

EVI ZEMANEK  
(HRSG.)

# OZON

Natur- und Kulturgeschichte  
eines flüchtigen Stoffes

# Inhalt

JENS SOENTGEN

*Vorwort* 8

EVI ZEMANEK

*Einleitung* 8

JENS SOENTGEN

**KAPITEL 1** O! Eine Entdeckungsgeschichte  
des Sauerstoffs und des Ozons 20

EVI ZEMANEK

**KAPITEL 2** Allheilmittel oder Gift? Imaginationen  
des Ozons in Literatur und Laiendiskurs  
(19. Jahrhundert) 76

STEFAN EMEIS

**KAPITEL 3** Ozon – unten und oben,  
früher und heute 104

SEBASTIAN GREVSMÜHL

**KAPITEL 4** Das Ozonloch: Eine Bild- und  
Metapherngeschichte 127

EVI ZEMANEK UND ANNALENA ERHARDT

- KAPITEL 5** Die Medienkarriere des Ozons in der Presse  
(20. Jahrhundert) 171

STEFAN BÖSCHEN

- KAPITEL 6** Schutz in Gefahr – Die Gefährdung  
der stratosphärischen Ozonschicht  
durch FCKW 212

ELKE HERTIG

- KAPITEL 7** Bodennahes Ozon: Auswirkungen auf die  
menschliche Gesundheit und Veränderungen  
durch den Klimawandel 240

EVI ZEMANEK

- KAPITEL 8** Satirische Reaktionen auf den öffentlichen  
Ozon-Diskurs: Das Faszinosum O<sub>3</sub>  
in der Karikatur (19. bis 21. Jahrhundert) 254

*Abbildungsverzeichnis* 289

*Über die Autorinnen und Autoren* 297

## KAPITEL 1

# O! Eine Entdeckungsgeschichte des Sauerstoffs und des Ozons

*Jens Soentgen*

Die populäre Geschichte des Ozons kann man als einen Diskurs verstehen, in dessen Verlauf dieser Stoff mit bestimmten Bedeutungen versehen wird, die ihrerseits wiederum Handlungen nach sich ziehen. Im 19. Jahrhundert wird, wie Evi Zemanek in Kapitel 2 zeigt, Ozon als eine Art potenziertes und noch besserer Sauerstoff angepriesen. Wenn man diese und auch spätere Zuschreibungen, die in diesem Buch vor allem in den Beiträgen von Stefan Emeis, Sebastian Grevsmühl und Stefan Bösch thematisiert werden, verstehen will, empfiehlt es sich, die Geschichte des Sauerstoffs in die Betrachtung einzubeziehen. Jedenfalls erschließt sich die Art, wie in den ersten Dekaden des Ozondiskurses über diese Substanz gesprochen wurde, vor diesem Hintergrund besser. Dies gilt besonders für die ambivalente Bewertung: Einerseits wird Ozon als gesteigerte Lebensluft, andererseits aber auch als Schadgas gesehen. Beides ist bereits in den frühen Sauerstoffnarrativen angelegt.

Hier soll daher die Geschichte des Sauerstoffs erzählt werden, und zwar so, dass dabei immer wieder deutlich wird, wie diese auch auf die Deutungen und Verwendungen von Ozon ausstrahlt. Die Entdeckungsgeschichte des Sauerstoffs ist ihrerseits eingebettet in die allgemeine Wissenschaftsgeschichte und besonders in die Philosophiegeschichte, auf die daher ebenfalls eingegangen werden soll. Eine besondere Rolle nimmt dabei die romantische Naturphilosophie ein, deren Bedeutung für die Interpretation des Sauerstoffs und des Ozons bislang kaum untersucht wurde. Es

wird also immer wieder darum gehen, den Transfer von Konzepten über Disziplingrenzen und auch über die Grenzen der Naturwissenschaft hinaus in die Betrachtung einzubeziehen. Auch vorwissenschaftliche Beobachtungen und Konzepte werden thematisiert. Es geht also um eine Wissensgeschichte des Sauerstoffs und des Ozons. Der wissenschaftsgeschichtliche Ansatz (vgl. Sarasin 2011) interessiert sich für die Bewegung von Wissen über gesellschaftliche und disziplinäre Sphären hinweg. Er ist im Kontext dieses Buches auch deshalb von Bedeutung, weil die Geschichte des Ozons insgesamt als eine Geschichte von Überschreitungen aufgefasst werden kann.

In der folgenden Geschichte hangele ich mich an den Bezeichnungen entlang: Gas, Dephlogisticirte Luft<sup>1</sup>, Feuerluft, Sauerstoff / Oxygène und Lebensluft bzw. Lichtstoff, O<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>. Bezeichnungen sind, vor allem in der Chemie, aufschlussreich, weil sie immer etwas über die Perspektive sagen, aus der auf eine Substanz geblickt wird. Diese Perspektive ist umso wichtiger, wenn der Gegenstand der Betrachtung unsichtbar ist – weil dies dazu einlädt, ihn mit Bedeutungen aller Art aufzuladen.

Wir blicken auf die Geschichte des Sauerstoffs und des Ozons von unserem heutigen Standpunkt, aber ohne jene Arroganz, die meint, der heute erreichte Standpunkt sei die Wahrheit selbst. Friedrich Albert Lange schrieb dazu in seiner hervorragenden Geschichte des Materialismus:

Vielen Chemikern beginnt noch die Geschichte ihrer Wissenschaft mit Lavoisier. Wie in Geschichtswerken für Kinder die finstere Periode des Mittelalters oft mit den Worten beendet wird: »Da trat Luther auf« – so tritt bei ihnen Lavoisier auf, um den Aberglauben des Phlogiston zu verbannen [...] Natürlich! So wie wir die Sache ansehen, so *muß* sie ja angesehen werden! Ein vernünftiger Mensch kann nicht anders [...]. (Lange 1877, S. 172)

Von einem solchen Fortschrittsdenken, das Lange mit Recht ironisiert, sollte man sich distanzieren. Es lohnt ganz im Gegenteil, die Arbeit der vorangegangenen Generationen mit größtem Respekt und aus ihren eigenen Voraussetzungen kennenzulernen. Stärker als man annehmen würde, sind dabei philosophische Theorien im Hintergrund wirksam. Die früheren Perspektiven auf Sauerstoff und Ozon erweitern durchaus unsere Kenntnis der Sache, und in der einen oder anderen Weise wirken sie bis in die Gegenwart hinein. Das jedenfalls ist die Annahme, die dem Folgenden zugrunde liegt. Und diese Annahme ist auch keineswegs willkürlich, wird doch in der neueren Wissenschaftsphilosophie ganz ähnlich argumentiert: So verteidigte etwa Hasok Chang (2012, S. 42–50) kürzlich die ›phlogistische‹ Sicht auf das Wasser gegen ein Denken, das meint, unser moderner Begriff zeige geradezu das Wesen selbst des Wassers. Chang zeigt, dass die ältere Interpretation der Dinge nicht nur ein historisch wichtiger Schritt auf dem Weg zur ›richtigen‹ Theorie war, sondern auch nach der Entwicklung der Sauerstofftheorie weiterhin ihre Berechtigung hat.<sup>2</sup>

## »Gas« oder: Die Entdeckung der Luftarten

Die Luft ist im alltäglichen Leben vor allem ein unsichtbares Medium, und in unserem alltäglichen Leben wird sie oft mit ›Nichts‹ gleichgesetzt. Man sagt zum Beispiel: ›er/sie ist Luft für mich‹, um auszudrücken, dass man sich entschlossen hat, jemanden zu ignorieren. Andererseits ist bekannt, dass Luft eigentlich kein Nichts, sondern höchstens ein Fast-Nichts ist; tatsächlich erkennt man in manchen Situationen, dass sie ein sehr notwendiges Etwas darstellt, nämlich dann, wenn sie fehlt, wenn man ›keine Luft mehr bekommt‹ bzw. die ›Luft dünn ist‹, wie es auf hohen Bergen der Fall ist. Auch beim Umgang mit dem Feuer bemerkt man, dass Luft sehr wichtig ist: Je mehr Luft ein

Feuer nämlich bekommt, umso heller und heißer brennt es, und wenn die Luftzufuhr abgeschnitten wird, gehen Feuer und Flammen aus. Große Brände ziehen Luft geradezu an sich, sie verursachen Winde, die eine beträchtliche Stärke annehmen können. Und die Luft geschlossener Räume, in denen viele Menschen atmen oder viele Kerzen brennen, wird immer schlechter, sie ist zum Atmen nur noch wenig geeignet, kann sogar zu Bewusstlosigkeit und Tod führen. Auch das sind Phänomene, die seit vielen Jahrhunderten, ja seit Jahrtausenden bekannt sind.

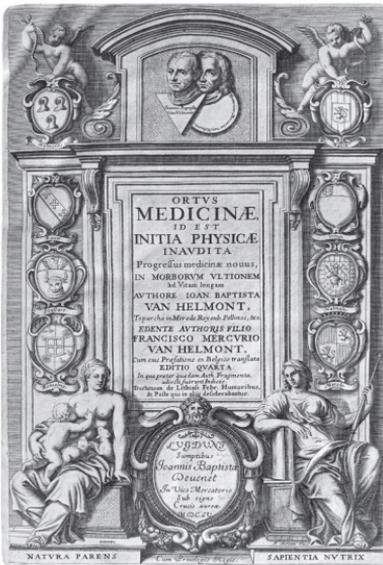
Eine Ahnung der Nähe, die zwischen Feuer und dem Atmen der höheren Tiere besteht, hatten zahlreiche Ärzte und Naturforscher.<sup>3</sup> Doch eine tiefgreifendere Untersuchung des Atems und damit die Entdeckung, dass das Leben der Tiere auf Prozessen beruht, die mit der Verbrennung tatsächlich stofflich analog sind, setzte die Fähigkeit voraus, Gase, also Luftarten zu unterscheiden und zu messen. Der Gasbegriff wurde aber erst im 17. Jahrhundert von dem flämischen Paracelsisten Johan Baptista van Helmont geprägt (vgl. Lieben [1935] 1970, S. 17 f.).<sup>4</sup>

**Abbildung 1** Detail aus dem *Ortus medicinae* (1655): Johan Baptista van Helmont, hinter ihm der Herausgeber seiner Werke, sein Sohn Mercurius van Helmont, dessen Vorname bereits die alchemistische Begeisterung seines Vaters erkennen lässt.



Dieser hatte gelehrt, dass es Stoffe gibt, die luftartig, aber keine Dämpfe sind. Dämpfe kann man wieder zu Flüssigkeiten oder zu Feststoffen machen, indem man sie abkühlt, was bei den Stoffen, an die van Helmont dachte, (damals) nicht möglich war. Sie bleiben immer und unter allen damals bekannten Umständen luftartig und sind trotzdem nicht »nur Luft«, sondern haben ganz klare chemische und auch physiologische Wirkungen. In der Nachfolge seines Lehrmeisters Paracelsus,<sup>5</sup> der seinerseits etliche neue, zum Teil heute noch gebräuchliche Begriffe erfunden hatte, wählte van Helmont den Begriff *gas*, um solche besonderen Körper zu kennzeichnen. Eine wesentliche Rolle spielte dabei die für die Alchemisten und besonders für die Paracelsisten zentrale Vorstellung, dass die eigentlich wichtigen Aspekte der Welt, das eigentlich Wirkende, oft unsichtbar und ungreifbar ist. Woher der Begriff *gas* ursprünglich stammt, ist nicht zweifelsfrei belegt, und auch van Helmont lässt sich hier nicht in die Karten blicken. Als gesichert gilt auch hier ein Einfluss des Paracelsus, bei dem das griechische Wort *cháos*, das ursprünglich so viel wie weiter, leerer Raum heißt, umgemünzt wurde und nun einen feinen, gleichwohl wirksamen Dampf bezeichnete, der zum Beispiel zu Erkrankungen von Arbeitern in Bergwerken führen konnte (siehe Paracelsus 1965, z. B. S. 293, Kap. 3).<sup>6</sup>

Das erste Gas, das van Helmont als spezifisches chemisches Individuum identifizierte, war der *spiritus sylvestris*, der »wilde Geist«, jener Stoff, den wir Kohlendioxid nennen. Mit diesem Stoff hatten die Menschen seit langer Zeit Erfahrungen gemacht, da er sowohl in manchen Höhlen vorkommt als auch bei manchen, »Säuerlinge« genannten Quellen austritt und bei der Wein-gärung und bei Verbrennungen entsteht. Wenn dieses Gas keine Möglichkeit hat auszutreten, kann es Fässer, in denen Wein gärt, zum Platzen bringen. Auch ansonsten hat es auffallende Wirkungen, weshalb es von van Helmont ausführlich diskutiert wurde (vgl. Soentgen 2019, S. 151–207, bes. S. 163–166).



**Abbildung 2**

Titelblatt des *Ortus medicinæ* (1655)



**Abbildung 3**

Seite des *Ortus medicinæ* (1655)

Dabei ist freilich immer zu beachten, dass van Helmont im Rahmen einer Metaphysik argumentierte, die, ganz ähnlich wie bereits bei Paracelsus, das Wirken geistiger Prinzipien und Einflüsse voraussetzte und zudem die paracelsische Mikrokosmos-Makrokosmos Spekulation übernahm.<sup>7</sup> Eine rein materielle Natur gab es daher für van Helmont nicht, weshalb sein Gasbegriff auch nicht identisch mit unserem war. Dies wird auch daran erkennbar, dass er seinem *gas* den *blas* entgegensetzte: eine unsichtbare Einwirkung oder Einblasung, eine fernwirkende, gewissermaßen magnetische Kraft, die im Gegensatz zum *gas* keinen irdischen, sondern einen himmlischen Ursprung hat.<sup>8</sup> Sein Gasbegriff wurde in der Folge jedoch mehr und mehr zu einem rein materiellen Konzept verkürzt, und in dieser vereinfachten Gestalt verwendeten ihn die nachfolgenden Forschergenerationen.

O! Eine Entdeckungsgeschichte des Sauerstoffs und des Ozons

Man entwickelte dann Methoden, solche Gase rein aufzufangen, insbesondere die sogenannte pneumatische Wanne. Ihr Prinzip besteht darin, dass man die bei einer Reaktion entstehenden Gase mit einem Rohr unter Wasser in ein ebenfalls mit Wasser gefülltes, umgedrehtes Gefäß leitet, das man anschließend mit einem Korken verschließt: Das Gas ist dann in dem Gefäß gefangen und kann für weitere Experimente verwendet werden. Eine Alltagsbeobachtung, dass nämlich Luft unter Wasser sichtbar wird und aufgefangen werden kann, wird hier technisch ausgenutzt. Dazu verwendete man auch ein gereinigtes und getrocknetes Tierorgan, die Schweinsblase, die wie ein Luftballon wirkt, allerdings weniger elastisch ist. Man band sie an Rohren fest und schnürte sie dann, wenn sie mit dem Gas gefüllt war, wieder ab, um das darin gesammelte Gas für weitere Experimente zu nutzen. So band der Apotheker Carl Scheele, auf den ich noch genauer eingehen werde, eine solche, mit etwas Kalkmilch versehene Schweinsblase vor seine Retorte, um vermutlich als erster Forscher reinen Sauerstoff, den er »Feuerluft« nannte, zu isolieren (vgl. Scheele 1777, S. 28–29 = §29).

