

Gerhard Öhlmann

**Detlev Möller, Luft – Chemie · Physik · Biologie · Reinhaltung · Recht.
Walter de Gruyter, Berlin New York 2003. 750 Seiten, 168 Abbildungen,
178 Tabellen.**

Bereits der Umfang und die Begriffe des Untertitels des vorliegenden Werkes machen deutlich, dass es sich bei diesem Thema nicht, wie es zunächst vielleicht scheinen will, um ein sehr begrenztes Wissensgebiet handelt, sondern vielmehr um einen sehr facettenreichen, sich schnell entwickelnden, angewandten Zweig der Chemie, dessen Bedeutung angesichts komplexer anthropogener Einflüsse auf Atmosphäre und Umwelt weiter zunimmt. Es kann daher nur begrüßt werden, dass der Verlag die Herausgabe des Werkes als Pendant zu dem Buch „Wasser“ initiiert und in unserem Mitglied, Hrn. Möller, einen auf diesem Gebiet sehr erfahrenen und renommierten Wissenschaftler als Autor gefunden hat.

Das Buch soll nach dessen erklärter Absicht sowohl als Nachschlagewerk als auch als Lehrbuch dienen und damit zugleich die Lücke schließen, die er trotz des Vorhandenseins zahlreicher Bücher zu diesem Thema in dem Fehlen eines zusammenfassenden Werkes sieht. Es sei hier vorweggenommen, dass diese nicht einfach zu realisierende Symbiose von Handbuch und Lehrbuch gut gelungen ist. Zu bemängeln wären allenfalls mitunter auftretende Wiederholungen, die aber wohl diesem Doppelcharakter geschuldet sind.

In der *Einführung* wird Luft als die chemische Substanz der Atmosphäre definiert, womit der Begriff Atmosphäre als der umfassendere, im Sinne einer Geosphäre charakterisiert ist. „Aus physiko-chemischer Sicht ist Luft ein Gasgemisch mit darin suspendierten Teilchen, wobei die natürlichen chemischen Bestandteile der Atmosphäre überwiegen sollten.“ Die Frage, ob Luftverschmutzungen zur Luft gehören oder nicht, ist angesichts der Tatsache, dass auch *reine* Luft, also vom Menschen unbeeinflusste Luft sehr variabler Zusammensetzung sein kann, eher müßig. Dem Autor ist zuzustimmen, wenn er es für richtiger hält, nach den natürlichen und anthropogenen Quellen der Luftbestandteile zu fragen. In Abgrenzung von der Atmosphärenphysik,

Meteorologie und von biogeochemischen Fragestellungen werden ausschließlich die chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse behandelt, die mit den chemischen Substanzen der Luft in direktem Zusammenhang stehen. Im Hinblick auf die Wirkung atmosphärischer Spurenstoffe auf Vegetation, Mensch, Tier und Material kann die Luftchemie als Hilfsdisziplin Beiträge leisten, die Erforschung der Wirkung dieser Stoffe auf die Atmosphäre selbst gehört aber natürlich zu den ureigensten Aufgaben der Chemie und Physik der Atmosphäre. Im Ergebnis einer Reihe von weiteren Überlegungen zu Begriffen wie Luftzusammensetzung und Klima, Luftverschmutzung und Luftreinhaltung resümiert der Autor, dass in diesem Buch „die Chemie der Luft (oder Atmosphäre) als die Lehre von der Herkunft, der Verteilung, Umwandlung und Ablagerung fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe der Luft verstanden wird.“ Damit wird deutlich, dass die Luftchemie keine rein chemische Disziplin sein kann, sondern sehr eng mit biologischen, geophysikalischen und technologischen Prozessen (Herkunft) verknüpft ist und ohne Physik und Meteorologie (Ablagerung und Verteilung) nicht denkbar wäre.

Das 1. Kapitel, „*Herkunft von Luftspurenstoffen*“, beginnt mit einem Rückblick auf die Geschichte der Entdeckung der Elemente der Luft, gefolgt von einem kurzen Ausflug in die Evolution der natürlichen Atmosphäre der Erde und ihrer Zusammensetzung, wobei besonders die Herkunft und Anreicherung des Sauerstoffs in Verbindung mit der Entstehung und Ausbreitung des Lebens betrachtet wird. Hervorzuheben ist hier die Feststellung, dass für die Landbesiedlung durch lebende Organismen nicht der Sauerstoff in der Luft fehlte, sondern, dass die harte UV-Strahlung der Sonne das Leben außerhalb der Ozeane zunächst verhinderte, es also zusätzlich der Herausbildung der stratosphärischen Ozonschicht als Filter für diese Strahlung bedurfte.

