 10.000 Bq pro Kubikmeter Raumluft auftreten (Abb. 2).

1) Mittlere Dosis (effektive Dosis) der Strahlenbelastung der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1990*

1. Natürliche Strahlenexposition	ca. 2,4 mSv
1.1 durch kosmische Strahlung	ca. 0,3 mSv
1.2 durch terrestrische Strahlung von außen	ca. 0,5 mSv
1.3 durch Inhalation von Radon und Folgeprodukten (Lungendosis ca. 10,8 mSv)	ca. 1,3 mSv
1.4 durch Ingestion von radioakt. Stoffen	ca. 0,3 mSv
2. Zivilisatorische Strahlenexposition	ca. 1,55 mSv
2.1 durch Anwendung radioakt. Stoffe und ionisier. Strahlen in der Medizin	ca. 1,50 mSv
2.2 durch kerntechnische Anlagen	< 0,01 mSv
2.3 durch andere Quellen und Tätigkeiten	ca. 0,04 mSv
3. Strahlenexposition durch den Reaktorunfall Tschernobyl	ca. 0,025 mSv

*Quelle: Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Jahresbericht 1990



(2) Radonkonzentration in Häusern. Die Klammerwerte geben die Anzahl der untersuchten Häuser wieder. Einteilung nach Regierungsbezirken, Stand: 1985 für Westdeutschland, 1993 für Ostdeutschland, vorläufig. Quelle: Biophysik Hamburg.

Der höchste Anteil der auf menschliche Technik zurückgehenden (*anthropogenen*) Strahlenexposition stammt aus der Anwendung von ionisierenden Strahlen in der Medizin. Er kommt vor allem durch den diagnostischen Einsatz der Röntgenstrahlen und von radioaktiven Stoffen zustande (siehe Tab. 1). Dabei fallen die hohen individuellen Strahlendosen bei der Therapie von Tumoren für den Mittelwert pro Kopf der Bevölkerung kaum ins Gewicht. Die Ermittlung der Strahlenexpositionen in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen kann hier nicht im einzelnen beschrieben werden, doch im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition betragen diese Dosen selbst in der unmittelbaren Nähe von Kernkraftwerken nur einen Bruchteil der Dosis aus natürlichen Quellen. In der Folge der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl ist es dagegen zu einer meßbaren Zunahme von radioaktiven Stoffen in unserer Umwelt gekommen: Nach der Erhöhung des radioakti-

ven Jod-131 innerhalb der ersten Wochen sind es vor allem die radioaktiven Isotope des Caesium gewesen, die auf dem Boden abgelagert worden sind und die auch heute noch meßbar zur Strahlenexposition unserer Bevölkerung beitragen. Vor dieser Reaktorkatastrophe waren es vor allem die atmosphärischen Kernwaffentests der Supermächte, die - besonders zu Beginn der 60er Jahre - eine Belastung durch die Radionuklide des Caesiums und des Strontiums verursacht haben.

Biologische Wirkungen

Zur Risikobewertung eines Giftstoffes (*toxisches Agens*) ist es unabdingbar, die Dosis-Wirkungs-Beziehungen zu kennen. Dieses gilt für chemische Schadstoffe ebenso wie für ionisierende Strahlen. In der Strahlenbiologie und im Strahlenschutz werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Typen von Dosis-Wirkungs-Beziehungen zur Risikoabschätzung herangezogen (Abb. 3). Beim ersten Typ muß eine Schwellendosis überschritten werden, bevor Effekte eintreten. Nach Überschreiten dieser Schwellendosis nimmt die Zahl der Schäden und der Schweregrad der Erkrankung mit steigender Dosis zu. Diese Kategorie von Strahlenwirkungen wird als *nichtstochastisch* oder *deterministisch* bezeichnet. Die Untersuchung der Mechanismen dieser Art von Strahlenwirkung hat ergeben, daß zur Auslösung ihrer Effekte multizelluläre Prozesse notwendig sind: Nur wenn viele Zellen durch die Bestrahlung geschädigt werden, zeigen sich Wirkungen wie beispielsweise akute Strahleneffekte bei der Blutzellerneuerung. Die Schwellendosen liegen dabei höher als diejenigen Strahlenexpositionen, die durch natürliche Strahlenquellen verursacht werden (siehe Tab. 1). Damit sind derartige Wirkungen im allgemeinen auch nicht durch Strahlenexpositionen in der medizinischen Diagnostik oder durch kerntechnische Anlagen

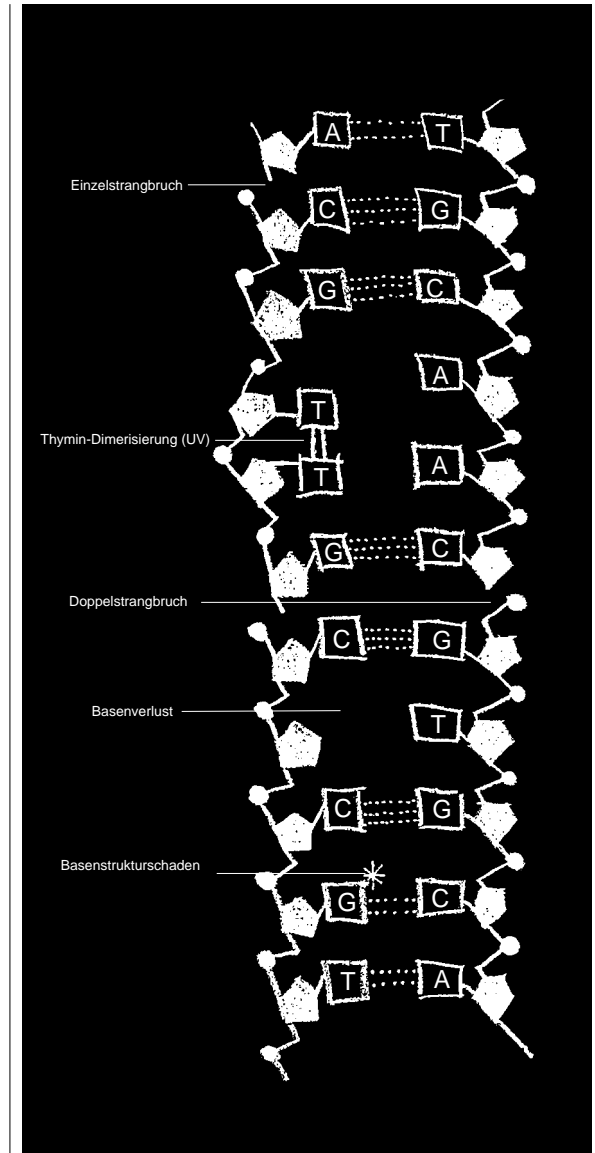
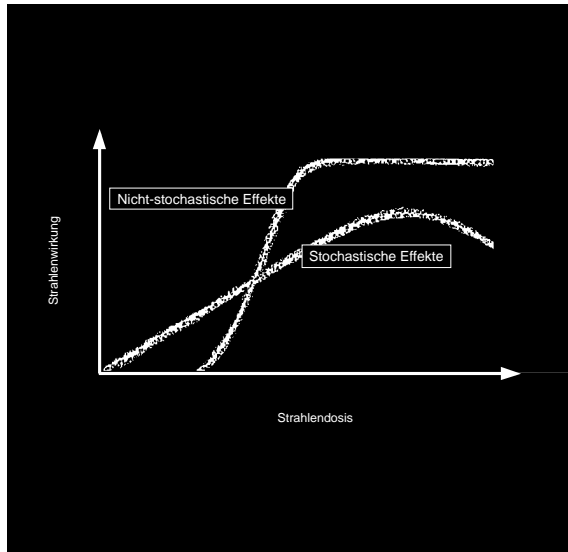
im Normalbetrieb zu erwarten. Sie können jedoch nach Strahlendosen, die in der Strahlentherapie von Tumoren eingesetzt werden, oder bei schweren Unfällen in kerntechnischen Anlagen auftreten. In diese Kategorie fallen vor allem alle akuten Strahleneffekte und Späteneffekte in Geweben und Organen, die nicht zu bösartigen (*malignen*) Krebserkrankungen führen.

Beim zweiten Typ der Dosis-Wirkungs-Beziehungen wird angenommen, daß es *keine* Schwellendosis für diese Strahlenwirkungen gibt. Diese Annahme wird auf der Basis wissenschaftlicher Daten zu den Wirkungsmechanismen und aus Gründen der Vorsorge gemacht, denn unter dieser Voraussetzung ist davon auszugehen, daß auch Strahlenexpositionen in niedrigen Dosisbereichen biologisch-medizinische Effekte auslösen. Eine *stochastische* Dosis-effektkurve dieser Art ist zu erwarten, wenn primäre Schäden in einer einzelnen Zelle bereits zur Entwicklung eines solchen Effektes führen. In die Gruppe dieser sogenannten stochastischen Strahlenwirkungen fallen die Auslösung von Krebs, von genetisch vererbaren Erkrankungen sowie der Zelltod - der Zustand einer Zelle, in dem sie nicht mehr in der Lage ist, als Stammzelle zu fungieren und damit nicht mehr zur Zellerneuerung in geschädigten Geweben beitragen kann. Die Frage, ob tatsächlich Dosis-Wirkungs-Beziehungen ohne Schwellendosis existieren und für welche Effekte dieses der Fall ist, ist von zentraler Bedeutung für die Bewertung von Strahlenrisiken. Daher soll dieser Problematik später ein besonderer Stellenwert zugemessen werden.

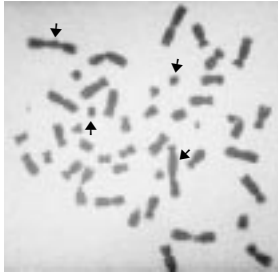
Strahlenwirkung: Grundlegende Phänomene

Wenn biologische Materie ionisierenden Strahlen ausgesetzt ist, führt dies zunächst zu einer Energieabsorption, die die Bildung von *Radikalen* - sehr reaktionsfreudige

(3) Grundtypen von Dosis-Wirkungs-Beziehungen der Strahlenexposition.
Grafik: Ralph Schöngeler



(4) Einige Grundtypen der Schädigung doppelsträngiger DNS-Moleküle durch DNS-reaktive Agentien (Mutagene, Kanzerogene) einschließlich ionisierender Strahlen.
Grafik: Ralph Schöngeler



(5) Mitose (Metaphase) eines bestrahlten menschlichen Lymphocyten mit Chromosomenaberrationen (2 dicentrische Chromosomen und Chromosomenbrüche).

Atomgruppen und Molekülen – und andere Ionisationsereignisse im bestrahlten Material zur Folge hat. Infolgedessen treten chemische Veränderungen in den Molekülen der Zelle auf. Für die Entwicklung biologischer Strahlenschäden sind die Veränderungen im genetischen Material einer Zelle, in der *Desoxyribonukleinsäure* (DNS), von entscheidender Bedeutung. So können in der Doppelhelix der DNS durch ionisierende Strahlen Brüche der *Polynukleotidstränge* hervorgerufen werden, die zu einem Einzelkettenbruch oder, wenn in beiden komplementären Polynukleotidketten derartige Schäden verursacht werden, zu einem Doppelkettenbruch führen. Darüber hinaus können die *Purin-* und *Pyrimidinbasen*, die in ihrer Abfolge die genetische Information der DNS beinhalten, durch strahlenchemische Reaktionen verlorengehen oder verändert werden (Abb. 4).

In jeder Zelle gibt es sehr effiziente Reparatursysteme, die in der Lage sind, einen erheblichen Teil dieser Strahlenschäden zu heilen¹. Molekularbiologische Untersuchungen haben ergeben, daß vor allem Einzelstrangbrüche und Basenschäden außerordentlich schnell und in großem Umfang von der Zelle selbst repariert werden können. Dagegen sind derartige Mechanismen bei der Reparatur von Doppelstrangbrüchen in der Zelle langsamer und auch weniger vollständig. Es wird heute allgemein angenommen, daß bei der Zellabtötung die verbliebenen Doppelstrangbrüche eine wichtige Rolle spielen. Doppelstrangbrüche der DNS tragen auch dazu bei, daß in den Chromosomen Strukturabweichungen und Brüche (*Aberrationen*) auftreten. Dabei können einerseits Bruchstücke von Chromosomen entstehen, andererseits können aber auch Stücke eines Chromosoms auf ein anderes Chromosom übertragen werden (*Translokationen*), Teile der DNS verlorengehen (*Deletionen*), es können Ringchromosomen, Chromosomen

mit mehreren *Zentromeren* und andere Schäden auftreten (Abb. 5).

Diese Aberrationen werden weiterhin unterschieden in stabile (Translokationen, Deletionen, *Inversionen*) und instabile Chromosomenaberrationen (Chromosomenbrüche, Ringchromosomen, dicentrische Chromosomen). Dies findet seine Begründung darin, daß Zellen mit stabilen Chromosomenaberrationen in vielen Fällen als veränderte, aber sich weiter fortpflanzende (*klonogene*) Stammzelle weiterleben können; solche Zellen werden auch in Tumoren gefunden. Dagegen können Zellen mit instabilen Aberrationen nicht als Stammzelle fungieren. Sie können sich möglicherweise noch ein oder zweimal teilen, sterben dann jedoch ab.

