

Das chemische Klima

Detlev Möller

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Luftchemie und Luftreinhaltung

Suchbegriffe: atmosphärische Chemie, chemische Klimatologie, Immissionsklimatologie, Klima, Klimaänderung, Klimasystem, Luftverschmutzung

Zusammenfassung

Der Klimabegriff hat im Verlaufe seiner Nutzung mehrfache Änderungen erfahren, wurde jedoch nahezu ausschließlich aus der physikalischen Betrachtung der Atmosphäre verwendet, obwohl bereits *Humboldt* in seiner – und aus heutiger Sicht ersten wissenschaftlich umfassenden Definition – den chemischen Zustand der Atmosphäre mit einbezog. In den letzten Jahren hat sich zunehmend der Begriff des „chemischen Wetters“ eingebürgert; der Autor legt dar, dass dieser Begriff wenig sinnvoll ist. Hingegen wird von einer „chemischen Klimatologie“ bereits seit Jahrzehnten gesprochen; in den 1960er Jahren war auch der Begriff „Immissionsklimatologie“ üblich (nur im deutschsprachigen Raum). In dieser Mitteilung wird ausgeführt, dass der Begriff „Klima“ eine allumfassende Zustandsbeschreibung der Atmosphäre ist und daher zwangsläufig neben physikalischen auch die chemischen (und ggf. biologische) Parameter („Elemente“) beinhaltet.

1. Einführung

Der Klimabegriff wird gegenwärtig vor allem mit dem *Klimawandel* (welcher sich in den letzten Jahren als populärer Term eingebürgert hat) in Zusammenhang gebracht; synonym damit wird der Begriff *Klimaänderung* (ein mehr wissenschaftlicher Terminus) verwendet. Im am 9. Mai 1992 in New York verabschiedeten *Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen* (unterschrieben von 34 Staaten) wird *Klimaänderung* als „Änderungen des Klimas, die unmittelbar oder mittelbar auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen sind, welche die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändern, und die zu den über vergleichbare Zeiträume beobachteten natürlichen Klimaschwankungen hinzukommen“ definiert. Diese Definition ist eingrenzend, da sie natürliche Prozesse nur im Sinne einer Klimaschwankung aber nicht Klimaänderung beinhaltet. Beobachtet kann aber nur eine Klimaänderung werden, die auf *alle* Ursachen zurückzuführen ist. Die möglichen anthropogenen Einflussfaktoren auf das Klima (und damit dessen Änderung) sind vielfältig und reichen von einer Änderung der Landnutzung (veränderte Oberflächeneigenschaften) bis zu Emissionen, wohingegen direkte energetische Beeinflussungen (z.B. Wärmeinseln) höchstens (erst) von lokaler Bedeutung sind.

Eine Klimaänderung ist also die Differenz zwischen zwei Klimazuständen. Ein *Klimazustand* ist durch den statistischen Zustand des Klimasystems beschrieben. Eine *Klimaschwankung* kann demzufolge als eine periodische Klimaänderung definiert werden, unabhängig von der jeweiligen Zeitskala. Das Klima ist eine Funktion von Raum und Zeit – und es ändert sich ständig.

Das Klimasystem ist zu komplex, um es mathematisch eindeutig beschreiben zu können. Das gilt mit großer Wahrscheinlichkeit auch für die Zukunft. Unser Wissen über viele Einzelprozesse in diesem System ist noch unvollkommen. Dennoch wurden in den vergangenen 20 Jahren in der Klimaforschung große Fortschritte erzielt und die Beschreibung der *prinzipiellen* Prozesse kann als gesichert gelten. Der *Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen* (WGBU) hat in einem Gutachten (vom 25.11.2003) betont, dass gefährliche Klimaänderungen¹ nur noch vermeidbar sind, wenn die

¹ Hier ergibt sich ein Dilemma: was ist eine *gefährliche* Klimaänderung?

Reduktion von Treibhausgasen deutlich stärker als bisher verfolgt wird. Insbesondere muss der vom Menschen verursachte Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) bis 2050 global um etwa 45-60% gegenüber 1990 gesenkt werden. Dies bedeutet, dass die Industrieländer ihren Ausstoß von Treibhausgasen bis 2020 um mindestens 20% verringern müssen. Gemäß *Kyoto-Protokoll* haben sie sich nur dazu verpflichtet, bis 2012 die Emissionen um 5,2% (bezogen auf 1990) zu senken. Nach einer früheren Aussage eines Beiratmitgliedes² würde eine Einhaltung des *Kyoto-Protokoll* – wenn es denn überhaupt verwirklicht wird – den Effekt eines Temperaturrückgangs um 0,1 K haben (also *keinen* Effekt).

Bei weiterem Hinsehen bemerkt man, dass die Klimaänderung mit der *Luftverschmutzung* im Zusammenhang steht, oder anders ausgedrückt, mit der Änderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre. Auch wissen wir, dass die meisten atmosphärischen Umweltprobleme miteinander verknüpft sind, allerdings in einer komplexen (im mathematischen Sinne nicht-linearen) Weise. So ist es keineswegs trivial, einfach den Umkehrschluss zu ziehen und mit einer sich verringernden Luftverschmutzung – also *Luftreinhaltung* – eine Lösung dieser Probleme zu erhoffen.