In einem gesonderten Abschnitt beschäftigt sich der Autor mit dem vergangenen Klima (Paläoklima) und gelangt zu der Feststellung, dass trotz abwechselnder Eis- und Warmzeiten unser Klima in den letzten 3,5 Milliarden Jahren als ziemlich stabil eingeschätzt werden kann, was er als Ausdruck eines sich im „Gleichgewicht“ befindlichen globalen biogeochemischen Kreislaufs versteht. Mit Blick auf die gegenwärtige Klimadiskussion betont er, dass die durch die Menschheit seit Beginn der industriellen Revolution vor ca. 150 Jahren verursachten Störungen der biogeochemischen Kreisläufe, deren Stoffumsätze zum Teil erheblich über den natürlich beobachteten liegen, sich noch innerhalb der natürlichen Variation der Luftzusammensetzung befinden mögen. Die Zeitspannen dieser natürlichen Änderungen aber liegen

Größenordnungen über den vergangenen 150 Jahren. Er folgert mit Recht: „Unser atmosphärisches Umweltproblem ist daher in erster Linie ein zeitliches Problem der Anpassung verschiedener Subsysteme innerhalb des globalen Systems.“

Wichtigste Voraussetzung für die Quantifizierung des menschlichen Einflusses auf die Luftzusammensetzung ist die Kenntnis der natürlichen Emissionen, die im zweiten Unterkapitel beschrieben werden. *Quellen natürlicher Emissionen* sind biogener, geophysikalischer oder geochemischer Natur. *Anthropogene Quellen* dagegen sind biogener, physikalischer, oder chemischer Natur. Die Zusammensetzung der Atmosphäre wird durch biogeochemische Stoffkreisläufe bestimmt. Triebkraft sind die Organismen mit ihrer Fähigkeit, chemische Substanzen zu synthetisieren, und diese mit dem Ziel der Energiegewinnung oder des Biomassewachstums um- oder abzubauen.

Der Autor behandelt zunächst ausführlicher den Kohlenstoffkreislauf (CO_2) und kurz die Kreisläufe des Stickstoffs und des Schwefels, um dann auf einzelne Verbindungen der drei Elemente näher einzugehen (NH_3 , SO_2 , Dimethylsulfid, NO , N_2O , CO , CH_4 , Alkane, Alkene sowie organische Säuren und andere organische Substanzen).

Als geogene Quellen von Luftspurenstoffen definiert der Autor solche geophysikalischen und geochemischen Prozesse, die Stoffeinträge in die Atmosphäre verursachen. Es handelt sich dabei um Bodestaub und Seesalze, die durch Windeinfluss von der Boden- oder Wasseroberfläche in die Atmosphäre eingetragen werden, um Stoffe, die durch Vulkanausbrüche, bei der Verbrennung von Biomasse oder in Gewittern freigesetzt bzw. aus primär emittierten Substanzen in der Atmosphäre gebildet werden (sekundäre Quellen). Alle genannten Quellen werden im Detail untersucht. Tabellarische, zusammenfassende Schätzungen der globalen, natürlichen Emission der betrachteten Spurenstoffe bilden den Abschluss des Kapitels der natürlichen Quellen von Luftbestandteilen.

Das dritte Unterkapitel behandelt die *belastete Luft*, wobei der Autor diesen Begriff ausschließlich für vom Menschen beeinflusste Luft verwendet und darauf verweist, dass es reine Luft, im Sinne einer vom Menschen unbeeinflussten Luft, heute praktisch nirgends mehr auf der Erde gibt. Man muss jedoch dabei sehen, dass die Spurenbestandteile der Luft in außerordentlich geringen Konzentrationen auftreten (0,01% CO_2 ; 0,0001% CH_4 ; 0,00001% alle übrigen Spurenstoffe), die trockene Luft also zu 99,9999% rein ist, wenn man als Verschmutzungen alle anderen Spurenstoffe mit Ausnahme von CO_2 und CH_4 bezeichnet. Zugleich wird deutlich, dass es sich bei der Analytik der

Luft um eine Ultrapurenanalytik handelt. Das Unterkapitel charakterisiert die anthropogenen Aktivitäten, die die chemische Zusammensetzung der Luft verändern und damit Wirkungen induzieren, die die Lebensqualität der Menschen nachteilig verändern. Der Autor nennt folgende atmosphärische Probleme, die uns in diesem Sinne gegenwärtig beschäftigen:

- Troposphärisches Ozon, d.h. die Zunahme des Oxydationspotenzials
- Atmosphärische Azidität (saure Deposition). Heute vor allem im asiatischen Bereich.
- Treibhausgase, zunehmende Emission, führt zweifellos zu einer Erwärmung
- Aerosole, insbesondere Sulfataerosole, führen zu einer Abkühlung der Atmosphäre, wirken im Unterschied zu CO_2 aber regional.
- Aerosole sind aber auch zunehmend Gefahr für die menschliche Gesundheit. Über die chemische Zusammensetzung von Partikeln $< 0,1 \mu\text{m}$ ist so gut wie nichts bekannt.
- Abnahme des stratosphärischen Ozons durch in die Troposphäre emittierte langlebige Spurengase ($\text{CClF}_3, \text{N}_2\text{O}$). Hauptproblem: Zunahme der Intensität kurzweiliger Strahlung. Die Folgen sind für die Atmosphäre selbst noch unzureichend beschrieben.