Man experimentierte also mit Gasen, die man lange auch als »Luftarten« bezeichnete. Dabei kam man auf die Spur von Zusammenhängen, die man zuvor nicht hatte entdecken können. Die systematische Bedeutung des Gasbegriffs für die Chemie kann deshalb kaum überschätzt werden. Dieses ursprünglich alchemistisch-paracelsistische Konzept lässt sich in seiner Bedeutung für die Entwicklung der modernen Chemie nur mit dem in der Antike geprägten Elementbegriff vergleichen. Denn zuvor hatte man nur Flüssigkeiten und feste Stoffe, also etwa Salz, Schwefel, Quecksilber beachtet. Nun wurde man darauf aufmerksam, dass es auch Substanzen eines anderen Typs gab. Die Luft, so stellte sich heraus, ist nicht nur ›Luft‹, vielmehr nehmen die Luftarten an vielen chemischen Prozessen teil, sei es als Reaktionspartner, sei es als Reaktionsprodukte. Durch den Begriff und

die neuen Experimentiermethoden wurde eine ganze *terra incognita* zugänglich. Eine konsistente und vollständige Theorie der Materie wurde erst jetzt möglich.

## »Dephlogisticirte Luft« oder: Priestleys Version des Sauerstoffs

Bei der Untersuchung der Luftarten spielt der englische Naturforscher und Prediger Joseph Priestley eine entscheidende Rolle. Priestley wurde 1733 in der Nähe von Leeds geboren, als Sohn eines Tuchhändlers, der ihn eigentlich zu seinem Nachfolger bestimmt hatte.<sup>9</sup> Doch Priestley war an anderen Dingen interessiert. Sein gesamtes Leben kennzeichnen eine tiefe Frömmigkeit und ein intensives Interesse an theologischen Fragen. Dadurch geriet er in Schwierigkeiten und Konflikte, da viele seiner Ansichten der herrschenden Lehre der anglikanischen Kirche zuwiderliefen. Mit demselben Eifer, mit dem er seine theologischen Auffassungen vertrat, befasste er sich auch mit der Naturforschung. 1770 begann Priestley seine Arbeit über Luftarten und betrat damit ein wissenschaftliches Gebiet, das ihn auf die Spur von Entdeckungen und Erkenntnissen von größter Tragweite bringen sollte. Bereits 1772 legte er seinen ersten ausführlichen Bericht der Royal Society vor.

Priestley hatte festgestellt, dass es eine bestimmte Luftsorte gibt, die sowohl bei der Atmung, bei Verbrennungsprozessen wie auch bei vielen natürlichen Prozessen entsteht, so etwa auch beim Bierbrauen.<sup>10</sup> Dies war die »verbrauchte« oder »verdorbene« Luft, die er bisweilen auch »fixierte Luft« (»fixed air«) nannte. Denn er wusste, dass genau diese Luftart freigesetzt wird, wenn man Kalk erhitzt – weshalb der Schluss nahelag, dass die Luft zuvor schon irgendwie im Kalk enthalten gewesen war. Wir nennen diese Luftart heute Kohlendioxid. In der Nähe von Priestleys Wohnort befand sich eine Brauerei. Von dort bezog Priestley seine »verbrauchte Luft«, die man über den Braukesseln regelrecht abschöp-

fen konnte, weil sie schwerer als Luft ist. Ihn trieb eine bestimmte Frage um. Wie vor ihm schon der Alchemist van Helmont hatte er festgestellt, dass seine ›fixierte Luft‹ (er sprach auch von »mephitic air«) nicht nur bei der Biergärung entsteht, sondern auch dort, wo viele Kerzen brennen oder viele Menschen atmen. Lässt man eine Kerze gar in einem abgeschlossenen Gefäß brennen, dann erlischt sie bald, genauso wie eine Kerze, die mit der ›verbrauchten Luft‹ begossen wird. Die Luft, in der die Kerze verlöscht ist, kann auch von keinem Tier mehr geatmet werden; Mäuse ersticken darin. Sie ist ›verdorben‹. Doch warum? Hier erweist sich Priestley als Anhänger der Phlogistontheorie. Er glaubte, dass die verdorbene Luft mit einem bestimmten Stoff namens Phlogiston übersättigt sei. Sie kann von ihm nicht noch mehr aufnehmen, und deshalb erstickt die Kerze, weil sie nur so lange brennen kann, wie sie Phlogiston abgeben kann.

Um Priestleys Schlussfolgerungen zu verstehen, müssen wir das Konzept des Phlogistons etwas genauer erläutern. Die Phlogistontheorie ist ein schlüssiger Versuch, Verbrennungssphänomene zu erklären. Chemiehistoriker halten dies gelegentlich für die erste empirisch-wissenschaftliche Theorie der Chemiegeschichte. Denn sie gestattete es, verschiedene Phänomene einheitlich zu deuten und neue Experimente zu entwickeln. Ersonnen wurde sie von dem deutschen Arzt und Chemiker Georg Ernst Stahl, der seinerseits auf Arbeiten von Johann Becher, einem umtriebigen, berühmt-berüchtigten Alchemisten aufbaute. Stahl kam aus dem fränkischen Ansbach, wurde Leibarzt des Herzogs von Sachsen-Weimar und kam 1716 nach Berlin, als Leibarzt des Königs – ein Amt, das ihm auch gestattete, auf die damals ins Werk gesetzte Reform des preußischen Medizinwesens entscheidenden Einfluss zu nehmen. Er blieb königlicher Leibarzt bis zu seinem Tode im Jahr 1734.

Stahls Werke zu lesen ist nicht einfach, zumal auch seine deutschsprachigen Bücher durchgehend in einer lateinisch-

deutschen Mischsprache verfasst sind. Jedoch hat er mit seiner neuen Lehre vom Feuer und von den Verbrennungsprozessen durchaus einen sehr wichtigen Fortschritt erzielt. Denn er konnte erstmals alle damals bekannten Phänomene, die bei Verbrennungen zu beobachten sind, einheitlich deuten. In allen brennbaren Substanzen ist, so lehrte er, ein stoffartiges Prinzip enthalten, das Phlogiston (abgeleitet vom griechischen Wort für Flamme, *phlox*), das bei der Verbrennung freigesetzt wird. Dazu muss man wissen, dass alle Metalle mit Ausnahme des Goldes (und einiger weiterer Edelmetalle, die damals aber noch nicht bekannt waren) verbrannt werden können. Hierbei handelt es sich um ein Phänomen, das man im Alltag kaum kennt, doch man weiß, dass sich Stahlwolle leicht entzünden lässt, sie verbrennt oder besser verglüht, und das Ergebnis ist ein bröckeliger, glanzloser Stoff. Diesen Vorgang bezeichnete man als »Verkalkung«, weil der entstehende Stoff entfernt an Kalk erinnerte, obwohl er nicht grau oder weißlich, sondern schwarz ist. Auch andere Metalle, etwa das Kupfer, lassen sich leicht verbrennen. Aber wie erklärt man diese Prozesse?

Stahl hatte hierfür einen sinnvollen Vorschlag (zu Stahls Theorie vgl. z. B. die Darstellung bei Carrier 1984). Er lehrte, dass Metalle, etwa das Eisen, eine Verbindung jenes Phlogistons mit einem Metallkalk darstellen. Dieser Metallkalk bleibt übrig, wenn das Metall brennt und das Phlogiston entweicht. Man kann die Sache aber umkehren, indem man den Metallkalk zusammen mit einer phlogistonreichen Substanz wie etwa Kohle erhitzt. Es gibt also Phlogiston-Austauschreaktionen, bei denen ein Stoff dem anderen sein Phlogiston gibt. Dann erhält man das Metall wieder zurück: Es wird laut Stahl »re-ducirt«. Aber nicht nur bei Metallverbrennungen entweicht das Phlogiston, auch bei allen anderen Verbrennungen wird es frei. Und wo es frei wird, da reichert es sich in der Luft an. Eben dies ist auch der Grund, weshalb Luft, in der eine Kerze erloschen ist, nicht mehr dazu taugt, eine Ver-

brennung zu unterhalten. Sie ist übersättigt mit Phlogiston. In Reinform konnte Stahl das Phlogiston allerdings nie darstellen, auch wenn er bisweilen meinte, dass die sehr feinen und leichten schwarzen Teilchen im Rauch vielleicht Phlogiston in möglichst weitgehender Reinheit seien. Dass die Produkte der Metalle, die verbrannt werden, hinterher schwerer sind als die ursprünglichen Produkte, erklärte man sich damit, dass das Phlogiston vielleicht ein negatives Gewicht habe. Man stellte sich die Sache ähnlich wie einen Vogelkäfig vor, der auch leichter ist, wenn die Vögel ausgeflogen sind, statt auf ihren Stangen zu sitzen. Andere wiederum behaupteten, das veraschte Metall müsse schwerer sein, denn es sei gewissermaßen getötet worden – es sei schließlich auch bei den Tieren so, dass der Leichnam schwerer sei als das lebende Tier (vgl. Dumas 1839, S. 155). So ganz überzeugte dieses Argument freilich niemanden. Oft sagte man sich auch, dass Gewicht für die Chemie unerheblich sei, denn die Masse sei eher eine Angelegenheit der Physiker. So also deuteten die Chemiker in jener Zeit, die den Sauerstoff noch nicht kannte, die Verbrennungsphänomene.<sup>11</sup>

Auch Priestley war von der Wahrheit der alten Phlogistontheorie überzeugt, übrigens bis ans Ende seines Lebens, obwohl sich damals längst die Oxydationstheorie durchgesetzt hatte. Aber er stellte dennoch auch etliche ganz neue Fragen, die ihn auf neuartige Wege führten. Wie, so fragte sich Priestley, könnte man diese verdorbene Luft wiederherstellen? Konnte man die ›fixierte Luft‹ wieder in gute, atembare zurückverwandeln? Priestley war nicht der Erste, der sich mit diesem Problem beschäftigte. So meinte ein gewisser Graf von Saluce, dass man solche ›verdorbene Luft‹ wiederherstellen könne, indem man sie entweder abkühle oder in einer Schweinsblase zärtlich massiere. Vermutlich wurde auf diese Weise aber nur zusätzlicher Sauerstoff von außen in die Blase gebracht. Wie auch immer: Allen diesen Hinweisen ging der umsichtige Priestley nach. Doch da er bei seinen Versuchen

die in der Literatur präsentierten Heilungsmethoden für die Luft nicht bestätigen konnte, versuchte er etwas Neues.

Hier kommt eine bestimmte Pflanze, nämlich die Minze, ins Spiel. Priestley könnte sich gesagt haben: Wenn der Atem nach dem Genuss von Minze angenehm duftet, ja, wenn Minzblätter auf den Boden gestreut werden, um die Luft in einem Raum angenehmer zu machen, dann kann diese Pflanze vielleicht die verbrauchte, miefige, phlogistonübersättigte Luft wieder ›reparieren‹! Damals wuchs die Minze in vielen englischen Hausgärten. Zwar bekränzte man sich nicht mehr wie noch im antiken Griechenland mit Minzzweigen, doch sie wurde als Tee getrunken, als Gewürz verwendet und damals wie auch heute noch vielerlei Form als Heilmittel angewandt. Außerdem hat die auch an Bachufern zu findende Minze eine weitere besondere Eigenschaft, die für Priestleys Versuch sehr wichtig war: Während andere Pflanzen, die man abschneidet und in ein Glas Wasser gibt, früher oder später absterben, ist dies bei der Minze anders; sie schlägt Wurzeln, auch ins Wasser hinein. Priestley setzte also in eines seiner Glasgefäße, das mit verdorbener Luft angereichert war, einen Stängel Minze, und gab noch etwas Wasser dazu, damit die Pflanze nicht gleich eingehe:

Accordingly, on the 17th of August 1771, I put a sprig of mint into a quantity of air, in which a wax candle had burned out, and found that, on the 27<sup>th</sup> of the same month, another candle burned perfectly well in it. (Priestley 1774, S. 52)<sup>12</sup>

Die Minze vermochte also eine erstickende, gefährliche Luft wieder zu erneuern, in eine atembare zu verwandeln! Priestley fragte sich nun, ob nur die duftende Minze die Kraft besitzt, die schlechte Luft wieder gut zu machen, oder ob auch andere Kräuter dazu in der Lage sind. Er testete die Melisse – wieder mit Erfolg. Anschließend wurde er kühner und versuchte es schließlich sogar

mit einer stinkenden Pflanze – auch sie machte aus der ›todbringenden‹ Luft eine ›lebensspendende‹. Auf den erfrischenden Geruch kam es also gar nicht an. Obwohl er nur einige wenige Pflanzen getestet hatte, verallgemeinerte Priestley kühn, dass alle Pflanzen beschädigte Luft erneuern könnten – solange sie wuchsen. Das, was die Tiere und die Menschen verbrauchten, stellten sie stillschweigend wieder her – Stunde für Stunde. Damit stieß Priestley auf einen ökologischen Zusammenhang von fundamentaler Tragweite. Rasch erkannten seine Zeitgenossen die Bedeutung seiner Entdeckung. Als die Royal Society in London Priestley eine ehrende Medaille verlieh, hielt deren Präsident John Pringle eine ergreifende und für die Kohlendioxid-Geschichte höchst aufschlussreiche Rede über die Arbeiten Priestleys:

From these discoveries we are assured that no vegetable grows in vain, but that from the oak of the forest to the grass of the field, every individual plant is serviceable to mankind; if not always distinguished by some private virtue, yet making a part of the whole which cleanses and purifies our atmosphere. In this the fragrant rose and the deadly nightshade co-operate: nor is the herbage, nor the woods that flourish in the most remote and unpeopled regions, unprofitable to us, or we to them, considering how constantly the winds convey to them our vitiated air, for our relief, and for their nourishment.<sup>13</sup> (Pringle [1773] 1783, S. 34f.)

Sogar der giftige Nachtschatten hat einen Platz in Gottes Plan! Denn auch er verrichtet eine unsichtbare, aber notwendige Arbeit, indem er die todbringende, verbrauchte Luft in neue, lebensspendende verwandelt. So dienten die Entdeckungen Priestleys in der Sicht seiner Zeitgenossen der Bestätigung der Weisheit des Schöpfers. Dass hier übergreifende Zusammenhänge sichtbar werden, würde natürlich auch ein moderner Naturwissenschaft-

ler zweifellos zugestehen, doch er würde sie nicht als Spur Gottes, sondern als funktionale Momente in einem selbstorganisierten System deuten.

Priestley gelang es schließlich, seine ›atembare Luft‹ in reinem Zustand herzustellen, indem er einen bestimmten Stoff, das rote Quecksilberoxid, mithilfe eines Brennspiegels in einem Kolben erhitzte, wobei, wie wir heute sagen, Sauerstoff und elementares Quecksilber entstehen. Dass diese besondere Luftsorte zum einen Kerzen in äußerst rabiater Form brennen lässt, beobachtete er sofort, aber er ging sogar noch weiter: Er ließ Mäuse jene superreine Luft atmen und probierte sie auch selbst. So wurde er zum ersten Menschen, der reinen Sauerstoff atmete.

Er überlegte, ob wohl eines Tages jene reine Luft einmal zu einem Modeartikel werden könne. Doch dies, sagte er, sei Zukunftsmusik, denn bislang hätten nur zwei Mäuse und er selbst das Privileg gehabt, sie zu atmen (vgl. Priestley 1774, S. 105). Andererseits warnte er auch vor allzu großer Sorglosigkeit im Umgang mit jener Luftart:

Denn so wie ein Licht weit geschwinder in dephlogisticirter Luft verbrennt, als in gemeiner, so würden auch wir, wenn ich mich so darüber ausdrücken darf, zu geschwind verleben, weil sich in dieser reinen Luftgattung die thierischen Kräfte zu geschwind erschöpfen würden. Zum wenigsten würde ein Sittenlehrer sagen, daß die Luft, womit uns die Natur versehen hätte, vor uns so gut sey, als wir es werth sind. (ebd.)