2. Was ist Klima?

Claußen (2006) unterscheidet zwischen einer meteorologischen und systemanalytischen Definition. In der älteren Literatur wird Klima als „die Gesamtheit aller meteorologischen Erscheinungen“ definiert, „die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgend einer Stelle der Erdoberfläche charakterisieren“ (Hann 1883). Wenn wir den momentanen Zustand der Atmosphäre an einem Ort als Wetter bezeichnen, dann ist Klima nach dieser Definition gleichbedeutend mit mittlerem Wetter. Im Laufe des letzten Jahrhunderts wurde der Klimabegriff dahingehend erweitert, dass neben dem Mittelwert auch die höheren statistischen Momente in die Klimadefinition einbezogen werden. Nach der neueren Definition beschreibt Klima das „statistische Verhalten der Atmosphäre, das für eine relativ große zeitliche Größenordnung charakteristisch ist“ (Hantel et al. 1987). Die Klimavariablen, auch manchmal Klimatelemente genannt, werden als statistische Kenngrößen angegeben wie zum Beispiel Jahres- oder Monatsmittel oder als Eintrittswahrscheinlichkeit und Häufigkeit von Ereignissen.

Die *World Meteorological Organization* (WMO) hat für die Zeitspanne, über die der Mittelwert des Wetters berechnet werden sollte, 30 Jahre festgelegt. Daher werden für Klimavergleiche häufig die Zeiträume 1931–1960 bzw. 1961–1990 gewählt. Man findet in der Literatur aber auch andere Mittelungszeiträume. Nach der WMO wird Klima folgendermaßen definiert:

Synthesis of weather conditions in a given area, characterized by long-term statistics (mean values, variances, probabilities of extreme values, etc.) of the meteorological elements in that area.

Ebenfalls nach der WMO wird als Wetter definiert:

The state of the atmosphere mainly with respect to its effects upon life and human activities. As distinguished from climate, weather consists of the short-term (minutes to about 15 days) variations of the atmosphere state.

Der Wetter- und Klimabegriff bezieht sich also auf die Atmosphäre und deren *Zustand*. Eine sehr schöne Definition der Atmosphäre (und implizit für die *Meteorologie*) wurde ebenfalls von der WMO gegeben:

² Hans-Joachim Schellnhuber in der Berliner Morgenpost vom 16.12.2001, S. 30.

The envelope of air surrounding the Earth and bound to it more or less permanently by virtue of the Earth's gravitational attraction; the system whose chemical properties, dynamic motions, and physical processes constitute the subject matter of meteorology.

Dem Leser wird sofort auffallen, dass in der Systembeschreibung hierbei „chemische Eigenschaften“ mit genannt werden; nebenbei wird auch eine (logische) Definition für die Disziplin *Meteorologie* unter Einschluß der atmosphärischen Chemie gegeben. Auch lässt sich eine Differenzierung der Begriffe Luft und Atmosphäre erkennen in dem Sinne, dass als *Luft* ein substanzielles (also chemisches) Gemisch angesehen wird, welches sich in der *Atmosphäre* nach (geo)-physikalischen Gesetzmäßigkeiten verhält. Die WMO wird nun aber bei ihrer Beschreibung, was man unter „meteorologischen Elementen“ (also den Systemparametern des atmosphärischen Zustands) zu verstehen hat, inkonsistent, indem keinerlei (atmosphären)-chemische Größen mit aufgezählt werden:

Any one of the properties or conditions of the atmosphere which together specify the weather at a given place for any particular time (for example, air temperature, pressure, wind, humidity, thunderstorm and fog)

Da Klima sich sowohl räumlich wie auch zeitlich ändert, gehören zur Angabe der Klimaelemente auch Ort und Mittelungszeitraum, für welche die statistischen Kenngrößen gelten. Die *meteorologische* Klimadefinition hat sich in der *Klimatologie*, der eher beschreibenden Wissenschaft des Klimas, bewährt. Zum Verständnis der Klimadynamik, also der Prozesse, die den mittleren Zustand und die Variabilität der Atmosphäre über längere Zeiträume bestimmen, reicht die meteorologische Definition nicht aus, denn die längerfristigen Veränderungen der Atmosphäre werden wesentlich durch die Wechselwirkung der Atmosphäre mit dem Ozean, der Vegetation und den Eismassen geprägt (Claußen 2006). Aus diesem Grunde wird in der Klimadynamik, wie in den modernen Lehrbüchern der Meteorologie und der Klimaphysik nachzulesen ist (z.B. Kraus 2000, Peixoto und Oort 1992), das Klima über den Zustand und das statistische Verhalten des *Klimasystems* definiert.