Der Übersicht gegenwärtiger anthropogener Quellen von Luftbestandteilen ist eine interessante historische Betrachtung der Entwicklung der Luftbelastung durch menschliche Aktivitäten in der Menschheitsgeschichte vorangestellt. Es sei an dieser Stelle hervorgehoben, dass solche Rückblicke in die Vergangenheit und damit in die Entwicklung unseres Wissens um die untersuchten Erscheinungen immer wieder auftauchen. Sie sind charakteristisch für die Herangehensweise des Autors. Man spürt, dass ihm diese historische Sicht besonderes Anliegen ist.

Die Ursache aller heutigen Umweltprobleme sieht der Autor in erster Linie im Wachstum der Weltbevölkerung und erst in zweiter Linie in der Zunahme des individuellen Ressourcenverbrauchs. In einer Fußnote schränkt er aber ein, dass diese Tendenz sich nicht unbedingt in die Zukunft fortsetzen muss, wenn die Idee der Nachhaltigkeit durchgesetzt werden kann, die er jedoch letztlich nicht als vollkommen erreichbares Idealziel sieht.

Eine Übersicht der anthropogenen Quellen von Luftbestandteilen wird dann in einem Schema dargestellt, das die Quellen-Ursachen-Wirkungskette atmosphärischer Spurenstoffe zeigt. Ein weiteres Schema gibt eine umfassende Übersicht über die Emissionsquellen. Die Beschreibung der Quellen folgt gegliedert nach chemischen (Industrie, Verkehr, Kommunalbereich)

und biologischen Prozessen (Landwirtschaft, Deponien, Kommunalbereich). Eine Diskussion der Trends der Emissionen und im Zusammenhang damit auch zum zukünftigen Klima schließt sich an. Solche Trendaussagen, so stellt der Autor fest, beruhen im Wesentlichen auf Einschätzungen der zu erwartenden Veränderungen des Energieverbrauchs und der Anteile der einzelnen Primärenergieträger sowie der Entwicklung der Weltbevölkerung, hier insbesondere der Veränderungen im Einsatz von Düngemitteln, in der landwirtschaftlichen Landnutzung und Nutztierhaltung. Wer sich ein wenig mit den aus solchen Einschätzungen hervorgehenden Szenarien befasst hat, wird schnell erkannt haben, wie problematisch diese sind und wie stark sie oft Gruppeninteressen reflektieren. Die Aussagen des Autors hierzu beruhen, nach den angeführten Zitaten zu urteilen, letztlich auf dem „Weltenergie-Ausblick“ der IEA von 1998 und 2000. Ausgehend hiervon sind seine Schlussfolgerungen über die Entwicklung vor allem der Treibhausgas-Emissionen sehr pessimistisch, mehr noch, er erwartet ohne Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen, die er für unrealistisch hält, bis Ende des 21. Jahrhunderts sogar eine noch wesentlich stärkere Zunahme der CO₂-Emissionen als sie der IPCC in seinen Szenarien vorhersagt. Nun mag man angesichts des Gefeilsches, das heute schon allein um die Realisierung der Verpflichtungen des sicher nicht ausreichenden Kyoto-Protokolls stattfindet, skeptisch sein, ob die menschliche Gesellschaft eine nachhaltig-zukunftsfähige Energieversorgung auch gegen alle Widerstände durchsetzen kann. Die sehr kritische Haltung des Autors beruht aber wohl eher auf seiner Einschätzung, dass die regenerativen Energien, bei grundsätzlich sehr positiver Bewertung ihrer Rolle, erst zum Ende des Jahrhunderts weit genug entwickelt sein werden, um gemeinsam mit einer deutlich verbesserten Energieeffizienz den Weltenergiebedarf decken zu können. Hierin kann ihm der Rezensent nicht folgen, um so mehr als zumindest für moderne Industrieländer wie Deutschland die Enquete-Kommission des 14. Bundestages trotz aller Minderheitsvoten zu der eindeutigen Feststellung gekommen ist (Bericht vom Juli 2002), dass „in einem modernen Industrieland eine Minderung der CO₂-Emissionen um 80% technisch realisierbar und wirtschaftlich machbar ist, auch unter Berücksichtigung des vereinbarten Ausstiegs aus der Kernenergie.“