Dies erinnert an die Redensart »die Kerze von beiden Seiten abbrennen«, womit ein intensiver und auch konsumptiver Lebensstil gemeint ist. Tatsächlich steht Priestleys Stellungnahme im Kontext seines theologischen Denkens und greift ein altes Motiv in der christlichen Liturgie auf: die Flamme als Lebenslicht (vgl. Freudenthal 1931, S. 154–187). Das Verlöschen einer Fackel zeigte

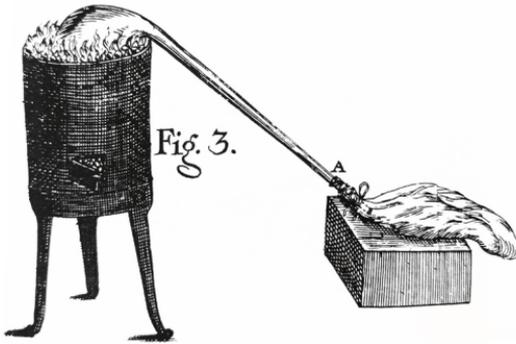
schon in der Antike den Tod an. Als in der frühen Neuzeit neben dem Holzspan die Kerze (von lateinisch *cera* = Wachs) zum bevorzugten, freilich auch teuren Beleuchtungsmittel wurde, waren es vorzugsweise diese Lichter, die Kerzen, deren Flackern, Rußen oder auch plötzliches Verlöschen als Omen galt (vgl. ebd.). Diesem alten Symbol fügt Priestley nun eine neue Wendung hinzu.

Priestleys vorsichtige Warnung wird übrigens auch von der modernen klinischen Erfahrung mit reinem Sauerstoff deutlich bestätigt. Zwar ist reiner Sauerstoff heute, wie Priestley schon vorhersah, ein sehr wichtiges Mittel der Notfallmedizin. Aber seine Gabe muss sehr vorsichtig dosiert werden und darf nicht über einen zu langen Zeitraum erfolgen. Mag es auch naheliegend erscheinen, sich mit dieser »Lebensluft« (s. u.) reichlicher zu versorgen, als es die Natur vorsieht, so entdeckte doch schon der französische Arzt Paul Bert im 19. Jahrhundert, dass längeres Einatmen von reinem Sauerstoff auf Dauer keineswegs gesund, sondern schädlich ist: Es bewirkt irreparable Schädigungen des Gewebes, die sogenannte Sauerstofftoxikose.

### **»Feuerluft« oder: Scheeles Experimente**

Nicht nur Priestley experimentierte mit dem Sauerstoff. Unabhängig von ihm und in mancher Hinsicht noch genauer als Priestley befasste sich der deutsch-schwedische Apotheker und Chemiker Carl Wilhelm Scheele mit den verschiedenen Luftarten. Scheele wurde 1742 im damals schwedischen Stralsund als Sohn ehemals wohlhabender, durch Konkurs aber verarmter Eltern geboren. Trotzdem schaffte er es aufs Gymnasium, wo er aber wenig Erfolg hatte. Schließlich wurde er Apothekengehilfe. Der französische Chemiker Jean-Baptiste Dumas schrieb später über ihn: »[E]r lernte fast nichts von den Menschen; die Natur war, so zu sagen, seine einzige Lehrerin.« (Dumas 1839, S. 77) In seiner Apotheke im schwedischen Köping experimentierte er mit einfachsten Mit-

teln, mit Biergläsern, Tiegeln und wenigen Kolben; die Luftsorten fing er, wie schon erwähnt, mit einer Schweinsblase auf, die er an eine Retorte band. Mit diesen Hilfsmitteln gelangen ihm eine ganze Reihe bedeutender Ergebnisse. Dank seiner Vorarbeiten konnte eine ganze Reihe neuer Elemente isoliert werden, darunter das Barium, das Wolfram, das Mangan und das Molybdän. Seine wichtigste Entdeckung aber bestand darin, aus hochkonzentrierter Salpetersäure durch geschickte Destillation eine neue Luftart zu isolieren. Er fing sie in einer innen mit Kalk bestrichenen Schweinsblase auf, wahrhaft eine merkwürdige Kinderwiege für eine Substanz, die man mit Recht als den Dreh- und Angelpunkt der ökologischen Prozesse auf diesem Planeten bezeichnen kann.



**Abbildung 4**  
Retorte mit  
vorgebundener  
Schweinsblase  
aus Scheele  
(1777)

Scheele füllte seine Luftart in einen eigenen Kolben, um damit weiter zu experimentieren: »darauf stellte ich ein schmales angezündetes Licht darein, kaum war dieses geschehen fieng das Licht an mit einer großen Flamme zu brennen wo bey es ein solch helles Licht von sich gab daß es die Augen verblenden konte [sic].« (Scheele 1777, S. 28) Scheele taufte diese neue Luftart auf den Namen »Feuerluft«:

Da diese Luft nothwendig zur Entstehung des Feuers erfordert wird, und etwa den dritten Theil in unserer Allgemeinen ausma-

chet, so werde [ich] sie der kürze halber [...] die Feuer Luft nenne[n], die andere Luft aber welche zur feurigen Erscheinung gar nicht dienlich ist und welche in unserer Luft etwa zwey Drittheil aus machet, [...] mit dem bereits bekanten Nahmen, Verdorbene Luft [...]. (ebd., S. 28f.)

So steht es in dem einzigen Buch, das Scheele zu Lebzeiten verfasste und veröffentlichte, in der *Chemischen Abhandlung von der Luft und dem Feuer*. Die etwas eigenwillige, ungelene Grammatik und Orthographie weist wohl darauf hin, dass Scheeles Alltagssprache in Köping eben nicht Deutsch, sondern Schwedisch war. Obwohl die Versuche schon Anfang der 1770er-Jahre durchgeführt wurden und Scheeles Entdeckung des Sauerstoffs auf 1772 datiert werden kann, erschien dieses Buch aufgrund verschiedener Verzögerungen beim Druck erst 1777.

Scheeles Vorschlag, den von ihm isolierten Stoff »Feuerluft« zu nennen, setzte sich bekanntlich nicht durch – sonst wäre unser modernes Symbol für den Sauerstoff vielleicht das Py für Pyrogenium. Immerhin aber geriet sein Vorschlag auch nicht völlig in Vergessenheit. Der dänische Physiker Hans Christian Oersted etwa griff ihn bei seinem Versuch, eine skandinavisch-deutsche chemische Nomenklatur zu entwickeln, auf und nannte den Sauerstoff das *Elt* – nach *Ild*, dem dänischen Wort für Feuer (siehe Oersted 1814).<sup>14</sup> Auch dies blieb eine Episode, aber vor allem in Skandinavien und in Deutschland war man in der weiteren Wissenschaftsgeschichte stets bemüht, die Leistung Scheeles nicht in Vergessenheit geraten zu lassen. Der schwedische Chemiker Torbern Bergman, der sich in seinem Vorwort zu Scheeles Untersuchung zugleich für die um Jahre verzögerte Publikation des Werkes entschuldigt, vergleicht die durch Scheele erreichte Einsicht mit Newtons Optik. Denn ähnlich wie Newton das Wesen des Lichtes erkannt habe, so habe Scheele durch Analyse das Feuer erklärt:

Newtons Erfindung das Licht, das unbegreiflich feine Licht in Farben zu zertheilen, hat, ob es gleich bloß eine mechanische Zertheilung war, einen neuen Weg zur Kenntniß vieler Geheimnisse der Natur gebahnet. Hr. Scheele zeigt eine feinere, eine chemische Zerlegung, die uns nicht allein vom Lichte, sondern auch vom Feuer, dessen zureichende Erklärung bisher ein *crux philosophiae naturalis* gewesen, unterrichtet. (Bergman 1777, S. 14)

Zu Scheeles Ergebnissen schrieb später der schon erwähnte Jean-Baptiste Dumas:

Seine Geschicklichkeit ersetzte alles, und ohne einen anderen Apparat als den so eben angeführten wußte er die feinsten Versuche zu machen, die verborgensten Stoffe zu isoliren, die unerwartetsten Verbindungen zu erzeugen, und sich zu den wichtigsten Entdeckungen zu erheben. (Dumas 1839, S. 83)

Carl Wilhelm Scheele und auch Joseph Priestley lassen sich nicht nur mit Newton, sondern auch mit Columbus vergleichen. Denn sie waren es, die als erste den später Sauerstoff genannten Stoff entdeckten, diesen jedoch nicht als solchen erkannten – ähnlich wie Columbus zwar Amerika erreichte, aber glaubte, in Indien angekommen zu sein. Sowohl Scheele wie auch Priestley dachten noch in den Bahnen der Phlogistontheorie. Sie stellten sich das Verbrennen – etwa eines Metalls oder auch eines Stückchens Kohle – als eine Zerlegung vor: Das in diesen Stoffen enthaltene brennbare Prinzip, das Phlogiston, entweicht in die Luft. Und diese kann ihrerseits nur einen gewissen Teil Phlogiston aufnehmen, dann ist sie gesättigt, wie auch Wasser nur eine bestimmte Menge Salz lösen kann.

Während aber Columbus trotz seines Irrtums weiterhin als Entdecker Amerikas gilt, sind sowohl Priestley als auch Scheele heute trotz ihrer Leistungen kaum noch bekannt, was mehr als

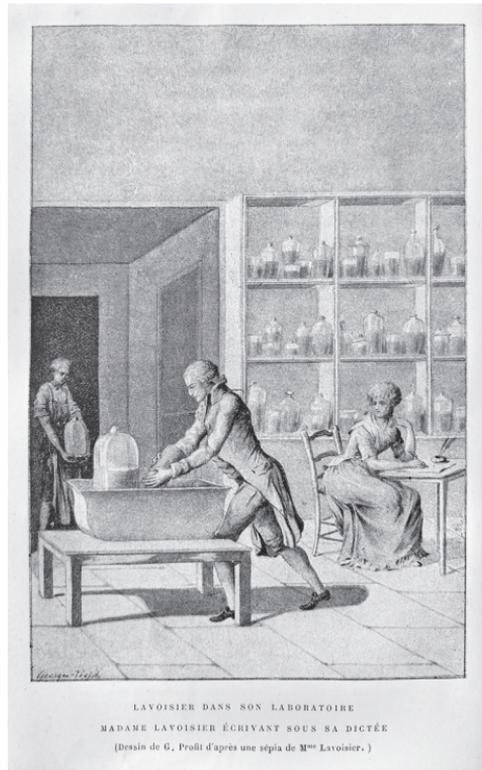
ungerecht ist. Als eigentlicher Entdecker des Sauerstoffs, der das Rätsel des Feuers und des Lebens gelöst hat, gilt vielmehr der französische Chemiker Antoine des Lavoisier, obwohl dieser ohne die Versuche Priestleys und Scheeles keine einzige seiner folgenreichen Überlegungen hätte anstellen können.

### **»Oxygène« oder: Lavoisier übernimmt und deutet, was Scheele und Priestley entdeckt hatten**

Antoine de Lavoisier war kein armer Prediger wie Priestley und auch kein Provinzapothecker wie Scheele, er war ein reicher Mann, der in der feinen Pariser Gesellschaft verkehrte. Er war ein sogenannter Steuerpächter. Sicher war dies kein Beruf, der denjenigen, die ihn ausübten, eine große Beliebtheit sicherte, aber einträglich war er allemal. Durch innovative Ideen steigerte Lavoisier die Effizienz der Steuereinnahmen ganz beträchtlich. So schlug er vor, eine Mauer um Paris zu errichten, um die ein- und ausgehenden Waren besser kontrollieren zu können, ein Plan, der schließlich auch umgesetzt wurde. Diese Idee sollte Lavoisier während des Großen Terrors der Französischen Revolution den Kopf kosten, denn seine Gegner empfanden sie wohl nicht ohne Grund als volksfeindlich und ausbeuterisch. Im Jahre 1794 wurde Lavoisier im Alter von 51 Jahren durch das Revolutionstribunal in Paris zum Tode verurteilt und hingerichtet (vgl. z. B. Poirier 1998).

Seine recht kurze wissenschaftliche Laufbahn hatte er genutzt, um einige der wohl wichtigsten Entdeckungen in der Geschichte der Naturwissenschaften zu tätigen. Denn die Entdeckung – oder sollte man eher sagen: Erfindung – des Sauerstoffs und die genaue Aufklärung seiner Rolle bei der Verbrennung und bei der Atmung sind Leistungen, die ähnlich bahnbrechend sind wie die Hypothese des Kopernikus, dass sich die Erde um die Sonne dreht, oder die Lehre Charles Darwins, dass die Arten in der Natur nicht ein für alle Mal geschaffen, sondern durch »natürliche Zuchtwahl«

**Abbildung 5**  
 Zeichnung »Lavoisier  
 dans son Laboratoire«  
 [Lavoisier in seinem  
 Labor] von Georges  
 Ernest Profit nach  
 einer Zeichnung von  
 Madame de Lavoisier,  
 die auf dem Bild rechts  
 zu sehen ist (1890)



langsam entstanden seien. Denn der Sauerstoff ist Dreh- und Angelpunkt der gesamten ökologischen Natur.

Lavoisier hatte durch Priestley und Scheele entscheidende Anregungen erhalten. Doch er interpretierte sie auf eine neuartige Weise. Er schuf ein zusammenhängendes Gesamtbild, das auch methodisch klar strukturiert war, weil es sich auf das einfache – und explizit formulierte – Prinzip von der Erhaltung der Masse stützte. Lavoisier meinte, dass es sich nicht einfach um Zustandsveränderungen der Luft handle, sondern um einen Gasaustausch, der zwischen Pflanzen und Tieren stattfindet. Die Luft wird beim Atmen also nicht mit einem unwägbaren Prinzip namens Phlogiston gesättigt. Vielmehr lehrte Lavoisier, dass die

Pflanzen ein Gas namens Kohlensäure einatmen und ein anderes Gas, eine andere Luftart, ausatmen.

Lavoisier behauptete, dass bei einer Verbrennung von Kohle nicht etwas Unwägbares weggeht, das Phlogiston, sondern etwas Wägbares hinzukommt. Und zwar auch dann, wenn ein Metall, etwa Stahlwolle, verbrannt wird. Deshalb ist auch das Produkt schwerer als der Ausgangsstoff. Jenes Etwas, das da hinzukommt, spielt auch beim Verbrennen anderer Stoffe, etwa von Phosphor und Schwefel, eine Rolle. Denn wenn diese in der Luft verbrennen, entstehen Säuren. Das Etwas stellte sich Lavoisier als einen wägbaren Stoff vor. Für ihn gebrauchte er in seinen Abhandlungen ab 1777 verschiedene Namen wie etwa »air pur«, reine Luft, oder »air vital«, Lebensluft. In einer Abhandlung, die er im September 1777 an der Pariser Akademie der Wissenschaften vortrug, fasst er seine Erkenntnisse zusammen:

Die vielfachen Experimente gestatten mir heute, die allgemeinen Folgerungen zu ziehen, und vorzubringen, dass die reinste Luft, die im besonderen Maße atembare Luft, das konstitutive Prinzip der Acidität ist, dass dieses Prinzip allen Säuren gemein ist [...] Nach diesen Wahrheiten, die ich als sehr solide fundiert ansehe, werde ich von nun an die dephlogistisierte Luft oder die besonders atembare Luft, wenn sie im Zustand der Verbindung ist und fixiert ist, mit dem Namen des säurebildenden Prinzips (*principe acidifiant*), oder, wenn man dieselbe Bezeichnung lieber als griechisches Wort hat, als *principe oxygène* bezeichnen. (Lavoisier 1862, S. 249)

In der wenig später in Zusammenarbeit mit anderen französischen Chemikern publizierten *Méthode der chemischen Nomenklatur* wurde daraus dann das Oxygène (wörtlich übersetzt ›Sauermacher‹, von griechisch *oxýs*, was scharf oder sauer bedeutet). Die deutsche Übersetzung dieses Wortes mit dem neugeschaffenen Wort ›Sauer-

stoff: wurde gemeinsam von dem Schweizer Arzt Christoph Girtanner und dem österreichischen Chemiker und Botaniker Nikolaus von Jacquin entwickelt und dann von Girtanner 1791 erstmals in einer kleinen Broschüre verwendet.<sup>15</sup> Girtanner hielt die deutschen Bezeichnungen für philosophischer als die französischen (vgl. Girtanner 1791, S. 4). Er hatte insofern recht, als in diesem Namen von der Möglichkeit der deutschen Sprache Gebrauch gemacht wurde, eine Zusammensetzung mit dem Wort ›Stoff‹ zu bilden, wodurch konsequenter gesagt wird, dass es sich um einen ganz normalen Stoff und nicht um ein halb-immaterielles Prinzip handelt.