Der Begriff des Klimas unterlag in der Geschichte der Menschheit – und damit der Erforschung der Luft und Atmosphäre – Wandlungen aber auch parallel existierenden Beschreibungen (auf die hier nicht eingegangen werden soll). Man muß dem entnehmen, dass *verschiedene* Klimadefinitionen im Gebrauch sind. Das ist *a-priori* ein Widerspruch, denn es gibt auf der Erde nur *ein* Klimasystem. Hier drückt sich ganz offenbar eine pragmatische Herangehensweise an die Erkennung und Beschreibung des Klimasystems durch a) unterschiedliche disziplinäre Sicht, b) verschiedene Zielstellung (beispielsweise Beschreibung von Teilsystemen) und/oder c) differenzierte Kenntnis der Systemzusammenhänge aus.

3. Das Klimasystem

Das Klimasystem besteht aus verschiedenen Untersystemen: der Atmosphäre, der Hydrosphäre (dazu gehören Ozean, Flüsse, Seen, Regen, Grundwasser), der Kryosphäre (Inlandeismassen, Meereis, Schnee, Permafrost), der marinen und terrestrischen Biosphäre, dem Erdreich, und, wenn die Klimaentwicklung über viele Jahrtausende betrachtet wird, der Erdkruste und dem oberen Erdmantel. Diese Unterteilung erfolgt im Wesentlichen aufgrund der beteiligten Medien (gasförmig, flüssig, fest) und der Zeitskalen, die für typische Änderungen in den Untersystemen beobachtet werden können. Die Untersysteme sind über Energie-, Impuls- und Stoffflüsse miteinander gekoppelt. Zu den Stoffflüssen muss auch der Transport chemischer Substanzen und deren Umwandlungsprozesse hinzugerechnet werden, soweit diese Substanzen – wie zum Beispiel Treibhausgase oder Nährstoffe der Biosphäre – direkt oder indirekt mit dem Energiekreislauf in Verbindung stehen.

Die Definition des Klimasystems wird nicht aus übergeordneten Prinzipien abgeleitet, sondern ist als eine pragmatische Eingrenzung des zu untersuchenden Gegenstandes durch

Unterteilung in Subsysteme und der Interpretation der jeweiligen Systemumgebung. Die Abgrenzung des Klimasystems zur Umgebung wird so vorgenommen, dass kein wesentlicher Massenfluss zwischen dem System und der Umgebung auf den für die Untersuchung relevanten Zeitskalen stattfindet.

Kraus (2000) zählt auch die Anthroposphäre, die Welt menschlichen Handelns, zum Klimasystem. Das erscheint auf der einen Seite sinnvoll, da der Mensch als Teil der Natur das „natürliche System“ weitgehend verändert hat³, aber auf der anderen Seite nicht pragmatisch, da sich das menschliche Handeln, insbesondere Kultur und Psychologie, der thermodynamischen Beschreibung entzieht. Die Summe von Klimasystem und Anthroposphäre wird in der Literatur auch als Erdsystem definiert (Schellnhuber und Wenzel 1998, Schellnhuber 1999, Claußen 1998, 2001), wobei in diesem Zusammenhang statt Klimasystem synonym die Begriffe Natursphäre oder Ökosphäre gebraucht werden.

4. Der chemische Aspekt des Klimas

Wenn als Klima (und dahingehend sind sich alle Klimatologen einig) der langfristige *Zustand der Atmosphäre* (durch sein Mittel als auch dessen Abweichungen charakterisiert) bezeichnet wird, und die Atmosphäre wiederum durch die Luft (im Sinne eines Stoffgemisches) und die darin ablaufenden Prozesse charakterisiert wird, so wäre ein Trennung zwischen Chemie und Physik töricht bei dem Versuch einer Beschreibung der Atmosphäre.

Die chemische Gemisch Luft beinhaltet neben den Hauptbestandteilen (Stickstoff und Sauerstoff) und den Nebenbestandteilen (Edelgase und Wasser) eine nahezu „unbegrenzte“ Anzahl Spurengase sowie feste Bestandteile (Aerosolpartikel) als auch (zeitweise) gelöste Stoffe (in Hydrometeoren). Lawrence et al. (2005) haben in Analogie zur (meteorologischen) Definition des Wetters ein *chemisches Wetter* definiert:

Local, regional, and global distribution of important trace gases and aerosols and their variabilities on time scales of minutes to hours to days, particularly in light of their various impacts, such as on human health, ecosystems, the meteorological weather, and climate.

Natürlich bemerkt der aufmerksame Betrachter sofort, dass (in Hydrometeoren) gelöste Spurenstoffe fehlen und stellt zweitens die Frage, was sind *wichtige* bzw. *unwichtige* Spurenstoffe. Wenn unter dem Zustand der Atmosphäre (hier auf der Kurzzeitskala) mit Wirkungen auf das Leben – eigentlich zwangsläufig – chemische Spurenstoffe („Schadstoffe“) mit einbezogen werden (sie sind ja Bestandteile der Atmosphäre mit eben diesen Beziehungen zum Leben und zu menschlichen Aktivitäten), so kann man ohne weitere Diskussion in die herkömmliche Definition des Wetters die atmosphärische Chemie mit einbeziehen (obwohl mit Sicherheit kein Meteorologe daran gedacht hatte). Die *Lawrence*-Definition kann somit korrigiert werden in:

The chemical state of the atmosphere mainly with respect...