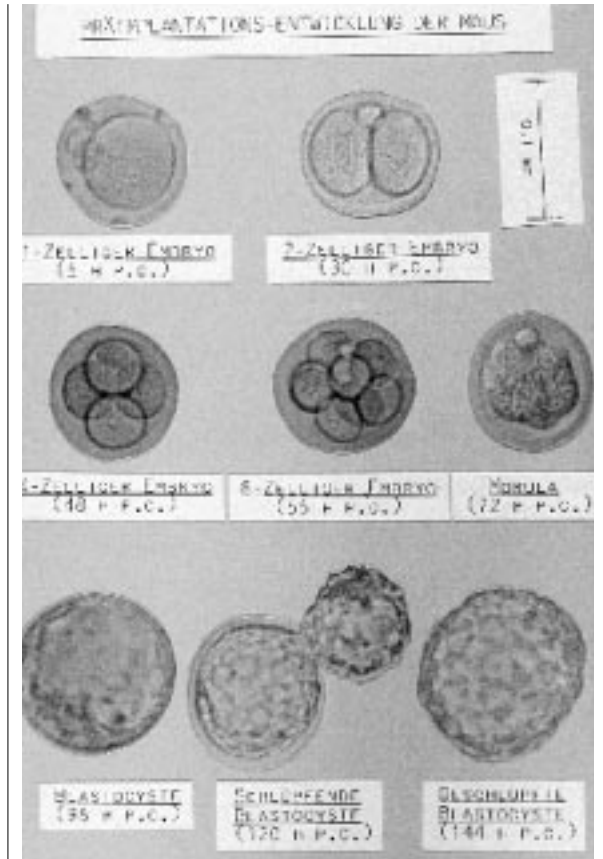
Untersuchungen an embryonalen Zellen haben gezeigt, daß diese Chromosomenaberrationen nicht in allen Fällen bereits während der ersten Zellteilung (*Mitose*) nach einer Bestrahlung auftreten, sondern daß neue Chromosomenaberrationen oftmals erst zwei oder drei Mitosen nach der Bestrahlung von der Zelle umgesetzt (*exprimiert*) werden. Für diese Untersuchungen sind einzellige Mäuseembryonen (*Zygoten*, Abb. 6) wenige Stunden nach der Befruchtung bestrahlt worden. Es sind dann die instabilen Chromosomenaberrationen während der ersten Zellteilung (vom Ein- zum Zweizeller), in der zweiten Zellteilung (vom Zwei- zum Vierzeller) und in der dritten Zellteilung (vom Vier- zum Achtzeller) gemessen worden. Dabei hat sich mit fortschreitender Entwicklung eine erhebliche Zunahme der Chromosomenaberrationen ergeben.

Diese Beobachtung macht deutlich, daß der Strahlenschaden sich offensichtlich auf chromosomaler Ebene während der Zellvermehrungsprozesse weiterentwickelt und sich erst später als tödlicher Strahlenschaden für die Zelle manifestiert – oder die Zelle mit einer Mutation über viele Generationen weiterlebt.

Diese Daten zeigen jedoch auch, daß ionisierende Strahlen die DNS oder die Chromosomen nicht „zerstrahlen“ oder „atomisieren“. Es sind vielmehr durchaus spezifische Prozesse, die zu den Strahleneffekten führen. Dieses kann auch daraus ersehen werden, daß die Strahlenergie, die einen Säugerorganismus abtötet, nur eine Temperaturerhöhung von etwa 0,002 °C bewirken würde, wenn die absorbierte Strahlenergie in thermische Energie umgewandelt würde.

Bei diesen Chromosomenuntersuchungen kann aufgrund ihrer Anlage mit Sicherheit davon ausgegangen werden, daß der Strahlenschaden – die Chromosomenaberration – von *einer* Zelle ausgeht. Infolgedessen ergibt sich hier eine Dosis-Wirkungs-Beziehung für ein Auftreten von chromosomalen Schäden, die keine Schwellendosis hat. Damit kann nun die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der Chromosomenaberrationen pro bestrahlter Zelle zu erwarten sind. Diese Frequenz liegt in Abhängigkeit vom biologischen System bei etwa 5×10^{-1} bis 10^{-3} pro Sv (*Sievert*) – was besagt, daß von 1.000 mit einem Sv bestrahlten Zellen etwa eine bis 500 Zellen eine Aberration aufweisen werden. Durch die Versuche wird ferner die allgemeine Erfahrung unterstrichen, daß für die Entwicklung zellulärer Strahlenschäden die Zellteilung und -vermehrung (*Proliferation*) von erheblicher Bedeutung ist: Organe und Gewebe, in denen eine erhebliche Zellproliferation stattfindet, sind entsprechend anfälliger gegenüber akuten Strahlenschäden als andere mit geringer Zellproliferation.

Die spezifische Strahlenempfindlichkeit von Zellen wird mit Hilfe eines sogenannten Klonogenitätstests ermittelt. Bei diesem Test entwickelt sich innerhalb von wenigen Tagen aus einzelnen Zellen eine Zellkolonie. Trägt man die erhaltenen Überlebensraten im logarithmischen Maßstab gegen die Strahlendosis auf,



(6) Präimplantationsentwicklung der Maus vom einzelligen Embryo über den sogenannten „Maulbeerkeim“ (erster, durch Furchungsteilung entstandener Zellhaufen; *Morula*) bis zur Keimblase (*Blastocyste*). Die Klammerwerte geben die Stunde nach der Befruchtung an.

Quelle: W. U. Müller und C. Streffer/Universität GH Essen

so erhält man in den meisten Fällen eine gekrümmte Dosis-Wirkungs-Beziehung (Abb. 7). In der Krümmung der Kurve (Schulter) spiegeln sich die sehr intensiven, intrazellulären Erholungs- und Reparaturvorgänge. Es gibt jedoch Personen, bei denen aufgrund eines genetischen Defektes einzelne Systeme der DNS-Reparaturprozesse nicht mehr oder nur in geringerem Maße wirksam sind. Zu diesen genetisch bedingten Zellreparaturdefekten (*Repairdefizienz*) zählen Erkrankungen wie *Xeroderma pigmentosum* und *Ataxia telangiectasia*, die sich in einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Strahlenexpositionen äußern².

Bei der erstgenannten Repairdefizienz (*Xeroderma*) geht es darum, daß durch ultraviolettes Licht (UV) erzeugte DNS-Schäden nicht oder nur in geringem Maße repariert werden können. Da UV-Licht bereits in der Haut absorbiert wird, sind daher auch nur die Zellen dieses Organes betroffen. Durch das UV-Licht des Sonnenlichtes werden Hautschädigungen hervorgerufen, die sich in Sonnenbrand, Geschwürbildungen (*Ulcerationen*) und Krebs äußern. In diesem Zusammenhang sind die DNA-Reparaturprozesse von eminenter Bedeutung. Bei den Personen, die an einer *Xeroderma pigmentosum* leiden, treten derartige Veränderungen bereits durch sehr geringe Sonnenlichtintensitäten ein, so daß die erkrankten Personen in hohem Maße gefährdet sind.

Allgemein haben in den letzten Jahrzehnten die Hautkrebserkrankungen wegen des vermehrten Sonnenbadens, unter anderem durch die hohe Beliebtheit von Urlaubsfahrten in das Mittelmeergebiet, erheblich zugenommen. Dieses gilt sowohl für die sehr bösartigen *Melanome* (schwarzer Hautkrebs) als auch für andere Hautkrebsarten. Das hierdurch bedingte Erkrankungsrisiko wird durch die Abnahme der Ozonschicht in der Stratosphäre noch zunehmen. In Australien werden

solche Effekte einschließlich des Anstiegs der Hautkrebsrate seit Jahren beobachtet.

Bei der zweiten Erkrankung mit Repairdefizienz (*Ataxia telangiectasia*) besteht eine sehr starke Einschränkung in der Reparaturfähigkeit der Zellen von DNS-Schäden, die durch *Gamma*- oder Röntgenstrahlung verursacht werden können. Dadurch ergibt sich bei diesen Personen eine erheblich höhere Strahlenempfindlichkeit als bei Normalpersonen. Im Klonogenitätstest wird dies sichtbar: Die Dosis-Wirkungskurve verliert ihre Schulter und verläuft bei dem halblogarithmischen Auftragsmodus auch im niedrigen Dosisbereich linear (Abb. 7).

Ataxia telangiectasia ist eine genetisch ausgelöste Erkrankung, die nur bei *homozygoten* Erträgern auftritt, Erträgern, die in ihren Erbanlagen die sie auslösenden Merkmale einer Form besitzen, bei der es immer zur Ausprägung kommt. Diese Merkmalskonstellation ist in unserer Bevölkerung sehr selten, sie tritt mit einer Chance von etwa einem Fall unter 40.000 bis 100.000 Personen auf. Neuere Untersuchungen haben allerdings ergeben, daß auch heterozygote Erträger – die in unserer Bevölkerung in der Häufigkeit von einigen Prozent zu finden sind – eine höhere Strahlenempfindlichkeit als Normalpersonen haben, wenn auch in geringem Maße als *homozygote* Erträger. Letztlich heißt dies, daß bezüglich der individuellen Strahlenempfindlichkeit innerhalb der Bevölkerung eine erhebliche Variabilität besteht und daß intrazelluläre Erholungsprozesse hierfür von großer Bedeutung sind. Wie die Dosis-Wirkungs-Beziehungen in Abbildung (7) zeigen, überleben bei einer Dosis von vier *Gy* (*Gray*, Sv) bei den normalen *Fibroblasten* etwa 60 bis 70 Prozent der Zellen, während es bei den *Fibroblasten* der Patienten mit *Ataxia telangiectasia* nur etwa ein Prozent sind.

Erkrankungen an einer Repairdefizienz sind heute mit Hilfe mole-

kularbiologischer Methoden am Genom des Menschen nachweisbar. Es können daher nicht nur *homozygote* sondern auch *heterozygote* Erträger erkannt werden. Damit stellt sich die Frage, ob Personen mit derartigen genetischen Merkmalen an Arbeitsplätzen, die als strahlengefährdet eingeschätzt werden müssen, tätig werden sollen. Das gleiche Problem tritt – in weitaus größerem Umfang – bei Arbeitsplätzen auf, an denen Expositionen durch chemische Karzinogene nicht auszuschließen sind. Nicht zuletzt aus ethischen Gründen wird gegenwärtig diskutiert, ob es stattdessen ist, dergleichen Analysen durchzuführen und auf ihrer Basis Auswahlkriterien für Arbeitsplätze festzulegen. Der Europarat, dem 32 Mitgliedsstaaten angehören, hat kürzlich eine *European Convention on Bioethics* verabschiedet, die genetische Tests außer zu Zwecken der biologischen und medizinischen Forschung verbietet. Unternehmen dürfen jedoch weiterhin einen genetischen Test fordern, wenn Personen aufgrund bestimmter Arbeitsbedingungen und ihrem individuellen Gesundheitszustand ein besonderes Krankheitsrisiko eingehen würden.

Akute Strahlenwirkungen

Akute Strahleneffekte treten vor allem in solchen Geweben und Organen ein, die einen hohen Zellumsatz haben – in denen also unablässig eine Zellerneuerung stattfindet. Dies sind in erster Linie die sich ständig regenerierenden inneren und äußeren Häute des Menschen (*Epithelien*), das blutzelnerneuernde Knochenmark und der keimzellbildende Hoden (*Spermiogenese*). Nach einer Bestrahlung ab etwa einem Sv kommt es zu einer Störung der Zellproliferation oder zur Abtötung von Stammzellen. Damit erlischt die Fähigkeit zur Zellerneuerung. Die Auswirkung einer solchen Bestrahlung besteht also zunächst in einer Abnahme der Zellen in den jewei-

gen Geweben oder im Blut. Im mittleren Dosisbereich sind diese Schädigungen reversibel, Gewebe und Organ können sich regenerieren. Bei höheren Dosen (Spermiogenese etwa ab fünf Sv, Knochenmark etwa ab acht Sv, Dünndarm etwa ab zwölf Sv) ist dieses nicht mehr möglich, so daß es zu schweren klinischen Symptomen kommt. Diese klinischen, zum Teil lebensbedrohenden Krankheitsbilder treten also in Dosisbereichen auf, die nur bei unfallartigen Strahlenexpositionen erreicht werden können.

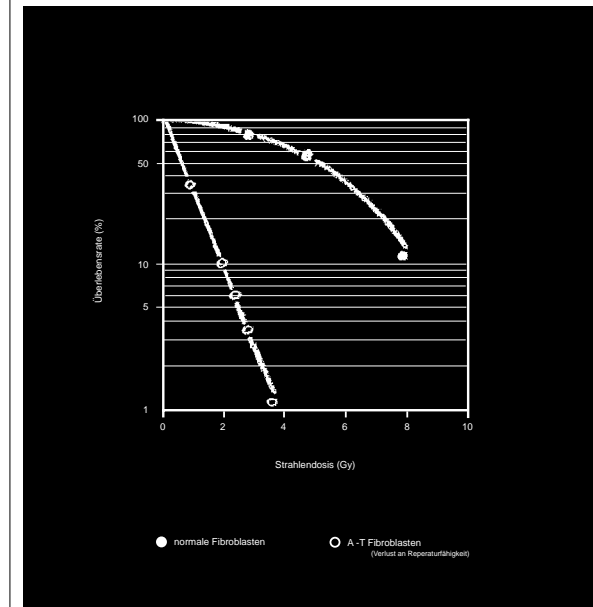
Die Folgen solcher Strahlendosen von einigen Sv, die derartige akute Erkrankungen nach sich ziehen, sind bisher nach den Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki, bei Unfällen in großen, vor allem mit Kernwaffenproduktion beschäftigten Laboratorien und bei der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl beobachtet worden. Die Bombenabwürfe von Hiroshima und Nagasaki verursachten etwa 130.000 Todesfälle, die sich auf akute Schäden durch ionisierende Strahlen oder deren Beteiligung zurückführen lassen. In Verbindung mit der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl sind etwa 35 Personen aufgrund akuter Strahlenschäden verstorben. Dieses waren Personen, die bei den Lösch- und Rettungsaktionen direkt am Reaktor hohe Strahlendosen erhalten hatten. Wesentliche Symptome dieser Schäden waren Störungen der Blutzellneubildung, die durch eine *Gammastrahlung* (Ganzkörper) verursacht wurden sowie Hautschäden, die durch hohe Dosen an *Betastrahlung* zustande kamen.

Betriebstechnische Störungen von Kernkraftwerken in der westlichen Welt haben bisher keine strahlenbedingten akuten Schäden unter der Bevölkerung verursacht. Selbst bei den Freisetzungen von radioaktiven Stoffen durch den Reaktorunfall Three Mile Island in Harrisburg (USA) sind derartige Wirkungen nicht aufgetreten. Bei Unfällen in

Kernkraftwerken ist mit derartigen hohen Strahlendosen nur dann zu rechnen, wenn eine Kernschmelze auftritt und eine Freisetzung der radioaktiven Stoffe unmittelbar oder innerhalb weniger Stunden nach dem Unfall eintritt. Daher sind moderne Kernkraftwerke so ausgelegt, daß die radioaktiven Stoffe im Containment zum überwiegenden Teil zurückgehalten werden können. Im Zusammenhang mit der Abschätzung des Gefährdungspotentials von kerntechnischen Anlagen stellt sich hier also die Frage nach der Reaktorsicherheit, einem technischen Risiko also, das der Frage nach den Gesundheitsrisiken aufgrund bestimmter Strahlenbelastungen vorausgeht. Bei der Kerntechnik im Normalbetrieb bleiben, wie im Bereich der natürlichen Strahlenquellen und in der medizinischen Diagnostik die Expositionen unserer Bevölkerung weit unterhalb des Dosisbereiches, ab dem akute Schädigungen

(7) Überlebensraten von Zellen nach Gammastrahlung mit niedriger Dosisleistung (Patterson et al. 1984).