Ohnehin war die Methode der chemischen Nomenklatur, wie schon oft herausgearbeitet wurde,<sup>16</sup> bereits sehr stark philosophisch inspiriert, und zwar von der Zeichentheorie des Aufklärers Etienne de Condillac. Dieser forderte in seinen Schriften zur Logik, auf die sich die Autoren der Nomenklatur bezogen, dass man sprachliche Zeichen verwenden solle, die nicht beliebig, sondern dem Wesen der Sache angemessen seien. Denn jede Sprache sei eigentlich eine Methode der Analyse, und daher sei es äußerst wichtig, auf Sprachrichtigkeit zu achten. Erst mit einer reformierten Sprache könne man erfolgreich forschen. Die Sprache wird hier also nicht als neutrales Ausdrucksmittel, sondern als ein Instrument des Forschens angesehen: »Wir haben festgestellt [...] daß die ganze Kunst sich darauf reduziert, die Sprache für jede Wissenschaft gut zu bilden.« (Condillac 1959, S. 113; siehe zur Ideengeschichte die wichtige Darstellung bei Meier-Oeser 1997, S. 415–425) Eben dieses philosophische Programm setzten Lavoisier und seine Mitautoren dann auch um, wobei sie sich ausdrücklich auf Condillac bezogen (vgl. Morveau et al. 1793, S. 19). Zudem erkannte Lavoisier, dass Wasser eine Verbindung und kein Element ist. Hier allerdings ergab sich eine Schwierigkeit, denn Wasser ist eine Verbindung von Sauerstoff und Wasserstoff und müsste daher nach Lavoisiers eigener Lehre eigentlich eine Säure sein, was aber bekanntlich nicht der Fall ist.

Im Grunde ist die Sauerstoff-Theorie von Lavoisier eine Umkehrung der alten Phlogistontheorie und setzt letztere daher nicht nur außer Kraft, sondern auch voraus. Darauf hat Lavoisier immer wieder selbst hingewiesen. Er sparte auch nicht mit Lob für den Erfinder dieser Theorie, den Chemiker und Arzt Georg Ernst Stahl, der als Erster die Calcination, die Veraschung von Metallen als eine Verbrennung betrachtet hatte und der zudem darlegte, dass die Verbrennbarkeit eine von einem Körper auf einen anderen übertragbare Eigenschaft sei (vgl. Dumas 1839, S. 143). Lavoisier lehrte, dass das Phlogiston nicht existiert, dass die sogenannte atembare Luft, die Feuerluft, die dephlogistisierte Luft, ein elementarer Stoff ist, und zwar der eigentlich wirksame Teil der Luft, der die Kerze und die Herdfeuer brennen lässt. Zugleich gibt er den Tieren, die ihn mit der Luft einatmen, ihre Wärme, denn in ihrem Inneren findet eine stille Verbrennung statt. Sauerstoff ist bei allen Naturerscheinungen gegenwärtig. Doch auch Lavoisiers Konzeption, so sehr sie der modernen Lehre ähnelt, ist nicht die Wahrheit selbst. Das fängt schon bei der Bezeichnung an. Denn wie man schon zu Lavoisiers Lebzeiten erkannte, ist der Sauerstoff nicht der ›Sauer-Stoff‹; also nicht das, was Säuren sauer macht. Es gibt nämlich etliche wichtige Säuren, die keinen Sauerstoff enthalten, zum Beispiel die Salzsäure.

Und nicht zuletzt steckte noch einiges von der alten Phlogistik in Lavoisiers Konzept. Denn er lehrte explizit, dass es sich bei der reinen Luft, der »air pur«, nicht schon um Oxygène handle: Dieser sei vielmehr nur darin enthalten, und zwar als Verbindung mit etwas anderem, nämlich dem von ihm so getauften »Wärme- und Lichtstoff«, der entbunden wird, wenn jene Luftart mit anderen Stoffen reagiert (vgl. zum Wärmestoff bei Lavoisier auch Färber 1927). So versuchte er auf seine Weise die energetischen Aspekte einzuordnen, die bei chemischen Reaktionen zu beobachten sind und die für die Phlogistik so wichtig waren.

## »Lebensluft« oder: Die Sauerstoffbegeisterung der Romantiker

Die neue Chemie im Allgemeinen und die Entdeckung des Sauerstoffs im Besonderen fanden in der Naturphilosophie der Romantik eine sehr starke Resonanz. Vor allem im Denken von Friedrich Wilhelm Schelling kann man eine systematische Bedeutung des Sauerstoffs erkennen. Der wichtigste romantische Naturphilosoph glaubte nämlich, dass die Physik der Chemie nachgeordnet sei, der er eine entscheidende Bedeutung für das Verständnis der lebendigen Natur zumisst. Dreh- und Angelpunkt der Chemie ist für ihn wie für andere romantische Naturphilosophen der kurz zuvor entdeckte Sauerstoff.



**Abbildung 6** Schelling nach Christian Friedrich Tieck (um 1800)<sup>17</sup>

In seiner Abhandlung *Erster Entwurf eines Systems der Naturphilosophie*, die 1799 erschien, als Schelling gerade einmal 24 Jahre alt war, stellt er die zentrale These auf: »Alle Functionen des Organismus erfolgen nach chemischen Gesetzen der Materie, das Leben selbst ist ein chemischer Proceß.« (Schelling 1799, S. 73) Zwar schreibt er, dass sich die Laborchemie zur Chemie unter freiem Himmel verhalte wie Sprache und Grammatik (vgl. ebd., S. 75), doch zugleich betont er: »Welche Stoffe in der organischen Natur besonders thätig sind, dieselben zeichnen schon in der anorganischen Natur sich aus, und umgekehrt.« (ebd., S. 76) Entsprechend versteht er auch den Unterschied von Pflanze und Tier als chemischen Unterschied:

Alle Mannigfaltigkeit der Materie in der Welt reducirt sich auf ihr Verhältnis zu jener Substanz, welche in unsrer Atmosphäre [...] das Element des Lichts gefesselt hält, und deren allgemeiner Sitz die leuchtenden Körper des Weltsystems zu seyn scheinen. Alle Materien sind entweder verbrannte oder verbrennende, oder solche, die wieder verbrennlich werden. Die Hauptprocesse der Natur sind wie im Großen – (daher der Gegensatz zwischen Sonnen und Planeten) – so im Kleinen Combustions- und Decombustionsprocesse. Die organische Natur hat sich in beide getheilt. (ebd., S. 79)

Und er bringt es noch klarer auf dem Punkt: »Die äußere Bedingung des Lebens für die Pflanze ist Licht, für das Thier phlogistischer Stoff.« (ebd., S. 80) Man erkennt hier, dass die Dialektik in ihrem Anfang mit der Chemie verbunden ist, ihr vielleicht ihre Entstehung verdankt. Der Sauerstoff wird jedenfalls als eine Art Quintessenz der Natur angesehen. In der 1803 erschienenen zweiten Auflage seiner *Ideen zu einer Philosophie der Natur* (die erste Auflage erschien 1797) nennt Schelling, der in Leipzig Mathematik, Naturwissenschaften und Medizin studiert hatte, entsprechend der französischen Bezeichnung »air vital« den Sauerstoff öfters direkt »Lebensluft«. Und er glaubt, dieser Sauerstoff sei ein Produkt aus Licht und einem einfachen Grundstoff: »weil diese Luft die Gewalt des Feuers allzusehr beförderte, die Kraft unserer Organe zu sehr erschöpfte [ist die atmosphärische Luft] eine Mischung aus ihr und einer andern, ihr gerad' entgegengesetzten Luftart.« (Schelling 1803, S. 27)

Schelling ist der Meinung, dass überhaupt noch sehr viele Entdeckungen rund um den Sauerstoff anstehen: »So viel scheint mir klar zu seyn, daß das Oxygene der neuern Chemie, wenn es das ist, wofür man es ausgibt, wohl noch mehr als das ist« (ebd., S. 99). Tatsächlich traut sich Schelling zu, die damals immerhin noch von einigen bezweifelte Existenz des Sauerstoffs auf einem

ganz neuen Weg zu beweisen, indem er ihn nicht experimentell darstellt, sondern spekulativ ableitet bzw. konstruiert. Er versucht also, intuitiv, spekulativ etwas zu ›finden‹ und zu bestätigen, dessen Existenz von Chemikern auf rein empirischem Weg entdeckt worden war. Für Schelling ist auch der chemische Prozess fortlaufende, unendliche Tätigkeit, die nur möglich ist, wenn er irgendwo auch begrenzt ist. Diese allgemeine Grenze aller Substanzen ist seiner Auffassung nach der Sauerstoff, mit dem alle anderen Stoffe verbrennen – nur er selbst nicht:

Es muß also unter den Principien der Verwandtschaften ein *einzelnes* vorkommen, das allen andern *entgegengesetzt* ist, und das eben dadurch den chemischen Proceß der Erde *begrenzt*. Dieses Princip muß Mittelglied aller chemischen Verwandtschaften seyn. Alle andern Materien müssen sich nur dadurch chemisch verwandt seyn, daß sie *gemeinschaftlich* nach Verbindung mit diesem Einen streben. – Dieses Princip ist, wie aus der Erfahrung erhellt, das, was wir Sauerstoff nennen. (Schelling 1799, S. 159)

Sauerstoff wird von Schelling also nicht als eines von verschiedenen Elementen angesehen, die allesamt grundsätzlich gleichwertig sind. Vielmehr wird er von seiner Funktion in der irdischen Natur her gedacht und besitzt eine zentrale Sonderstellung. Weil für Schelling Natur Tätigkeit ist, muss sie in sich gehemmt sein, da die Natur andernfalls zerstäuben würde. Diese innere Hemmung aber resultiert aus polaren Gegensätzen – alles, was in der Natur ist, hat seine Gegensätze. Schellings Polaritätsdenken ist gerade für die Chemie durchaus fruchtbar, selbst wenn man es eher als heuristisches Prinzip ansehen sollte, denn tatsächlich gibt es in der Chemie polare Verhältnisse, wie etwa den Gegensatz von Säuren und Basen. Der Gestus absoluten Wissens, mit dem Schelling seine Einsichten verkündet, und die zahlreichen

Missgriffe bei der rein gedanklichen Konstruktion vermeintlicher Tatsachen haben ihn bei vielen Naturwissenschaftlern diskreditiert (kritisch zur spekulativen Physik äußert sich etwa Mutschler 1990, S. 71–108).

Lorenz Oken, der mit Schelling in engem Kontakt stand und ihm auch die erste Auflage seines *Lehrbuchs der Naturphilosophie* widmete, erklärte, es gebe nur drei einfache Stoffe, nämlich »einen Schwerestoff = 0, einen Lichtstoff = +, und einen Wärmestoff = –« (Oken 1843, S. 50 = §269). Als »Wärmestoff« identifizierte er den Wasserstoff, als »Schwerestoff« den Kohlenstoff und als »Lichtstoff« den Sauerstoff. Varianten des Kohlenstoffs sind laut ihm die Metalle, Varianten des Sauerstoffs die Halogene (Chlor, Jod, Brom), und als mögliche Variante des Wasserstoffs kommt für ihn der Schwefel in Frage. »Der Stickstoff ist höchst wahrscheinlich gesauerstoffter Wasserstoff, oder ein Wasserstoffoxyd; darauf deutet sein mittleres Gewicht und sein völlig todter Charakter« (ebd.).

Auch Oken begeistert sich für den Sauerstoff, über den er schreibt: Der Sauerstoff ist das überall Thätige, alles Aufregende, Belebende, Bewegende, das Licht im Irdischen. Der Stickstoff das Träge, Todte, Indifferente, heißt bezeichnend Azot; eben so sollte man den Sauerstoff das Zoot nennen.« (Ebd., S. 83 = §268) Tatsächlich hält er Sauerstoff und Stickstoff buchstäblich für Pole und glaubt, dass sie ineinander umwandelbar seien, »wenn die Polarisierung, die Begeisterung [...] wechselt.« (ebd.) Dreißig Jahre später – die Wissenschaft und Oken waren inzwischen vorangeschritten – erschien die dritte Auflage seines *Lehrbuchs der Naturphilosophie*. Oken, mittlerweile erster Rektor der Universität Zürich und als Gründer der Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte einer der bedeutendsten Wissenschaftsorganisationen der damaligen Zeit, formulierte nun weniger wortreich: »Der Sauerstoff ist das überall Thätige, alles Aufregende, Bewegende und Belebende, das Licht im Irdischen. Der Stickstoff das Träge, gleichsam Getödtete und daher Tödtende; jener das +, die-

ser das –.« (ebd., S. 52 = §288) So oder so: Der Vergleich von Sauerstoff und Stickstoff mit dem Plus- und dem Minuspol dürfte auf moderne Leser befremdlich wirken, denn für uns sind diese beiden Stoffe nichts weniger als Pole. Die Luft ist nach unserem Verständnis kein geordnetes Ganzes, sondern ein Gemisch, das man sich auch ganz anders denken könnte. Und doch war das romantische Denken keineswegs absurd oder wissenschaftlich unproduktiv, es führte zu erfolgreichen empirischen Theorien und Klassifikationen, worauf auch Oken mit Stolz hinweist (vgl. Oken 1843, S. III–VI). Als ein Beispiel nennt er seine Klassifikation der Erze, die er erstmals nicht nach den jeweiligen Metallen vornahm, sondern danach, ob es sich um Sauerstoffverbindungen oder andere Verbindungen (z. B. mit Schwefel oder Säuren) handle (ebd., S. V). Diese Klassifikation, ganz aus der romantischen Sauerstoffbegeisterung geboren, hat sich bis heute erhalten.

Auch auf höheren Stufen der Theoriebildung finden sich in der modernen Wissenschaft Konzepte, die sich erstmals bei den Romantikern nachweisen lassen. So findet man die Idee eines ökologischen, systemischen Naturbegriffs zuerst bei Schelling, für den die Natur ein in sich zusammenhängendes, dynamisches System ist. Daraus leitete Schelling auch konkrete Forschungsperspektiven ab:

Und dies sollte jetzt das Ziel der Bemühungen der Chemiker und Naturforscher seyn [...] zu erforschen, durch welche Mittel und nach welchen unveränderlichen Gesetzen die Natur dem ewigen Kreislauf, in welchem sie fortduert – nicht dem Einzelnen, sondern dem Ganzen – nicht dem Individuum, sondern dem System – Bestand und Fortdauer gebe. (Schelling 1803, S. 424)

Dabei ist ihm bereits völlig klar, dass die Natur selbst ein organisches System ist, in dem Tiere und Pflanzen über die Atmosphäre zusammenhängen (vgl. ebd., S. 42 ff.):

Unsern Erdball umgibt ein durchsichtiges, elastisches Fluidum, das wir Luft nennen, ohne dessen Gegenwart kein Proceß der Natur gelänge, ohne welches animalisches sowohl als vegetabilisches Leben unausbleiblich erlöschen würde – wie es scheint das allgemeine Vehikel aller belebenden Kräfte, eine unerschöpfliche Quelle, aus der die belebte sowohl, als die unbelebte Natur alles an sich zieht, was zu ihrem Gedeihen notwendig ist. (ebd., S. 145)

Gerade anhand der Atmosphäre entwickelt Schelling den Gedanken des systemischen Zusammenhangs der ökologischen Natur. Er schreibt, dass die Natur »in ihrer ganzen Oekonomie nichts zugelassen [hat], was für sich und unabhängig vom ganzen Zusammenhange der Dinge existiren könnte, keine Kraft, die nicht durch eine entgegengesetzte beschränkt, nur in diesem Streit ihre Fortdauer fände [...]« (ebd.).