Wenn wir nun den Kurzzeitaspekt fallen lassen, also den Nachsatz bezüglich der Klima-Definition anwenden, haben wir eine formale Definition des chemischen Klimas:

Synthesis of chemical weather conditions in a given area, characterized by long-term statistics (mean values, variances, probabilities of extreme values, etc.) of the chemical substances in that area.

³ Vernadsky hatte den Begriff *Noosphäre* eingeführt und verstand darunter eine neue Dimension der Biosphäre, die sich unter dem evolutionären Einfluss des Menschen auf die natürlichen Prozesse entwickelt(e).

Anstelle “meteorological elements” wurde hier “chemical substances” geschrieben. Wenn – wie implizit bereits erwähnt – die Meteorologie auch für die Beschreibung des chemischen Zustands der Atmosphäre sich als Disziplin zuständig fühlt, kann man die Liste der „meteorologischen Elemente“ einfach um alle relevanten chemischen Größen mit erweitern. Um keine Mißverständnisse aufkommen zu lassen, es handelt sich hier bei der Erweiterung des Klimabegriffs um chemische Aspekte, nicht um „Chemie“, genausowenig, wie die Klimatologie eine Unterdisziplin der Physik ist. Die zeitliche Variation (Tagesgang, Trend usw.) der Konzentration eines atmosphärischen Spurenstoffes ist keine „Chemie“ (diese befasst sich mit der Umwandlung des Spurenstoffes und den dazu gehörenden atmosphärischen Bedingungen, d.h. untersucht – in Analogie zur Physik der Atmosphäre, den Prozess und damit die Zustandsänderung). Hier wird die chemische Substanz (wie beispielsweise die Temperatur) als „Zustandsgröße“ im Sinne einer geographischen (Raum-Zeit-Abhängigkeit) und meteorologischen (atmosphärisch-phänomenologischen) Eigenschaft aufgefasst. Ich möchte nun das Klima in seinem allgemeinen Sinne wie folgt definieren:

Clima describes the mean status of the atmosphere at a given site of the Earth surface, represented by the statistical total properties (mean values, frequencies, durations etc.) of a long enough time periode.

Es versteht sich (und deshalb sollte keine Differenzierung zwischen einer *meteorologischen* und einer *systembezogenen* Definition des Klimas nach Claußen unternommen werden), dass die Atmosphäre nur ein Teil des Klimasystems ist und deshalb das Klima physikalisch-chemisch nur unter Berücksichtigung der stofflichen und energetischen Wechselwirkungen mit den weiteren Teilsystemen (s. Abschn. 3) korrekt beschrieben werden kann. Es lässt sich zweckmäßigerweise ein *Klimazustand* (d.h. die naturwissenschaftliche, weitgehend mathematische Beschreibung des Klimas) definieren:

A climate state is described by the whole description of the statistical state of the internal climate system.

Warum – abgesehen vom akademischen Gesichtspunkt – ist die Einbeziehung der „chemischen Komponente“ in die Beschreibung des Klimas so wichtig? Warum ist die Betrachtung eines „chemischen Wetters“ von keiner oder nur geringer Bedeutung? Der momentane Zustand der Atmosphäre (Wetter) hat in Bezug auf seine physikalische Komponente eine enorme Bedeutung für den Menschen und die Gesellschaft und es erübrigt sich hier jede weitere Begründung. Vom Gesetzgeber wurde die chemische Komponente beispielsweise bei Schwellenwertüberschreitungen ausgewählter chemischer Substanzen (z.B. Ozon) eingeführt (Ozonprognose und tägliche Information). Eine derartige Information macht aber nur Sinn, wenn a) damit eine Gefährdung verbunden sein könnte und b) die Möglichkeit der Vorbeugung bzw. Entgegnung besteht. Der erstere Punkt soll hier nicht weiter ausgeführt werden; vom Autor wurde an anderer Stelle (Möller 2000, 2003) dargelegt, dass bei allen messbaren bodennahen Ozonkonzentrationen eine akute Gefährdung völlig unwahrscheinlich ist. Eine wirksame Gegenmaßnahme (z.B. Fahrverbote haben sich – was bei näherer Kenntnis der atmosphärischen und chemischen Prozesse vorher bekannt war – als unwirksam erwiesen) ist nicht bekannt. Hingegen wäre eine Warnung zu früheren Zeiten (Winter- und Sommersmog)⁴ durchaus wichtig gewesen, um dann empfindlichen Personen beispielsweise zu empfehlen, das Haus nicht zu verlassen.