Grafik: Rolf Schiangere



auftreten können. Hier sind daher nur stochastische Effekte von besonderer Bedeutung.

Genetische Mutation und Erbkrankheiten

Eine signifikant erhöhte Rate an Keimzellmutationen ist bisher beim Menschen nach Strahlenexpositionen *nicht* beobachtet worden. Selbst die Untersuchung von etwa 20.000 Kindern, deren Eltern (Vater, Mutter oder beide) bei den Atombombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki radioaktiver Strahlung ausgesetzt waren, lassen bisher keine statistisch signifikanten, genetischen Effekte erkennen. Bei der quantitativen Abschätzung des strahlen-genetischen Risikos sind wir daher weiterhin auf tierexperimentelle Untersuchungen angewiesen, die vor allem an Mäusen durchgeführt wurden.

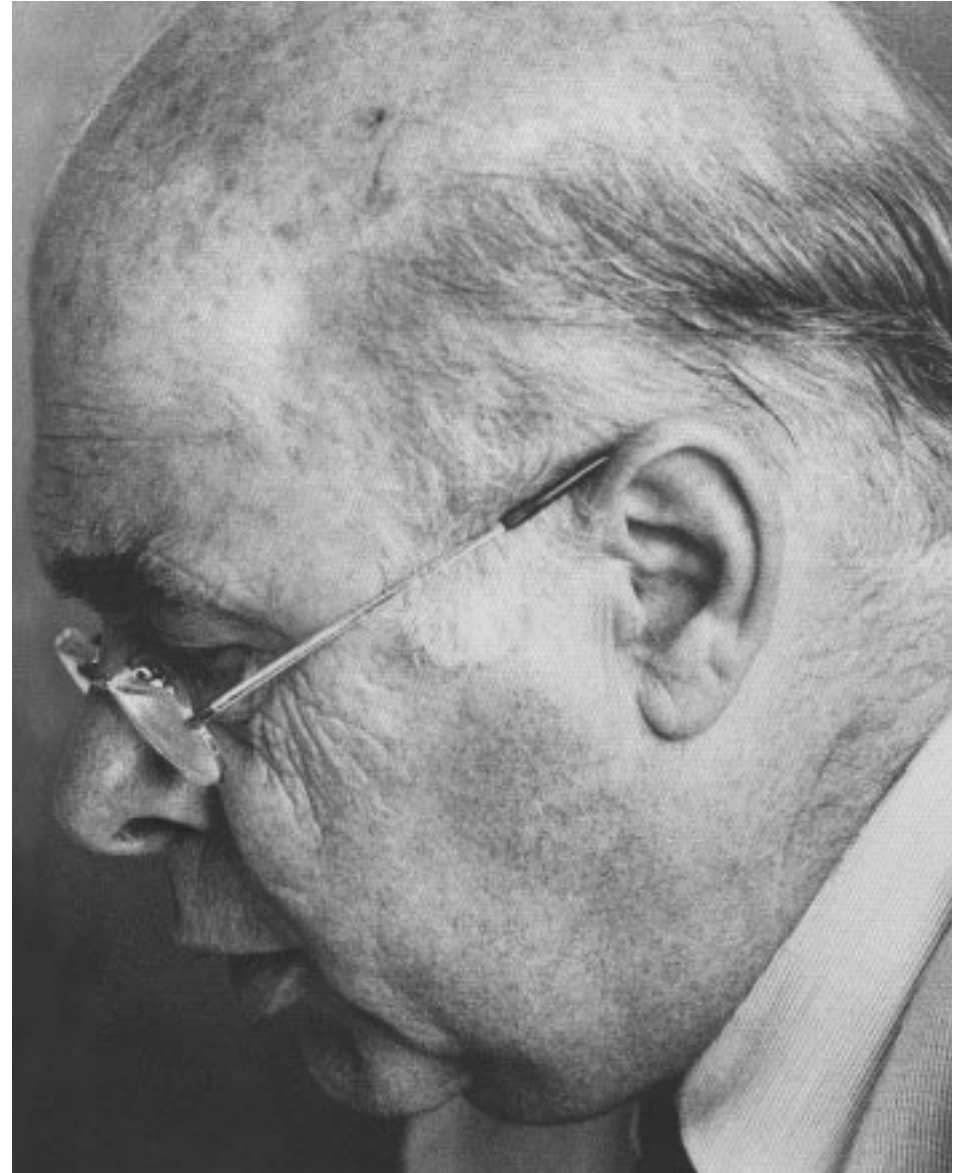
Bei diesen Studien werden lokale Bestrahlungen der Geschlechtsdrüsen (*Gonaden*) vorgenommen und die Mutationsrate in Abhängigkeit von der Dosis bestimmt. Statistisch signifikante Erhöhungen der Mutationsraten sind hier ebenfalls erst in Dosisbereichen gefunden worden, die oberhalb der Strahlenexpositionen der in Tabelle (1) aufgeführten Werte liegen. Für die Abschätzung des Strahlenrisikos im niedrigen Dosisbereich muß daher eine Extrapolation von hohen Dosen in den niedrigen Dosisbereich – unter der Annahme des Fehlens einer Schwellendosis – vorgenommen werden. Voraussetzung dafür sind zwei grundlegende Annahmen:

- Zwischen Dosis und Zahl der induzierten Mutationen besteht eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis.
- Die strahleninduzierte Mutationshäufigkeit in Keimzellen des Menschen und der Maus ist bei vergleichbaren Bestrahlungsbedingungen etwa gleich groß.

Die bisher gesammelten Kenntnisse über die Wirkungsmechanis-



Prof. Dr. Christian Streffer, seit 1974 Inhaber des Lehrstuhls für Medizinische Strahlenbiologie am Universitäts-



klinikum Essen.

men ionisierender Strahlung und die Entstehung von Mutationen in Keimzellen geben nun sehr deutliche Hinweise darauf, daß für diese Strahleneffekte in der Tat eine Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert vorliegt. In allen Organismen einschließlich der Säugetiere tritt bereits *ohne* zusätzliche Bestrahlung eine gewisse Zahl von Mutationen in den Keimzellen auf. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Bestrahlung zu einer Erhöhung der Frequenz dieser „spontanen“ Mutationen führt.

Um einen Richtwert zur Abschätzung des genetischen Strahlenrisikos zu erhalten, wurde diejenige Strahlendosis bestimmt, die so viele Mutationen auslöst, wie in der untersuchten Population ohne Bestrahlung bereits vorhanden sind. Diese Dosis wird als Verdopplungsdosis bezeichnet. Nach entsprechenden Untersuchungen an Mäusen und der

Umrechnung der Ergebnisse für das menschliche Genom sind Verdopplungsdosen in Höhe von einem Sv bei einer dauerhaften Bestrahlung mit locker ionisierenden Strahlen (Röntgenstrahlen, Gammastrahlen) abgeschätzt worden. Dieser Wert wird heute allgemein für die Angabe des genetischen Strahlenrisikos verwendet. Extrapoliert man ihn, so ergibt sich, daß eine Keimdrüsendosis von 100 mSv die „spontane“ Mutationsrate um zehn Prozent erhöht. Niedrigere Strahlendosen führen zu entsprechend geringeren Erhöhungen der Frequenz an vererbaren Erkrankungen. Damit wird klar, warum die bisherigen Untersuchungen beim Menschen keine statistisch signifikanten Daten erbracht haben: Etwaige Strahleneffekte werden überdeckt durch die Schwankungsbreite der natürlichen Mutationsraten.

Krebserkrankungen: Das generelle Strahlenrisiko

Im Gegensatz zur Situation bei den vererbaren Erkrankungen ist eine Risikoabschätzung für Leukämie und Krebs durch epidemiologische Daten beim Menschen möglich. Krebserkrankungen, die durch ionisierende Strahlen verursacht worden sind, können allerdings aufgrund ihres klinischen Verlaufes oder zellbiologischer Untersuchungen bisher nicht von solchen Krebserkrankungen unterschieden werden, die durch andere Ursachen hervorgerufen worden sind. Infolgedessen ist eine Bewertung des Strahlenrisikos nur dann möglich, wenn in einer epidemiologischen Untersuchung bestrahlte Personengruppen mit nicht exponierten Personengruppen hinsichtlich der Rate an Krebserkrankungen verglichen werden können. Ist die Strahlendosis bei den strahlenexponierten Personengruppen bekannt, so kann eine Dosis-Wirkungs-Beziehung für die Verursachung von Krebs aufgestellt werden. Derartige Untersuchungen sind bisher durchgeführt worden an:

- den Überlebenden der Atombombenabwürfe von Hiroshima und Nagasaki,
- Personen nach hohen beruflich bedingten Strahlenexpositionen,
- Patienten nach hohen medizinisch bedingten Strahlenexpositionen.

Aus den Untersuchungen an den Überlebenden der Atombombenabwürfe in Hiroshima und Nagasaki kommen die wesentlichen Daten, die für die Abschätzung des Krebsrisikos nach Einwirkung ionisierender Strahlen verwendet werden. Bei diesen Untersuchungen ist versucht worden, für jeden der Betroffenen, die eine Strahlenexposition im Bereich von einigen mSv bis etwa vier Sv erhalten haben, die Höhe der Strahlendosis abzuschätzen, um dadurch Gruppen von sogenannten Dosisbereichen zu bilden. Damit können die Dosis-Wirkungs-Beziehungen für diese Personengruppen aufgestellt werden. Für diese Art von Untersuchung spricht:

Die Zahl der Personen ist relativ hoch. Insgesamt sind etwa 120.000 Personen in die Studie aufgenommen worden. In den neueren Untersuchungen sind für etwa 76.000 Personen relativ gute Dosisabschätzungen gemacht worden.

Es sind alle Altersgruppen einer Bevölkerung und beider Geschlechter in der Gruppe vorhanden. Allerdings gibt es ein gewisses Überwiegen von Frauen insbesondere in der Altersgruppe von 20 bis 40 Jahren zum Zeitpunkt der Exposition.

Der Zeitpunkt der Strahlenexposition ist sehr genau bekannt, da die Exposition weitaus überwiegend durch externe Bestrahlung direkt nach der Atombombenexplosion verursacht worden ist.

Die wesentlichen Spätschäden, die nach den akuten Strahlenwirkungen ohne Todesfolge oder auch nach niedrigen Strahlendosen ohne akute Effekte auftreten können, sind Krebserkrankungen. Da Leukämien relativ rasch, etwa zwei bis zehn Jahre nach einer Bestrahlung und außerdem mit einem besonders ho-

hen *relativen Risiko* – also im Vergleich zum Risiko einer ansonsten gleichen, aber nicht der Strahlung ausgesetzten Personengruppe – auftreten, liegen für diese Erkrankungen verhältnismäßig viele Daten vor. Über Leukämien hinaus sind auch bei weiteren Krebserkrankungen strahlenbedingt erhöhte Fallzahlen festgestellt worden. Auf diese Krebserkrankungen wird weiter unten eingegangen.

Die Erhöhung des relativen Risikos und damit der strahlenbedingten Krebserkrankungen und Todesfälle nimmt mit steigender Strahlendosis zu. Damit liegt – beispielsweise für die Leukämiemortalität nach Bestrahlung – eine Dosis-Wirkungs-Beziehung vor (Abb. 8). Diese Dosis-Wirkungs-Beziehung, die die Zunahme des relativen Risikos für die Leukämiemortalität bei den Überlebenden nach den Atombombenkatastrophen in Hiroshima und Nagasaki angibt, zeigt jedoch, daß eine signifikante Zunahme des Strahlenrisikos erst nach Strahlendosen in einem Dosisbereich von 0,2 bis 0,5 Sv und höher beobachtet werden konnte. Niedrigere Strahlendosen zogen, selbst innerhalb dieser großen Personengruppe von 76.000 Personen, keine statistisch signifikant erhöhten Leukämieraten nach sich. Nach unserem heutigen Verständnis bedeutet dieses *nicht*, daß geringere Strahlendosen als 0,2 Sv *keine* Leukämien oder Krebs hervorrufen. Die Zahl der Fälle wird dann jedoch so klein, daß die Variabilität des spontanen Krebsrisikos das zusätzliche, strahlenbedingte Risiko überlagert, so daß sich dieses aus der Streubreite der spontanen Rate nicht mehr heraushebt.

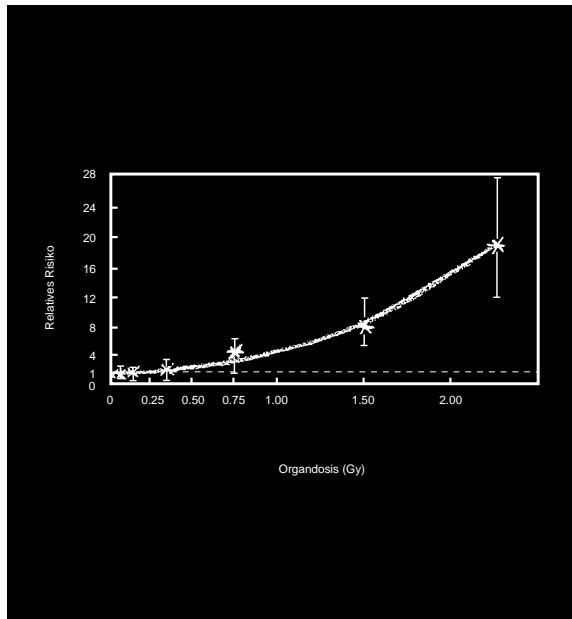
Diese Streubreite der Krebserkrankungen und Todesfälle auch bei nicht exponierten Personengruppen ist durch vielerlei Faktoren, beispielsweise durch die individuelle biologische Variabilität, bedingt. Viele dieser Faktoren sind bis heute im einzelnen nicht bekannt. So haben epidemiologische Untersuchun-

gen zur Rate der Lungenkrebstodesfälle in den Landkreisen Hessens für die Jahre 1988 bis 1990 ergeben, daß bei Männern bis zu 75 Jahren etwa fünf Prozent aller Todesfälle durch Lungenkrebs verursacht sind. Diese Rate hat allerdings eine Schwankungsbreite von ± 1 Prozent innerhalb der verschiedenen Landkreise. Eine Strahlendosis von 100 mSv würde das Lungenkrebsrisiko einer solchen Personengruppe ungefähr um zwei Promille erhöhen. Daraus ergibt sich, daß eine derartige strahlenbedingte Erhöhung in der Streubreite der spontanen Rate an Lungenkrebstodesfällen verschwindet.