Nichts, was ist und was wird, kann seyn oder werden, ohne daß ein anders zugleich sey oder werde, und selbst der Untergang des einen Naturproduktes ist nichts als Bezahlung einer Schuld, die es gegen die ganze übrige Natur auf sich genommen hat; daher ist nichts Ursprüngliches, nichts Absolutes, nichts Selbstbestehendes in der Natur. Der Anfang der Natur ist überall und nirgends [...]. (ebd., S. 145f.)

## **Biosphäre oder: Die Bedeutung des Sauerstoffs für die moderne Ökologie**

Die systemische Betrachtung des Sauerstoffs in der romantischen Naturphilosophie hatte durchaus ihre Auswirkung auf den Gang der Wissenschaft oder griff jedenfalls Ideen auf, die allgemein in der Luft lagen. Jedenfalls finden wir wenig später sehr ähnliche Überlegungen auch in nüchternen chemischen Werken wieder.

Die Chemiker Jean-Baptiste Dumas und Jean-Baptiste Boussingault bezeichneten das Tierreich als »Verbrennungsapparat« und das Pflanzenreich als »Reduktionsapparat« (Dumas und Boussingault 1844, S. 5). Mit diesen Begriffen unterstrichen sie, dass Flora und Fauna über die Atmosphäre miteinander verbunden sind, ja, dass Pflanzen und Tiere eigentlich aus der Atmosphäre kommen und dorthin auch wieder zurückkehren (vgl. ebd., S. 6). Ein großer Teil der körperlichen Masse der Organismen – insbesondere der Pflanzen – stammt aus der Atmosphäre und geht während ihres Lebensprozesses und endgültig nach ihrem Tode auch wieder in diese Atmosphäre zurück.

Hier knüpfte später der russische Chemiker Wladimir Vernadskij an, jener Forscher, der den modernen Biosphäre-Begriff entwickelte. Er erklärte nämlich, die wichtigste Erscheinung in der Chemie der Lebewesen sei ihre Entstehung aus gasförmigen Stoffen und ihre Rückverwandlung in solche Stoffe nach ihrem Tode: »Sicherlich entstammen über 97–98 Gewichtsprozent aller Atome der lebenden Substanz den Gasen der Biosphäre und eine nur wenig geringere Menge, doch derselben Größenordnung, wird nach dem Tode der Organismen wieder in gasförmigem Zustand in Freiheit gesetzt.« (Vernadskij 1930, S. 176) Nicht nur die Gase Kohlendioxid und Sauerstoff sind hier gemeint, sondern auch das Wasser, das ja ebenfalls, ehe es in Quellen sprudelt, als Wolke in der Luft ist. Hinzu kommen verschiedene Stickstoffverbindungen. Dass diese Stoffe, die sämtliche Lebewesen benötigen, gasförmig sind, ist von kaum zu überschätzender Bedeutung, denn dadurch stehen sie allen unmittelbar gleichmäßig zur Verfügung. Daher ist Recycling auf planetarer Ebene möglich. Die Atmosphäre verteilt die kostbaren Güter und sorgt auf der grundlegendsten Ebene für Chancengleichheit, denn alle Grundnahrungsmittel sind nicht nur umsonst, sie stehen auch allen überall in gleicher Weise zur Verfügung.

Wäre zum Beispiel das Kohlendioxid, das die Tiere ausatmen, ein Feststoff oder eine Flüssigkeit unter irdischen Verhältnissen, dann stünde es nur an ganz bestimmten Stellen bereit. Die Folge wäre, dass sich nur an einigen wenigen Flecken Lebensgemeinschaften ausbilden könnten. So aber sorgt die globale Atmosphäre dafür, dass der Atem eines Eisbären zur Nahrung einer Orchidee werden kann, die im Wipfel eines Urwaldbaumes von nichts anderem als Luft, Regen und ein wenig Staub lebt. Weil das Leben vor allem aus der Luft kommt, kann es tatsächlich überall auf Erden aufblühen, und sei es auch nur als dünne Algenschicht. Dass man *überall* auf der Erde Lebewesen findet, ist eine Tatsache, über die man nicht genug staunen kann. Vernadskij hat dies zurecht betont:

Die Verteilung der lebenden Substanz über die Erdoberfläche ist eine ihrer bewundernswertesten, nur bei ihr anzutreffenden Eigenschaften. In dieser Eigenschaft spiegelt sich gewissermaßen ihre Herkunft von gasförmigen Stoffen wider. Denn in der leblosen Materie beobachten wir, abgesehen von den Eigenschaften der Gase, nichts Analoges. (ebd., S. 178)

Auf eine der romantischen, spekulativen Naturphilosophie recht ähnliche Art und Weise deutet also die moderne Naturwissenschaft den gesamten ökologischen Prozess in *einem*, allerdings nun rein materiellen Zusammenhang, der in einem modernen Lehrbuch wie folgt beschrieben wird:

[Die Ökologen] sehen eine Biosphäre, in der das Leben von der Energie der Sonne angetrieben wird. Grüne Pflanzen finden sich überall dort auf Erden, wo es feucht und warm genug ist, wo sich genügend Nährstoffe finden, um sie wachsen zu lassen; und sie verwenden Sonnenenergie, um Kohlenhydrate herzustellen. Der Rest der Lebewesen (mit Ausnahme einiger

weniger bemerkenswerter Chemiker unter den Bakterien) lebt, indem sie etwas von den Brennstoffvorräten, die die grünen Pflanzen anlegen, abzweigt. Tiere essen Pflanzen, Pilze und Bakterien zerlegen tote Pflanzenkörper. Alle geben Wärme ab, sodass die Energie, die einst von den grünen Pflanzen von der Sonne gesammelt wurde, wieder in den Weltraum abgegeben wird. Elegant in seiner Einfachheit ist der Überblick der Ökologen über das, was die Welt im Innersten zusammenhält.<sup>18</sup>

Laut dieser Weltsicht produzieren die Pflanzen jenen Brennstoff, der nicht nur offene Feuer unterhält, sondern auch von den Tieren, Pilzen und Bakterien benötigt wird, die ihn nicht eigentlich verbrennen – es lodern ja keine Flammen in unseren Körpern –, aber veratmen. Dabei geben die Tiere Kohlendioxid ab, das wiederum die Pflanzen für ihre Ernährung benötigen. Tiere sind in dieser Sicht Antagonisten der Pflanzenwelt, durch deren Verzehr sie sich erhalten. Das Feuer ist demnach Antagonist sowohl der Tiere wie auch der Pflanzen.

So tritt die moderne ökologische Chemie auf ihre Weise das Erbe der romantischen Naturphilosophie an: Laut ihren Erkenntnissen ist die Natur auf eine weitaus tiefere Art verbunden, als man sich dies bis dahin vorgestellt hatte. So entstand ein völlig neues Naturkonzept. Es zeigt sich, dass die Natur nicht nur eine Ansammlung ist, in der Tiere, Pflanzen, Wasser, Luft, Erde und Feuer mehr oder weniger beziehungslos nebeneinander existieren. Die Natur hat vielmehr einen ganz engen, systemischen Zusammenhang, in dem jedes Moment die anderen erhält, und daher jedes Einzelne auch das Ganze spiegelt.

Am Sauerstoff lässt sich dies besonders deutlich erkennen. Er ist tatsächlich untrennbar mit dem Lebensprozess verbunden, weshalb es nicht verwundert, dass man ihn selbst schon früh für ein Produkt des Lebensprozesses gehalten hat. Bereits 1907 vertrat der schwedische Chemiker Svante Arrhenius als

einer der ersten Gelehrten die Überzeugung, dass der Sauerstoff der Atmosphäre von den Pflanzen gebildet wurde (vgl. Arrhenius 1907, S. 53). Auch der schon erwähnte russische Mineraloge und Chemiker Vernadskij wies darauf hin, dass der Sauerstoff vermutlich vom Leben selbst hervorgebracht worden sei, also nicht zur normalen Grundausstattung der Erde gehörte. Er ist also wirklich buchstäblich Lebensluft, nicht nur Luft, von der wir leben, sondern auch Luft des Lebens, er hat seinen Ursprung im Lebensprozess selbst.

Auch auf die romantische Bezeichnung »Lichtstoff« möchte ich nochmals zurückkommen. Steckt in ihr vielleicht ebenfalls mehr als nur begeisterte Rhetorik? Aus heutiger Sicht scheint der »Lichtstoff« zunächst gerade das Gegenteil dessen zu sein, was wir über den Sauerstoff wissen. Forscher gehen aktuell davon aus, dass Sauerstoff ursprünglich als Stoffwechselgift von Algen in die Luft entlassen wurde, wo er sich allmählich anreicherte, bis schließlich Lebewesen entstanden, die mit diesem »Gift« etwas anfangen konnten: die Tiere. Giftig ist der Sauerstoff für viele Lebewesen, weil er hochgradig reaktiv ist. Es gibt kaum Stoffe, die vom Sauerstoff nicht angegriffen und durch Oxidation zerstört werden. Weder Eisen noch Plastik oder irgendein natürliches Material ist in der Lage, der korrosiven Kraft des Sauerstoffs auf Dauer zu widerstehen. Man würde den Sauerstoff als eine der aggressivsten Substanzen überhaupt streng kontrollieren und hätte strikte Grenzwerte für ihn aufgestellt, wenn wir Menschen ihn nicht notgedrungen atmen müssten. Wie alle anderen Tiere nutzen wir die Fähigkeit des Sauerstoffs, rasch gewaltige Energie freizusetzen, Energie, die wir brauchen, um zu rennen, zuzugreifen, zuzupacken, uns aufzuregen – und schließlich auch: um zu denken. Und hier kommt die romantische Bezeichnung des Sauerstoffs als »Lichtstoff« am Ende vielleicht doch noch zu einem gewissen Recht. James Lovelock, ein moderner Nachfolger Vernadskijs, bringt es folgendermaßen auf den Punkt:

Der Sauerstoff sorgt für chemische Potentialunterschiede, die groß genug sind, um Vögel fliegen und uns laufen zu lassen oder im Winter warm zu halten; vielleicht auch, um uns denken zu lassen. Die gegenwärtige Sauerstoffkonzentration ist für unsere heutige Biosphäre, was die Versorgung mit Hochspannungselektrizität für den Lebensstandard unseres zwanzigsten Jahrhunderts ist. Es ginge auch ohne sie, doch wären die Möglichkeiten dann wesentlich eingeschränkt. (Lovelock 1984/1979, S. 104)

Dieser Vergleich ist deshalb treffend, weil Hochspannungselektrizität bekanntlich eine recht riskante Sache ist. Das ist beim Sauerstoff nicht anders: Er ist unerlässlich für unser Leben und auch für unser Denken, aber wer meint, durch sehr viel Sauerstoff besser denken zu können, sollte sich an die Warnung von Joseph Priestley erinnern, der wohl als erster Mensch auf diesem Planeten reinen Sauerstoff einatmete.

## **Ö +/- oder: Ozon als potenziertes und polarisiertes Sauerstoff im Denken Schönbeins**

Von der romantischen Naturphilosophie waren nicht wenige Naturwissenschaftler und vor allem Chemiker stark beeindruckt. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich, da sich Schelling ja zumindest in seinen frühen Schriften besonders stark auf die Chemie bezog. Die direkten Einflüsse sind oft schwer nachzuweisen, da sie in den Publikationen meist nicht benannt wurden. Zu denen, die sich für Schellings Philosophie begeisterten, zählte auch der Chemiker Christian Friedrich Schönbein, der unter anderem durch die Erfindung der Schießbaumwolle (heute meist als Cellulosenitrat bezeichnet) berühmt wurde. Hinzu kamen die Entdeckung des Prinzips der Brennstoffzelle sowie des Prinzips der sogenannten Opferanode. Besonders hervorzuheben sind



**Abbildung 7**  
Schönbein,  
Fotografie  
von Franz  
Hanfstaengl  
(1857)

aber seine Forschungen rund um den Sauerstoff, wobei die Entdeckung des Ozons seine wichtigste Entdeckung war.

Schönbein wurde 1799 in der Kleinstadt Metzingen am Fuße der Schwäbischen Alb geboren, wo er in einfachen Verhältnissen aufwuchs. Mit nicht einmal vierzehn Jahren schickten ihn seine Eltern bereits zur Lehre nach Böblingen in eine kleine chemisch-pharmazeutische Fabrik. Dort erkämpfte er sich zäh und ohne jegliche Unterstützung durch die Familie den Zugang zur Universität, wo er nach verschiedenen Stationen reüssierte. Zuletzt lehrte er Chemie in Basel, wo er 1868 hochgeehrt starb.

Im Januar 1821 schrieb Schönbein einen Brief an Schelling, der sich wie er selbst damals in Erlangen aufhielt: »Streben nach Wahrheit im vollsten Sinne, (oder des Seyns der Dinge und ihrer Beziehungen und Verhältnisse zueinander bewusst zu werden) ist der grösste Trieb, den ich in mir kenne« (zit. n. Kahlbaum und Schaer 1899, S. 28). Schönbein bedauerte, dass er keine Gelegenheit habe, Schellings Philosophie durch dessen Vorlesungen kennenzulernen, und fragte an, ob es eine andere Möglichkeit gebe, miteinander bekannt zu werden. Tatsächlich ließ sich der Philosoph darauf ein und unternahm mit dem Chemiker Spaziergänge

in der Umgebung von Erlangen. Damit begann eine langjährige Freundschaft, die erst mit Schellings Tod 1854 endete.

Die Belehrung, die Schönbein von Schelling empfing, war weitreichend und hatte erheblichen Einfluss auf seine Forschungsthemen und -methoden. Schönbein befasste sich zeit seines Lebens vor allem mit dem Sauerstoff, den auch Schellings romantische Naturphilosophie in den Mittelpunkt gestellt hatte. Von seiner besonderen Liebe zum Sauerstoff spricht er etwa in einem Brief an Justus von Liebig vom 16. Januar 1856: »Im Laufe der letzten Monate habe ich mich [...] einzig u. allein mit dem Sauerstoff beschäftigt, mit dem ich nun einmal so verwachsen bin, dass ich fürchte während des Restes meines Lebens werde ich zu Nichts Anderem mehr kommen.« (zit. n. Kahlbaum und Thon 1900, S. 45). Er spricht von ihm auch als einem »Zentralkörper der chemischen Welt« (ebd., S. 45f.) und dem »wunderbarsten aller Elemente« (ebd., S. 46). Schönbein war der Ansicht, »dass der Sauerstoff zum zweiten Male entdeckt werden müsse, wenn die Chemie als Wissenschaft in eine bedeutungsvolle Phase ihrer Entwicklung treten soll.« (ebd., S. 45) Auch war das Polaritätsprinzip für ihn ein wichtiges heuristisches Prinzip, das ihn immer wieder zu wichtigen Entdeckungen inspirierte. Außerdem interessierten ihn stets Verbindungen von Elektrizität und Chemie – ebenfalls ein Thema der romantischen Naturphilosophie. Nicht zuletzt ist bei seinem Denken die Betonung der Intuition für die wissenschaftliche Erkenntnis hervorzuheben.<sup>19</sup>

Schönbein blieb der romantischen Naturphilosophie eng verbunden und sah sie nicht im Widerspruch zu seiner empirischen Forschung. Vielmehr kritisierte er den Materialismus, der damals an Einfluss gewann; ihm zog er Schelling vor. Seinen Vorbildern folgend ging es ihm immer auch um Erkenntnis des Ganzen; und stets betonte er den Wert reiner Erkenntnis. Obgleich er einige Entdeckungen machte, die von enormer wirtschaftlicher Bedeutung waren, hat er sich daher nur wenig um die wirtschaftliche

Verwertung gekümmert und stand dieser fast abweisend gegenüber. Selbst die Jahrhundertfindung der Schießbaumwolle ließ er sich nur in einem sehr bescheidenen Maße versilbern.

