

D. Möller (1999) *Sitzungsber. Leibniz-Sozietät* 24 (5), 31-60

## Luftchemie - ein Instrument der Luftreinhaltung, eine Disziplin der angewandten Chemie oder eine weitere Umweltdisziplin?

Detlev Möller

Brandenburgische Technische Universität Cottbus,  
Lehrstuhl für Luftchemie und Luftreinhaltung

### 1. Zu Begriffen und Inhalten *oder* die Kombination der Präfixe

In unserer Zeit, wo *Begriffe* von *Inhalten* losgelöst werden, um lediglich den *Markt* (scheinbar) zu bereichern, erscheint es zweckmäßig, zunächst die im Titel genannten Begriffe zu erörtern. Mit breitem Konsens wird die Chemie als das Wissenschaftsgebiet definiert, daß sich mit dem Vorkommen, der Herkunft und der Umwandlung von Stoffen beschäftigt. Es hat sich als *zweckmäßig* erwiesen, dieses Gebiet in drei Grunddisziplinen einzuteilen, wobei der *stoffliche* Aspekt zuerst die organische von der anorganischen Chemie unterscheidet. Die Frage nach den unterschiedlichen *Zuständen*, in denen sich die Stoffe befinden und *Prozessen*, denen die Stoffe unterliegen, hat schließlich die physikalische Chemie hervorgerufen. Damit lassen sich *alle* Aspekte der Chemie mit diesen drei Disziplinen hinreichend darstellen. Weiterhin ließe sich zwanglos folgern, daß alle anderen „Disziplinen“ (Chemiegebiete) *angewandte* Disziplinen seien, d.h. Teilgebiete, in denen lediglich die Prinzipien der anorganischen, organischen und physikalischen Chemie angewandt wird. Andererseits sind sowohl die anorganische als auch organische Chemie ohne Physikochemie heute undenkbar und die Grenzen zwischen anorganischer und organischer Chemie werden immer fließender. Diese zunehmenden Schwierigkeiten in der Abgrenzung von Disziplinen macht sie aber nicht überflüssig, wenn man sie mehr als (problemorientierte) Aufgabengebiete versteht.

Diesem Gedanken folgend, ist die *Luftchemie* eine angewandte chemische Disziplin, da sie sich aus der anorganischen, organischen und physikalischen Chemie zusammensetzt. Eine *Hilfdisziplin*, was keineswegs eine Abwertung bedeutet, ist die analytische Chemie, da sie uns methodisch hilft, Stoffe qualitativ und quantitativ zu beschreiben und damit auch Zustandsänderungen zu verfolgen. Schließlich sind die Physik und Mathematik (neben anderen Wissenschaften) in Bezug auf die Chemie auch *Hilfswissenschaften* (obgleich der Chemiker um den höheren Rang von Physik und Mathematik weiß; denn die Mathematik benötigt keinerlei Hilfswissenschaften für ihr eigenes Selbstverständnis).

Akzeptieren wir den Ausspruch von Pasteur, daß es keine angewandten Wissenschaften gibt, sondern nur eine Anwendung der Wissenschaft, so kommen wir auf den wichtigen Grundsatz der Einheit der Wissenschaft zurück. Konsequenterweise kann es dann auch keine chemische *Grundlagenforschung* geben, sondern ausschließlich chemische Forschung, die sich mit dem Verhalten von Stoffen in einer bestimmten Umgebung beschäftigt. Als eine *angewandte Frage* könnte dann die Frage nach dem Nutzen für die Menschheit (z.B. Wertstoff) oder Schaden (z.B. Schadstoff) sein. Die nützliche Eigenschaft eines Stoffes war seit Beginn der Kulturgeschichte immer

mit der schädlichen Seite verbunden (denken wir an die Gifttod von Sokrates). Erst viel später<sup>1</sup> rückte die schädliche Wirkung von Stoffen auf die Umwelt in das menschliche Interesse.

Als eine der ersten wissenschaftlich begründeten Ursache-Wirkungs-Beziehungen dürfte der Einfluß von Rauch auf Wälder genannt werden (Stöckhardt, 1871)<sup>2</sup>. Nachdem Liebig (wohl als Erster) die Bedeutung atmosphärischer Beimengungen für die *Agrikultur* erkannt hatte, setzten um 1840 erste *niederschlagschemische* Untersuchungen ein, die 1870 in dem Buch von R.A. Smith (einem Schüler von Liebig) „*Acid Rain - Beginning of a Chemical Climatology*“ in eine systematische Darstellung eingingen. Bereits um die Jahrhundertwende wurden Begriffe wie „Säuregehalt der Luft“, „Saures Niederschlagswasser“, „saurer Nebel“ und „Luftrecht“ wie selbstverständlich gebraucht (Wislicenus, 1908). Die weitere Einteilung der Luftchemie und ihre Einbindung in die Atmosphärenforschung soll jedoch erst im nächsten Abschnitt behandelt werden.