Auf den folgenden Seiten gibt der Autor eine Einschätzung der künftigen Emissionen anderer Gase wie SO₂, NO, CO, VOC und geht auf Methan und auf die möglicherweise bemerkenswerte Rolle von Isopren ein, das mit steigender Nettoprimärproduktion infolge des CO₂-Anstiegs vermehrt gebildet

wird und durch seine Teilnahme an atmosphärischen Reaktionen den positiven Klimaantrieb verstärken könnte. In der Einführung zum 2. Kapitel – *Physikalisch-chemische Grundlagen der Luft* – kommt der Autor noch einmal auf die von ihm vertretene Definition der Luftchemie zurück und begründet, warum er den Begriff Atmosphärenchemie dem Begriff Luftchemie vorzieht, obwohl beide Begriffe synonym verwendet werden. Der Grund ist die sehr enge Verknüpfung der Chemie der Luft mit der Physik der Atmosphäre. Die Spezifik der Atmosphärenchemie beruht auf dem Einfluss der meteorologischen Elemente (Druck, Dichte, Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit, Strahlung) auf die chemischen Umwandlungen in der Atmosphäre, wodurch makroskopisch gesehen eine geographische Komponente in der Atmosphärenchemie wirksam wird. Bedingt durch den Multiphasen- und Multikomponentencharakter der Luft bedarf ihre wissenschaftliche Untersuchung der Anwendung praktisch aller Teildisziplinen der physikalischen Chemie, die der Autor hier kurz darlegt.

Das erste Unterkapitel befasst sich mit der *Phänomenologie der Luft*, das heißt mit ihren für den Beobachter direkt erkennbaren Eigenschaften, wie dem horizontalen und vertikalen Aufbau der Atmosphäre den meteorologischen Elementen, den Wolken, dem Nebel und den Niederschlägen.

Es folgt danach ein Unterkapitel über die Optik der Atmosphäre, in dem die Sonnenstrahlung als Triebkraft aller Prozesse, auch der chemischen Stoffumwandlungen, im Mittelpunkt steht. Behandelt werden die Strahlungsgesetze, Grundlagen der Strahlungsabsorption sowie die solare und terrestrische Strahlung und deren Bilanz. Wichtig ist hier der Hinweis, dass die jedes Jahr von der Sonne global eingestrahlte Energie in Höhe von $5,5 \cdot 10^{24}$ J 100 mal mehr ist als dem Menschen noch aus ausbeutbaren fossilen Reserven zur Verfügung steht. Interessant auch die Abschätzung der Energiespeicherung durch nachwachsende Rohstoffe, die lediglich 1 TW beträgt, dem gegenwärtig ein anthropogener Energieverbrauch von 13 TW ($400 \cdot 10^{18}$ J/a) gegenübersteht. Nachwachsende Rohstoffe allein können also den Welt-Energiebedarf nicht decken. Das folgende Unterkapitel ist der *Mechanik der Atmosphäre* gewidmet. Es beschreibt die Grundgleichungen der wirksamen atmosphärischen Kräfte, der Strömungen, der kinetischen Gastheorie, der Diffusion, sowie der Aerosoldynamik. Die drei letzten Unterkapitel dieses Kapitels behandeln die Thermodynamik der Atmosphäre, die Reaktionskinetik, sowie Aggregatzustände und Phasenübergänge in der Atmosphäre. Diese Kapitel sind charakteristisch für den Lehrbuchanspruch des Buches. Sie sind sehr übersichtlich und verständlich geschrieben. Die knappe Darstellung der

Grundlagen wird anschaulich an Beispielen aus der Luftchemie erläutert. In der Einführung des Unterkapitels (2.5) findet man die Aussage, die Thermodynamik sei, indem sie die Richtung einer Reaktion angibt, auch eine Methode zur Beschreibung des (Reaktions-)Mechanismus, ohne dabei jedoch Informationen über den konkreten Weg zu geben. Nach Auffassung des Rezensenten machen aber gerade diese Informationen den Mechanismus einer Reaktion aus. Ähnliche Bedenken hätte der Rezensent auch gegen die Aussage zur Definition katalytischer Reaktionen (S.224), wonach sich der Mechanismus einer Reaktion (z.B. $A \rightarrow B$) in Gegenwart eines Katalysators als Folge der Verringerung der Aktivierungsenergie dieser Reaktion ändert. Vielmehr erschließt doch der Katalysator der Reaktion einen neuen Weg (Mechanismus), und dieser ist mit einer geringeren Aktivierungsenergie verbunden. Die verminderte Aktivierungsenergie ist also die Folge des neuen Weges und nicht umgekehrt. Das Kapitel 2 schließt mit einer ausführlichen Betrachtung heterogener Bestandteile der Luft in Gestalt von flüssigen oder festen Partikeln sehr kleiner Größe, die als Aerosole neben ihrer meteorologischen auch eine erhebliche Bedeutung für die Chemie der Atmosphäre haben. Sie sind offenbar an ihrer Oberfläche oder bei flüssigen Tropfen in deren Volumen sehr häufig Ort komplexen Reaktionsgeschehens, dessen Verständnis ohne die Analyse der Phasenübergänge nicht möglich ist. Diese werden daher ebenfalls behandelt.

Das 3. Kapitel des Buches trägt den Titel „*Deposition von Spurenstoffen*“. In ihm beschreibt der Autor die verschiedenen Mechanismen des natürlichen Substanzaustrags aus der Atmosphäre und schließt damit die Spurenstoffkette Emission \rightarrow Ausbreitung \rightarrow Umwandlung \rightarrow Deposition. Die Deposition ist zugleich eine intensive Quelle von Spurenstoffen für die Biosphäre. Beispielfhaft werden hier Daten zur Deposition von Sulfat, Nitrat und Ammonium, aber auch von Schwermetallen wie Pb, Cd, Cu, Zn und Mangan angeführt und diskutiert, an deren Bestimmung der Autor selbst großen Anteil hat.