Das akute Wirkungspotential chemischer Größen (s. dazu auch weiter unten) in der Atmosphäre ist im Vergleich zu physikalischen Größen (z.B. Wind, Niederschlag) in Bezug auf Schäden vernachlässigbar gering und deshalb von untergeordneter gesellschaftlicher Bedeutung. Die Erfassung des momentanen chemischen Zustands der Atmosphäre (also des chemischen Wetters) ist jedoch eine notwendige Voraussetzung für die Langzeitregistrierung,

⁴ Der Vollständigkeit soll hier die Notwendigkeit der Havariewarnung bei Chemieunfällen genannt werden.

um dann eine *chemische Klimatologie* zu erstellen. Die Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre ist seit der industriellen Revolution⁵ zu einem ständigen Prozess geworden. Erst mit dem Gedanken der Nachhaltigkeit (der die Notwendigkeit der „grünen“ Chemie und des Solarzeitalters als technologische Alternative hervorrief) kann die Stoff- und Energiewirtschaft langfristig in (bis dahin jedoch anthropogen stark veränderte) biogeochemische Kreisläufe eingegliedert werden und – so hoffen wir – zu einer Konstanz der atmosphärisch-chemischen Zusammensetzung führen. Dass die Veränderung der chemischen Zusammensetzung (Treibhausgase und Aerosole, um nur zwei Komponenten zu nennen) die Ursache der ablaufenden Klimaänderung ist, wird allgemein anerkannt. Mit unserer neuen, umfassenden Definition ist die Veränderung der chemischen Zusammensetzung selbst Klimaänderung.

Die Erkenntnis, dass bestimmte chemische Substanzen (die in Wechselwirkung mit der Strahlung treten und damit die Energiebilanz der Atmosphäre verändern) über interne Rückkopplungen auch die *physikalische* Komponente des Klimas ändern, ist ein „einfacher“ naturwissenschaftlicher Zusammenhang. Umgekehrt verändern physikalische Größen (u.a. Bewölkung und Strahlung) über veränderte Reaktionsbedingungen den chemischen Umsatz (raum-zeitliche Konzentrationsverteilungen) und damit das chemische Milieu. Das Klima wird also über interne Rückkopplungen in der Atmosphäre selbst als auch über externe Rückkopplungen mit Prozessen in anderen Teilsystemen (die aus der Sicht des Klimasystems aber auch als interne Beziehungen betrachtet werden können) kontrolliert. Aus der Sicht des Erdsystems können als externe Rückkopplungen sowohl extraterrestische als auch magmatische Einflüsse gesehen werden.

Die Erfassung der chemischen Komponenten im Klima (also das Erstellen einer chemischen Klimatologie) ist von großer Bedeutung für die Gesellschaft. Klimamodellierer haben gegenwärtig erkannt, dass nur eine bessere Beschreibung chemischer Prozesse auch zu einer höheren Aussagezuverlässigkeit der bedeutenden physikalischen Aussagen (beispielsweise den Wasserkreislauf betreffend) führen wird. Zum anderen hat die Beschreibung der Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre (nur zur Erinnerung: wir fassen das als Bestandteil des Klimas auf) einen eigenständigen Wert, beispielsweise betreffend des toxischen Potentials der Atmosphäre (weiter ansteigende mittlere Ozonkonzentrationen führen zu einem Pflanzenstress), des oxidativen Potentials (Abbauraten schädlicher Spurenstoffe) und der Säure-Base-Bilanz (geochemische Erosion, Nährstoffverfügbarkeit, Schwermetallmobilität). Diese langsam vorgehenden Veränderungen bedürfen eines umfassenden globalen und auch sorgfältigen Monitorings, einer Analyse und Bewertung sowie (auch nur langfristig möglichen) technologischen Änderungen und Anpassungen mit dem Ziel der Gewährleistung einer nachhaltigen Entwicklung.

5. Eine chemische Klimatologie

Mit der beginnenden mathematischen Beschreibung der atmosphärischen Dynamik und Thermodynamik um 1850 (mit den Namen *Helmholtz*⁶, *Ferrel*⁷, *Bezold*⁸, *Hann*⁹, *Margules*¹⁰

⁵ Genauer genommen seit der Menschwerdung und dem Beginn großer Waldrodungen.

⁶ Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821–1894) Prof. für Physik, Anatomie und Physiologie in Berlin, Königsberg, Bonn und Heidelberg

⁷ William Ferrel (1817-1891) USA-Mathematiker im Selbststudium der Werke von *Bernoulli*, *Euler* und *Laplace*. In 1882 trat er in den *United States Army Signal Service* ein, der erst 1891 *U.S. Weather Bureau* unter ziviler Verwaltung wurde.

⁸ Wilhelm von Bezold (1837-1907) Prof. der Meteorologie in München und Nachfolger von *Dove* als Direktor des Preuß. Meteorol. Inst.