In den Umweltwissenschaften wird der Begriff *Medium* gerne und häufig gebraucht, und wir versuchen, unseren Studenten eine medienübergreifende Betrachtungsweise bei- bzw. nahezubringen. Das Wort *Medium* kann als ein räumlicher Teilbereich der belebten (z.B. Gegenstand der Biochemie) und unbelebten (z.B. Gegenstand der Geochemie) Umwelt verstanden wissen. In diesem Zusammenhang bietet sich eine einfache Definition der *Umwelt* als Summe der Medien an. Bemerkenswerterweise wurde die *Geochemie* von Schönbein, dem Entdecker des atmosphärischen Ozons (Schönbein, 1854), begründet. Für die Luftchemie ist das Medium selbstverständlich die Atmosphäre. Der Begriff *Umweltchemie*<sup>3</sup> sollte vermieden werden, obwohl seit 1980 durch Hutzinger (1995) 24 Bände des „*Handbook of Environmental Chemistry*“ herausgegeben wurden. Zum einen, da *Umwelt* zwar möglicherweise als Summe der Medien (Reservoir) zu definieren ist, aber im Unterschied zu der recht genauen Begrenzung *eines* Reservoirs die *Summe* der Medien eine erhebliche Unschärfe des Untersuchungsgegenstandes in sich birgt. Zum anderen, da die reservoirbestimmenden (physikalischen, chemischen und biologischen) Eigenschaften der „Umweltmedien“ so verschieden sind und daher die Definition von Teildisziplinen<sup>4</sup> wie z.B. Luftchemie wesentlich zweckmäßiger erscheinen lassen. Hutzinger kann daher die *Umweltchemie*<sup>5</sup> auch lediglich bezüglich „*reactions in the environment*“ definieren und als zu behandelnden Gegenstand natürliche und anthropogene Verbindungen (von letzteren sind mehr als

---

<sup>1</sup> Zum Beispiel J. Evelyn (1661) „*Fumifugium: or the inconvenience of the aer and smoake of London dissipated. Together with some remedies humbly proposed to his sacred Majestie and to the Parliament now assembled.*“

<sup>2</sup> Als ältestes ohne zeitliche Lücken bestehendes chemisches Institut in Deutschland gilt das Institut für Pflanzen- und Holzchemie in Tharandt (an der TU Dresden), gegründet 1847 von Stöckert.

<sup>3</sup> Es sollte an dieser Stelle angemerkt werden, daß die Chemie als eine der ältesten Wissenschaften der Menschheit ihren Ursprung in den „Elementen“ (Wasser, Boden Luft und Feuer) und Stoffen der *Umwelt* gefunden hat und deshalb die Chemie von ihrem Ursprung her als Naturstoffchemie zu bezeichnen ist (Natur = Umwelt = Bio + Geo). Die Diskussion „Chemie und Umwelt“ beinhaltet, daß unsere „Umwelt“ (das natürliche System) anthropogen gestört und modifiziert (z.T. bestimmt) ist, also Natur = Geo + Bio + Techno. „Techno“ bezeichnet die *Technosphäre* (daraus leitet sich zwanglos das Aufgabengebiet der *technischen Chemie* oder *chemischen Technologie* ab).

<sup>4</sup> An dieser Stelle soll der Begriff *Disziplin* nicht überbetont werden im herkömmlichen Sinne der Abgrenzung eines Wissenschaftszweiges und Fachgebietes (denken wir auch begrenzen im Sinne von *disziplinieren*), zumal wir noch sehen werden, daß die *Atmosphärische Chemie* mehr eine *Interdisziplin* ist.

<sup>5</sup> Auch wenn der Begriff *Umweltchemie* dem modernen (oder postmodernen?) Trend der Auflösung von Disziplinen, d.h. problemorientiertem Überschreitens disziplinärer Grenzen vielleicht folgt (wir sehen diesen Trend im sog. fachübergreifenden Studium) so plädiere ich immer noch dafür, schließlich nur noch von *Chemie* zu sprechen. Allerdings wird es wohl nicht eine Entwicklung zurück zu G.W. Leibniz geben, den man landläufig für den letzten Universalgelehrten hält (d.h., ihm soll das ganze Wissen seiner Zeit in Verständnis und Umfang zur Verfügung gestanden haben). Wir werden jedoch im nächsten Abschnitt sehen, daß der Ausspruch von G. Ch. Lichtenberg (1742-1799), „*Wer nur die Chemie versteht, versteht auch die nicht recht*“ für die Luftchemie sehr zutreffend ist. Ein Lehrbuch der „*Umweltchemie*“ (Bliefert, 1994) kann nur generalistisch, um nicht zu sagen „dünn“ werden (das ist kein persönlicher Vorwurf an den Autor).

5 Millionen synthetisiert und beschrieben worden) in ihrer Verteilung und Umwandlung in Luft, Wasser und Boden benennen.

Es hat sich der Begriff *ökologische Chemie*<sup>6</sup> (Korte, 1992) eingebürgert (wobei hier die Silbe *Öko* nicht primär als Synonym für *Umwelt* steht). Allerdings (schaut man in die Fachzeitschrift *Chemosphere* als Blatt der Ökotoxikologie und ökologischen Chemie) wird unter ökologischer Chemie weniger die Chemie der Ökosysteme (d.h. chemische Ökologie - Ökosystem im Sinne der Definition von Ernst Heckel) als vielmehr das Verhalten anthropogener Spurenstoffe in Böden und Gewässern betrachtet. Mit dieser Begrenzung ist die ökologische Chemie sinnvoll, da dieser Gegenstand nicht primär zur *aquatischen Chemie* (Sigg und Stumm, 1996) und Geochemie im engeren Sinne (d.h. Chemie der Erdkruste) gehört. Damit könnte man sagen, aquatische und atmosphärische Chemie sind *Hilfsdisziplinen* der ökologischen Chemie. Eine Bodenchemie (obwohl dieser Begriff zu finden ist) abzugrenzen macht wenig Sinn, da „Boden“ als Reservoir (Reaktionsmedium) im Unterschied zur Hydrosphäre und Atmosphäre nicht als annähernd homogen („abgrenzbar“ im Sinne einer Disziplin) aufgefaßt werden kann. Als sehr sinnvoll erweist sich die Bezeichnung und Disziplin *Biogeochemie*<sup>7</sup>, die sich mit der chemischen Wechselwirkung zwischen Stoffen und Organismen in der Biosphäre befaßt (Butcher u.a. 1994, Calvert 1995). Zunehmend wird die Biogeochemie als das Wissenschaftsgebiet des *globalen Wandels* aufgefaßt (Schlesinger 1997).