Kapitel 4 beinhaltet eine ausführliche Darlegung der *Troposphärenchemie*, die, wie vom Autor immer wieder betont, ungeachtet der Dominanz von Gasphasenreaktionen, eine Multiphasenchemie ist. Sie schließt Reaktionen in flüssiger Phase und an Phasengrenzen, Gas/fest, Gas/flüssig und flüssig/fest ein. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Chemie der Bildung und des Verbrauchs reaktiver Oxidantien, mit deren Darstellung das Kapitel beginnt. Wegen der Vielzahl der parallel ablaufenden Reaktionen wählt der Autor eine Methode der Darlegung des Wissenstandes, die von dem System Sauerstoff/Wasser (enthält nur O_3 , O_2 , N_2 , und H_2O) ausgeht und dieses dann sukzessive

durch Spurenkomponenten ergänzt. Angesichts der Komplexität des gesamten Reaktionsgeschehens hätte man sich innerhalb dieses Kapitels eine angemessene Darlegung der experimentellen Untersuchungsmethoden, mit denen der Ablauf der einzelnen Reaktionen in Laborstudien bzw. in Feldmessungen nachgewiesen wurde, gewünscht.

Dem Konzept der sukzessiven Erweiterung des Ausgangssystems folgend, wird gezeigt, wie durch Photolyse von Ozon in Folgereaktionen die wichtigen OH- und HO₂-Radikale gebildet werden, für die Nettobildung von Ozon in der Troposphäre aber noch die Voraussetzungen fehlen. Daran ändert auch die Zugabe von NO zu obigem System nichts, denn erst wenn zusätzlich OH-reaktive Kohlenstoff-Verbindungen zugegen sind, entsteht ein Reaktionssystem, in dem Peroxyradikale auftreten und eine Nettobildung von Ozon möglich ist. In dem folgenden Unterkapitel zur Gasphasenchemie geht der Autor ein auf die Rolle der Stickoxide (NO_x – NO_y) im atmosphärischen Stickstoffhaushalt und bei der Bildung der atmosphärischen Azidität. Es folgen ausführliche Beschreibungen der Luftchemie organischer Verbindungen, ein Arbeitsgebiet, das noch weniger gut erforscht ist als die Umwandlung anorganischer Spurenstoffe der Luft. Der letzte Abschnitt dieses Unterkapitels ist den Schwefelverbindungen und ihren Umsetzungen in der Luft gewidmet. Nach der Behandlung der Azidität und der Einführung des Begriffes der atmosphärischen Azidität folgt ein Unterkapitel zur Flüssigphasenchemie, worunter die Chemie in den einzelnen Tropfen der Atmosphäre verstanden wird, die trotz des geringen Anteils flüssiger Phase in der Luft nicht zu vernachlässigen ist (Elektronentransfer- und Ionenreaktionen, H₂O₂-Chemie, Katalyse an Übergangsmetallverbindungen) und hier zunächst als homogene Reaktionen, gleichsam in einem unendlich großen Tropfen, untersucht werden. Die Chemie in Wolken, Nebel und Niederschlag ist jedoch als Multiphasenchemie ungleich komplexer und ihre experimentelle Untersuchung außerordentlich schwierig. Erkenntnisse über die in Gas- und Flüssigphase ablaufenden Reaktionen basieren überwiegend auf Modellsimulationen. Obwohl der Wolken-Volumenanteil der planetaren Grenzschicht im Jahresmittel weniger als 10% ausmacht, ist der Effekt von Wolken auf die atmosphärische Chemie erheblich (Reaktionsbeschleunigung, Langstreckentransport und vertikaler Transport von Spurenstoffen und Auswaschung durch Regen). Diesen Prozessen ist daher ein besonderes Unterkapitel gewidmet, in dem im Einzelnen die Multiphasenchemie von Ozon, Wasserstoffperoxid, Schwefeldioxid sowie halogenhaltiger Verbindungen dargelegt wird. Das Kapitel zur Tropos-

phärenchemie endet mit Abschnitten zur chemischen Zusammensetzung von Niederschlägen, Wolken und Nebel.