Gemäß seiner antimaterialistischen Einstellung glaubte er nicht an die Existenz von Atomen. Auch hierin folgte er dem Vorbild Schellings, der die mechanischen Atome, die als kleine Körperchen gedacht wurden, als paradox kritisierte und nur dynamische Atome gelten lassen wollte.<sup>20</sup> Schönbein vermisste bei anderen zeitgenössischen Chemikern besonders den Blick für das Ganze (siehe hierzu etwa seinen Brief an Justus von Liebig vom 26. Februar 1969, zit. n. Kahlbaum und Thon 1900, S. 97).<sup>21</sup>

Schönbein pflegte auch den Kontakt zu anderen, ebenfalls der romantischen Schule zugeneigten Philosophen und Naturforschern, etwa zu Lorenz Oken. Zugleich war er ein unermüdlicher, fantasievoller Experimentator. Über seine Entdeckung des Ozons im Frühjahr 1839 hat er selbst mehrfach berichtet. Er schreibt:

[E]s war im Frühjahr 1839, dass ich mich mit volta'schen Untersuchungen beschäftigte, die es mit sich brachten, dass ich in meinem Laboratorium Wasser electrolysirte und die Bestandteile dieser Verbindung in die Luft gehen ließ. Da zufälligerweise das kleine Laboratorium während einer Stunde ungeöffnet geblieben, so bemerkte ich bei meinem Wiedereintritt in dasselbe auf das deutlichste den gleichen Geruch, welchen man beim Ausströmen der electricität [sic] aus Spitzen in der in die atmosphärische Luft oder beim Entladen electricer Batterien wahrnimmt. (zit. n. Kahlbaum und Schaer 1901, S. 2f.)

Sicherlich war Schönbein nicht der Erste, der diese Wahrnehmung hatte, doch ging er als Erster der Sache nach. Was mochte das sein? Schönbein kannte diesen Geruch, er hatte ihn schon einmal als Kind wahrgenommen, nämlich 1811, als der Blitz in die Kirche von Metzingen einschlug. Schönbein, damals ein zwölf-

Diese Jahreszahl kann nicht stimmen; Liebig und Schönbein waren zu diesem Zeitpunkt längst tot-). Es kann aber auch kein einfacher Tippfehler sein: 1969 statt 1869, da Schönbein schon 1868 verstarb.

jähriger Knabe, betrat die Kirche unmittelbar darauf und fand sie ganz von einem stechenden Geruch und blauem Dunst erfüllt (vgl. ebd., S. 2).

Nunmehr, im Labor, untersucht Schönbein die Ursache des Geruchs mit chemischen Mitteln, und stellt durch verschiedene Versuche fest, dass er nur in dem durch Elektrolyse erzeugten Sauerstoff bemerkbar ist, nicht aber in dem gleichzeitig entstehenden Wasserstoff. Daraufhin untersucht er diesen »riechenden Sauerstoff« genauer und stellt fest, dass sich seine Reaktionen von denen des normalen Sauerstoffs unterscheiden. So ist er etwa in der Lage, blankes Silber zu schwärzen, wozu normaler Sauerstoff nicht fähig ist. Gummi, der auch damals schon in Laboren verwendet wurde, wird in diesem Stoff sehr schnell brüchig. Das Gas lässt sich eine Weile aufbewahren, ist aber nicht dauerhaft haltbar und zersetzt sich offenbar besonders rasch in der Hitze.

Schönbein war daraufhin überzeugt, dass es sich um einen bislang unbekanntem, gasförmigen Stoff handle und taufte jenes Gas – denn um ein solches musste es sich seiner Meinung nach handeln – auf den Namen Ozon. Dabei hatte er sich von einem Altphilologen namens Wilhelm Vischer beraten lassen<sup>22</sup>. Ozon leitet sich her von einem griechischen Verb ὄζειν, das so viel wie »riechen« oder »Geruch verbreiten« bedeutet. Der Ozongeruch ist nicht das, was man einen Gestank nennen könnte, aber doch recht auffällig und sehr charakteristisch. Man kann ihn bei starkem Sonnenschein auch in der Natur wahrnehmen.

Durch die folgenden empirischen Untersuchungen stellt Schönbein fest, dass das Ozon eine Reihe von Eigenschaften hat, die sich auch technisch nutzen lassen: So bleicht es zum Beispiel. Andererseits beobachtet er, dass dieser Stoff die Atemwege reizt. Die desinfizierende Wirkung des Ozons hat Schönbein nicht erkannt, wohl aber stellt er fest, dass Ozon kein reines Laborphänomen ist, sondern in der Natur vorkommt. Er entwi-

ckelt ein Messverfahren, indem er Filterpapier mit einer Lösung aus Kaliumjodid und Kleister tränkt; bei Anwesenheit von Ozon färbt sich dieses Papier blau, eine Reaktion, die auf die Freisetzung von Jod zurückzuführen ist. Je mehr Ozon, desto blauer der Papierstreifen. Schönbein kreiert eine Farbskala und metrisiert damit sein Phänomen. So gerüstet regt Schönbein in Wien 1853 die ersten regelmäßigen Messungen von Ozon in der Luft an, die 67 Jahre lang durchgeführt werden und als erste systematische luftchemische Messungen angesehen werden können (vgl. Nolte 1999, S. 137f.).

Über die eigentliche Natur des Ozons rätselte Schönbein – und nicht nur er. Einmal glaubte er, dass das Ozon aus dem Stickstoff ableitbar sei (vgl. Kahlbaum und Schaer 1901, S. 23), dann wieder vermutete er, dass das Ozon irgendeine neuartige gasförmige Verbindung (zwischen ungleichartigen Atomen) sei. Erst relativ spät akzeptierte er die von vielen anderen Chemikern längst vertretene Auffassung, dass es sich um eine Modifikation des Sauerstoffs handeln müsse, weil sich zeigen ließ, dass sich Ozon auch in völlig reinem, trockenem Sauerstoff bildet (vgl. ebd., S. 33). Nun hielt er das Ozon für »thätigen Sauerstoff«. War es also doch nur ein besonderer Zustand des Sauerstoffs, kein besonderer Stoff? Dies hatte bereits Justus von Liebig angenommen, der zudem davon ausging, dass es solche Zustände auch bei anderen Elementen geben könne (Brief von Liebig an Schönbein am 30. September 1853, vgl. Kahlbaum und Thon 1900, S. 25).

Schönbein selbst hatte recht eigene Auffassungen. Auch hier leitete ihn das Polaritätsdenken, das er bei Schelling kennengelernt hatte – und das, wie er zu Recht glaubte, auch in der Chemie von Bedeutung ist. Er machte gern Polaritäten aus, und oft traf er damit einen wichtigen Aspekt der chemischen Prozesse, die er untersuchte. So hielt er Sauerstoff und Wasserstoff für zentrale Typen chemisch-stofflicher Gegensätze, was man auch aus heutiger Sicht gut nachvollziehen kann, handelt es sich doch beim

Sauerstoff um den Prototyp eines Oxidationsmittels und beim Wasserstoff um den Prototyp eines Reduktionsmittels, die dementsprechend heftig miteinander reagieren.<sup>23</sup> Auch bei seinen Forschungen im Bereich der eher organisch-physiologischen Chemie suchte er, öfters mit Erfolg, stets nach Antagonisten der von ihm gefundenen wirksamen Substanzen.

Allerdings überdehnte er seine heuristischen Konzepte und meinte, dass sich mit der Polarität in der Chemie schlechthin alles erklären ließe. Dies ist der Hintergrund seiner Vermutung, dass Ozon eine Art polarisierter Sauerstoff sein müsse. Analog dazu, dass es einen Plus- und einen Minuspol in der Elektrizität bzw. einen Nord- und einen Südpol in dem Feld des Magnetismus gab, vermutete er, dass auch zwei polarisierte Formen des Sauerstoffs existieren könnten. Das war nach seinen experimentellen Resultaten auch nicht einmal abwegig, denn Ozon wirkt zwar einerseits stark oxidierend, hat aber in bestimmten Fällen auch die gegenteilige Wirkung. Daher war es nicht von vornherein abwegig anzunehmen, dass sich aus Sauerstoff neben Ozon auch dessen Gegenstück, das »Antozon« bilden könne. Nach diesem von ihm so genannten »Antozon« suchte er jedoch vergeblich. Mehrfach war er sehr optimistisch, dass er kurz vor einem endgültigen Beweis für die Existenz dieses Stoffes stehe. So heißt es in einem Schreiben an Liebig vom 29. September 1857:

Was werden Sie wohl zu der Hypothese von zwei thätigen Sauerstoffarten  $\overset{\circ}{\text{O}}$  und  $\overset{\circ}{\text{O}}$  sagen? Ich gebe zu, sie klingt aussergewöhnlich genug, aber was kann ich dafür, dass es Thatsachen gibt, die so ganz u. gar extra ordinem sind, wie z. B. Desoxidationen durch Sauerstoff bewerkstelliget. (ebd., S. 72f.)

Die Sache beschäftigte ihn noch im Alter. Im Jahr 1860 etwa schrieb er an einen Freund, dass er sich »Tag und Nacht an seinem Sauerstoff abarbeite« (Kahlbaum und Schaer 1901, S. 98). Er

bezeichnet den Sauerstoff, dem er in der Folge noch viele weitere Untersuchungen widmen sollte, als »König der Elemente« (ebd.), doch setzt er dabei ein triadisches Modell voraus:

Du weißt, dass es nach meinem Dogma eine Dreifaltigkeit des Königs der Elemente oder des Erdgeistes gibt, von welcher mir bis jetzt nur zwei Personen oder Falten in ihrer gesonderten Gestalt bekannt geworden sind die dritte ist mir verhüllt geblieben und ich habe auf ihr Dasein nur durch gemachte Wirkungen schließen können. (ebd.)

Man kann daher den Sauerstoff in diesen drei verschiedenartigen Zuständen mit  $\bigcirc$ ,  $\oplus$  und  $\ominus$  bezeichnen.

**Abbildung 8** Ozonsymbole in Schönbeins Abhandlung *Ueber die nächste Phase der Entwicklung der Chemie* (1861)

Das Problem bei diesen Versuchen, neben dem Ozon auch noch dessen Gegenstück zu isolieren, schildert Schönbein folgendermaßen: »[E]benso habe ich allen Grund zu vermuten, dass sich die beiden Kbolde, dass Ozon und Antozon, sobald sie zusammengelassen werden, ein anderer mit Stumpf und Stiel auffressen und dabei nicht einmal einen Geruch von sich zurücklassen.« (ebd., S. 99) Schönbein glaubte in dieser Zeit, dass er das »Antozon« in einem bestimmten Gestein auffinden könne, und zwar in einem blauen Flusspat, den man im Granitgebirge bei Wösendorf findet. Allerdings war auch diese Spur trügerisch. Das Polaritätsdenken erwies sich als unergiebig für die Interpretation des Ozons – das »Antozon« konnte nie isoliert werden.

## O<sup>2</sup>, O<sup>8</sup> und O<sup>3</sup> oder: Der Weg zur modernen Ozonformel

Die romantische Naturphilosophie spielte, wie gezeigt wurde, für die Deutung der zentralen Funktion des Sauerstoffs im Gesamtzusammenhang der Natur eine erhebliche Rolle. Zugleich waren die von ihr popularisierten Bezeichnungen, insbesondere der Begriff »Lebensluft«, wichtig für den öffentlichen Diskurs über den Sauerstoff und dann auch über das Ozon. Wenn es jedoch um die wissenschaftliche Interpretation der Stoffe selbst geht, also um die Frage, was der Sauerstoff bzw. das Ozon an sich sind, so setzte sich stattdessen eine materialistische Weltdeutung durch. Der Materialismus, der als ein Gegenspieler der romantischen Naturphilosophie betrachtet werden kann, blickt auf eine sehr lange Tradition zurück. Sein Kennzeichen ist, dass er alle Phänomene auf rein materielle Vorgänge zurückführen will. Von Anfang an war er eng verbunden mit dem Atomismus, ja er setzt ihn voraus (vgl. Lange 1877, S. 8–21 und passim). Eben diese materialistische Atomistik wurde besonders durch den englischen Naturforscher John Dalton am Anfang des 19. Jahrhunderts wieder auf die Interpretation der Stoffe und der chemischen Prozesse angewandt. Dalton lehrte, dass alle Stoffe aus Atomen zusammengesetzt seien, die er sich recht konkret als harte und unteilbare Kügelchen vorstellte, welche Verbindungen eingehen können. Die Atome des John Dalton unterschieden sich von den Atomen des Demokrit, wie sie von dem französischen Philosophen, Theologen und Naturforscher Pierre Gassendi wieder in das europäische Denken eingeführt worden waren, denn sie waren alle gleichartig und hatten auch keine unterschiedlich strukturierten Oberflächen, sondern wurden als glatte Kugeln vorgestellt, die sich je nach Atomart untereinander anzogen oder abstießen. Die chemischen Vorgänge sind also nicht durch Druck und Stoß zu erklären, sondern durch einen inneren Trieb nach Verbindung, über dessen Ursachen Dalton fast nichts sagte, da

man damals nur sehr wenig darüber wusste. Dalton hielt sich an die wägbaren Tatsachen, stellte aus seiner Zusammenschau chemischer Reaktionen das Gesetz der multiplen Proportionen auf. Aus den konstanten und multiplen Gewichtsverhältnissen bei chemischen Reaktionen zog er den Schluss, dass die beteiligten Atome ebenfalls bestimmte, bei ein- und derselben Sorte immer gleiche Atomgewichte haben mussten (vgl. Bradley 1877, S. 181–187). Diese spezifischen Atomgewichte waren ein neuartiges Konzept, das für die weitere Entwicklung der Wissenschaft eine besondere Bedeutung haben sollte.

Man nahm auch an, dass der Sauerstoff aus Atomen zusammengesetzt war. Doch wie sah das genau aus? Welches Atomgewicht hatte der Sauerstoff? Hier erwies sich nun ein Phänomen, das damals bekannt wurde, als zentral: Wenn zwei Gase miteinander reagieren, um ein neues Gas zu bilden, dann geschieht dies immer in einfachen, geradzelligen Volumenverhältnissen. Nicht nur die Gewichtsverhältnisse, sondern auch die Volumenverhältnisse sind konstant und einfach. Verbindet sich etwa Wasserstoff mit Chlor, um Chlorwasserstoff, also Salzsäuregas zu bilden, dann verbindet sich 1 Liter Wasserstoff stets mit 1 Liter Chlor. Aus diesen Verhältnissen konnte man schließen, dass sich auch immer ein kleinstes Teilchen Wasserstoff und ein kleinstes Teilchen Chlor miteinander verbinden. Nun ergab sich aber eine Schwierigkeit. Die Experimente zeigten nämlich, dass aus 1 Liter Wasserstoff und 1 Liter Chlor 2 Liter Salzsäuregas entstanden – und nicht, wie man erwarten könnte, 1 Liter. Wie sollte man sich dies erklären?! Hält man daran fest, dass sich immer ein Atom des einen Stoffes mit einem Atom des anderen verbindet, dann müssten sich in diesem Falle die Atome geradezu aufspalten, was aber dem Atombegriff widerspricht.