Das relative Risiko für spezifische Krebsarten ist unterschiedlich. So wurde nach Bestrahlung ein relativ hohes Krebsrisiko des Knochenmarkes (Leukämie), der weiblichen Brust, der Lunge und möglicherweise auch des Magens sowie eines bestimmten Teil des Dickdarms festgestellt. Grundsätzlich geht man davon aus, daß in allen Organen und Geweben durch ionisierende Strahlen Krebs induziert werden kann. Die Strahlenempfindlichkeit jedoch hängt sehr stark vom Alter zum Zeitpunkt der Exposition ab; so besteht für Kinder und Jugendliche ein wesentlich höheres relatives Risiko für die Krebsmortalität nach einer Bestrahlung.

Im Dosisbereich von etwa 50 bis 100 mSv sind dann zusätzliche, strahlenbedingte Krebserkrankungen gefunden worden, wenn sehr strahlenempfindliche Personengruppen exponiert wurden. Bei Kindern, die im Alter von bis zu zwei Jahren wegen eines vergrößerten Thyreas bestraht wurden, wobei gleichzeitig die Schilddrüse der Strahlung ausgesetzt wird, mußten in späteren Jahren vermehrt Schilddrüsenkarzinome festgestellt werden. In diesem Zusammenhang ist es von besonderem Interesse, daß auch bei der Bevölkerung in Weißrußland und in der Ukraine eine Erhöhung von Schilddrüsenkarzinomen bisher nur bei denjenigen Kindern aufgetreten

(8) Relatives Risiko für die Leukämiemortalität in Hiroshima und Nagasaki.
Grafik: Rolf Schümgele



ist, die während des Reaktorunfalls in Tschernobyl bis zu fünf Jahre alt waren. Epidemiologischen Untersuchungen zur strahlenbedingten Karzinogenese bei erwachsenen Personen konnten jedoch keine statistisch signifikanten Erhöhungen der Rate an Krebserkrankungen oder Todesfällen in einem Dosisbereich unterhalb von 200 mSv feststellen.

Da also wie bei den genetischen Mutationen auch für Krebserkrankungen im Dosisbereich unterhalb von 200 mSv allgemein keine statistisch signifikante Erhöhung festzustellen ist, kann das Krebsrisiko durch ionisierende Strahlen im niedrigen Dosisbereich (von etwa 100 mSv und kleiner) wiederum nur durch Extrapolation von hohen Dosen zu kleinen Dosen abgeschätzt werden. Auch hier wird eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis angenommen.

Aufgrund der vorliegenden Daten aus den Studien zu den Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki können die Risikofaktoren abgeschätzt werden. Nach den neuesten Untersuchungen wird für die strahlenbedingte Krebsmortalität auf diese Weise ein Risikofaktor im Bereich von 5 bis 10×10^{-2} – also etwa fünf bis zehn von hundert – pro Sv ermittelt. Bei einer Krebsmortalität von 20 Prozent, wie sie bei unserer Bevölkerung vorliegt, bedeutet dieses, daß eine Dosis von etwa zwei Sv zu einer Verdopplung des Krebsrisikos führt. In einem Dosisbereich von zehn bis 100 mSv wird dieses Krebsrisiko (10^{-3} bis 10^{-2} , etwa ein bis zehn Fälle von tausend) dann so gering, daß es sich aus den Schwankungen der „spontanen Krebsrate“ nicht mehr heraushebt. Daher kann nicht erwartet werden, daß das Strahlenrisiko im niedrigen Dosisbereich durch epidemiologische Daten abgeschätzt werden kann. Vielmehr müssen Untersuchungen zum Mechanismus der Krebsentstehung die Frage lösen, ob in der Tat eine Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis vorliegt.

Krebserkrankungen: Das Risiko bei niedrigen Dosen

Die Krebsentstehung findet über eine Reihe von Einzelschritten statt. Gegenwärtig wird angenommen, daß die Schädigung der DNS einen wesentlichen Schritt für die Initiation dieser Prozesse darstellt. Nach einer Bestrahlung von Zellen werden viele der entstandenen Schäden im menschlichen Genom von der Zelle selbst repariert, einige dieser Schäden bleiben jedoch irreversibel und führen dann zu einer Zelltransformation von einer normalen Zelle in eine Krebszelle.

Eine Strahlendosis von einem Sv bewirkt etwa 2000 Strahlenschäden im Genom jeder bestrahlten Zelle. Diese hoch anmutende Zahl relativiert sich, wenn man bedenkt, daß die fast zwei Meter lange DNS in einer menschlichen Zelle etwa drei Milliarden Basenpaare (3×10^9) enthält, auf die sich diese Schäden verteilen. Ein Schaden tritt also ungefähr unter einer Millionen Basenpaaren auf. Von Chromosomenaberrationen ist bei der genannten Exposition jede zweite bis jede tausendste Zelle betroffen, Transformationsereignisse – Veränderungen der von Zelle zu Zelle weitergegebenen genetischen Information, die zur Entwicklung von bösartigen Zellen führen können – treffen je eine von 100 bis eine von 10.000 Zellen³. Einige Studien an Zellkulturen in vitro haben jedoch ergeben, daß auch bei Dosen im Bereich von etwa zehn mSv noch signifikant erhöht Zelltransformationen auftreten können.

Es stellt sich nun vor allem die Frage, ob einzelne transformierte Zellen in der Lage sind, einen klinisch manifesten Tumor zu bilden. Eine Reihe von klinischen, zellbiologischen und molekularbiologischen Daten deuten darauf hin, daß in der Tat ein sogenanntes *monoklonales* Wachstum des Tumors stattfindet. Dieses bedeutet, daß sich *eine* wild wachsende, bösartige Zelle entwickelt, aus dem dann der Tumor entsteht⁴.

Über die späteren Schritte der Krebsentwicklung nach der Zelltransformation, der Initiation der krebserzeugenden Prozesse, ist das Bild der weiteren Tumorentwicklung bisher nur undeutlich. Für die Schritte des eigentlichen Anstoßes der Tumorbildung (*Promotion*) und der Weiterentwicklung von Tumoren (*Progression*) sind weitere Untersuchungen notwendig. Der Aufklärung dieser Vorgänge kann jedoch die These vorgestellt werden, daß nur bei einem monoklonalen Ablauf der Tumorentwicklung – wobei der Tumor also ausschließlich aus einer einzelnen geschädigten Zelle entsteht – mit einer Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis zu rechnen ist. Nur, wenn der Strahlenschaden in einer Zelle für diese Prozesse ausreichend ist, sind die bisherigen Annahmen zur Dosis-Wirkungs-Beziehung tragfähig.

Diese Einschätzung hat sich durch Untersuchungen an Mausembrionen bestärken lassen. Aufgrund dieser Experimente und klinischer Erfahrungen besteht kein Zweifel mehr daran, daß der Embryo (*Fe1*) während der gesamten pränatalen Entwicklung außerordentlich strahlenempfindlich ist. Die Qualität und Quantität der Strahleneffekte ist sehr vom Entwicklungsstadium des Organismus in utero abhängig. Bis vor wenigen Jahren galt es als eine Regel, daß während der ganz frühen Stadien der Embryonalentwicklung (Präimplantationsperiode, bis zum 5. Tag der Entwicklung bei der Maus bzw. 10. Tag der Entwicklung beim Menschen) keine Mißbildungen durch ionisierende Strahlen oder entsprechende chemische Schadstoffe hervorgerufen werden können. Neuere Untersuchungen haben ergeben, daß diese Regel nicht immer gültig ist. Vielmehr gibt es Mäusestämme mit besonderen genetischen Voraussetzungen, bei denen auch in diesem frühen Entwicklungsstadium Mißbildungen durch Strahlung verursacht werden können.

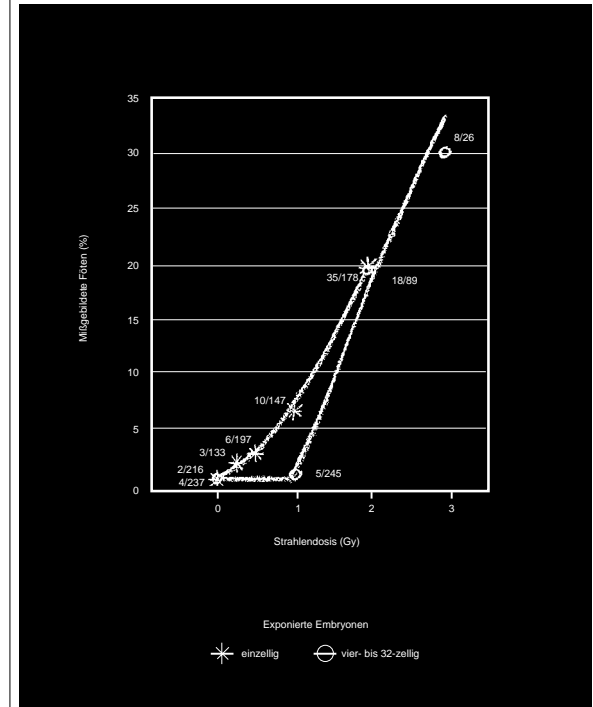
Bei einem der in unserem Institut untersuchten Mäusestämme treten bereits ohne Bestrahlung relativ häufig Fehlentwicklungen (Bauchdeckenbrüche, *Gastroschisis*) auf. Nach einer Bestrahlung der befruchteten Eizelle mit Röntgenstrahlen oder schnellen Neutronen vor ihrem Einnistern in die Gebärmutter erhöhte sich die Rate dieser Fehlbildungen. Die Untersuchung der Dosis-Wirkungs-Beziehungen ergab eine Doseffektkurve ohne Schwellendosis dann, wenn die Strahlenexposition im Einzellstadium durchgeführt wurde. Dagegen traten nach Bestrahlungen im Mehrzellstadium nur Dosis-Wirkungs-Beziehungen mit einer Schwellendosis auf (Abb. 9). Diese Ergebnisse machen deutlich, daß nur ein einzellärer Prozeß der Schadensentwicklung zu einer Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis führt. Bei der Bestrahlung im Einzellstadium ist nur eine einzige Gesamtkopie des Genoms vorhanden, so daß offensichtlich die Schädigung dieses Genoms zur Mißbildung führen muß. Dieser Effekt wurde daher als „quasi-genetischer“ Effekt definiert. Spätere Untersuchungen haben dann gezeigt, daß diese Mißbildung in der Tat auch durch eine Bestrahlung der Keimzellen entstehen kann, die Bestrahlung also einen *echten* genetischen Effekt verursacht. Ferner konnte nachgewiesen werden, daß durch die Bestrahlung im Einzellstadium bei den mißgebildeten Feten die Expression von Proteinen verändert ist und daß diese Veränderungen bei einer begrenzten Zahl von Proteinen auftreten. Allerdings ist die Spezifität nicht so hoch, daß bei jedem Embryo mit einer *Gastroschisis* dieselben veränderten Proteine zu finden sind. Trotzdem veranschaulichen diese Daten, daß es „Schwachstellen“ im Genom gibt, die durch eine Strahlenexposition besonders häufig verändert werden – was dann zu entsprechenden Schädigungsmustern führt.

Es muß aber deutlich gesehen werden, daß das Fehlen einer Schwellendosis bei der Dosis-Wirkungs-Beziehung für die strahlenbedingte Karzinogenese bisher nicht bewiesen ist. Allerdings gibt es neben den bereits angeführten Darlegungen auch einige weitere experimentelle Daten, die diese Annahme bestätigen. So werden in Zellen von Leukämien und anderen Krebsarten sehr häufig chromosomale Veränderungen gefunden, die in jeder Krebszelle der untersuchten Krebserkrankung auftreten⁵.

Die Annahme des Fehlens einer Schwellendosis ist vor allem auch deshalb von Bedeutung, weil die Strahlenexpositionen unserer Bevölkerung durch Medizin, Technik (im übrigen auch durch Flüge in großen

(9) Grundtypen von Dosis-Wirkungs-Beziehungen der Strahlenexposition für Mißbildungen.

Grafik: Rolf Schilling



Höhen) und Natur in jenem niedrigen Dosisbereich liegen, in dem das strahlenbedingte Krebsrisiko nur durch Extrapolation rechnerisch ermittelt werden kann. Daher beruhen auch alle Angaben über Krebsrisiken, wie sie beispielsweise im Zusammenhang mit der Röntgendiagnostik oder dem Fliegen diskutiert werden, nicht auf epidemiologischen Messungen, sondern auf rechnerischen Abschätzungen, die mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet sind. Da es bisher keine Wege gibt, einen möglicherweise durch ionisierende Strahlen verursachten Krebs aufgrund spezifischer molekularbiologischer oder zellbiologischer Veränderungen zu erkennen, kann auch immer nur die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der ein individueller Krebs durch ionisierende Strahlen verursacht worden ist.

Strahlenschutzstandards

Ionisierende Strahlen können grundsätzlich bei allen lebenden Organismen Schäden hervorrufen. Für Pflanzen und Tiere, ausgenommen die Säugetiere, liegen die Strahlendosen, die irreversible Schädigungen hervorrufen, jedoch wesentlich höher als dieses beim Menschen der Fall ist. Die Strahlenschutzstandards sind daher auf der Basis der Kenntnisse über die Strahlenwirkungen auf die menschliche Gesundheit hin angelegt worden. Die wesentlichen Grundregeln des Strahlenschutzes und die Basiswerte für die Dosisbegrenzung gehen auf Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP, International Commission on Radiological Protection) zurück. Sie werden inzwischen weltweit anerkannt und angewendet – für den Arbeits- und Umweltschutz eine einmalige Situation.

Nach den Regeln der ICRP fußt ein effektiver Strahlenschutz auf folgenden Grundprinzipien:

- Jede Strahlenanwendung, die keinen Nutzen bringt, sollte unterblei-

ben (Rechtfertigung einer Strahlenanwendung).

- Die aus der Strahlenanwendung resultierende Exposition von Einzelpersonen soll bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten (Dosisgrenzwerte). Dabei sind die medizinischen Expositionen, die eine Person als Patient erhält, und die natürliche Strahlenexposition nicht zu berücksichtigen.
- Zusätzlich sollen alle Strahlenexpositionen unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalles so gering wie vernünftigerweise möglich gehalten werden (Optimierung des Strahlenschutzes).

Diese Strahlenschutzstandards und Dosisgrenzwerte haben bereits eine Entwicklung von Jahrzehnten hinter sich. Bereits in den 20er Jahren wurden die ersten Dosisgrenzwerte für den Arbeitsplatz festgelegt, 1956 wurde dieser Wert mit einer Dosis von 50 mSv pro Jahr für beruflich strahlenexponierte Personen neu definiert – er besteht bis heute.