Das 5. Kapitel behandelt die *Chemie der Stratosphäre*, in der im Prinzip alle troposphärischen Reaktionen ebenfalls vorkommen, jedoch wegen der anderen Reaktionsbedingungen Besonderheiten aufweisen. Wesentlich ist aber die Tatsache, dass in der Stratosphäre photolytische Reaktionen im Bereich kürzerer Wellenlängen (< 242 nm) möglich sind. Wichtigste Reaktion ist hier die O_2 -Photolyse zu Triplett- und Singulett-Sauerstoffatomen, die durch Wechselwirkung mit O_2 Ozon bilden. Hauptgegenstand des Kapitels sind die Mechanismen der Bildung von Katalysatorsubstanzen aus Methan, Lachgas sowie Halogen- und Schwefelverbindungen, die den katalytischen Zerfall des Ozons in der Stratosphäre bewirken. Abschließend analysiert der Autor die Trends der stratosphärischen Ozonkonzentration und bedient sich dabei der längsten Messreihe für das Gesamtazon (seit 1926) von Arosa (Schweiz). Sie mündet in der Feststellung, dass die international durchgesetzten Maßnahmen zur Reduzierung der Produktion von Chlorfluorkohlenwasserstoffen und ihrer Anwendung heute die Annahme rechtfertigt, dass sich bis Mitte des 21. Jahrhunderts die Ozonschicht wieder auf die Werte von 1975 stabilisiert.

Wichtige Voraussetzung für Maßnahmen zur Luftreinhaltung und für die Aufklärung der Chemie der Atmosphäre ist die *Messung von Luftspurenstoffen*, die der Autor im 6. Kapitel ausführlich beschreibt. Es widerspiegelt in besonderem Maße die umfangreichen praktischen Erfahrungen des Autors in der Durchführung solcher Messungen und die Kenntnis ihrer Tücken und ist daher eine praktische Anleitung, die den interessierten Leser mit allem vertraut macht, was solche Messungen erfordern, angefangen bei den allgemeinen Prinzipien über die konkrete Planung von Immissionsmessungen zu den Verfahrenskenngrößen wie Empfindlichkeit, Präzision, Richtigkeit und Genauigkeit, der Qualitätssicherung bis hin zu den Auswertemethoden.

Das 7. Kapitel trägt den Titel „*Luftspurenstoffe und Luftreinhaltung*“. Eingeleitet wird es mit einer Definition des Begriffes Luftreinhaltung als Management der Luftverschmutzung. In der Praxis bedeutet das eine auf konkrete Emissionsquellen ausgerichtete Emissionsreduzierung im Ergebnis technischer und gesetzgeberischer Maßnahmen, nicht aber, was richtiger wäre, die grundsätzliche Vermeidung von Emissionen und Abfällen im Sinne einer Ressourcen schonenden, nachhaltigen Strategie möglichst geschlossener Stoffkreisläufe durch abproduktfreie Technologien. Mit Recht verweist der Autor an dieser Stelle auf den Konflikt zwischen marktwirtschaftlichen

und gesellschaftlichen Interessen. Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Luft als Folge menschlicher Tätigkeit sind nicht nur mit Hilfe jeweils geeigneter Analysemethoden zu bestimmen, sondern die erfassten Spurenkomponenten müssen auch hinsichtlich ihrer Wirkungen auf Mensch und Natur quantitativ bewertet werden. Diese zweifellos schwierigere Aufgabe mündet letztlich in einer wissenschaftlich begründeten Definition der tolerierbaren Grenzkonzentrationen der einzelnen Spurenkomponenten, innerhalb derer katastrophale Auswirkungen vermieden werden können. Die Genauigkeit, mit der das geschehen kann, ist, dem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis entsprechend, mehr oder weniger gut. Der Autor verweist hier auf die Klimadiskussion, in der auch als Folge der Unsicherheiten in der Angabe der Auswirkungen weiterer Akkumulation der Treibhausgase und den damit verbundenen Rückkopplungen auf den in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden Temperaturanstieg, Raum ist sowohl für sehr pessimistische als auch für weniger pessimistische Prognosen. Regierungsentscheidungen zu Gegenmaßnahmen sind aber erforderlich. Diese können natürlich auch falsch sein. Ob das, wie der Autor in einer Fußnote vermerkt, auch für den Ausstieg aus der Atomenergie in Deutschland gilt, wagt der Rezensent zu bezweifeln.

Verwiesen wird auf die Berichte der UNEP zum Zustand der Umwelt unserer Erde, in denen die Probleme: stratosphärischer Ozonverlust, Stickstoffbelastung als Folge der Düngieranwendung, Klimaänderung als Folge der Treibhausgase und toxische Substanzen (Schwermetalle und persistente organische Verbindungen) genannt werden. Der Autor ergänzt diese Liste um die Probleme des Anstiegs der troposphärischen Oxidationskapazität und der troposphärischen Aerosolbelastung. Man kann dem Autor nur uneingeschränkt zustimmen, wenn er zum Schluss der Einleitung zu diesem Kapitel formuliert: „Vieles deutet darauf hin, dass sich die Lebensbedingungen der Menschen zum Ende des 21. Jahrhunderts drastisch verschlechtern werden, wenn weiter nach dem bisherigen Motto business-as-usual konsumiert wird“. Nach diesen grundsätzlichen Darlegungen beschreibt das Kapitel zunächst die Wirkungspotenziale von Luftspurenstoffen wie Oxidationspotenzial, Aziditätspotenzial, Toxizität und Klimaantrieb und behandelt im Anschluss daran ihre toxischen Wirkungen in Form des oxidativen Stresses, der Vegetationsschäden, und der Gesundheitsschädigung des Menschen. Schließlich folgt ein längerer, sehr interessanter Abschnitt, der allein der Klimaänderung gewidmet ist. Hier knüpft der Autor an seine Darlegungen dazu im ersten Kapitel an und kommt zurück auf den weiteren Temperaturanstieg