⁹ Julius von Hann (1839-1921) 1874 bis 1897 Prof. der physikal. Geographie, Univ. Wien; 1897/00 Prof. der Meteorologie in Graz, anschl. bis 1910 wieder in Wien

und vieler anderer hier nicht genannter Wissenschaftler verbunden) etablierte sich die Meteorologie als wissenschaftliche Disziplin. Ein erstes *Lehrbuch der Klimatologie* wurde von *Hann* (1883) vorgelegt. Die theoretischen mathematischen Ansätze führten zwangsläufig zu einer Schwerpunktlegung des Klimabegriffs auf die quantifizierbaren meteorologischen Elemente. *Hann* hatte bereits in seinem in dritter Auflage 1908 erschienenen „Handbuch der Klimatologie“ unter den klimatologischen Elemente („Faktoren des Klimas“) auch die Zusammensetzung der atmosphärischen Luft beschrieben. So kann man – ohne dass es zu dieser Zeit explizit genannt wurde – bereits davon ausgehen, daß das *chemische Wetter* als ein Bestandteil des Klimas erkannt und akzeptiert wurde; die Schwierigkeit lag freilich darin, daß damals noch kein Spurengas quantitativ und routinemäßig gemessen werden konnte, eine Voraussetzung zur Erstellung einer (chemischen) *Klimatologie*. Köppen schreibt (1906):

Mit dem Fortschritt des Wissens werden neue Gegenstände in die Zahl der klimatischen Elemente aufgenommen, wenn deren geographische Züge entschleiert werden.

Etwa in der Mitte des 19. Jahrhunderts begann auch eine zunehmend wissenschaftliche Betrachtung der Probleme der belasteten Luft. Eine Behandlung des *sauren Regens* erfolgte in einer bemerkenswert systematischen Weise schon 1852 in the *Memoirs and Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* „*On the air and rain of Manchester*“ von Smith¹¹; er prägte den Begriff *acid rain*. In seinem 1872 in London erschienenen Buch

„*Air and Rain: The Beginning of a Chemical Climatology*“

mit dem erstmals verwendeten Begriff „Chemische Klimatologie“ unterschied er drei verschiedene Belastungstypen in Abhängigkeit von der Entfernung von der Stadt zum ländlichen Gebiet hin:

„... that with carbonate of ammonia in the fields at a distance, that with sulphate of ammonia in the suburbs and that with sulphuric acid or acid sulphate, in the town“.

Prestel¹² (1865) untersuchte zwischen 1857 und 1864 systematisch die Ozonkonzentration in Emden und schrieb 1873 in einer Schrift „Über den Boden, das Klima und die Witterung Ostfrieslands“ dass „... die Feststellung des periodischen und nichtperiodischen Auftretens des Ozons ein wesentliches Moment für die Klimatologie“ sei. Mit seiner „ozometrischen Windrose“ wurde erstmals eine chemische Größe im klimatologischen Sinne dargestellt.

Diese beiden Beispiele aus der frühen Geschichte der Luftchemie sollen deutlich machen, dass – ohne vordergründige Begründungen – die mittlere chemische Charakteristik der Atmosphäre (an konkreten chemischen Verbindungen dargestellt) als Bestandteil der Klimatologie erkannt wurde, eben einer *chemischen Klimatologie*. Nach Warneck (2003) war der Begriff chemische Klimatologie – in großer Nähe zur Bioklimatologie – vor 1948 die allgemein übliche Bezeichnung für die Beschreibung der „Chemie der Atmosphäre“, wobei das Interesse an der (chemischen) Beschaffenheit der Luft vornehmlich in Luftkurorten galt. Es ist festzuhalten, dass ausschließlich eine phänomenologische Herangehensweise praktiziert wurde und die Frage nach der Umwandlung (den Prozessen) weit im Hintergrund stand, weil alle labortechnischen und feldexperimentellen Möglichkeiten noch nicht geschaffen waren.

¹⁰ Max Margules (1856-1920) Öster. Meteorologe (geb. in Brody/Ukraine), 1885-1906 an der „Centralanstalt für Meteorologie

¹¹ Robert Angus Smith (1817-1884) Schottischer Chemiker, der sich mit zahlreichen Umweltfragen befaßte. Er wurde 1863 Queen Victoria's erster sog. Alkali-Inspector (*Alkali Acts Administration*, mit dem Grenzwerte der HCl-Emission von Alkaliwerken gesetzt und deren Einhaltung auch kontrolliert wurde).

¹² Michael August Friedrich Prestel (1809-1890) Mathematiker, Direktor der Naturforschenden Gesellschaft zu Emden

Den Begriff „atmosphärische Chemie“ soll nach Warneck (2003) erstmals von Cauer¹³ (1948) verwendet worden sein. Allerdings findet sich dieser Begriff bereits in der Einleitung (*L'étude chimique de l'atmosphère...*)¹⁴ des Buches „Les Gaz de L'Atmosphère“ von Henriot (1896).

Erst nach dem Erkennen atmosphärischer Umweltprobleme (Sommersmog und Wintersmog), d.h. mit dem Übergang von lokaler zu regionaler Luftverschmutzung in den 1950er Jahren, etablierte sich diese neue Disziplin – auch mit Lehrbüchern und später Fachzeitschriften – wobei die unterschiedlichsten Bezeichnungen genutzt werden (hier in englisch mit dem Zitat der jeweils ersten Buchpublikation):

- photochemistry of air pollution (Leighton, 1961)
- air chemistry (Junge, 1963)
- chemistry of air pollution (Westberg et al., 1973)
- atmospheric chemistry (Heicklen, 1976)
- air pollution chemistry (Butler, 1979)

Die internationale Fachzeitschrift “Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology” (begründet 1976) enthält zwar den Begriff „chemische Meteorologie“¹⁵ ist aber überwiegend auf Luftchemie und Biogeochemie orientiert (im Unterschied zu Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography). Erst 1989 wurde das „Journal of Atmospheric Chemistry“ (Kluwer) gegründet. Die Zeitschrift „Atmospheric Chemistry and Physics“ wurde 2001 gegründet. Luftchemische Fragestellungen und Untersuchungen werden aber auch in einer Vielzahl weiterer Journale behandelt, die zumeist (teilweise in Kombination) mit den Begriffen *environment(al)*, *atmospher(-e, ic)*, *air* und oft auch in Verbindung mit *science* und/oder *chemistry* stehen.