Die gegenwärtigen rechtlichen Regelwerke der Bundesrepublik Deutschland zum Strahlenschutz unterscheiden zwischen Dosisgrenzwerten für eine Ganzkörperdosis (effektive Dosis) und für Teilkörperdosen. Die Grenzwerte für die Teilkörperdosen sind so angelegt, daß bei ihrer Einhaltung die jeweiligen Schwellendosen keinesfalls überschritten und damit nichtstochastische Strahleneffekte vermieden werden können. Der Dosisgrenzwert für die Ganzkörperdosis (effektive Dosis) ist auf stochastische Effekte abgestellt und so eingerichtet, daß bei seiner Einhaltung Arbeitsplätze in Strahlenkontrollbereichen hinsichtlich ihrer Sicherheit mit anderen Arbeitsplätzen vergleichbar sind. Darüber hinaus gibt es bei beruflich strahlenexponierten Personen unter anderem Sonderregelungen für Frauen im gebärfähigen Alter und für Jugendliche. Die ICRP hat mittlerweile für nichtmedizinische

Strahlenexpositionen eine Ganzkörperdosis von einem mSv pro Jahr und Person innerhalb der Bevölkerung empfohlen.

Die Auswirkungen der Atombombenkatastrophen in Hiroshima und Nagasaki und der zunehmende Einsatz von ionisierenden Strahlen in Medizin und Technik haben in den 50er Jahren dazu geführt, daß auch Dosisgrenzwerte für die Bevölkerung insgesamt festgelegt wurden. Zunächst galt dabei das Hauptaugenmerk den genetischen Effekten, es wurde daher eine sogenannte genetische Bevölkerungsdosis eingeführt. Aufgrund der Abschätzung der natürlichen Strahlenexposition und der erwarteten Expositionen aus der medizinischen Anwendung von ionisierenden Strahlen empfahl eine Kommission der National Academy of Sciences der USA eine genetische Bevölkerungsdosis für einen Zeitraum von 30 Jahren (ein Generationsalter) in Höhe von 50 mSv für medizinische Expositionen und 50 mSv für nichtmedizinische Strahlenexpositionen.

Für die Bundesrepublik Deutschland sind darüber hinaus Dosisgrenzwerte für Einzelpersonen in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen festgelegt worden. Dabei muß eine Anlage so geplant und errichtet werden, daß ihre Abgaben an radioaktiven Stoffen sowohl über die Abluft als auch über das Abwasser eine Strahlenexposition von jeweils 0,3 mSv pro Jahr nicht überschreiten. Die heutigen Grenzwerte beziehen sich dabei auf die bekannten stochastischen Strahleneffekte. Für die Berechnung werden radioökologische Modelle eingesetzt, die die Bestrahlung von außen und von innen – nach Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung oder der Atemluft – berücksichtigen müssen. Dabei wird von der extremen Annahme ausgegangen, daß sich die betreffende Person an ungünstigsten Ort mit der höchsten Strahlenbelastung ständig aufhält und ebenso alle Nahrungs-

mittel, die sie zu sich nimmt, unter den ungünstigsten Einwirkungsbedingungen mit der höchsten radioaktiven Kontamination produziert werden.

Bei der Festlegung dieses Dosisgrenzwertes von 0,3 mSv pro Jahr dient zusätzlich die natürliche Strahlenexposition als Orientierung, und zwar insbesondere ihre Schwankungsbreite, unter der in der Bundesrepublik Deutschland der größte Teil der Bevölkerung ohnehin lebt. Durch diese Art der Festsetzung kann nun eine individuelle Änderung der Lebensgewohnheiten einschließlich des Ortswechsels innerhalb der Bundesrepublik zu Veränderungen der natürlichen Strahlenexposition führen, die *größer* sind als der Spielraum, der für die Umgebung kerntechnischer Anlagen gilt. Anders ausgedrückt: Auf der Basis der vorher angegebenen Risikowerte würde eine einmalige effektive Dosis von 0,3 mSv das karzinogene Risiko um etwa 0,1 Promille der „spontanen“ Krebstodesrate erhöhen – wenn die Extrapolation linear unter Annahme des Fehlens einer Schwellendosis vorgenommen wird. Damit ist dieser Dosisgrenzwert an Lebensgewohnheiten orientiert, denen unsere Bevölkerung heute ständig ausgesetzt ist oder denen sie sich selbst – beispielsweise als Raucher – aussetzt. Diese Risiken liegen weit höher als diejenigen einer Schädigung durch Strahlen im Rahmen des vorgegebenen Grenzwerts.

Schlußbemerkung

Ionisierende Strahlen und radioaktive Stoffe haben der Menschheit in der diagnostischen und therapeutischen Medizin viele neuartige Heilungschancen eröffnet und ihr eine Reihe von Fortschritten in der Technik ermöglicht, beispielsweise durch Anwendungen zur Materialprüfung, bei der Sterilisierung von medizinischen Geräten und vielem mehr. Sie haben aber auch schwere Katastrophen, Schrecken und Ängste hervor-

gerufen. Die Atombombenexplosionen über Hiroshima und Nagasaki, die Reaktorkatastrophe in Tschernobyl und die Ängste vor ähnlichen Unfällen bei anderen Kernkraftwerken haben immer wieder zu berechtigten, häufig aber auch völlig überzogenen apokalyptischen Vorstellungen geführt.

Es gibt wohl keine Noxe in der Arbeits- und Umwelt, über deren Wirkungen und mögliche Risiken so viele Kenntnisse erarbeitet worden sind wie über ionisierende Strahlen, obwohl chemische und biologische Agentien bekannt sind, deren Wirkungen als wesentlich risikoreicher eingeschätzt werden müssen. Klinische Erfahrungen beim Umgang mit ionisierenden Strahlen in der Medizin, experimentelle Daten und epidemiologische Untersuchungen an Personengruppen, die aus unterschiedlichen Quellen strahlenexponiert worden sind, haben dazu geführt, daß Strahlenrisiken im mittleren und hohen Dosisbereich heute sehr gut abgeschätzt werden können. Offen bleiben allerdings viele Fragen in bezug auf das Strahlenrisiko im niedrigen Dosisbereich, in dem die Wirkungen auch entsprechend kleiner sind. Hieran muß weiter gearbeitet werden.

Für den Strahlenschutz sind bereits in den zwanziger Jahren erste Regeln eingeführt worden, die auf internationaler Ebene bis zum heutigen Tage ständig weiterentwickelt wurden und in weiten Kreisen der internationalen Wissenschaft Konsens gefunden haben – was allerdings die öffentliche Diskussion unter Wissenschaftlern gerade in der Bundesrepublik Deutschland leider nur selten widerspiegelt. Auch wird in den Medien leider häufig über Strahlenrisiken berichtet, ohne sich an den wissenschaftlichen Erkenntnissen und Fakten zu orientieren. So muß hier an die Berichterstattung über die Strahlenauswirkungen auf die deutsche Bevölkerung nach der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl im Jahre 1986 und die damals ange-

stellten Prognosen erinnert werden. Heute ist festzustellen, daß es in Deutschland bisher keinerlei Anhaltspunkte dafür gibt, daß irgendwelche Schäden durch diese radioaktiven Belastungen in Deutschland aufgetreten sind. Andererseits bedingen die Gefahren, die von radioaktiven Stoffen und ionisierender Strahlung – wie beispielsweise durch eine Freisetzung aus Kernkraftwerken – eintreten können, eine hohe Verantwortung der Wissenschaft und Technik, die sich mit diesen Fragen befaßt. Es versteht sich von selbst, daß jedes neue Anzeichen einer Strahlenwirkung ebenso wie die Sicherheit dieser Anlagen mit hohem kritischem Sachverstand analysiert werden müssen. Die Strahlenschutzgesetzgebung ist in Deutschland während der letzten Jahrzehnte der Prämisse gefolgt, daß Expositionen für Einzelpersonen der Bevölkerung aus technischen Anlagen nicht größer als die Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition sein dürfen. Ebenso wie dieses Ziel in unserem Land bisher eingehalten wurde, muß daran auch zukünftig festgehalten werden. Es bleibt zu wünschen, daß ein solch pragmatisches Vorgehen auch zu einer höheren Akzeptanz führen und Ängste abbauen helfen wird, wenn nur die Fakten hinreichend bekannt sind.

Summary

The average annual radiation exposure from natural sources is about 2.4 mSv per caput for the German population. The man made average annual radiation exposure is around 1.55 mSv of which 1.5 mSv are caused by medical diagnostics and less than 0.01 mSv caused by nuclear power stations. The evaluation of radiation risk is dependent on two principally different dose effect curves for the various radiation effects. For one of the two classes of these curves a threshold dose exists

below which the corresponding radiation effects cannot be induced. Clinical and experimental studies show that acute radiation effects and late somatic effects besides cancer follow such a dose effect curve. Studies of the mechanism show that these nonstochastic or deterministic effects develop from multicellular radiation damage. Cell renewal systems and death of stem cells play a significant role in this connection.

For a second type of dose effect curve it is assumed that no threshold dose exists. These stochastic effects are the induction of genetic diseases and cancer by irradiation. Within a certain dose range these effects have been observed in animals and man. In the low dose range the effects become unmeasurable as possible radiation-induced cases are masked by the variance of the spontaneous rate of mutations and cancers. Risk estimates in the low dose range can therefore only be gained by extrapolation. In order to verify the extrapolation procedure without a threshold dose it is necessary to evaluate the mechanism of how these effects develop. The stochastic effects must develop from unicellular processes. The knowledge about the molecular and cellular processes has been outlined in this article. The standards for radioprotection orientate themselves to the risk of stochastic effects.

Der Autor:

Christian Streffer promovierte 1963 im Hauptfach Biochemie, unmittelbar an die Promotion schloß sich ein Aufenthalt am Institut für Biochemie der Universität Oxford/Großbritannien bei Professor H. A. Krebs an. 1964 bis 1971 war er Wissenschaftlicher Assistent und Oberassistent am Radiologischen Institut der Universität Freiburg, 1967 habilitierte er sich für das Fach Molekulare Strahlenbiologie, 1972 bis 1974 als Wissenschaftlicher Rat und Professor am Radiologischen Institut der Universität Freiburg tätig, folgte er 1974 dem Ruf auf den Lehrstuhl für Medizinische Strahlenbiologie am Universitätsklinikum Essen. Als Direktor des gleichnamigen Instituts am Universitätsklinikum war er 1976

bis 1977 sowie 1981 bis 1983 Dekan des Fachbereiches Theoretische Medizin, 1977 bis 1981 Gründungssprecher des Sonderforschungsbereiches *Experimentelle und klinische Leukämie- und Tumorforschung* sowie vom Juli 1986 bis September 1988 Geschäftsführender Direktor des Radiologischen Zentrums. Von 1988 bis 1992 amtierte Professor Christian Streffer als Rektor der Universität GH Essen. In seinen wissenschaftlichen Arbeiten hat sich Christian Streffer vor allem mit den molekularen und zellulären Mechanismen der Strahlenwirkung befaßt. Sein besonderes Interesse galt dabei den Wirkungen ionisierender Strahlen auf Säuger während der frühen Embryogenese und der experimentellen Tumorthherapie. Bisher hat er insgesamt etwa 300 Originalarbeiten publiziert.

Im Winter 1984/85 war Christian Streffer Gastprofessor am Cancer Center der University of Rochester, New York, USA. Neben seiner wissenschaftlichen Tätigkeit in Essen hat er eine Reihe von Funktionen in wissenschaftlichen Gesellschaften und beratenden Kommissionen ausgeführt. Unter anderem ist er Präsident der *European Society for Radiation Biology*, Councillor der *International Association for Radiation Research*, Vorsitzender der *Deutschen Strahlenschutzkommission* und Mitglied des *Komitees der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP)*. Prof. Christian Streffer ist Mitherausgeber mehrerer wissenschaftlicher Zeitschriften und Buchserien.

Anmerkungen:

- 1) Vgl. Manfred F. Rajewsky: Ein Prozeß in vielen Schritten. In: ESSENER UNIKATE MEDIZIN (1), Krebsforschung, S. 7 ff.
- 2) Es gibt allerdings auch Hinweise darauf, daß niedrige Strahlendosen von etwa 10 mSv möglicherweise eine Erhöhung der Strahlenresistenz durch Induktion des DNS-Repair hervorrufen. Die dieser Vermutung zugrunde liegenden Daten sind bisher jedoch widersprüchlich und sollten daher bei Risikoabschätzungen nicht berücksichtigt werden.
- 3) Die Zelltransformation wurde in proliferierenden Zellen in der Kultur gemessen.
- 4) Vgl. Manfred F. Rajewsky: Ein Prozeß in vielen Schritten. In: ESSENER UNIKATE MEDIZIN (1), Krebsforschung, S. 11.
- 5) Bei chronisch myeloischen Leukämien wurde beispielsweise festgestellt, daß Teile eines Chromosoms 22 auf andere Chromosomen, häufig ein Chromosom 9 und das Chromosom 17, übertragen werden (Translokation) und damit nur ein kleiner Rest des einen Exemplares des Chromosomenpaares 22 übrigbleibt. Dieser Chromosomenrest wird als Philadelphia-Chromosom bezeichnet und konnte in jeder leukämischen Zelle eines entsprechenden Patienten identifiziert werden.

Literatur:

- BEIR: Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. BEIR-V-Report. Washington, D. C.: National Academy Press, 1990.