## 2. Zur Einteilung der Luftchemie und ihrer Beziehung zur Meteorologie und der Atmosphärenwissenschaft

Atmosphärische Chemie und Luftchemie werden synonym verwandt. Wollen wir die Chemie in erster Linie auf das „Stoffliche“ bezogen wissen, so dürfte Luftchemie ein treffenderer Begriff sein, da "Luft der Stoff ist, aus dem die Atmosphäre gemacht" ist. Die Atmosphäre als Reservoirbegriff ist in erster Linie ein stofflich-energetisches System, wird daher von der Chemie und Physik (der Atmosphäre) beschrieben<sup>8</sup>. Wenn neuerdings<sup>9</sup> die Meteorologie als die Lehre (das Wort „Kunde“

---

<sup>6</sup> Das Springer-Umweltlexikon (1995) setzt ökologische Chemie = Umweltchemie, kennt aber weder Luft- noch Atmosphärenchemie (kein Wunder, wenn man sich die Profession der Herausgeber ansieht). Der Begriff ökologische Chemie wurde bereits 1968 von Korte geprägt. In der Deutschen Chemischen Gesellschaft gibt es eine Fachgruppe „Umweltchemie und Ökotoxikologie“. Dahinter verbirgt sich m.E. die ökologische Chemie im dargelegten Sinn, d.h. einer breiten und diffusen Definition. Streit (1994) definiert die Ökotoxikologie als die „Wissenschaft von den Wirkungen anthropogener chemischer *Anm. D. Möller: gibt es eigentlich nicht-chemische Substanzen?*) Substanzen auf Organismen, Organismengemeinschaften und Ökosysteme (*Anm. D. Möller: so weit so gut*) und vom Eintrag, der Verteilung und Umwandlung dieser Substanzen in verschiedenen Kompartimenten der Biosphäre *Anm. D. Möller: diesem letzteren Teil kann ich nicht folgen, da hier die Ökotoxikologie Aufgabengebiete der ökologischen Chemie, der Biogeochemie und Luftchemie vereinnahmt*). Wenn schon immer mehr Disziplinen definiert werden, sollten diese *diszipliniert* bleiben und ihre *Grenzen* besser aufzeichnen, um *kooperativ* sein zu können und damit *sinnvoll* für die Wissenschaft. Neben Kants Bemerkung (vgl. Fußnote 10) zur Wissenschaftseinteilung dürfte wohl in diesem Jahrhundert zusätzlich der marktorientierte menschlich-wissenschaftliche Individualdrang bestimmend sein bei der „Erfindung“ immer mehr *interdisziplinärer Disziplinen* mit zunehmender (nicht-überschaubaren) Überlappungen. Sinnvoll(er) wäre, die Forschung auf die Schnittstellen durch *interdisziplinäre* Kooperation zwischen verschiedenen *Disziplinen* zu fokussieren. Dem steht aber weitgehend die ressortbezogene Förderung (im Klartext: Finanzierung) entgegen.

<sup>7</sup> Dieser Begriff wird (neben Geochemie und Ökologischer Chemie) im Römpp-Chemielexikon genannt, jedoch werden weder Luft- noch Atmosphärenchemie erwähnt. Das ändert sich hoffentlich in Zukunft, nachdem Paul Crutzen 1995 den Nobelpreis für Chemie (mit Rowland und Molina zusammen) für *luftchemische* Erkenntnisse erhielt.

<sup>8</sup> Bemerkenswerterweise gibt es keine *Luftphysik*, sondern nur die Atmosphärenphysik, womit sicherlich die vorzugsweise Sichtweise der Physik auf das „System als Ganzes“ unterstrichen wird.

wäre auch sehr zutreffend) von den physikalischen und chemischen Vorgängen in der Atmosphäre und ihren Wechselwirkungen zur Erdoberfläche („Erdkunde“) und dem Weltraum („Himmelskunde“) bezeichnet wird, ist das im Sinne des Überbegriffes *Atmosphärenwissenschaft* durchaus akzeptabel. Nur sollte dann die Meteorologie nicht mehr als ein Teilgebiet der Geophysik betrachtet werden (es wurde ja die Luftchemie eingeschlossen). Auf die Atmosphärenforschung („Luftkunde“) bezogen haben sich weitere „disziplinbildende“ Bezeichnungen herausgebildet, die meistens jedoch interdisziplinäre Ansätze verfolgen: chemische Klimatologie, chemische Meteorologie, Umweltmeteorologie. Mit der Biometeorologie und Bioklimatologie wird wiederum die Schnittstelle zur Biologie angedeutet, allerdings eher nur in einer Richtung, d.h. des Einflusses von Wetter und Klima auf Lebewesen und Pflanzen. Die andere Richtung, d.i. der biogene Einfluß auf die Chemie und Physik der Atmosphäre wird am ehesten durch die Biogeochemie dargestellt, ist aber genauso gut Gegenstand der Luftchemie (nur mit Unvernunft wird man von Bioluftchemie sprechen). Um mit Ph.I. Kant (1724-1804), ordentlicher Professor für *Logik und Meteorologie* zu Königsberg, die Verwirrung der Begriffe wieder philosophisch<sup>10</sup> zu vereinfachen, sollte *die Luftchemie als die Lehre von der Herkunft, der Verteilung, Umwandlung und Ablagerung fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe in der Atmosphäre* bezeichnet werden.