Die Darstellung der mittleren Konzentrationsverteilung in einem Gebiet wurde seit den frühen 1970er Jahren als *Immissionsklimatologie* bezeichnet. Der Begriff *Immission* – nicht im anglo-amerikanischen Sprachraum bekannt – leitet sich in Analogie zu Emission (Eintrag von Stoffen in die Atmosphäre) ab, bezeichnet aber nicht den Austrag (der als Deposition bezeichnet wird) sondern die Konzentration eines Stoffes am Wirkungsort, eine schwammige Definition¹⁶. Im Wesentlichen wurden Isolinien der SO₂-Konzentration (durch einfache Ausbreitungsmodellierung und Konzentrationsmessungen) für einzelne Gebiete erstellt, nachdem Schwefeldioxid als klassischer Schadstoff für Pflanzen erkannt war¹⁷. Weiterhin wurden diese Darstellungen auch als Immissionkataster, im Sinne einer räumlichen Verteilung der Immissionen, bezeichnet.

6. Epilog zur Terminologie

¹³ Hans Cauer (1899-1962) Meteorologe und Luftchemiker

¹⁴ Es ist bemerkenswert, dass mit dem weiteren Satzverlauf „... nécessite des recherches qui l'est indispensable de poursuivre pendant un temps très long, afin de ne pas donner l'importance d'une loi à des phénomènes qui peuvent n'être qu'accidentels.“ bereits auf die klimatologisch wichtigen *Langzeituntersuchungen* hingewiesen wird.

¹⁵ Der Begriff „chemische Meteorologie“ existiert einzig für den Lehrstuhl von Henning Rodhe – Hrsg. von Tellus B – an der Stockholm-Universität (Professor i kemisk meteorologi)

¹⁶ Noch konfuser ist sie nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz: Immissionen sind auf Menschen sowie Tiere, Pflanzen oder andere Sachen einwirkende Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Umwelteinwirkungen.

¹⁷ Das war allerdings bereits um 1850 bekannt durch die Untersuchungen von *Julius Adolf Stöckhardt* (1809-1886) der das durch Kohlehütten emittierte Rauchgas in seiner Wirkung auf Forstbestände untersuchte.

Es ist nicht sinnvoll von einem *chemischen Klima* und einem *chemischen Wetter* zu sprechen. Klima und Wetter bezeichnen den atmosphärischen Zustand, jeweils auf unterschiedliche Zeitskalen bezogen. Es versteht sich von selbst, dass in den atmosphärischen Zustand (und dessen Beschreibung) alle (physikalischen und chemischen) Parameter mit einbezogen werden müssen. Hingegen ist es sinnvoll, von einer chemischen Klimatologie zu sprechen, wenn nur ein Teilaspekt des Klimas beschrieben werden soll, nämlich das chemische Milieu. Eine chemische Klimatologie ist damit ein Bestandteil (und somit eine Unterdisziplin) der allgemeinen Klimatologie, ähnlich wie die Bioklimatologie. Die chemische Klimatologie ist andererseits ein Bestandteil der *atmosphärischen* Chemie. Die Chemie der Atmosphäre befasst sich a) mit der Messung von Luftspurenstoffen (analytische Chemie und speziell als ein Teil der Umweltanalytik), b) der Untersuchung der Kinetik (und implizit des Mechanismus) von chemischen Reaktionen (unter Laborbedingungen)¹⁸, die in der Atmosphäre relevant sind (als ein Teilgebiet der physikalischen Chemie) und c) der Beschreibung der Verteilung von Spurenstoffen in der Atmosphäre (durch Modellierung und Messung). Die letztere Aufgabe kann in unterschiedlicher raum-zeitlicher Auflösung erfolgen; nur im Fall eines Langzeitaspektes sprechen wir dann von chemischer Klimatologie. In anderen Fällen handelt es sich um eine (chemische) Wetteranalyse.

Die atmosphärische Chemie ist daher keine „reine“ Chemie im Sinne des ortsunabhängigen Geschehens, sondern hat in Analogie zur Geochemie eine Orts- und Zeitkomponente (wie alle Geo- und Umweltwissenschaften). Die atmosphärische Chemie ist – neben ihrer Charakterisierung als eine angewandte Chemie – ein Teilgebiet der Meteorologie. Mit der Einordnung der chemischen Klimatologie in die allgemeine Klimatologie schließt sich der Kreis.