- Butler D: Europe plans convention on social impacts of biomedical technologies. *Nature* 370, 3, 1994.
- Ehling UH: Quantifizierung des strahlen-genetischen Risikos. *Strahlenther. Onkol.* 163, 283-291, 1987.
- ICRP: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford, New York, Frankfurt, Seoul, Sydney, Tokyo, 1991.
- Müller W-U, Streffer C, Pamper S: The question of threshold doses for radiation damage: malformations induced by radiation exposure of unicellular or multicellular preimplantation stages of the mouse. *Radiat. Environ. Biophys.* 33, 63-68, 1994.
- Pamper S, Streffer C: Prenatal death and malformations after irradiation of mouse zygotes with neutrons and X-rays. *Teratol.* 37, 1-9, 1988.
- Patterson MC, Béch-Hanssen NT, Smith PJ, Mulvihill JJ: Radiogenic neoplasia, cellular radiosensitivity and faulty DNA repair: In: *Radiation Carcinogenesis*. J. D. Boice & JF Fraumeni (eds.), New York, Raven Press, 319-336, 1984.
- Pinkau K, Decker K, Gethmann CF, Levi HW, Mittelstraß J, Peyerimhoff S, zu Putlitz G, Randelzhofer A, Renn O, Streffer C, Weinert FE: Umweltstandards. Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1992.
- Shimizu Y, Kato H, Schull WJ: Life span study report. 11, Part 2. Cancer mortality in the years 1950-85 based on the recently revised doses (DS 86). *Radiat. Effects Res. Found.* RERF TR 5-8, Hiroshima 1988.
- Streffer C, van Beuningen D: Zelluläre Strahlenbiologie und Strahlenpathologie. *Handbuch der Radiologie*. Springer-Verlag, Berlin, Bd. XX, 1-39, 1985.
- Streffer C: Strahlentoxikologie. In: Gift - Geschichte der Toxikologie. M. Amberger-Lahrman und D. Schmähl (Hrsg.): Springer-Verlag, Berlin, 127-166, 1988.
- Streffer C: Stochastische und nichtstochastische Strahlenwirkungen. *Nucl.-Med.* 30, 198-205, 1991.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation): Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations, New York, 1988.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation): Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations, New York, 1993.
- Wojcik A, Bonk K, Müller WU, Streffer C, Weissenborn U, Obe G: Absence of adaptive response to low doses of X-rays in preimplantation embryos and spleen lymphocytes of an inbred mouse strain as compared to human peripheral lymphocytes: A cytogenetic study. *Int. J. Radiat. Biol.* 62, 177-186, 1992.

Die weit überwiegende Zahl aller Krebserkrankungen ist nach Erkenntnissen der letzten 50 Jahre auf vermeidbare Ursachen zurückzuführen. Neben gefährdenden Nahrungs- und Genußgewohnheiten sind Chemikalien anzuschuldigen, die in wachsender Zahl als krebserzeugend erkannt wurden. Ob sie hauptsächlich aus industriellen Produktionsprozessen stammen, wird bezweifelt. Identifiziert wurden in großer Zahl auch Kanzerogene natürlicher Herkunft, gegen die nun erstmalig im Laufe der Menschheitsgeschichte wirksamer Schutz möglich ist.

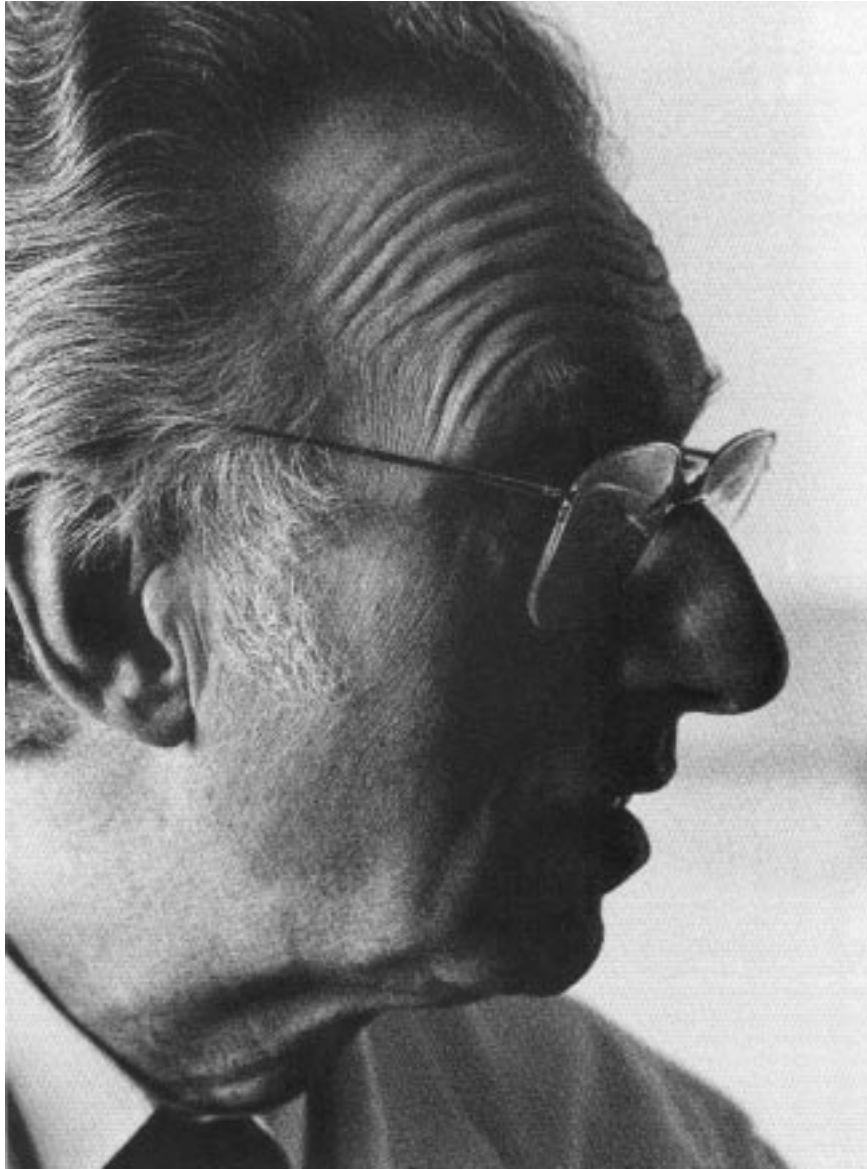
Krebsrisiko Natur?

Die Belastung des Menschen aus natürlichen Kreisläufen / Von Klaus Norpoth

Wachsende Krebsgefahren in Verbindung mit steigender Industrialisierung sind seit einigen Jahrzehnten unter dem Stichwort der „Chemisierung“ unseres Lebensraumes ein zentrales Thema der Umweltmedizin geworden. Nachdem zahlreiche Industriechemikalien erst aufgrund ihrer Wirkung beim Menschen als Krebsgifte erkannt wurden, kam es zu Regulationen, die eine Zulassung neu synthetisierter

Verbindungen vom Ergebnis vorgeschriebener experimenteller Prüfungen abhängig machen. Aufgrund der inzwischen durch „Altlasten“ entstandenen Probleme gelangten bereits vor zwei Jahrzehnten amerikanische Wissenschaftler zu der Überzeugung: „Wir leben in einem Meer von Chemikalien, die noch nicht auf krebserzeugende und erbgutverändernde Wirkung getestet worden sind.“¹ Im Jahre 1981 ver-

öffentlichten Doll und Peto dann eine Schätzung der relativen Anteile bestimmter vermeidbarer Krebsrisiken für Industrienationen wie die USA (Abb. 1). Sie stellten heraus, daß nicht Industriechemikalien, sondern Fehlernährung, Tabakrauch und Infektionen vorrangige Krebsursachen sind. Bei ihren Schätzungen fand die Unterscheidung *anthropogener* von natürlichen Krebsursachen noch keine besondere Beachtung.



Prof. Dr. med. Klaus Norpoth, seit 1981 Professor für Arbeits- und Sozialmedizin am Institut für Hygiene und Arbeitsmedizin des Universitätsklinikums Essen.

Foto: Matthias Lückner

Diese verlangten 1987 die Krebsforscher Ames und Gold. Vier ihrer teilweise provokativen Thesen lauten:

- Die meisten uns bekannten *Kanzerogene* sind nicht, wie weithin angenommen, synthetischen Ursprungs.
- Auf Gewichtsbasis bezogen sind in unserer Nahrung 10.000mal mehr natürliche als industriell produzierte Kanzerogene enthalten.
- Vermutlich enthält jedes im Supermarkt erhältliche pflanzliche Produkt natürliche Kanzerogene.
- Krebsrisiken durch Industriechemikalien sind auch nicht deswegen höher zu veranschlagen, weil der Mensch im Laufe der Evolution dagegen keine Abwehrmechanismen entwickeln konnte. Vielmehr unterscheiden die vielschichtigen induzierbaren Abwehrmechanismen unseres Körpers nicht zwischen synthetischen und natürlichen Giften.

Das allgemeine Fazit dieser Überlegungen lautet: Die Angst vor Kanzerogenen „synthetischen“ Ursprungs ist hinsichtlich ihrer Rolle im Vergleich zu „natürlichen“ Kanzerogenen unbegründet, insbesondere weil der menschliche Körper diese Unterscheidung nicht kennt und gerade gegenüber den „natürlichen“ Kanzerogenen auf verlässliche Abwehrmechanismen zurückgreifen kann. Die Frage der kreberzeugenden Wirkung eines Stoffes müßte daher von der Forschung ohne Vorurteil bezüglich seiner Herkunft und in erster Linie in bezug auf den menschlichen Organismus geklärt werden.

Aus der Forschung: Kanzerogene Naturstoffe im Überblick

Ames und Gold haben mit ihren Hypothesen die Bedeutung „natürlicher“ Krebsgifte hervorgehoben, diese aber zugleich unter Hinweis auf die Existenz wirksamer Abwehrmechanismen relativiert. Priorität sollten Anstrengungen zur Vermeidung von Krebsrisiken durch Fehlernährung, Tabak- und Alkohol-

konsum, AIDS, radioaktives Radon in Innenräumen und die Aufnahme von Krebsgiften am Arbeitsplatz erhalten.

Mit ihrer Diskussion haben die Autoren jedoch auch die Aufmerksamkeit vieler Krebsforscher auf folgende Sachverhalte gelenkt:

- Krebsgefahren durch natürlich vorkommende Kanzerogene wurden erst im Zuge der Aufklärung wesentlicher Aspekte der Chemokanzerogenese stärker beachtet und sind zweifellos noch unzulänglich erforscht.
- Obwohl bereits eine Vielzahl „natürlicher Krebsgifte“ identifiziert wurden, ist mit der Entdeckung weiterer Risiken zu rechnen deren Größe nicht vorausgesagt werden kann.
- Globale Risikobetrachtungen sind ohne Kenntnis regionaler und individueller Aspekte der *kanzerogenen* Konstellation fragwürdig. Sie können sogar wirksame Prävention behindern.
- In diesem Zusammenhang wird das Zusammenwirken unterschiedlicher Krebsursachen auch im Hinblick auf wachsende Einwirkungszeiten bei verlängerter Lebenserwartung immer mehr zur wissenschaftlichen Herausforderung.

Unser gegenwärtiger Kenntnisstand über kanzerogene Naturstoffe, so unvollständig er sich in Kürze darstellen läßt, diene zur Erläuterung dieser Sachverhalte².

Soweit wir Kenntnis von krebs-erzeugenden Wirkungen organischer Naturstoffe besitzen, handelt es sich dabei überwiegend um Stoffe, die in unserer Nahrung enthalten sein können oder aber um Verbindungen, die als Arzneimittel Verwendung gefunden haben bzw. aus Heilkräutern oder Mikroorganismen isoliert wurden. Unser Wissen über Kanzerogene, die aus Mikroorganismen oder Pflanzen isoliert wurden, verdanken wir größtenteils einer Wirkstoffforschung, die auf die Entdeckung neuer *antibiotisch* oder *zytostatisch* wirkender Mittel ausge-

richtet war. In Tabelle (2) mögen Penicillinsäure, Penicillin G und Griseofulvin als Beispiele dienen.

Weitere Verbindungen der Tabelle (2) zählen zur Gruppe der kanzerogenen Mykotoxine. Die zweifelslos wichtigsten Vertreter dieser Gruppe nach Gefährdungspotential und Verbreitung stellen die Aflatoxine dar, die vorwiegend in verschimmelter Nahrung zu finden sind. Von ihnen ist Aflatoxin B₁ bei der Ratte weit stärker wirksam als Aflatoxin G₁. Dieses wiederum übertrifft die Wirkung des Aflatoxins B₂ deutlich. Epidemiologische Hinweise auf Aflatoxine als *Hepatokanzerogene* stammen aus Uganda, Kenia, Moçambique, Swasiland und Thailand. Zwischen der Aflatoxinaufnahme mit der Nahrung und Leberkrebsinzidenzen wurde eine Dosis-Wirkungs-Beziehung gefunden. Allerdings werden die in den betroffenen Entwicklungsländern verbreiteten Hepatitis-B-Viren als wesentliche Mitverursacher der relativ hohen Leberkrebsinzidenzen angesehen.

Für Proteinmangeldiät wird eine solche Bedeutung diskutiert. Aflatoxin B₁ ist darüber hinaus zu zwei ppb in amerikanischer Erdnußbutter enthalten und wurde auch in kontaminiertem Weizen, in Mais, in Nüssen und kohlenhydrathaltigen Nahrungsmitteln gefunden, die längere Zeit auf Vorrat gehalten wurden. Ohne auf die anderen genannten Kanzerogene näher einzugehen, sei angemerkt, daß es sich bei PR-Toxin um eine Verbindung aus Kulturen von *Penicillium-Roqueforti* handelt und bei T-2-Toxin, wie bei Fusarion X, um Toxine, die von *Fusarium* Spezies gebildet werden.

