



Peter Fabian

Atmosphäre und Umwelt

Chemische Prozesse · Menschliche Eingriffe

Ozon-Schicht · Luftverschmutzung ·
Smog · Saurer Regen

Vierte, erweiterte und aktualisierte Auflage
mit 37 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona Budapest

Professor Dr. Dr. h.c. Peter Fabian

Lehrstuhl für Bioklimatologie und Immissionsforschung
der Universität München
Hohenbachernstraße 22
8050 Freising-Weihenstephan

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Fabian, Peter: Atmosphäre und Umwelt : chemische Prozesse, menschliche Eingriffe ; Ozon-Schicht, Luftverschmutzung, Smog, saurer Regen / Peter Fabian. – 4., erw. und aktualisierte Aufl. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; London ; Paris ; Tokyo ; Hong Kong ; Barcelona ; Budapest : Springer, 1992

ISBN-13: 978-3-642-77694-6 e-ISBN-13: 978-3-642-77693-9
DOI: 10.1007/978-3-642-77693-9

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1983, 1987, 1989, 1992
Softcover reprint of the hardcover 4th edition 1992

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Satz: Fotosatz-Service Köhler, Würzburg; Einbandgestaltung: Klaus Lubina, Schöneiche;

51/3020-5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort zur vierten Auflage

Die Menschheit hat von Anbeginn die Umwelt als Müllkippe zum Nulltarif benutzt. Die Luft, der Boden und die Gewässer haben schon immer als Deponie gedient für alles, was man loswerden wollte und mußte; Rauch, Abgase, Hausmüll, Fäkalien, Industrieabfälle und Abwässer. Niemand machte sich Gedanken darüber, was wohl mit den Abfällen unserer Zivilisation in der Umwelt passieren würde, denn die Lufthülle, der Boden, Flüsse und Meere wurden als unendlich große Reservoirs mit grenzenloser Aufnahmekapazität betrachtet.

Das ging gut, solange die Erde dünn besiedelt war. Mit dem Anwachsen der Bevölkerung, insbesondere durch die zunehmende Industrialisierung, wurde die Aufnahmekapazität der Umwelt aber zunehmend überfordert: Flüsse, die sauber und fischreich waren, wurden durch das Einleiten von Abwässern zu toten Kloaken. Ölderivate, Chemikalien und Schwermetalle vergifteten den Boden, und Abgase jeglicher Art, hemmungslos in die Atmosphäre abgelassen, führten zu regionalen Umweltbelastungen und Schäden. Zuerst waren es hier die Rauchschäden im Nahbereich der Hüttenreviere oder der gefürchtete Londoner Smog, heute haben wir zunehmend mit dem photochemischen Smog, verbunden mit der Bildung giftiger Photooxidantien wie Ozon, und mit dem sauren Niederschlag zu tun.

Die Umwelt ist eben nicht unendlich groß. Überall, wo der Mensch mehr Schadstoffe in die Umwelt abläßt, als diese über ihre eigenen Kreisläufe verarbeiten und abbauen kann, kommt es zu Problemen. Und weil Umweltprobleme im Grunde „nur“ Mengenprobleme sind, wird auch verständlich, warum wir hier nie präventiv handeln: Jede Schadstoffemission fängt mit kleinen Mengen an, die als unschädlich betrachtet werden.

Deshalb werden zunächst auch keine Vorkehrungen für die Verringerung der Schadstoffemission getroffen. Das Problem macht sich erst bemerkbar, wenn die ausgestoßenen Mengen zu groß werden. Dann ist es aber sehr schwierig, im Dschungel der politischen und wirtschaftlichen Interessen eine Lösung zu finden, da diese in aller Regel mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Der „Leidensdruck“ muß schon sehr groß werden,