¹⁸ Viele Versuche, unter Feldbedingungen, d.h. durch raum-zeitlich aufgelöste Messung der Spurenstoffkonzentrationen in der Atmosphäre auf Mechanismen und Reaktionskinetik zu schließen, waren nicht erfolgreich.

Literatur

- Butler, J. D. (1979) Air pollution chemistry. Acad. Press, London u.a., 408 pp.
- Cauer H (1948) Chemie der Atmosphäre. FIAT-Review. 19, 277-290
- Claußen, M. (1998) Von der Klimamodellierung zur Erdsystemmodellierung: Konzepte und erste Versuche. *Ann. Meteorol. (NF)* 36, 119–130
- Claußen, M. (2001) Earth system models. In: Understanding the Earth System: Compartments, Processes and Interactions (Hrsg. Ehlers E. und T. Krafft), Heidelberg, Springer, pp. 145–162
- Claußen, M. (2006) Klimaänderungen: Mögliche Ursachen in Vergangenheit und Zukunft. In: Klimawandel - vom Menschen verursacht? 8. Symposium Mensch - Umwelt, hrsg. von D. Möller. *Acta Academiae Scientiarum* 10, 217 pp.
- Hann J. von (1883) Handbuch der Klimatologie, Bibl. geogr. Handbücher (Hrsg. F. Ratzel), Stuttgart, J. Engelhorn, pp. 764
- Hann, J. von (1908) Handbuch der Klimatologie, I. Band: Allgemeine Klimalehre. In: Bibliothek Geographischer Handbücher (Hrsg. A. Penck), Stuttgart, J. Engelhorn, pp. 394
- Hantel M., Kraus H. und C.-D.Schönwiese (1987): Climate definition. In: Climatology. Functional Relationships in Science and Technology (Hrsg. G. Fischer) Landolt-Börnstein, V/4/c1. Berlin, Springer, pp. 1-5
- Heicklen, J. (1976) Atmospheric Chemistry, Academic Press, New York, pp. 406
- Henriet, H. (1896) Les gaz de l'atmosphère. Paris, Gauthier-Villars et Masson, pp. 192
- Junge, Chr. E. (1963) Air chemistry and radioactivity. Vol. 4 Int. Geophys. Ser. (Hrsg. J. van Mieghem), Academic Press, New York and London, pp. 382
- Köppen W. (1906) Klimakunde I: Allgemeine Klimakunde, Göschen, Leipzig, 132 pp.
- Kraus H. (2000) Die Atmosphäre der Erde. Eine Einführung in die Meteorologie. Braunschweig und Wiesbaden, Vieweg, 470 pp.
- Lawrence, M. G., O. Hov, M. Bekmann, J. Brandt, H. Elbern, H. Eskes, H. Feichter und M. Takigawa (2005) The chemical weather. *Environ. Chem.* 2, 6-8
- Leighton, P. A. (1961) Photochemistry of air pollution. Vol. 9 in "Physical Chemistry" series of monographs (Hrsg. E. M. Loeb), Acad. Press, New York, London, pp. 300
- Möller, D. (2000) Quellen und Senken troposphärischen Ozons: Eine Budgetbetrachtung. In: *Troposphärisches Ozon – Eine kritische Bestandsaufnahme über Ursachen, Wirkung und Abhilfemaßnahmen*. Band 32 Schriftenreihe Kommission Reinhaltung der Luft im VDI, Düsseldorf, pp. 23-34
- Möller, D. (2003) Luft. De Gruyter, Berlin, New York, 750 pp.
- Peixoto J. P. und A. H. Oort (1992) Physics of Climate. New York: American Institute of Physics, 520 pp.
- Prestel, M. (1865) Die jährliche, periodische Änderung des atmosphärischen Ozons und die ozonoskopische Windrose als Ergebniss der Beobachtungen zu Emden von 1857-1864. *Leop. Acad. Nova Acta* Vol. 32, E. Blochmann & Sohn, Dresden, pp. 13
- Prestel, M. (1873) Der Boden, das Klima und die Witterung von Ostfriesland sowie der gesammten norddeutschen norddeutschen Tiefebene in Beziehung zu den land- und volkswirtschaftlichen Interessen, dem Seefahrtsbetriebe und den Gesundheits-Verhältnissen, Emden, Sep. Abdr. aus dem Emders Witterungsbeobachtungen
- Schellnhuber H.-J. und V. Wenzel (Hrsg.) (1998) Earth System Analysis – Integrating science for sustainability. Heidelberg, Springer
- Schellnhuber H.-J. (1999) 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature* 402, C19–C26
- Vernadski V.I. (1926) Biosphera (*in Russ*). Leningrad, Wiss.-chem.-techn. Verlag, 48 pp.
- Warneck, P. (2003) Zur Geschichte der Luftchemie in Deutschland. *Mitt. Fachgr. Umweltchemie und Ökotoxikologie*. 9. Jahrg. / Nr. 2
- Westberg, K., R. T. Cheng and L. A. Ripperton (1973) The chemistry of air pollution. Vol. 1 in MSS'Series on Air Pollution. MSS Inform. Corp. New York, 200 pp.