als Folge der Zunahme der Emission vor allem des Treibhausgases CO_2 , der wahrscheinlich nur dann weniger als 1-2 K betragen würde, wenn es gelänge, die globale Emission dieses Gases um weit mehr als 50% innerhalb weniger Jahre zu senken, was nur mit einer Abkehr von der Verbrennung fossiler Rohstoffe erreichbar wäre. Ein solches Ziel aber hält er für wenig realistisch, selbst wenn der politische Wille dazu vorhanden wäre (S. 524). Wenn diese Haltung angesichts des dominierenden Einflusses der großen Welt-Energiekonzerne in diesen Fragen auch verständlich erscheint, sollte es nicht dennoch gerade Aufgabe der Wissenschaftler in Lehre und Forschung sein, die Kräfte in der Gesellschaft zu unterstützen, die sich die Durchsetzung der klimapolitischen Ziele zur Aufgabe gemacht haben? Sollte es nicht möglich sein, deutlich zu machen, dass die mit dem Klimawandel schon mittelfristig verbundenen Risiken wirtschaftliche Gewinne viel stärker bedrohen als Aufwendungen in die Entwicklung der regenerativen Energien diese heute vielleicht vorübergehend belasten?

Im Einzelnen werden dann der Einfluss der ultravioletten Strahlung (UV-B), die abkühlende Wirkung der Streuung an Aerosolen und die erwärmende Wirkung durch absorbierende Gase (Treibhauseffekt) auf das Klima diskutiert.

Es folgt nun ein Unterkapitel, in dem der Autor die Probleme der *Luftreinhaltung* beschreibt und nach der Darlegung allgemeiner Prinzipien und Technologien der Reinigung von Abluft und Abgasen auf einige für die Luftreinhaltung problematische Wirtschaftsbereiche eingeht. Dazu gehören vor allem die Landwirtschaft (N_2O , NH_3), die Energiewirtschaft (Verbrennung fossiler Rohstoffe) und der Transportsektor. Nach Einschätzung des Autors sind in der Energiewirtschaft die Probleme der SO_2 - und Flugstaubemission für Braun- und Steinkohlekraftwerke gelöst. Während eine NO-Reduzierung (0,3-0,5 kg NO/MWh) bisher kaum gelang, können Reduzierungen von N_2O (6-15g N_2O MWh) und CO (0,12-0,14 kg CO/MWh) nicht erreicht werden. Nur in sehr begrenztem Maße ist eine Reduzierung der spezifischen CO_2 -Emission (1000 kg CO_2 /MWh) durch weitere Erhöhung des Wirkungsgrades der Kraftwerke denkbar.

Nach der ausführlichen Darlegung der Wirkungsprinzipien der Luftspurenstoffe und der Prinzipien der Luftreinigung kommt der Autor nun im letzten Teil des 7. Kapitels zu den Luftspurenstoffen selbst. Trotz Beschränkung auf die drei wichtigsten primären aziditätsbestimmenden Gase SO_2 , NO, NH_3 und zwei sekundäre Oxidantien (O_3 , H_2O_2) ist dieser Teil der umfangreichste des Kapitels. Für alle diese Gase werden ihre Quellen, ihre Eigenschaften und