bevor die Gesellschaft bereit ist, für Abhilfe zu sorgen. Schwierig wird es, Umweltprobleme zu beseitigen, wenn grenzüberschreitende Schadstoffe im Spiel sind. So sind noch heute in Deutschland viel zu wenige, in anderen EG-Ländern praktisch noch gar keine Fahrzeuge mit geregelter 3-Wege-Katalysator ausgestattet, obwohl diese Technik, mit der die zur Zeit effizienteste Abgasreinigung möglich ist, seit vielen Jahren eingeführt und erprobt ist. Eine ganz neue Dimension haben globale Umweltprobleme, die sich in den kommenden Jahren wohl zu den wesentlichen Problemen der Menschheit entwickeln werden: Zwei Millionen Tonnen halogenierter Kohlenwasserstoffe, die als Treibgase, Kältemittel, Bläh- und Lösungsmittel alljährlich in die Atmosphäre entweichen, führen zu einer fortschreitenden Ausdünnung der schützenden Ozonschicht. Diesem langsamen Schwund überlagert sich jedes Jahr während der Monate September/Oktober der dramatische Effekt des Ozonloches, indem mehr als die Hälfte des Ozons über der Antarktis beinahe schlagartig vernichtet wird. Auch dieser geht auf das Konto der halogenierten Kohlenwasserstoffe.

Nicht minder schwerwiegend ist das Anwachsen des Kohlendioxidgehaltes unserer Atmosphäre als Folge der Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte und der großflächigen Brandrodung, insbesondere in den tropischen Waldgebieten. Als Folge des hierdurch verstärkten Treibhauseffektes verändert sich weltweit das Klima. Mit den Folgen hat die gesamte Menschheit fertigzuwerden. Mehr als 90% der halogenierten Kohlenwasserstoffe werden in den Industrieländern auf der Nordhalbkugel emittiert. Als Folge schrumpft die Ozonschicht weltweit, und das Ozonloch klafft über der Antarktis. Mehr als 80% der CO₂-Emission erfolgt in den Ländern der industrialisierten Welt, das Klima ändert sich dagegen in globalem Maßstab.

Deshalb sind tiefgreifende Maßnahmen zur Reduktion der Emission von Schadgasen auf weltweiter Ebene geboten. Der „Klimagipfel“ von Rio hat gezeigt, daß in vielen Köpfen das Verständnis hierfür wächst, daß wir aber von wirksamen Maßnahmen noch weit entfernt sind.

Seit dem Erscheinen der 3. Auflage von „Atmosphäre und Umwelt“, die wiederum erfreulich schnell ihre Leser gefunden hat, haben sich tiefgreifende Veränderungen vollzogen.

Mit dem Wegfall des Eisernen Vorhangs begann die Bildung neuer politischer Strukturen, die heute noch keineswegs abgeschlossen ist. Gleichzeitig wurden im ehemals sozialistischen Machtbereich schwerste Umweltschäden offenbar, die auf die exzessive Belastung von Luft, Boden und Gewässern mit Schadstoffen aller Art zurückzuführen sind und kostspielige Sanierung erfordern.

Auch auf dem Gebiet der atmosphärischen Umweltchemie gab es viel Neues. So haben wir neben dem antarktischen Ozonloch inzwischen

erheblichen Ozonschwund auch über der Arktis, ja sogar in mittleren nördlichen Breiten. Offensichtlich ist die Verschmutzung der Stratosphäre mit Halogenen, freigesetzt aus FCKW-Verbindungen, bereits so weit fortgeschritten, daß sich heterogene Reaktionen an Partikeln und Tröpfchen jedweder Art, an den natürlichen Aerosolen der Sulfatschicht wie auch an vulkanischem Aerosol, wie es der Pinatubo freigesetzt hat, ozonzerstörend auswirken können.

Die Neuauflage bot die Möglichkeit, das Buch wieder auf den aktuellen Stand zu bringen. Aktualisiert und erweitert wurden vor allem die Kapitel zum Flugverkehr, zum Photosmog, zur Problematik des Waldsterbens, zum Ozonabbau in der Stratosphäre und zum Ozonloch. Das Literaturverzeichnis wurde um 35 Arbeiten erweitert und umfaßt jetzt 169 Titel. Daneben konnten einige Druckfehler der 3. Auflage korrigiert werden.

Möge auch die erweiterte und aktualisierte vierte Auflage einen Beitrag zum Verständnis der komplexen Umweltprozesse leisten.

München, im Juli 1992

Peter Fabian

Vorwort zur dritten Auflage

Die erweiterte zweite Auflage wurde innerhalb von nur 2 Jahren verkauft. Die erfreulich große Nachfrage spiegelt die wachsende Bedeutung der Umweltprobleme in der öffentlichen Diskussion.