Eine Antwort lieferte der italienische Naturforscher Amedeo Avogadro, der ursprünglich eine juristische Ausbildung durchlaufen hatte und auch zunächst als Jurist tätig war, bevor er sich mit

den Naturwissenschaften befasste. Er hielt es für möglich, dass die kleinsten Teilchen des Wasserstoffs und des Chlors sich stets aus zwei Atomen des Wasserstoffs beziehungsweise des Chlors zusammensetzen. Natürlich hatte er dafür keinen Beweis und sprach auch selbst von einer reinen Hypothese – einer Annahme, die es aber erlaubte, das, was sich in Experimenten beobachten ließ, klar zu interpretieren. Denn wenn, wie Avogadro annahm, in gleichen Volumina von Gasen sich immer dieselben Zahlen von kleinsten Teilchen dieser Stoffe befinden und wenn es zugleich möglich ist, dass diese kleinsten Teilchen nicht Atome, sondern Moleküle sind, die sich aus zwei gleichen Atomen zusammensetzen, dann lässt sich die obige Reaktion von Wasserstoff mit Chlor sehr leicht verstehen. Dann reagiert nämlich immer ein Molekül Wasserstoff,  $H_2$ , mit einem Molekül Chlor,  $Cl_2$ , und es entstehen zwei Moleküle Salzsäuregas,  $HCl$ . Auch andere Reaktionen konnte man so sehr einfach erklären.

Allerdings hatte Avogadro keine Erklärung dafür, weshalb sich der Wasserstoff immer in zweiatomigen Molekülen finden sollte. Was veranlasste die Wasserstoffatome, sich miteinander zu verbinden? Sie waren ja völlig gleichartig! Solche Überlegungen verhinderten, dass Avogadros Hypothese bei den Chemikern der damaligen Zeit größeren Anklang fand (vgl. Califano 2010, S. 299–310). Erst ein anderer italienischer Chemiker, der aus Palermo stammende Stanislao Cannizzaro, griff die Hypothese wieder auf. Auf dem berühmten Chemiker-Kongress, der vom 3. bis zum 5. September 1860 in Karlsruhe stattfand und in die Geschichte eingehen sollte, zeigte er, dass sich die damals bekannten Tatsachen der Chemie sehr einfach interpretieren lassen, wenn man die Annahme von Avogadro zu Hilfe nimmt. In Form eines Briefes an einen Kollegen entwarf er eine Darstellung, die alle damals bekannten Phänomene in einen schlüssigen Zusammenhang brachte und auf diese Weise das äußerst verwirrende Labyrinth der chemischen Tatsachen erstmals überzeugend

ordnete. Seine kleine Schrift mit dem altertümlichen Titel *Sunto di un corso di filosofia chimica*<sup>24</sup> wurde auf dem Karlsruher Kongress verteilt.

Atome und Molekeln	Symbole der Molekeln der Elemente und mit diesen geschriebene Formeln	Symbole der Atome der Elemente und mit diesen geschriebene Formeln	Zahlenwerte ihrer Gewichte
Wasserstoffatom	$\text{H}\frac{1}{2}$	H	1
Wasserstoffmolekel	$\text{H}$	$\text{H}^2$	2
Sauerstoffatom	$\text{O}\frac{1}{2} = \text{O}\frac{1}{8}$	O	16
Molekel des gewöhnl. Sauerstoffs	$\text{O}$	$\text{O}^2$	32
» » elektris. » (Ozon)	$\text{O}\frac{3}{2}$	$\text{O}^8$	128
Schwefelatom	$\text{S}\frac{1}{2} = \text{S}\alpha\frac{1}{8}$	S	32
Schwefelmolekel über 1000° ( <i>Bineau</i> )	$\text{S}$	$\text{S}^2$	64
» » unter 1000°	$\text{S}\alpha$	$\text{S}^6$	192
Wassermolekel	$\text{H}\text{O}\frac{1}{2} = \text{H}\text{O}\frac{1}{8}$	$\text{H}^2\text{O}$	18
Schwefelwasserstoffmolekel	$\text{H}\text{S}\frac{1}{2} = \text{H}\text{S}\alpha\frac{1}{8}$	$\text{H}^2\text{S}$	34

**Abbildung 9** Tabelle aus Cannizzaros *Abriss eines Lehrgangs der Theoretischen Chemie* (1918 [1858])

In dieser Schrift nun findet sich tatsächlich ganz prominent die auch heute noch akzeptierte Formel für den Sauerstoff:  $\text{O}^2$ .<sup>25</sup> Denn ähnlich wie Wasserstoff und Chlor und viele andere Gase kommt auch der Sauerstoff immer in zweiatomigen Molekülen vor. Und auch das Ozon deutete Cannizzaro in seiner kurzen Darstellung als besonderes, aus Sauerstoffatomen zusammengesetztes Molekül – wobei er allerdings dessen Formel mit  $\text{O}^8$  angab. Dabei stellte er den Exponenten hoch, die heute üblichen tief gestellten Exponenten wurden erst später von Justus von Liebig eingeführt. Entsprechend ordnete er dem Ozon auch das Molekulargewicht 128 zu, was acht Sauerstoffatomen entspricht; dem Sauerstoff hatte er das auch heute akzeptierte Atomgewicht 16 zugeordnet. Ähnlich wie schon der deutsche Physiker Rudolf Clausius war Cannizzaro hier wohl ein Opfer der damals noch sehr unzuverlässigen Volumenbestimmungen des Ozons geworden.

Clausius, der sich intensiv mit Gasen auseinandergesetzt hatte und dessen Arbeiten auch auf Cannizzaro einen erheblichen Einfluss ausübten, hatte in seinen Beiträgen zur kinetischen Gastheorie als Erster versucht, die Moleküle nicht nur als nützliche Gedankendinge, sondern tatsächlich als physikalische Objekte zu behandeln, die zum Beispiel rotieren oder auch gegeneinander schwingen konnten. Er befasste sich mit dem Verhalten ganz konkreter Gase und bezog dabei auch das chemische Verhalten ein (siehe hierzu Wolff 1995). So war er zu dem Schluss gekommen, dass das Ozon aus atomarem Sauerstoff bestehe, während der Sauerstoff normalerweise in zweiatomigen Molekülen vorliegt. Dies konnte seine besondere Reaktivität erklären, denn die starke oxidierende Wirkung des Ozons beruhte seiner Ansicht nach darauf, »daß die aus ihrer Verbindung zu je zweien gelösten Atome sich leichter mit anderen Stoffen vereinigen können, als solche Atome, die noch erst aus jener Verbindung gelöst werden müssen, bevor sie in andere Verbindungen eintreten können.« (Clausius 1869, S. 103). Zugleich, so fügte Clausius hinzu, ließ sich mit dieser Annahme auch die Beobachtung erklären, dass Ozon gebundenen Sauerstoff in Verbindungen aus diesen lösen kann, weil sich die einzelnen Sauerstoffatome wieder zu zweiatomigen Molekülen verbinden wollen.<sup>26</sup> Dass das Ozon tatsächlich nicht aus einzelnen Sauerstoffatomen, sondern aus Molekülen besteht, die aus drei Sauerstoffatomen gebildet sind, konnte erst nach den genaueren und besseren Messungen des Schweizer Chemikers Jacques-Louis Soret erschlossen werden, die dieser in Heidelberg in Bunsens Labor vorgenommen hatte und 1863 veröffentlichte.

Sauerstoff ist also ein Element, doch das bedeutet nicht, dass es auch aus lauter gleichen, einzelnen Atomen besteht. In reiner, gasförmiger Form kommt dieses Element gerade nicht einatomig vor, sondern stets in Form von zwei zu Molekülen verbundenen Atomen. Die heute weltweit bekannte Formel  $O_2$  hat

ihren Ursprung also, wie es scheint, in Italien und verbreitete sich von Karlsruhe aus über die ganze Welt. Weil dem Sauerstoff immer noch, wie in den Zeiten der Romantik, die Assoziationen von Leben und Lebendigkeit anhaften, ist diese kühle Formel zu einem international geschützten Markennamen geworden, dessen sich das spanische Telekommunikationsunternehmen Telefónica bedient, um seine Produkte mit einem vitalen Nimbus zu umgeben.

Und das Ozon konnte nunmehr als Modifikation des Sauerstoffs verstanden werden, es ist zusammengesetzt aus drei Sauerstoffatomen. Eben aus dieser Tatsache erklärt man heute die gesteigerte Reaktivität des Ozons, denn das dreiatomige Molekül spaltet gern ein einzelnes Sauerstoffatom ab, um in den normalen und energetisch günstigeren zweiatomigen Zustand überzugehen. Für die eigentliche Reaktivität des Ozons aber ist das einzelne Sauerstoffatom verantwortlich. Das von Cannizzaro vorgeschlagene, auf Avogadros Hypothese beruhende Konzept drang von Karlsruhe aus durch; es lieferte nicht nur eine Lösung des Ozon- und des Sauerstoffproblems, sondern darüber hinaus den Ariadnefaden, der durch das unüberschaubar wachsende Labyrinth chemischer Reaktionen führte und der es ermöglichte, alles auf eine einheitliche Weise zu deuten. Daher inspirierte Cannizzaro die bald folgenden Entdeckungen. Sein Konzept hatte insbesondere einen direkten Einfluss auf Lothar Meyer und Dimitri Mendelejew, die in Karlsruhe anwesenden Chemiker, die später, unabhängig voneinander, das Periodensystem entdeckten.

Der Entdecker des Ozons, Christian Friedrich Schönbein, gehörte hingegen nicht zu den Teilnehmern des Karlsruher Kongresses. Er hätte wohl auch kaum die Begeisterung für die Ergebnisse Cannizzaros geteilt. Vielmehr hatte er noch vor dem Kongress in einem Brief an Liebig vom 29. Juli 1860 gegrummelt, dass die neueren Formen, sich mit den chemischen Problemen zu

beschäftigen, ihm nicht zusagen würden (Kahlbaum und Thon 1900, S. 104–107). Und auch als er unmittelbar nach dem Kongress von den Resultaten erfuhr, blieb er bei seiner schroffen Ablehnung:

sic  
???

»Wo die Begriffe fehlen, da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein«, und sicherlich ist ganz besonders in der Chemie mit Molekülen und ihrer **Gruppierung** seit Cartesius Zeiten ein arger Missbrauch getrieben worden in dem Wahne, durch derartige Spiele der Einbildungskraft für uns noch durchaus dunkle Erscheinungen erklären und den Verstand täuschen zu können. (Schönbein 1861, S. 301)

Kategorisch lehnte er in dieser Schrift die Deutung des Ozons als aus Sauerstoffatomen zusammengesetztes Molekül ab und brachte nochmals seine eigene Theorie von der »Dreifaltigkeit« der Sauerstoffzustände vor, die er hier ausführlicher als je zuvor ausbreitete.

Seine Kritik erwies sich indes als verfehlt, denn es handelte sich bei der Atomlehre des 19. Jahrhunderts um ein außerordentlich fruchtbares heuristisches Konzept, das in der Lage war, verwirrende Phänomene zu ordnen und zusammenhängend zu interpretieren. Von Schönbeins eigenem Konzept, an dem er bis zuletzt unbeirrbar festhielt und das sicher nicht weniger spekulativ war, ließ sich dies nicht behaupten. Natürlich enthielt die Molekültheorie von Anfang an offene Fragen. Warum der Sauerstoff in zweiatomigen Molekülen vorkommt, warum er überhaupt solche Moleküle bildet und weshalb und unter welchen Umständen dreiatomige Sauerstoffmoleküle gebildet werden, die man Ozon nennt. Alle diese Fragen waren berechtigt, aber sie konnten erst mit der Quantenmechanik des 20. Jahrhunderts, die auch wesentliche Beiträge zum Verständnis der Reaktivität des Ozons lieferte, befriedigend erklärt werden.

gebracht, gegenseitig zu gewöhnlichem oder neutralem Sauerstoffe sich ausgleichen, welcher letztere die dritte Modification dieses Elementes bildet. Man kann daher den Sauerstoff in diesen drei verschiedenartigen Zuständen mit  $\circ$ ,  $\oplus$  und  $\ominus$  bezeichnen.

Der Sauerstoff, sowie er in der atmosphärischen Luft vorhanden ist oder in unseren Laboratorien dargestellt wird, befindet sich in dem neutralen oder  $\circ$ -Zustand und die Ergebnisse der neuesten Untersuchungen haben es in einem hohen Grade wahrscheinlich, wo nicht völlig gewiss gemacht, dass dieser Sauerstoff als solcher eine chemisch durchaus unwirksame Materie, d. h. unfähig sei, mit irgend einem andern Körper eine chemische Verbindung einzugehen. Um ihn zu dem Oxydationswerke geschickt zu machen, muss derselbe erst diejenige allotrope Zustandsveränderung erleiden, welche ich „chemische Polarisation“ genannt habe, muss mit andern Worten  $\circ$  in  $\oplus$  und  $\ominus$  gleichsam gespalten oder, um diesen merkwürdigen Vorgang passender zu bezeichnen, müssen als *Conditio sine qua non* in dem neutralen Sauerstoff dessen gegensätzliche Zustände hervorgerufen werden.

Besagte Polarisation lässt sich durch verschiedenartige Mittel bewerkstelligen, über welche in das Einzelne einzutreten, hier der Ort nicht ist; es sei im Allgemeinen hierüber nur soviel bemerkt, dass diese gedoppelte Allotropie des Sauerstoffes unter dem Einflusse gewichtloser und gewichtiger Agentien zu Stande gebracht wird.

Was den chemisch gebundenen Sauerstoff betrifft, so lassen die uns vorliegenden Thatsachen kaum einen Zweifel darüber walten, dass er auch in diesem Zustand entweder als  $\circ$ ,  $\oplus$  oder  $\ominus$  existirt, bei welchem Anlass ich bemerken will, dass wir  $\oplus$  bis jetzt nur in Verbindungen,  $\circ$  und  $\ominus$  dagegen auch in freiem Zustande kennen. In den einen Sauerstoffverbindungen ist nur  $\circ$ , in Andern nur  $\oplus$  oder  $\ominus$ , in Manchen zugleich  $\circ$  und  $\oplus$  oder  $\circ$  und  $\ominus$  vorhanden. Da ich früher  $\ominus$  „Ozon“

**Abbildung 10** Seite aus Schönbeins Schrift *Ueber die nächste Phase der Entwicklung der Chemie* (1861)

Die hier nachgezeichnete Geschichte des Sauerstoffs und des Ozons zeigt eine recht intensive Interaktion zwischen experimenteller Naturforschung und der zeitgenössischen oder auch antiken Philosophie. Überraschen könnten dabei die vielen produktiven Interaktionen nicht nur mit materialistischen Ansätzen und Begriffen wie der Atomistik, sondern auch jenen mit idealistischen Konzepten, wie sie die romantische Naturphilosophie repräsentiert. Man gewinnt den Eindruck, dass die Naturforscher sich gern von philosophischen Theorien inspirieren ließen. Was freilich am Ende zählte, war der Erfolg; ob es nämlich gelang, auf der Spur der spekulativen Konzepte zu neuen experimentellen Entdeckungen oder überzeugenden empirischen Theorien zu gelangen. Man nahm das, was weiterhalf. Dass zwischen der den Geist betonenden romantischen Naturphilosophie und dem Materialismus aus Sicht der Philosophen und der Philosophiehistoriker ein Abgrund klafft, spielt dabei eine geringe Rolle. Für die Interpretation des Sauerstoffs und auch des Ozons waren sowohl die materialistische Metaphysik wie auch die ihr entgegengesetzte romantische Naturphilosophie wichtig: Das zeigt, dass auch in der Geschichte der Wissenschaften eine gewisse Polarität belebend wirkt.

Sowohl der Sauerstoff wie auch das Ozon inspirierten weiterhin nicht nur die Wissenschaft, sondern auch die Öffentlichkeit. Womöglich nicht zuletzt aufgrund ihrer Unsichtbarkeit waren beide Gegenstände geeignet, nicht nur das nüchterne Denken, sondern auch die Fantasie zu beschäftigen. Man kann sagen, dass der Forscher Schönbein nicht nur das Ozon entdeckte, sondern auch den Ozondiskurs initiierte, der offensichtlich sehr eng mit dem älteren Sauerstoffdiskurs zusammenhing und zusammenhängt. Beide Diskurse sind heute noch sehr lebendig und tragen immer noch einiges von den ursprünglichen Prägungen in sich.