Wir haben dabei die Luft als eine disperse Phase, als ein Multiphasen- und Multikomponentensystem zu betrachten. Neben den beiden Hauptbestandteilen Sauerstoff und Stickstoff (99 % der trockenen Atmosphäre) haben wir Wasserdampf (<0,5 bis 4 % der feuchten Atmosphäre), Edelgase (~1 % Ar) und *Spurengase* (im Bereich von ppt - ppm, d.h. <10<sup>-4</sup> %) sowie *atmosphärisches Aerosol* (feste Partikeln im Größenbereich nm - µm und Konzentrationen 100-5000 Partikeln cm<sup>-3</sup> bzw. 10-100 µg m<sup>-3</sup>) sowie *Hydrometeore* (flüssige Partikeln wie Nebel-, Wolken-, Regentropfen und feste Partikeln wie Eiskerne und Schneekristalle; der Flüssigwassergehalt von Wolkentropfen liegt um 10<sup>-6</sup> g m<sup>-3</sup> Luft, die Größe um 10 µm Durchmesser und die Anzahl beträgt einige Hundert Tropfen pro cm<sup>-3</sup>) zu betrachten. Spurengase sind molekularen oder atomaren Charakters (*Gasphasenchemie*) wohingegen atmosphärisches Aerosol ein biogen-chemisches Substrat von nahezu unendlicher Vielfalt ist (*Aerosolchemie*) und Hydrometeore verdünnte wäßrige Lösungen von Gasen, Kationen und Anionen (mit Konzentrationen ≥ ppm) darstellen.

Mit dieser stofflich bezogenen Unterteilung des „Stoffes Luft“ benötigen wir nicht mehr die Begriffe *Luftschadstoff* (es wird immer nur spezifisch zu bestimmen sein, wann ein Stoff Schadstoff ist) und *Luftbeimengung* (Luft ist eine Menge aus Stoffen); mehr zu dieser Problematik im nächsten Abschnitt.

Im folgenden wird die Luftchemie entsprechend der o.g. Definition etwas näher charakterisiert. Die *Herkunft* der Spurenstoffe betrifft die Frage nach den natürlichen und anthropogenen Quellen und Emissionen, d.h. für die Luftchemie ist die Emission als Stofffluß in die Atmosphäre von großer Wichtigkeit (Eintrag von Edukten). Die Frage nach der Entstehung von Emissionen ist bereits Gegenstand der Biogeochemie, der Geochemie und Geophysik (natürliche Emissionen betreffend) sowie der Verfahrenstechnik (anthropogene Emissionen betreffend).

---

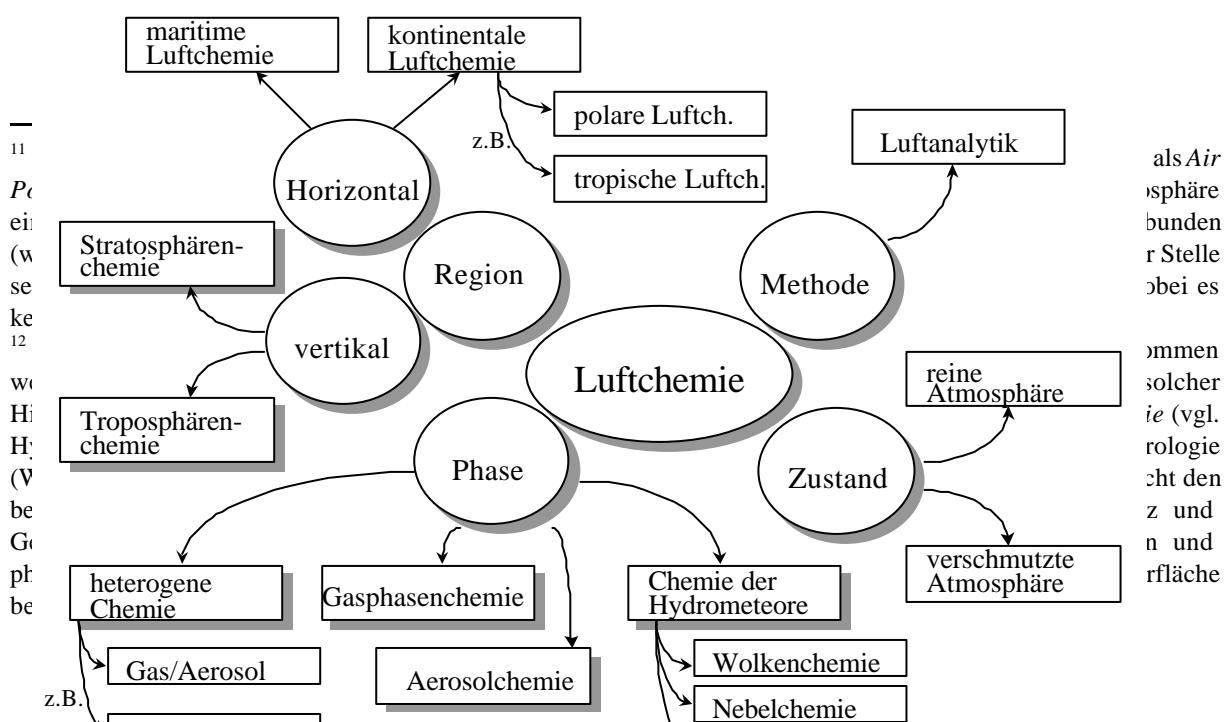
<sup>9</sup> Springer-Umweltlexikon (1995). Diese Definition (Meteorologie als die Lehre von der Physik und Chemie der Atmosphäre) wurde schon um 1986 vom Meteorologischen Dienstes der DDR geprägt, allerdings erst nach jahrelanger „Einwirkung“ durch Luftchemiker (Möller und Rolle 1987, Möller 1988). Als Begründer der Meteorologie wird Aristoteles (384-322 v. Chr.) angesehen; er schrieb 332 v. Chr. das Lehrbuch *Meteorologica*.

<sup>10</sup> Kant hatte in seinem „Streit der Fakultäten in drey Abschnitten“ trocken bemerkt, daß bei der Einteilung der Fakultäten in die drei „oberen“ (die theologische, juristische und medizinische - die ihre Lehren aus der Bibel, dem Landesrecht und der Medizinalordnung anstelle vernünftigerweise aus der Vernunft, dem Naturrecht und der Physiologie ziehen) die „untere“, die philosophische, nicht weisungsgebunden ist sondern lediglich unter der Gesetzgebung der Vernunft steht.