Die Neuauflage bot die Chance, das Buch auf den neuesten Stand des Wissens zu bringen. So wurde dem Ozonloch über der Antarktis, das in der zweiten Auflage nur in den *Schlußbemerkungen* kurz abgehandelt wurde, nunmehr ein vollständiges neues Kapitel gewidmet. Zur anthropogenen Veränderung der Ozonschicht, zum Treibhauseffekt und den *Schlußbemerkungen* wurden einige ergänzende Abschnitte hinzugefügt. Sonst wurde das Buch praktisch unverändert gelassen.

Möge auch die vorliegende dritte Auflage dazu beitragen, daß noch mehr Verständnis für die komplexen Zusammenhänge unserer atmosphärischen Umwelt geweckt wird.

München, im September 1989

Peter Fabian

Vorwort zur ersten Auflage

Die Verschmutzung der Umwelt durch den Menschen ist nicht neu. Schon in der Bronzezeit haben schwefelhaltige Abgase gewiß Vegetationsschäden verursacht, denn bei der Verhüttung von Erzen wird Schwefel ausgetrieben. Der wahrscheinlich älteste Bericht hierzu stammt von dem älteren Plinius (23 bis 79 n. Chr.), dessen *Historia naturalis* die Empfehlung des griechischen Geographen *Strabo* enthält, Schmelzöfen für Silber möglichst hoch ins Gelände zu bauen, um den verderblichen Rauch in die Höhe abzuführen.

Waldschäden durch Luftverunreinigungen werden in Deutschland erstmalig gegen Mitte des 19. Jahrhunderts gemeldet: Total zerstörte Wälder an den Metallhütten des Harzes und des Erzgebirges. Mit der Entstehung großer Industriereviere an Ruhr und Saar, in Oberschlesien und in Mitteldeutschland weiteten sich um die Jahrhundertwende die Immissionschäden aus. Ausgedehnte Wälder gingen im Nahbereich der Industriebetriebe zugrunde.

Solche Schäden waren verhältnismäßig klar zu übersehen: Wenn nach Inbetriebnahme eines Hüttenwerkes der benachbarte Wald abstirbt, so ist der kausale Zusammenhang in der Regel selbst für den Laien verständlich. Seit etwa 10 Jahren haben wir es aber mit einem neuen Phänomen zu tun, das selbst für den Fachmann schwer zu verstehen ist: Aus fast allen Gebieten Mitteleuropas werden schwere Waldschäden gemeldet. Besonders im Schwarzwald und im Bayerischen Wald, Erholungsgebieten mit „Reinluftbedingungen“ also, ist die Existenz der Tannen und Fichten, neuerdings auch der Buchen, bedroht. Die Ursachen für das heutige Waldsterben sind äußerst komplex. Es wirken mehrere Faktoren zusammen, wobei die Luftverschmutzung, insbesondere die Emission von Schwefeldioxid und Stickoxiden, die Hauptursache sein dürfte. Schwefeldioxid wird heute überwiegend bei der Verbrennung von Kohle und Öl freigesetzt; das in den Hüttenwerken anfallende Schwefeldioxid wird schon seit vielen Jahren größtenteils aufgefangen und in Schwefelsäure, einen begehrten Rohstoff der chemischen Industrie, umgewandelt. Stickoxide werden überwiegend aus Kraftfahrzeugen sowie Kraft- und Fernheizkraftwerken ausgestoßen.

Luftverschmutzung ist, wie dieses Beispiel zeigt, nicht nur ein lokales Problem, das auf die eigentlichen Emissionsgebiete beschränkt bleibt. Die Injektion von Schadstoffen kann sich über eine ganze Region, einen Kontinent und sogar global auswirken. Die Luftströmungen verteilen die in die Atmosphäre abgelassenen Substanzen, und durch chemische Reaktionen werden aus ihnen während dieser Zeit neue Stoffe gebildet. Häufig sind weniger die eingebrachten Schadstoffe als vielmehr deren chemische Folgeprodukte schädlich. So stellt das Ablassen der halogenierten Kohlenwasserstoffe CFC-11 und CFC-12, die in Europa immer noch als Treibgase für Sprühdosen im Handel sind, an sich keine Gefahr dar, denn diese Substanzen sind sehr langlebig und damit „umweltfreundlich“. Aber gerade auf Grund ihrer Langlebigkeit reichern sich CFC-11 und CFC-12 in den unteren Luftschichten an und diffundieren von dort allmählich in die Höhe, wo unter Einwirkung der Ultraviolett-Strahlung der Sonne Folgeprodukte entstehen, welche nun die Ozon-Schicht angreifen.