ihr atmosphärisches Verhalten, die mit ihrer Anwesenheit in der Atmosphäre verbundenen Probleme sowie die Maßnahmen zur Minimierung ihres Wirkungspotenzials beschrieben. Dabei setzt sich der Autor zu recht für eine intelligente Luftreinhaltung ein. Er plädiert für eine Steuerung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre mit dem Ziel, ein optimales Wirkungspotenzial zu erreichen, da die verschiedenen Spurenkomponenten der Atmosphäre zum Teil gegensätzliche Wirkungen haben. Es erscheint ihm z.B. nicht sinnvoll, SO_2 -Reduktionen in Europa weit unter den toxikologischen Schwellenwert fortzusetzen, wenn mit einer gewissen SO_2 -Belastung der Luft sowohl eine Düngung als auch eine kompensierende Wirkung zum Treibhauseffekt infolge des negativen Aerosolantriebs (Ammoniumsulfat) möglich ist, was angesichts des bereits beobachteten Schwefeldefizits im Boden doppelten Vorteil brächte. Die Problematik beim troposphärischen Ozon liegt nach Meinung des Autors weniger in der Häufigkeit der Überschreitung definierter Grenzwertkonzentrationen (hier ist eine deutliche Abnahme zu verzeichnen) als viel mehr darin, dass die Hintergrundkonzentration des Ozons in den letzten 50 Jahren ständig zugenommen hat, womit eine Veränderung des Oxydationspotenzials der Atmosphäre einhergeht, und die Gefahr besteht, dass in absehbarer Zeit der Schwellenwert der phytotoxischen Wirkung ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$) des Ozons überschritten wird. Verantwortlich für die langfristig angestiegene Ozonmenge in der Troposphäre sind die Vorläufersubstanzen Kohlenmonoxid und Methan. Eine humantoxikologische Wirkung des Ozons unter atmosphärischen Bedingungen hält er, gut begründet, nicht für gegeben. Beobachtete Wirkungen auf den Menschen im Zusammenhang mit erhöhten Ozonkonzentrationen müssen auf andere Substanzen zurückgeführt werden. Interessant ist auch die Feststellung des Autors, dass in Deutschland trotz einer starken Reduzierung der Vorläufersubstanzen des Ozons (flüchtige organische Substanzen und NO) durch Einführung von Automobilkatalysatoren keine Minderung der mittleren Ozonkonzentration zu beobachten ist. Erheblichen Einfluss hat diese Maßnahme in Deutschland jedoch auf die signifikante Abnahme der Bedeutung von Maximalwerten des Ozons durch die Reduzierung der Emission von organischen Verbindungen (andere außer Methan) (ca. 50%) als sehr reaktive Vorläufer der Ozonbildung gehabt. Schließlich kommt der Autor auf das Wasserstoffperoxid zu sprechen, mit dessen Bestimmung er sich selbst intensiv befasst hat. Es entsteht als ein Folgeprodukt der Ozonphotolyse, ist relativ stabil in der Luft und muss wegen seiner möglichen toxischen Wirkungen bei der Luftreinhaltung berücksichtigt werden. Er diskutiert zunächst die Daten zur Konzentration des

H_2O_2 in ihrer zeitlichen Variabilität und kann sich dabei auch auf eigene Messergebnisse stützen, die im Zeitraum vom August 2000 bis Juli 2001 in Berlin-Adlershof durchgeführt wurden. Im Detail werden danach die Quellen und Senken dieser Spurenkomponente sowie ihr Langzeitverhalten beschrieben. Auch hier zeigt sich wieder die Komplexität der luftchemischen Prozesse als Folge von miteinander konkurrierenden Reaktionen, auf die der Autor immer wieder hinweist. So ist NO als Reaktionspartner der HO_2 -Radikale (Bildung von NO_2) ein wichtiger Konkurrent zu der Bildung des H_2O_2 in deren Reaktion mit sich selbst, was den Autor veranlasst, die Frage aufzuwerfen, in wie weit eine drastische Reduktion der NO Emission (z.B. mit Hilfe des Dreiwegekatalysators bei Automobilen) tatsächlich zweckmäßig ist. Sicher ist diese Frage berechtigt, sein Vorschlag jedoch, sinnvoller ein optimales NO/VOC-Verhältnis anzustreben, dürfte nicht ganz einfach zu verwirklichen sein. Interessant sind seine Überlegungen zur Erklärung der erst in letzter Zeit aus der Untersuchung von Grönland-Eisbohrkernen gewonnenen Erkenntnis, dass die Konzentration des H_2O_2 in den letzten 150 Jahren um etwa 60% gestiegen ist, wovon wiederum 80% allein auf die Jahre 1975 bis 1995 fallen. An Hand einer Gegenüberstellung der 10-jährigen Mittelwerte der H_2O_2 -Konzentrationen und dem Sulfatgehalt in diesen Eisbohrkernen mit dem Wachstum der Weltbevölkerung in dieser Zeit und der Summe der jährlichen SO_2 -Emissionen Nordamerikas und Westeuropas zeigt er recht überzeugend, dass die SO_2 -Emission offensichtlich eine begrenzende Wirkung auf das durch Zunahme der Weltbevölkerung bedingte Anwachsen der H_2O_2 -Konzentration hat, wodurch dieses maskiert wird (H_2O_2 oxydiert SO_2 zu SO_3). Die drastische Abnahme des Wasserstoffsuperoxids in den zwei Jahrzehnten von 1975 bis 1995 erklärt sich dann durch die in diesen Jahren beginnende Abnahme der SO_2 -Emission infolge der Einführung der Rauchgasentschwefelung.

Das letzte Kapitel des Buches widmet der Autor *rechtlichen Aspekten der Luftreinhaltung*, wobei das immissionsschutzrechtliche Instrumentarium zum Schutze der Umwelt vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen im (Bundes-Immissionsschutzgesetz) Vordergrund steht.

Neben dem umfangreichen Literaturverzeichnis schließen sich als Anhänge 1 und 2 tabellarische Zusammenstellungen der in der Atmosphäre (Gas- und Flüssigphase) ablaufenden Elementarreaktionen und ihren Geschwindigkeitskonstanten an. Von den etwa 1000 zitierten Originalarbeiten stammen etwa 50 aus der Feder des Autors. Das vorliegende Werk ist ohne jeden Zwei-

fel eine wesentliche Bereicherung der wissenschaftlichen Literatur auf diesem hochwichtigen Zweig der Chemie.