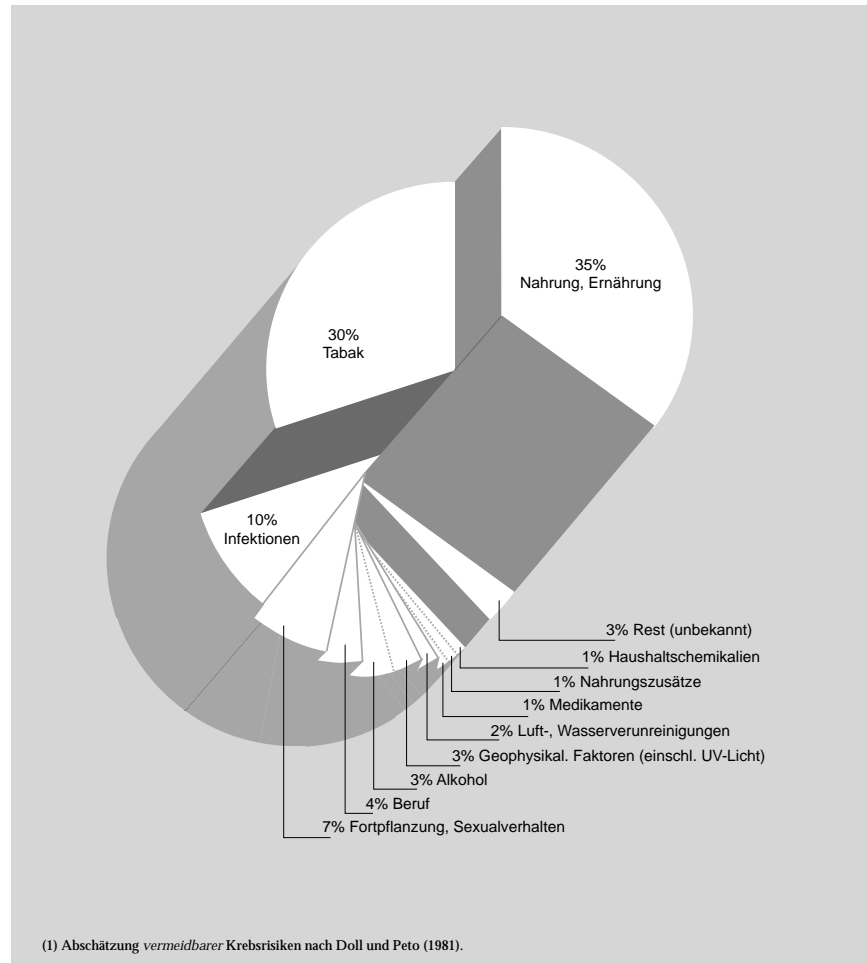
Aus Speisepilzen wurden nicht nur krebs-erzeugende Hydrazinverbindungen isoliert, sondern weitere Kanzerogene, von denen das 4-(Hydroxymethyl)-Benzodiazonium-Ion aus *Argaricus Bisporus* als Beispiel genannt sei. Die Frühjahrs- oder Speisemorchel enthält zwölf verschiedene Hydrazin-derivate, von denen fünf kanzerogen im Tier-

experiment und *mutagen* im bakteriologischen Test wirken, also beide Wirkqualitäten besitzen. Andere Speisepilze sind bisher nicht derart intensiv erforscht worden.

Die in Tabelle (2) aufgeführten Pflanzeninhaltsstoffe ließen im Tierexperiment krebserzeugende Eigenschaften erkennen:

- Safrole gehören zu den als Geschmacksstoffe inzwischen verbotenen *Alkylbenzolen* pflanzlicher Herkunft.
- Als kanzerogene Pyrrolizidin-Alkaloide in Schwarzwurzeln und deren Blättern gelten Synphytin und Echinidin sowie 7-Acetylcytosin. Praktisch alle bisher untersuchten

1,2-ungesättigten-Pyrrolizidin-Alkaloide haben jedoch *gentoxische* und kanzerogene Eigenschaften erkennen lassen. Pyrrolizidinhaltige *Phytopharmaka* sind als Mittel gegen Erkältungskrankheiten, gegen krampfartige Schmerzen der ableitenden Harnwege und zur äußerlichen Anwendung bei Prellungen,



Zerrungen und Verstauchungen in Gebrauch. Tagesdosen und maximale Anwendungsdauer wurden neuerdings vom Bundesgesundheitsamt begrenzt.

• Adlerfarn gehört vorwiegend in Japan zum Nahrungsangebot. Dort wurde nach täglicher Aufnahme ein dreifach erhöhtes Risiko ermittelt, an Speiseröhrenkrebs zu erkranken. Als bedeutendstes Kanzerogen im Adlerfarn wird Ptaquiloidisid angesehen. Eine synergistische Wirkung mit anderen, schwächeren Kanzerogenen im Adlerfarn wird vermutet.

• Tannine gehören zu den pflanzlichen Polyphenolen, die in Teezubereitungen, Rotwein, Früchten und Gemüse gefunden werden. Im Tierexperiment ist die parenterale Zufuhr erforderlich, da die enterale Resorption nach oraler Aufnahme praktisch ohne Bedeutung ist.

• Cycasin gilt als Hauptkanzerogen in Zykadenblättern und -früchten. Auf Guam, in Japan, Australien sowie Zentral-, Ost- und Südafrika wird es in der Regel mit der Nahrung aufgenommen. Im Tierversuch (Ratte) zeigten sich Wirkungen an Leber, Niere und Darm.

• Limonen, in Zitrusölen enthalten, hat schwache kanzerogene Wirkungen an Mäusehaut hervorgerufen.

• Psoralen und seine Derivate stellen Furocumarinverbindungen dar, die durch UV-Licht aktiviert werden.

• Allylthiocyanat ist Hauptbestandteil des Senföls. Es entsteht durch enzymatische Hydrolyse des Sinigrins, einer flüchtigen Verbindung in Pflanzenölen.

Die aufgeführten Kanzerogene stellen eine Auswahl aus mehr als 50 pflanzlichen Naturstoffen dar, die an Nagern krebserzeugende Eigenschaften erkennen ließen. Einige von ihnen haben auch als Arzneistoffe Verwendung gefunden. Dies zeigt Tabelle (3). Sie führt neben Griseofulvin und Psoralenen wiederum Tannine auf, Verbindungen, die nicht wie Adriamycin, Daunomycin, Bleomycin und Dimethomezine wegen ihrer krebshemmenden Ei-

Quelle:	Nahrungskomponenten:
- Verschimmelte Nahrung	- Aflatoxine
	- Versicolorin A
	- Citrinin
	- Penicillinsäure
	- Griseofulvin
	- PR-Toxin
	- T-2-Toxin
	- Sterygmatozystin
	- Ochratoxin A
	- Patulin
	- Penicillin G
	- Luteoskyrin
	- Rugulosin
	- Fusarenon X
- Speisepilze	- Hydrazine
- Pflanzeninhaltsstoffe	- Safrole (Sassafras-Pflanzen, Schweizer Pfeffer)
	- Pyrrolizidine (Schwarzwurzeln)
	- Alkaloide (Pflanzen, Kräutertees, gelegentl. in Honig)
	- Pflanzl. Östrogene (Weizen, Reis, Futtergetreide)
	- Karzinogene des Adlerfarns (Salate, Kuhmilchprodukte über die Nahrungskette)
	- Tannine (Tee, Wein, Pflanzen)
	- Ethylcarbamate (Wein, Bier, Joghurt)
	- Cycasin (Mehl, Stärke aus Cycaden)
	- Limonen (Zitrusöle)
	- Psoralen und Analoge (Petersilie, Sellerie, Feigen)
	- Allylthiocyanat (Kohlrarten, Speiseöl Meerrettich)

(2) Nahrungskomponenten mit krebserzeugender Wirkung im Tierversuch.

- Natürlich vorkommende
Chinone:
Adriamycin,
Daunomycin,
Mitomycine (A, B, C) u. a.
- Aristolochiasäure
- Azaserin
- Bleomycin
- Chloramphenicol
- Griseofulvin
- Psoralen
- Streptozotocin
- Tannine
- Thioharnstoff

(3) Therapeutisch verwendete
Naturstoffe mit nachgewiesener oder
vermuteter Kanzerogenität.

genschaften Eingang in die Arzneimitteltherapie gefunden haben. Aristolochiaextrakte wurden bereits im Altertum in der Geburtshilfe und bei Insektenstichen gegeben. Die beiden Verbindungen (Abb. 4), die in unseren Tagen gegen Arthritis, Gicht, Rheumatismus und zur Beschleunigung der Wundheilung verwendet wurden, haben an Ratten und Mäusen Tumoren des Verdauungstraktes und des Urogenitaltraktes, bei Mäusen außerdem maligne Lymphome hervorgerufen.

In Tabelle (5) sind Kanzerogene aufgelistet, die aus Heilkräutern isoliert wurden. Die meisten von ihnen stammen aus Heliotropium und Senecio Spezies. Nicht unerwähnt bleiben sollen Anthrachinone aus *Rubia tinctorum* L., Aloe, *Sennae foliae*, *Frangula cortex* und *Rhei radix*. Einige wurden als Abführmittel verwendet, Extrakte aus *Rubia tinctorum* L. gegen Harnsteinleiden. Nach neueren Erkenntnissen handelt es sich teilweise um krebszerzeugende Verbindungen, teilweise um sogenannte Tumorpromotoren³. Aecolin gilt als eigentliches Kanzerogen der Betelnuß und des Beteltabaks, dessen Genuß als Ursache von Karzinomen der Mundhöhle, des Pharynx und des Oesophagus angesehen wird. 250 Millionen Menschen in Südostasien sind Betelkonsumenten.

Struktur-Wirkungs-Beziehungen

Unser heutiges Wissen über kanzerogene Naturstoffe ist nicht das Ergebnis einer systematischen Aufarbeitung des Problems, und insofern bestehen zweifellos erhebliche Unsicherheiten. Diese verstärken sich bei der Betrachtung der Strukturelemente zahlreicher Naturstoffe, die als kritisch beurteilt werden müssen. Ein Blick auf *alkylierende Antibiotika* aus *Streptomyces* Spezies (Abb. 6) zeigt bei direkt alkylierenden Verbindungen sowohl Aziridin- wie auch Epoxi- und Maleimidkonfigurationen und Acetylenstrukturen.

Aufmerksamkeit ist auch der chinoiden Struktur der Mithomycine zu schenken. Chinoiden Strukturen finden sich auch bei alkylierenden Antibiotika aus *Aspergillus* Spezies (Abb. 7) neben Epoxigruppierungen. Indirekt reagierende Naturstoffe, wie Aflatoxin B₁, werden im Stoffwechsel in *Metabolite* mit derartigen reaktiven Eigenschaften überführt. Derzeit sind etwa 200 natürlich vorkommende Chinone bekannt, die nach *Metabolisierung* zu bioreduktiven *Alkylantien* möglicherweise kanzerogene Eigenschaften erhalten, und die in der Mehrzahl experimentell nicht getestet sind. Kürzlich wurde gezeigt, daß die als Antioxidantien geltenden Naturstoffe Sesamol, Katechol und Para-Methylkatechol bei der Ratte Magenkrebs hervorrufen. Bei Katechol und seinen Konjugaten handelt es sich um eine Verbindung, die bis zu 30 mg/Tag im Urin ausgeschieden wird. Sowohl Katechol wie auch Paramethylkatechol wirken ebenfalls als Promotoren. Wie Inhibitoren der Kanzerogenese dürften Promotoren in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen in unserer Nahrung enthalten sein, wobei synergistische Effekte beider Wirkprinzipien zu unterstellen sind. Beide Komplexe sind unzureichend untersucht. Auch das Zusammenspiel natürlicher und anthropogener Kausalfaktoren bei der Umweltkanzerogenese ist weitgehend noch „Terra incognita“.

Kanzerogene in einheimischen Hölzern

Das Vorkommen und die Bedeutung krebszerzeugender Naturstoffe in bisher unbekanntem Verbindungen in Laubhölzern, vor allem in Buchen- und Eichenholz, wird gegenwärtig in der Arbeitsmedizin heftig diskutiert. Anlaß sind weltweit beobachtete Häufungen sonst seltener Krebsgeschwülste der inneren Nase bei Beschäftigten in holzverarbeitenden Betrieben, insbesondere in der Möbelindustrie. Als Ursache wur-

den Stoffe der Holzbearbeitung, krebszerzeugende Stoffwechselprodukte aus Mikroorganismen, physikalische Prinzipien und schließlich auch natürliche gentoxische Holz-inhaltsstoffe diskutiert. Letztere scheinen nach neuen Forschungsergebnissen nachgewiesen zu sein. Experimentelle Studien im Institut für Hygiene und Arbeitsmedizin am Universitätsklinikum Essen gelangten zu folgenden Ergebnissen:

- Die für chemische Kanzerogene typische Veränderung des Erbgutes spezieller Testbakterien läßt sich auch mit sauren Alkoholextrakten aus Buchenholz demonstrieren.
- Fraktionen dieses Extraktes erzeugen Hautkrebs im Pinselungsversuch bei der Maus.
- An der Nasenschleimhaut der Ratte läßt sich mit dem Extrakt ein dosisabhängiger Anstieg sogenannter Mikrokernbildungen erzeugen, der erbgutverändernde Eigenschaften getesteter Substanzen oder Substanzgemische erkennen läßt.

Inzwischen wurden diese Befunde von anderen Autoren und mit Hilfe anderer Modelle zum Nachweis erbgutverändernder Komponenten im Buchen- und auch im Eichenholz bestätigt. Extrakte aus Nadelhölzern zeigten demgegenüber solche Wirkungen nicht.

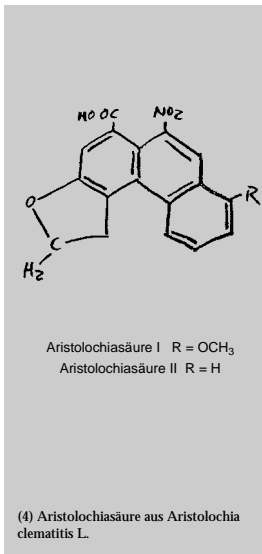
Im September 1994 stufte die Internationale Agentur für Krebsforschung der WHO (IARC) in Lyon Holzstäube als erwiesene Humankanzerogene ein. Da das verursachende Prinzip noch nicht aufgeklärt ist, wurden die Untersuchungen aus Essen als richtungweisend in den Berichtband über die Einstufung aufgenommen. Im übrigen folgte die IARC mit ihrem Beschluß der Einstufung von Stäuben der Hölzer Buche und Eiche, die in der Bundesrepublik bereits 1985 von der MAK-Kommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft vollzogen worden war. Dieses Beispiel – für den Weg zur Erkenntnis von natürlichen Kanzerogenen – ist in mehrfacher Hinsicht

aufschlußreich. Einmal lenkt es die Aufmerksamkeit auf analoge Krebserkrankungen der inneren Nase nach Exposition gegenüber Leder- und Baumwollstäuben, die ebenfalls durch einen noch unbekanntem Mechanismus ausgelöst werden. Zum anderen zeigt es, daß auch gegenwärtig noch weitere Naturstoffe als krebszerzeugend identifiziert werden können. Stoffe, an deren weiter Verbreitung niemand zweifeln kann.

Krebszerzeugende Naturstoffe – ein Hochrisiko?

Aus den von Doll und Peto vorgelegten Berechnungen läßt sich ableiten, daß kanzerogene Naturstoffe bei globaler Betrachtung nicht zu den Hauptverursachern menschlicher Krebserkrankungen zu zählen sind. Für die zunehmende Zahl mancher Krebsleiden können sie kaum verantwortlich sein, da etwa die Belastung unserer Nahrung durch natürliche Kanzerogene sich seit Bestehen der Menschheit nicht wesentlich geändert haben dürfte.