Eine luftchemische Kernfrage ist die nach dem Verhältnis anthropogener zu natürlichen Emissionen (oder Anteilen an den in der Atmosphäre verteilten Spurenstoffen), d.h. nach der sich verändernden chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre (Schlesinger 1997). Die *Verteilung* der Spurenstoffe bedeutet, chemisch-phänomenologisch deren raum-zeitlich abhängige Konzentration darzustellen. Grundlage jeder anthropogen bedingten Veränderung in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre ist die Kenntnis ihrer natürlichen Zusammensetzung und deren Variationen auf unterschiedlichen Zeitskalen. Das ist ein wesentlicher Gegenstand der Biogeochemie. Die Verteilung der Spurenstoffe im „Reaktor“ Atmosphäre ist neben den Quellen (primäre Emission, chemische Reaktionen als sekundäre Quellen) auch von deren Senken (chemische Reaktionen, Deposition) und vom Transport abhängig (Seinfeld 1986). Der Transport ist Untersuchungsgegenstand der Atmosphärenphysik<sup>11</sup>. Zweifellos gehört die *Wirkung* atmosphärischer Spurenstoffe (auf Vegetation, Mensch, Tier und Material) nicht primär zum Gegenstand der Luftchemie. Die Luftchemie erweist sich hierbei aber als Hilfsdisziplin beispielsweise für die Ökotoxikologie. Die Wirkung von Spurenstoffen auf die Atmosphäre selbst (z.B. Klimaänderung) kann hingegen nur durch die Chemie und Physik der Atmosphäre (also Meteorologie)<sup>12</sup> erforscht werden (Charlson und Heintzenberg 1994).

Die *Umwandlung* der Spurenstoffe wird von Kinetik und Mechanismus der chemischen Reaktionen beschrieben, der „eigentlichen“ Luftchemie (Finlayson-Pitts und Pitts, 1986, Barker 1995). Die *Ablagerung* der Spurenstoffe (von Edukten und Reaktionsprodukten) stellt den Austrag aus dem „Reaktor“ Atmosphäre durch verschiedene physikalisch-chemisch-biologische Prozesse dar. Wie bei der Emission werden hier weitere Disziplinen berührt. Die Schnittstelle Atmosphäre/Erdoberfläche ist die wichtigste Kopplung im biogeochemischen Stoffkreislauf.

Aus der Sichtweise der Atmosphäre als chemischer Reaktor läßt sich eine Unterteilung der Luftchemie nach den im Bild 1 gezeigten Kriterien durchführen. Selbstverständlich können alle bereits genannten Teildisziplinen der Chemie in der Luftchemie Anwendung finden. Insbesondere sind die Photochemie und Radikalchemie von allergrößter Bedeutung für die luftchemischen Prozesse. Thermische Reaktionen sind in der (unteren) Atmosphäre aufgrund der wenig erhöhbaren Temperatur begrenzt, dafür sind Einige umso bedeutender (z.B. Reaktionen des O<sub>3</sub> mit NO, NO<sub>2</sub> und Alkenen). Dabei entstehen teilweise Radikale (also auf nicht-photochemischen Weg), welche umfangreiche Reaktionsketten zur Folge haben.



### Bild 1: Einteilung der Luftchemie

Schaut man sich die Fachleute an, die auf dem Gebiet der Luftchemie arbeiten, so stellt man fest, daß überwiegend Lehrstühle/Fachgebiete für *physikalische Chemie* vertreten sind (nicht nur bzgl. der heterogenen luftchemischen Prozesse, s. Bild 1). Es folgen Lehrstühle/Fachgebiete für *analytische Chemie* (kein Analytiker sieht sich gerne als Dienstleister - auch wenn es im Kern der Dinge zutrifft - also war die *Umweltanalytik* eine willkommene Herausforderung für ein eigenes Fachgebiet). Dann folgen Lehrstühle/Fachgebiete für *allgemeine, angewandte* und *anorganische Chemie*. Eine große Herausforderung für die zukünftigen Aufgaben in der Luftchemie kann in der *organischen Luftchemie* (Isidirov 1990) gesehen werden. In erster Linie ist die mangelhafte Kenntnis organischer Spurenkomponenten in der Atmosphäre auf die Probleme bei der Probenahme und Analytik zurückzuführen. Die Titelfrage wieder berührend, haben wir zunächst festgestellt, daß Atmosphärenchemie besser Luftchemie zu nennen sei (allerdings halte ich diese Unterscheidung nicht für wesentlich). Wird die einleitend getroffene Feststellung akzeptiert, daß die Chemie<sup>13</sup> grundsätzlich durch die organische und anorganische sowie physikalische Chemie vollständig dargestellt werden kann, so muß man alle weiteren (mit Ausnahme der analytischen Chemie als einer *Hilfsdisziplin*)

---

<sup>13</sup> Der Vollständigkeit halber erwähne ich den Begriff *allgemeine Chemie* für Lehrstühle/Fachbereiche, nur um festzustellen, daß entweder die Finanzierung nicht reichte, um mehrere Personen mit der Verantwortung für Teildisziplinen zu betrauen oder aber (das trifft auch auf die institutionalisierte *angewandte Chemie* zu) ein Alibi für unbegrenzte Freiheitsgrade in der Selbstbestimmung des chemischen Arbeitsgegenstandes zu haben. Es gibt auch die *theoretische Chemie*. Wir sollten diese nicht mit *Modellierung* (konkreter: numerische Simulation chemischer Prozesse, z.B. in der Luft) verwechseln, denn das ist auch „nur“ ein Experiment mit anderen Methoden. Jeder gute Experimentator hat eine Hypothese, die auf einer/mehreren bereits überprüften Theorien beruht. Hat er sie nicht, ist er ein schlechter Experimentator oder ein Empiriker (letzteres halte ich u.U. nicht für schlecht).

chemischen Disziplinen (also auch die Luftchemie) als *angewandt* bezeichnen, nämlich angewandt bezüglich spezieller Fragestellungen (hier nach der chemischen Dynamik der Atmosphäre). Im folgenden Abschnitt wird festgestellt, daß die Luftchemie wiederum *angewandt* wird, um Probleme der Luftreinhaltung zu lösen. Als Fazit ließe sich (vgl. einleitendes Zitat von Pasteur) die Schlußfolgerung ziehen, wir benötigen den Begriff *angewandte Disziplin* nicht, um Probleme zu erkennen und zu lösen, da wir grundsätzlich Wissenschaften und Techniken sowie deren Teildisziplinen anwenden.