Derart komplexe Vorgänge sind für Nichtspezialisten kaum noch zu verstehen. Dies liegt nicht zuletzt daran, daß sich das *junge Gebiet der Luftchemie* erst in den letzten 20 Jahren stürmisch entwickelt hat und ihre Ergebnisse fast nur über die Spezialliteratur zugänglich sind. Mit dem Problem der Umweltverschmutzung sollte aber jeder, der Verantwortung empfindet, vertraut sein. Eine sinnvolle Umweltpolitik kann nicht mit Emotionen, sondern nur mit Sachkenntnis betrieben werden. Es geht ja schließlich nicht darum, unsere Zivilisation abzuschaffen – wir wollen ja elektrischen Strom verbrauchen, Auto fahren, hochwertige Konsumgüter besitzen und mit dem Flugzeug verreisen, und eben damit verschmutzen wir direkt oder indirekt unsere Umwelt! Es geht vielmehr darum, einen tragbaren Kompromiß aller Übel zu erzielen, wobei jeder Einzelne durch Sparsamkeit und Umsicht und die Gesellschaft über geeignete Emissionsvorschriften dazu beitragen sollten, daß sich die Umweltbelastung in akzeptablen Grenzen hält. So sollten sich Kernkraftgegner darüber im Klaren sein, daß der Verzicht auf Kernenergie-Anlagen für absehbare Zeit unter Umständen durch mehr Kohle- und Schwerölkraftwerke kompensiert werden muß, wodurch der Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre weiter erhöht wird, – ganz zu schweigen von der Schwefeldioxid-Emission.

In diesem Buch werden die komplexen chemischen Prozesse in unserer Atmosphäre verständlich dargestellt. Breiter Raum wird der Beschreibung der natürlichen Vorgänge eingeräumt, deren Kenntnis für das Verständnis der Störungen durch menschliche Aktivitäten notwendig ist. Aus der Fülle der bekannten Umweltprobleme wurden diejenigen ausgewählt, die zur Zeit am schwerwiegendsten erscheinen.

Der größte Teil dieses Buches entstand während eines Forschungsaufenthaltes an der University of California in Irvine. Der Max-Kade-Foundation, die diesen Aufenthalt finanziell ermöglichte, sei an dieser Stelle gedankt.

Irvine, California, im September 1983

Peter Fabian

Inhaltverzeichnis

Einleitung	1
1 Die Evolution der Erdatmosphäre	7
1.1 Vom solaren Nebel zur Ur-Atmosphäre	7
1.2 Evolution des atmosphärischen Sauerstoffs	11
1.3 Sedimente und Fossilien: Konservierte Indizien der atmosphärischen Evolution	17
2 Die Ozon-Schicht und die photochemischen Prozesse in der mittleren Atmosphäre	26
2.1 Die Sauerstoff-Reaktionen	26
2.2 Der Einfluß der atmosphärischen Dynamik	30
2.3 Die katalytischen Ozon-Abbaureaktionen	35
2.4 Die Verkoppelung der katalytischen Ozon-Abbauzyklen und die Reservoir- und Senkengase	43
2.5 Problematik der Modellrechnungen	49
2.6 Solare und kosmische Einflüsse	53
3 Photochemie der Troposphäre	60
3.1 Die Troposphäre als System	60
3.2 Die Rolle des OH-Radikals für die troposphärische Photochemie	63
3.3 Die natürlichen Quellgase	67
3.4 Das troposphärische Ozon	73
4 Einflüsse menschlicher Aktivitäten: Luftverschmutzung als regionales und globales Umweltproblem	78
4.1 Smog in Ballungsgebieten	78
4.2 Saurer Regen	89

XIV Inhaltsverzeichnis

4.3	Zur Problematik des Waldsterbens	94
4.4	Flugzeuge und Kernwaffen: Einflüsse direkter Injektion von Stickoxiden auf die Ozon-Schicht	102
4.5	Einfluß halogener Kohlenwasserstoffe auf die Ozon-Schicht	107
4.6	Das Ozonloch über der Antarktis	114
4.7	Anthropogene N ₂ O-Emission durch die Landwirtschaft . . .	123
4.8	Der Anstieg des atmosphärischen Kohlendioxid-Gehaltes . .	123
4.9	Schlußbemerkungen	127
5	Literatur	134
6	Sachverzeichnis	142