Unser wachsendes Wissen über Vorkommen und Verbreitung dieser Gefahrstoffe lehrt aber auch, daß der globalen Risikoabschätzung eine differenzierende Betrachtung möglicher Risikopopulationen sowie regionaler und mit der Verwendung von Naturstoffen einhergehender abgrenzbarer Hochrisiken an die Seite zu stellen ist. Auch wirkt sich eine Dauerbelastung durch kleinste Tagesdosen sogenannter Latenzgifte angesichts wachsender Lebenserwartung heute anders als vor Jahrtausenden aus. Und schließlich stehen uns heute eine größere Anzahl an Interventionsmöglichkeiten zur Verfügung als früher. Die bestehenden Vorschriften des Verbraucherschutzes sind deshalb mehr als legitimiert. Neben Vermeidungsstrategien in bezug auf bestimmte einzelne Stoffe ist jedoch eine Krebsverhütung durch bewußte Nahrungsgestaltung zu fordern. Bei weitem der



größte Anteil des Krebsgeschehens könnte verhindert werden durch eine Abkehr von schlackenarmer, kalorien- und fettreicher Ernährung und durch die Vermeidung von Vitaminmangelzuständen. Letztere sind vor allem im Hinblick auf die Schutzvitamine A, Vitamin E und Vitamin C zu betonen sowie auf die Vorstufe des Vitamins A, das β -Carotin.

Der weiterführende Gedanke, auch andere als nahrungsabhängige Krebsformen durch die tägliche Aufnahme schützender Verbindungen zu reduzieren, wird zur Zeit auf breiter Basis diskutiert. Wissenschaftlich können derartige Versuche durch moderne Ansätze einer molekularen Epidemiologie überprüft werden, die nicht erst nach manifestester Krebserkrankung, sondern bereits im Voraus zu handlungsrelevanten Ergebnissen gelangen kann.

Verbesserte Methoden des Nachweises sogenannter genotoxischer Einflüsse auf den Menschen versprechen für die nahe Zukunft, daß Prioritäten bei der Bekämpfung von Krebsrisiken, gleichgültig ob industrieller oder natürlicher Herkunft, besser zu begründen sind. Ob und welche Strategien der aktiven Krebsprävention Erfolg versprechen, sollte dann vor Ablauf langer Latenzzeiten erkennbar sein.

Summary

An increasing number of naturally occurring carcinogens has been identified during the last decades which can be incorporated into the human body as constituents of food, drugs and plant extracts. Among these compounds, aflatoxins and aecolin, a compound of the betel nut, constitute

major cancer risks. Regardless whether or not naturally occurring carcinogens have more significance as causes of human cancer than synthesized chemicals, they clearly contribute to the overall but even more to the individual cancer risk. This is demonstrated by an overview covering a wide range of such compounds including wood constituents.

Der Autor:

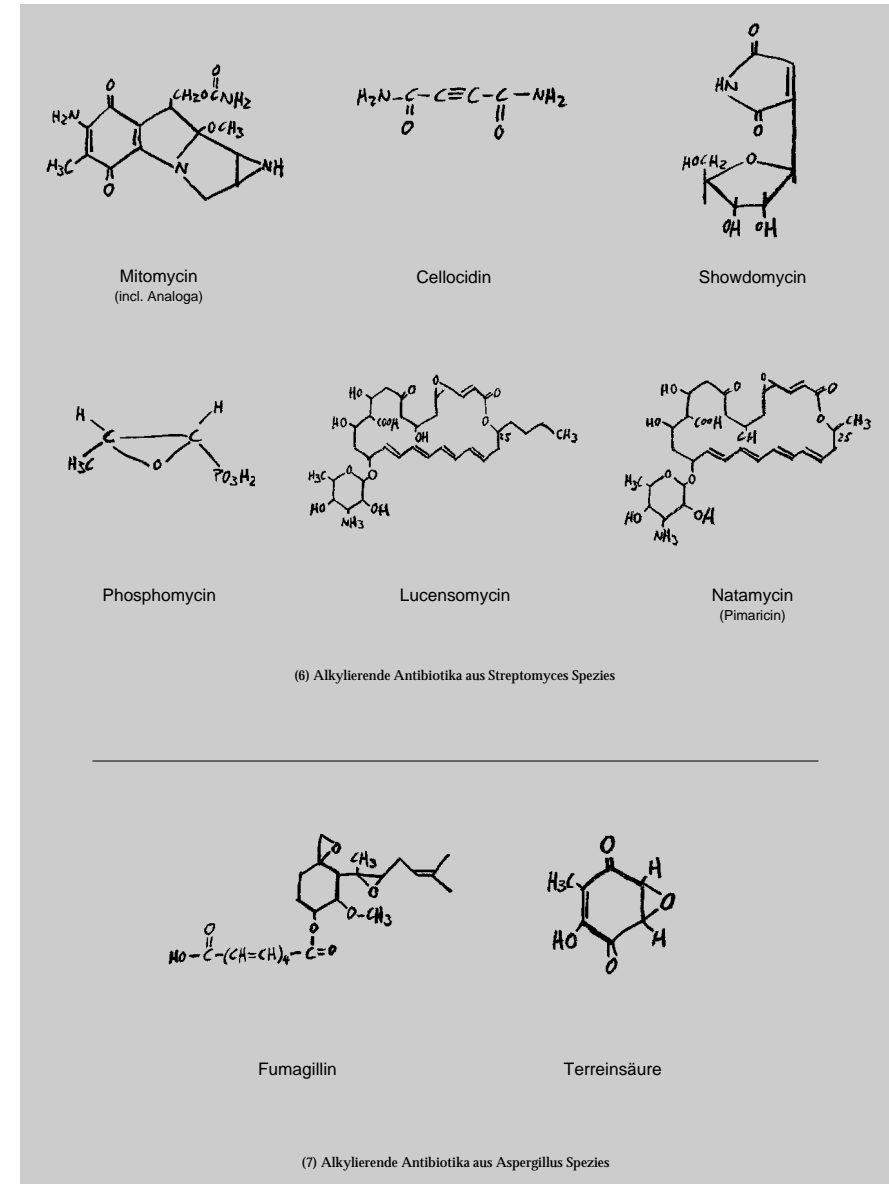
Klaus Norpoth studierte katholische Theologie, Philosophie, Psychologie und Medizin in Münster, Freiburg und West-Berlin. Nach dem medizinischen Staatsexamen 1960 habilitierte er sich 1969 für das Fach Physiologische Chemie an der medizinischen Fakultät der Universität Münster. 1971 wurde er zum wissenschaftlichen Rat und Professor, 1973 zum kommissarischen Leiter des Institutes für Staublungenforschung und Arbeitsmedizin der Universität Münster ernannt. 1972/73 bekleidete er das Amt des Dekans der Medizinischen Fakultät der Universität Münster. 1981 wurde Klaus Norpoth auf die Professur für das Fach Arbeits- und Sozialmedizin am Institut für Hygiene und Arbeitsmedizin der Universität GH Essen berufen. Seine wissenschaftliche Arbeit – insbesondere zum Forschungsschwerpunkt *Arbeits- und umweltmedizinische Toxikologie* – dokumentiert sich in etwa 200 Publikationen. Seit 1979 ist Professor Dr. med. Klaus Norpoth Leiter der Arbeitsgruppe *Aufstellung von MAK-Werten der Kommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe* der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Anmerkungen:

- 1) McCann et al. 1975.
- 2) Die in diesem Abschnitt benutzten Fachtermini sind nicht ins Glossar aufgenommen worden, da sich die hier aufgeführten Informationen besonders an den fachlich interessierten Leser richten.
- 3) Westendorf et al. 1994.

Literatur:

- Ames BN, Magaw R, Gold LS, 1987: Ranking Possible Carcinogenic Hazards. *Science* 236: 271 ff.
- Ames BN, 1983: Dietary Carcinogens and Anticarcinogens, Oxygen Radicals and Degenerative Diseases. *Science* 221.
- Ames BN, Gold LS, 1990: Falsche Annahmen über die Zusammenhänge zwischen der Umweltverschmutzung und der Entstehung von Krebs. *Angew. Chem.* 102: 1233-1246.
- Carr BJ, 1985: Chemical Carcinogens and



Substanzen	Herkunft
Arecolin	Betel Palme
Heliotrin	Heliotropum Sp., Kartoffelkraut u.a.
Lasiocarpin	Heliotropum Sp., Symphyrum Sp.
Dehydroheliotridin	Heliotropum Sp.
Retronecin	Senecio Sp.
Isatidin	Senecio Sp.
Monocrotalin	Crotalaria Sp.
Jacobin	Senecio Sp.
Riddelin	Senecio Sp.
Dehydrorretonecin	Senecio Sp., Farfugium jap., Tussilago farfara
Petasitenin	Petasites japonicus
Sanguinarin	Argemone, Papaveraceen
β -Asaron	Calamus

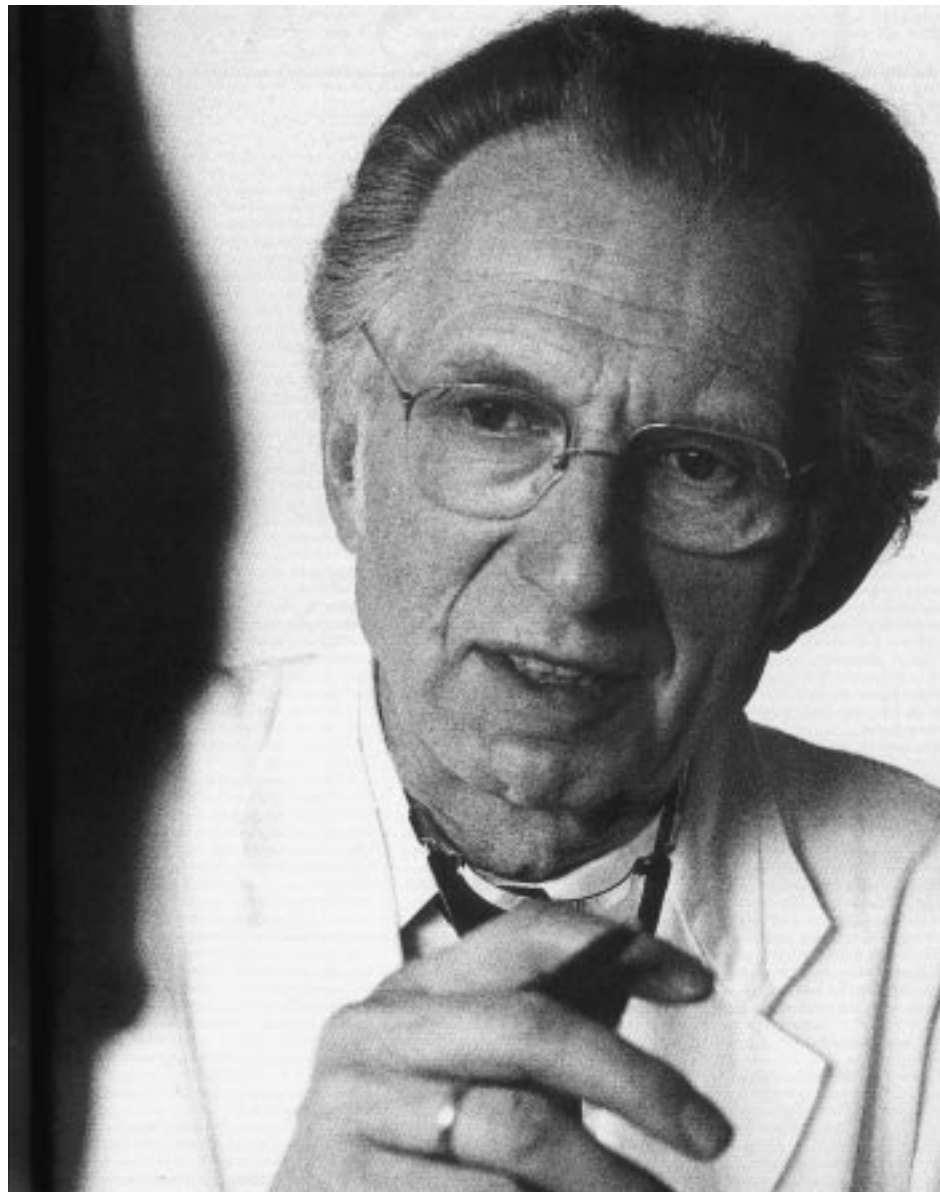
(5) Tierexperimentell wirksame Kanzerogene in Heilkräutern* (Quelle: *Lai u. Woo, 1987).

Inhibitors of Carcinogenesis in the Human Diet. Cancer 55: 218-224.

- Coduro E, 1986: Chemische Schadstoffe in Lebensmitteln. Zbl. Bakt. Hyg. B 183: 221-223.
- Doll R, Peto R, 1981: The Causes of Cancer: Quantitative Estimates of Avoidable Risks of Cancer in the United States Today. JNCI 66: 1192-1309.
- Editorial: Edible Carcinogens. The Lancet, January, 14, 87 (1984).
- Habs M, Habs H, Forth W, 1991: Risikobewertung pyrrolizidinhaltiger Arzneistoffe. Deutsches Ärzteblatt - Ärztliche Mitteilungen, 88. Jg., 41: A: 3425-3432, B: 2288-2293, C: 1928-1935.
- Lai DY, Woo Y-T, 1987: Naturally Occurring Carcinogens: An Overview. Environ Carcinog Rev 5: 121-74.
- Mc Cann, J et al., Proc. Nat. Acad. Sci. USA 72, 979-983 (1975).
- Maugh Th H, 1979: Cancer and Environment: Higginson Speaks Out. Science 205.
- Mengers U, 1988: Tumour induction in mice following exposure to aristolochic acid. Arch Toxicol 61: 504-505.
- Moore HW, Czerniak R, 1981: Naturally Occurring Quinones as Potential Bioreductive Alkylating Agents. Medicinal Research Reviews, Vol 1, No. 3: 249-280.
- Schmähl D, Thomas C, Auer R, 1977: Iatrogenic Carcinogenesis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Weinberg AM, Ingmanson DE, Shapiro AM, Hunter JE, Epstein SS, Swartz JB, Ames BN, 1984: Cancer and Diet. Letters. Science 224: 658 ff.
- Westendorf, J. et al.: In: Dengler, HJ und Mutschler, E (Hrsg.): Fremdstoffmetabolismus und klinische Pharmakologie. G. Fischer, Stuttgart, Jena, New York 1994, S. 65-78.

Prof. Dr. med. Klaus Norpoth
im Gespräch mit einem Patienten am
Institut für Hygiene und Arbeitsmedizin
des Universitätsklinikums Essen.

Foto: Matthias Locker



DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/23617

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20201019-130025-0

Essener Unikate 4/5(1994)

Alle Rechte vorbehalten.