### 3. Luftchemie und Luftreinhaltung

Es gibt im Deutschen Begriffe wie *Luftreinhaltung* und *Lufthygiene*, die nicht ganz identisch sind mit den englischen Begriffen *Air Pollution Control* und *Air Quality*. Wir haben gesehen, daß wir den Begriff Luftverschmutzung nicht benötigen. Baumbach (1993) versteht unter *Luftreinhaltung* die Untersuchung von Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen, die dazugehörige Meßtechnik und die Anwendung von Verfahren der Emissionsminderung und Vorschriften. Wir haben hier einen eingebürgerten Sprachgebrauch in dem Sinne, daß Luftreinhaltung weder eine wissenschaftliche noch sonstige Disziplin ist, sondern eine *problemorientierte* Aufgabenstellung. Der Begriff Ausbreitung wird dabei für Umwandlung *und* Transport gebraucht. Demnach wäre die Luftchemie (neben Atmosphärenphysik, Ökotoxikologie, Umweltrecht, Verfahrenstechnik) ein Instrument der Luftreinhaltung, um in erster Linie die Verteilung der (schädigenden) Spurenstoffe in der Atmosphäre zu beschreiben. Im Bild 2 ist der Versuch unternommen worden, die Luftreinhaltung als einen Regelkreislauf darzustellen. Die Umweltverfahrenstechnik (Theodore und Bunocore 1994) hat sich inzwischen als ein eigenständiges und umfangreiches Gebiet der Verfahrenstechnik herausgebildet.

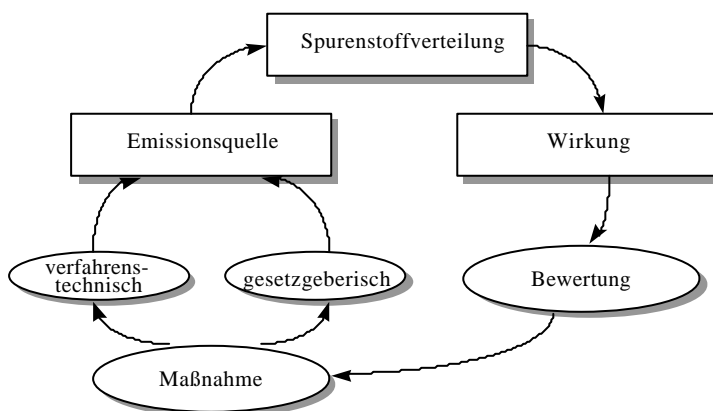


Bild 2: Luftreinhaltung als Regelkreislauf

Die Luftchemie kann - allerdings nur in enger Zusammenarbeit mit der Atmosphärenphysik (die in meiner Fakultät aus unverständlichen Gründen Umweltmeteorologie genannt wird) - die Spurenstoffverteilung, d.h. die raum-zeitlich abhängige chemische Zusammensetzung der Atmosphäre für unterschiedliche Emissionsszenarien darstellen. Darüber hinaus wird die atmosphärische Wirkung

selbst beschrieben, also das luftchemische (z.B. Versäuerungs- und Oxidationspotential) und klimatologische (z.B. Klimaantrieb) Element beschrieben. Diese zu quantifizierenden Zielgrößen sind allerdings - in Abhängigkeit von unserem Wissen, unseren experimentellen und rechentechnischen Möglichkeiten - mit teilweise sehr großer Unsicherheit behaftet (Möller, 1999). Nach diesem ersten Schritt muß die Wirkung der sich verändernden atmosphärischen (chemischen und physikalischen) Eigenschaften auf die Biosphäre (z.B. Waldschäden) und die Technosphäre (z.B. Korrosion) als Funktion von den atmosphärischen Eigenschaften dargestellt werden. Schließlich ist ein weiterer entscheidender Schritt die Bewertung der *Folgen* der Wirkung. Eine ökonomische Bewertung ist zweifellos wichtig, aber nicht hinreichend. Soziologische und allgemein gesellschaftspolitische Kriterien sind schon deshalb erforderlich, weil die Atmosphäre weder staatliche noch gesellschaftliche Grenzen kennt, aber vielen Wirkungen effektiv nur auf regionaler (z.B. Azidität) und sogar globaler Skala (z.B. Treibhauseffekt) begegnet werden kann.

Als ein aktuelles Beispiel kann *joint implementation* gelten, d.h. eine weitere Reduzierung des (negativen) atmosphärischen Wirkungspotentials (d.i. „Luftverschmutzung“) in Westeuropa wäre mit extremen Kosten und nur kleinem positiven Effekt verbunden - demzufolge ist es besser, die Mittel (oder wenigstens einen Teil davon) in Strategien zur Verminderung anthropogener Emissionen in andere Regionen zu investieren (Osteuropa, Asien). Obgleich heute verfahrenstechnische Lösungen für eine Vielzahl von Emissionsproblemen angeboten werden, sehe ich eine weltweit durchgreifende Verminderung schädigender Emissionen nur in veränderten Technologien (z.B. Vergasung und Verflüssigung anstelle Verbrennung von Kohle) und Alternativen in der Technologie und Konsumption. Bei einer möglichen Vervielfachung des globalen Pkw-Bestandes ist die Herabsetzung des Benzinverbrauches auf die Hälfte keine globale Lösung, wenngleich jedoch ein positiver Teilschritt. Eine Lösung kann nur in alternativen Kraftstoffen und/oder Antrieben (oder alternativen Transportsystemen) liegen.

#### 4. Aktuelle Probleme in Luftchemie und Luftreinhaltung

Wir haben gesehen, daß Luftchemie und Atmosphärenphysik untrennbar in der Meteorologie verbunden sind, wenn die Atmosphäre als physikalisch-chemisches System verstanden werden soll. Die Untersuchung (luft)-chemischer Reaktionen im Labor ist zunehmend wichtiger geworden, da alle Versuche, durch direkte Feldmessungen Kinetik und Mechanismen chemischer Prozesse in der Atmosphäre zu bestimmen, bisher ohne Erfolg waren. Feldmessungen ergeben jedoch entscheidende phänomenologische Erkenntnisse und Zustandsbeschreibungen, die laborexperimentelle und modelltheoretische Ergebnisse sowohl bestätigen („evaluieren“) als auch Hinweise auf noch durchzuführende Laborexperimente und Modellverbesserungen geben können. In kaum einer anderen Disziplin sind daher Modellierung, Feldmessungen und Laboruntersuchungen wie in der Luftchemie so eng miteinander verbunden.

Ein großes methodisches Problem liegt in der Übertragbarkeit von kinetischen und mechanistischen Laborergebnissen auf die Atmosphäre. Es sind daher noch größere Reaktoren<sup>14</sup> entstanden, um atmosphärische Verhältnisse immer besser simulieren können. Allerdings werden sich m.E. nie die für den chemischen Umsatz in einem atmosphärischen Raumelement entscheidenden Ver- und Entmischungsprozesse, die in verschiedenen raum-zeitlichen Skalen stattfinden, simulieren lassen. Wir wissen inzwischen, daß die Atmosphäre durchaus natürlich bedingten Änderungen (vgl. Tab. 1) und Variation ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften unterliegt. Viele der in den letzten

---

<sup>14</sup> Photosmogreaktor EUROPHOR in Valencia (Spanien) und heterogen-chemischer Reaktor AIDA in Karlsruhe

100 Jahren sich verändernden Eigenschaften der Atmosphäre sind auch aus der Paleoklimatologie bekannt, allerdings mit dem Unterschied, daß diese natürlichen Änderungen sich über lange (geologische) Zeiträume vollzogen. Bei der Festlegung, was ist das Problem, muß zwischen Zuständen, deren Ursachen sowie deren Wirkungen und den weiteren Folgen unterschieden werden. Für die Luftchemie und Luftreinhaltung wird das Problem beispielsweise (Tab. 1) die Zunahme der Azidität (Versäuerung) sein, bedingt durch eine Änderung des Budgets an Emissionen, die Säuren und Basen bilden (Möller u.a. 1996b). Für den Forstmann liegt das Problem beispielsweise in vermindertem Holzzuwachs, für den Geologen in einer erhöhten Erosionsrate und für den Ökologen in einer sich ändernden Landnutzungsstruktur. Es ist daher notwendig, die Wirkung (das eigentliche *Problem*) auf verschiedenen Ebenen zu unterscheiden.

Die uns gegenwärtig beschäftigenden atmosphärischen *Probleme* sind zweifellos (es handelt sich hierbei um keine Rangfolge - eine solche ist m.E. nicht generell aufstellbar):

- Troposphärisches Ozon, d.h. die Änderung (Zunahme) des Oxidationspotentials (auch Oxidationskapazität genannt, oft mit der OH-Radikalkonzentration gleichgesetzt)<sup>15</sup>; während die anorganisch-chemischen Gasreaktionen der Ozonchemie gut verstanden sind, gibt es noch offene Felder im oxidativen Abbau von Kohlenwasserstoffen, insbesondere bei Aromaten und sog. heterogenen Prozessen (Gas-Tropfen, Gas-Aerosol-Wechselwirkung) und Flüssigphasenreaktionen (Wolkenchemie) werden im Ozonbudget bisher nicht oder unzureichend berücksichtigt, sind aber auch z.T. noch unerforscht. Neben Ozon muß weiteren Oxidantien verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden, beispielsweise dem Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), s. Möller (1999c).
- Atmosphärische Azidität (saure Deposition); war das Phänomen „Saurer Regen“ vor 30 Jahren durch die stark ansteigenden Emissionen von SO<sub>2</sub> und NO (Säurebildner) in Westeuropa und Nordamerika bedingt, so verschiebt sich dieses Problem regional nach Asien (insb. China) und erfordert eine Neubewertung infolge der Möglichkeit eines Überschusses an Basen (NH<sub>3</sub>) und einer eventuellen Alkalisierung (Möller, 1999a).
- Treibhausgase (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> u.a.) werden zunehmend primär emittiert bzw. auch sekundär gebildet (CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) und führen zweifellos zu einer Erwärmung der Atmosphäre; das Problem liegt in der technologisch bedingten Nichtvermeidbarkeit der CO<sub>2</sub>-Bildung bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe und deren Veredlungsprodukte sowie in der biogen bedingten Emission von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O aus der Landwirtschaft (also Nahrungsproduktion), die bisher auch nicht erfolgreich eingedämmt werden konnte (z.B. durch Arten- und Bewirtschaftungswechsel).
- Aerosole, insbesondere Sulfataerosole führen zu einer Abkühlung der Atmosphäre und „verdecken“ den Treibhauseffekt (Charlson und Heintzenberg 1994); das Problem ist hier sehr „interessant“, da in Asien die SO<sub>2</sub>-Emission und damit der Aerosolgehalt zweifellos noch steigen werden (und zu einer „Verdeckung“ des gleichfalls steigenden Erwärmungspotentials durch Treibhausgase führt) aber andererseits durch Rauchgasentschwefelung der Sulfatgehalt über Europa und Nordamerika wahrscheinlich spürbar sinken wird und somit der Netto-Treibhauseffekt zum Bruttoeffekt wird (die Verweilzeit von Aerosol beträgt ca. 1 Woche, die der entscheidenden Treibhausgase > 40 Jahre)

---

<sup>15</sup> Es gibt meines Erachtens noch keine allgemeine und auch durchgängig physikalisch sinnvolle Definition, obwohl es dazu ausreichend Literatur gibt (z.B. Becker 1999)

- Abnahme des stratosphärischen Ozons durch in der Troposphäre langlebige Spurengase (in erster Linie Chlorfluorkohlenwasserstoffe und  $N_2O$ ); neben dem Hauptproblem, der Zunahme der Intensität kurzwelliger Strahlung (UV-B), die schädigend für den Menschen und die Biosphäre ist, treten für die Atmosphäre selbst (Photochemie, Temperaturverteilung) noch unzureichend beschreibbare Effekte auf.

Auf weitere Effekte und Probleme soll hier nicht eingegangen werden; eine ausgezeichnete Darstellung findet sich bei Crutzen (1999).

Tab. 1: Atmosphärische *Umweltprobleme*

Änderung (Ursache)	Eigenschaft (Zustand)	Wirkungsbeispiele
Budget Säuren/Basen	Azidität	Korrosion, Waldschäden
Zunahme trop. $O_3$	Oxidationspotential	Waldschäden, Gesundheit
Zunahme von $CO_2$ , $CH_4$ u.a.	Treibhauseffekt	Erwärmung
Zunahme Aerosolgehalt	Aerosolantrieb	Abkühlung
Abnahme strat. $O_3$	UV(B)-Strahlung	Gesundheit

### Literatur:

- Baumbach, G. (1993) *Luftreinhaltung*, Springer
- Becker, K.-K., I. Barnes, L. Ruppert und P. Wiesen (1998) *Is the oxidising capacity of the atmosphere changing?*  
In: Prediction of Atmospheric Environmental Problems between Technology and Nature (Hrsg. D. Möller), Springer
- Bliefert, C. (1994) *Umweltchemie*, Verlag Chemie, Weinheim
- Butcher, S.S., R.J. Charlson, G.H. Orians, G. V. Wolfe (Hrsg.) *Global Biogeochemical Cycles*, Academic Press, San Diego (1994)
- Calvert, J. G. (Hrsg.) *The Chemistry of the Atmosphere: Ist Impact on Global Change*, Blackwell Sci. Publ., Oxford (1995)
- Charlson, R.J., J. Heintzenberg (Hrsg.) *Aerosol Forcing of Climate*, J. Wiley & Sons (1994)
- Crutzen, P. (1999) *Global problems of atmospheric chemistry - The story of man's impact on atmospheric ozone*  
In: Prediction of Atmospheric Environmental Problems between Technology and Nature (Hrsg. D. Möller), Springer
- Finlayson-Pitts, B.J, F.N. Pitts (1986) *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*, J. Wiley & Sons
- Hutzinger, O. (Herausg.) *The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer 1995
- Isidirov, V.A. (1990) *Organic Chemistry of the Earth's Atmosphere*, Springer
- Junge, C.E. (1963) *Air chemistry and radioactivity*. Acad. Press, New York
- Kant, I. (Der Streit der Fakultäten in drey Abschnitten, 1798) In: Immanuel Kant Werkausgabe, Bd. XI, W. Weischedel (Hrsg.), Suhrkamp, Frankfurt/M. (1991)
- Korte, F. (1992) *Lehrbuch der Ökologischen Chemie*, 3. Aufl., Thieme, Stuttgart
- Möller, D. und W. Rolle (1987) *Atmosphärische Chemie - Aufgaben, Methoden und Ergebnisse*. Z. Chem. **27**, 247-255
- Möller, D. (1988) *Stand und Perspektiven atmosphärenchemischer Untersuchungen am HHI*. Aus Arb. Plenum Kl. AdW DDR, Berlin **13**, 8:16-30
- Möller, D. (1999a) Acid rain – gone? In: Prediction of Atmospheric Environmental Problems between Technology and Nature (Hrsg. D. Möller), Springer
- Möller, D. (Hrsg.) *Prediction of Atmospheric Environmental Problems between Technology and Nature*, Springer, 1999b

- Möller, D. (1999c) Explanation for the recent dramatic increase of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations found in Greenland ice cores. *Atmos. Env.* **33**, 2435-2437
- Schlesinger, W. H. (1997) *Biogeochemistry - An Analysis of Global Change*. Academic Press, San Diego
- Seinfeld, J.H. (1986) *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, J. Wiley & Sons,
- Schönbein, C.F.(1854) *Über verschiedene Zustände des Sauerstoffs*. *Liebigs Ann. Chem.* **89**, 257-300
- Stöckhardt, A.. (1871) *Untersuchung über die schädliche Einwirkung des Hütten- und Steinkohlenrauches auf das Wachstum der Pflanzen, insbesondere der Fichte und Tanne*. *Tharandter Forstl. Jahrb.* **21**, 218
- Streit, B. (1994) *Lexikon Ökotoxikologie*, Verlag Chemie, Weinheim
- Theodore, L., A. Buonicore (Hrsg.) *Air Pollution Control Equipment*, Springer (1994)
- Wislicenus, H. (Herausg.) *Sammlung von Abhandlungen über Abgase und Rauchschäden*, Verlagsbuchhandlung Paul Parey, Berlin 1908