## ANMERKUNGEN

- 1 Neben der Schreibweise ›dephlogisticirte Luft‹ ist in wissenschaftsgeschichtlichen Untersuchungen auch die modernisierte Schreibweise ›dephlogistisierter‹ sowie ›dephlogistierte‹ Luft üblich. Die hier gewählte Schreibweise trägt noch, wie einen Zopf, eine Andeutung der ursprünglich lateinischen Bezeichnung ›aer dephlogisticatus‹ in sich (vgl. Mensching 1787).
- 2 Eine solche Auffassung ist keinesfalls die Außenseitermeinung eines Philosophen, dem es um »wissenschaftlichen Pluralismus« (vgl. Chang 2012, S. 252–298) geht, sondern wird auch von Zunftvertretern geäußert. Der Züricher Quantenchemiker Ulrich Müller-Herold, der sich intensiv mit den Prinzipien chemischer Reaktivität befasst hat (vgl. das klassische Lehrbuch Primas und Müller Herold 1990), sagte mir, dass aus Sicht der modernen Chemie das Phlogiston ein sinnvolles Konzept war, weil man Phlogistonübertragungsreaktionen als Elektronenübertragungsreaktionen interpretieren könne; das Elektron sei aber mit den damaligen Mitteln nicht messbar gewesen.
- 3 Hervorzuheben ist neben Robert Boyle etwa der in Hanau geborene Arzt Franciscus Sylvius de le Boë, der in seiner Abhandlung über die Atmung den Atem mit dem Feuer analogisiert hat (vgl. de le Boë 1681, S. 18). Zu dessen Nachfolgern siehe Lieben (1970 [1935]), S. 20.
- 4 Siehe ergänzend auch Arthur Tröndle (1925) sowie ausführlich zur Entdeckung der Gase Soentgen (2019), S. 151–182. Zur Bedeutung des Gasbegriffs siehe auch Priesner (2011), S. 102 f.
- 5 Über Paracelsus, die Paracelsisten und van Helmont vgl. ausführlich und mit Quellen Soentgen (2021), bes. S. 50–124.
- 6 Zu beachten ist, dass anlautendes g in der niederländischen Aussprache dem ch in cháos recht ähnlich ist (vgl. Pfeiffer 1993, S. 399 f.).
- 7 Das bedeutet, dass der Leib des Menschen, der Mikrokosmos, immer in seinen Korrespondenzen zu einem größeren Leib, dem Makrokosmos, betrachtet wurde. Auf ihn wirkten nicht nur irdische Stoffe und Dinge, sondern auch feinere, astrale Einflüsse. Diese Einflüsse waren geistiger Natur. Auch sonst gab es in der Welt des van Helmont nicht nur materielle Effekte. Krankheiten konnten auch, wie er am Beispiel des Asthmas zeigt, durch Worte ausgelöst werden; sie konnten auch durch Worte geheilt werden; ja, van Helmont hielt auch Heilung durch Gedanken und magische Prozeduren nicht nur für ausnahmsweise möglich, sondern für ganz normal und alltäglich.
- 8 Siehe die Ausführungen zu van Helmont bei von Hartmann (1969).
- 9 Hier wie auch sonst stütze ich mich zum einen auf die Publikationen von Priestley (1774; 1778–1780), aber auch auf Jean-Baptiste Dumas' herausragende, quellennahe und zugleich luzide Darstellung in Dumas (1839), S. 89–109.
- 10 In diesem Abschnitt orientiere ich mich an früheren Studien, siehe Soentgen (2019), S. 166–169.

- 11 Schon Stahl hatte diese Interpretation vorgeschlagen; vgl. Carrier (1984), S. 145 f.
- 12 »So legte ich am 17. August 1771 einen Zweig Minze in ein Luftgefäß, in dem eine Wachskerze erloschen war, und stellte fest, dass am 27. desselben Monats eine andere Kerze darin einwandfrei brannte.« (Übers. v. Verf.)
- 13 »Diese Entdeckungen geben uns die Gewissheit, dass keine Pflanze umsonst wächst, sondern dass von der Eiche des Waldes bis zum Gras des Feldes jede einzelne Pflanze für die Menschheit nützlich ist; wenn auch nicht immer durch irgendeine Tugend ausgezeichnet, so trägt sie doch zu dem Ganzen bei, das unsere Atmosphäre reinigt und läutert. Darin arbeiten die duftende Rose und der tödliche Nachtschatten zusammen; auch das Kraut und die Wälder, die in den entlegensten und unbewohnten Gegenden gedeihen, sind für uns und wir für sie nützlich, wenn man bedenkt, wie ständig die Winde ihnen unsere verdorbene Luft zuführen, zu unserer Erleichterung und zu ihrer Ernährung.« (Übers. v. Verf.)
- 14 Vgl. auch darauf aufbauend von Brandes (1818).
- 15 In der Broschüre (Girtanner 1791) finden sich alle heute gültigen Namen, soweit sie schon in der französischen Nomenklatur vorkommen; insbesondere gehen die Bezeichnungen Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Kohlenstoff auf diese kleine Schrift zurück (dort, S. 11).
- 16 Keine andere Episode der Wissenschaftsgeschichte wurde so oft untersucht. Siehe all seine neueren Studien (Roberts 1992).
- 17 Man sieht gut den »geistreichen Trotz im Gesicht« (zit. n. Fischer 1923, S. 70), den Caroline Schlegel, die nachmalige Caroline Schelling, in einem Brief an ihre Tochter beschrieb.
- 18 »They [the ecologists – JS] see a biosphere in which life is driven by the energy of the sun. Green plants are staked out under that sun in every part of the earth, that is moist, warm, or nutrient-rich enough to let them live, using solar energy to drive a chemical synthesis of carbohydrate fuels. The rest of life (with the exception of remarkable chemists among the bacteria) persists as a tax on the fuel hoards that the green plants make. Animals eat plants, fungi and bacteria rot plant corpses. All give off heat, so that the energy once trapped from the sun by green plants is radiated back to outer space. Elegant in its simplicity is this ecologist's overview of how the world works.« (Colinvaux 1993, S. 1)
- 19 Weitere Aspekte siehe Nolte (1999), S. 113 f.
- 20 Zur dynamischen Atomistik Schellings siehe übersichtlich Fischer (1923).
- 21 Obwohl Schönbein sich hier so vehement von seiner Zeit absetzt, war er doch in anderer Beziehung, wie nicht anders zu erwarten, ganz Kind seiner Zeit. So behauptete er etwa, dass es die »natürliche Überlegenheit seines Geistes« – in Verbindung mit dem Schießpulver wohlgemerkt – gewesen sei, die dem europäischen Menschen die Herrschaft über die restliche Welt verschafft habe. Siehe Schönbein (1855), S. 23. Auch den romantisch gestimmten Chemiker Schönbein sollte man also nicht romantisieren, sondern historisch kontextualisieren.

- 22 Vgl. Kahlbaum und Schaer (1901), S. 7. Kahlbaum moniert, dass das heute gebräuchliche Wort *Ozón* aufgrund dieser Etymologie eigentlich *Ózon* ausgesprochen werden müsste. Die eigentliche ›Taufe‹ des Stoffes fand zwischen dem 10. und 27. April 1839 statt (vgl. ebd., S. 8).
- 23 Schönbein spricht sogar von dem Vorbild schlechthin für alle chemischen Verbindungen und Trennungen, siehe den Brief an Liebig vom 5. September 1853 in Kahlbaum und Thon (1900), S. 14. Dies ist jedoch übertrieben, es gibt noch einige andere Typen chemischer Reaktionen.
- 24 Die Schrift liegt in einer von Lothar Meyer veranlassten und herausgegebenen deutschen Übersetzung vor, vgl. Meyer (1913 [1858]). Eine ausführlich kommentierte Neuausgabe des *Sunto* hat Luigi Cerrutti (1991) herausgegeben. Zu Avogadro und Cannizzaro vgl. quellennah: Califano (2010), S. 299–312.
- 25 Die Exponente der chemischen Formeln wurden im 19. Jahrhundert zunächst hochgestellt, die von Justus von Liebig eingeführten tiefgestellten Exponenten setzten sich erst allmählich durch (vgl. Soentgen 2019, S. 171).
- 26 Siehe Clausius (1869); darin weitere Verweise.

## LITERATUR

- Arrhenius, S. (1907): *Das Werden der Welten*, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.
- Bergman, T. (1777): Vorbericht, in: Carl Wilhelm Scheele: *Chemische Abhandlung von der Luft und dem Feuer*, Upsala/Leipzig: Magn. Swederus, S. 1–16.
- Berthelot, M. (1890): *La révolution chimique: Lavoisier. Ouvrage suivi de notices et extraits des registres inédits de laboratoire de Lavoisier*, Paris: Félix Alcan, Ancienne Librairie Germer Baillière et Cie.
- Boë, F. S. de le (1681): *Opera Medica*, Genf: De Tourne.
- Bradley, J. (1990): *Cannizzaros Methode: die Schlüssel zur modernen Chemie*. Bad Salzdetfurth: Franzbecker.
- Brandes, R. (1818): Versuch einer deutschen chemischen Benennung der in die Chemie gehörigen Körper, in: *Neues Journal der Pharmacie für Ärzte, Apotheker und Chemiker*, Bd. 2, S. 1–21.
- Califano, S. (2010): *Storia della chimica*, Vol. 1, Dall'alchimia alla chimica del XIX secolo, Turin: Bollati Boringhieri.
- Cannizzaro, S. (1913 [1858]): *Abriß eines Lehrganges der Theoretischen Chemie*, Vorgetragen an der K. Universität Genua von Prof. S. Cannizzaro, 2. Aufl., übers. und hrsg. v. Lothar Meyer, Leipzig: Verlag von W. Engelmann.
- Carrier, M. (1984): *Atome und Kräfte: Die Entwicklung des Atomismus der Affinitätstheorie im 18. Jahrhundert und die Methodologie Imre Lakatos'*, Dissertation: Westfälische Wilhelms-Universität zu Münster.

- Cerrutti, L. (1991): Stanislao Cannizzaro: Sunto di un corso di filosofia chimica, Commento e nota storica di Luigi Cerrutti, Palermo: Sellerio editore.
- Chang, H. (2012): Is Water  $H_2O$ ? Evidence, Realism and Pluralism, Heidelberg/London/New York: Springer.
- Clausius, R. (1869): Zur Geschichte des Ozon, in: *Annalen der Physik*, Bd. 212, 1, S. 102–105.
- Colinvaux, P. (1993): *Ecology 2*, New York: J. Wiley.
- Condillac, E. B. de (1959): Die Logik oder die Anfänge der Kunst des Denkens, in: G. Klaus (Hrsg.), Étienne Bonnot de Condillac: Die Logik/Die Sprache des Rechnens, übers. v. E. Salewski, Berlin: Akademie-Verlag.
- Dumas, J. (1839): Die Philosophie der Chemie. Vorlesungen, gehalten im Collège de France, Berlin: C. G. Lüderitz.
- Dumas, J.-B. / Boussignault, J.-B. (1844): *Essai de statique chimique des êtres organisés*, Paris: Librairie de Fortin, Masson et Cie.
- Färber, E. (1927): Wärmestoff und Sauerstoff, in: Ruska, J. (Hrsg.): *Studien zur Geschichte der Chemie. Festgabe für Edmund O. v. Lippmann zum 70. Geburtstag*, Berlin: Springer Verlag, S. 122–131.
- Fischer, K. (1923): Schellings Leben, Werke und Lehre, in: ders., *Geschichte der neuern Philosophie. Gedächtnis-Ausgabe*, Bd. 7, Heidelberg: Carl Winters Universitätsbuchhandlung, S. 386–389.
- Freudenthal, H. (1931): *Das Feuer im Deutschen Glauben und Brauch*, Berlin/Leipzig: de Gruyter.
- Girtanner, C. (1791): *Neue Chemische Nomenklatur für die Deutsche Sprache*, Berlin: Unger.
- Hartmann, E. v. (1969): *Geschichte der Metaphysik*, Bd. 1, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Heydt, I. von (2005): *Rauchen Sie? Verteidigung einer Leidenschaft*, Köln: Dumont.
- Kahlbaum, G.W.A./Schaer, E. (1899): Christian Friedrich Schönbein 1799–1868. Ein Blatt zur Geschichte des 19. Jahrhunderts, Teil 1, in: G.W.A. Kahlbaum (Hrsg.): *Monographien aus der Geschichte der Chemie*, 4. Heft, Leipzig: J. A. Barth.
- Kahlbaum, G.W.A./Schaer, E. (1901): Christian Friedrich Schönbein 1799–1868. Ein Blatt zur Geschichte des 19. Jahrhunderts, Teil 2, in: G.W.A. Kahlbaum (Hrsg.): *Monographien aus der Geschichte der Chemie*, 6. Heft, Leipzig: J. A. Barth.
- Kahlbaum, G.W.A./Thon, E. (1900): Justus von Liebig und Christian Friedrich Schönbein. Briefwechsel 1853–1868, in: G.W.A. Kahlbaum (Hrsg.): *Monographien aus der Geschichte der Chemie*, 5. Heft, Leipzig: J. A. Barth.
- Lange, F. A. (1877): *Geschichte des Materialismus und Kritik seiner Bedeutung in der Gegenwart*. Erstes Buch: *Geschichte des Materialismus bis auf Kant*, Iserlohn: Baedeker.
- Lavoisier, A. (1862): *Considération sur la nature des acides*, in: *Œuvres de Lavoisier*, Bd. II, Paris: Imprimerie Impériale, S. 248–260.

- Lieben, F. (1970 [1935]): *Geschichte der Physiologischen Chemie*, Hildesheim / New York: Georg Olms.
- Lovelock, J. (1984 [1979]): *Unsere Erde wird überleben. Gaia. Eine optimistische Ökologie*. München: W. Heyne.
- Mensching, J. H. (1787): *De Aeris Fixi Ac Dephlogisticati In Medicina Usu, Dissertatio Inauguralis Physico-Medica Quam Illustris Medicorum Ordinis Consensu Et Auctoritate Pro Gradu Doctoris Medicinae Ac Chirurgiae Publice Ventilabit*, Göttingen: Barmerier.
- Morveau, L.-B. G. de / Lavoisier, A. L. / Berthollet, C.-L. / Fourcroy, A.-F. de / Hassenfratz, J. H. / Adet, P.-A. / Meidinger, K. (1793): *Methode der chemischen Nomenclatur für das antiphlogistische System*, übers. v. K. Meidinger, Wien: C.F. Wappler.
- Meier-Oeser, St. (1997): *Die Spur des Zeichens. Das Zeichen und seine Funktion in der Philosophie des Mittelalters und der frühen Neuzeit*, Berlin/New York: De Gruyter.
- Mutschler, H.-D. (1990): *Spekulative und empirische Physik: Aktualität und Grenzen der Naturphilosophie Schellings (= Münchener philosophische Studien, N.F., Bd. 5)*, Stuttgart: Kohlhammer.
- Nolte, P. (1999): *Ein Leben für die Chemie. 200 Jahre Christian Friedrich Schönbein 1799–1999, Bd. 5*, Metzingen: Metzinger Heimatblätter.
- Oersted, H. C. (1814): *Versuch einer allen Skandinavisch-Germanischen Sprachen gemeinschaftlichen chemischen Nomenclatur*, in: *Journal für Chemie und Physik*, Bd. XII, S. 113–154.
- Oken, L. (1843): *Lehrbuch der Naturphilosophie*, 3. Aufl., Zürich: Verlag v. F. Schulthess.
- Paracelsus, T. (1965): *Von der Bergsucht*, in: *Theophrastus Paracelsus Werke*, besorgt von W.-E. Peuckert, Bd. II, *Medizinische Schriften*, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 284–362.
- Pfeiffer, W. (1993): *Etymologisches Wörterbuch des Deutschen*, Berlin: Akademie Verlag.
- Poirier, J.-P. (1998): *Lavoisier: Chemist, Biologist, Economist*, Philadelphia: University of Pennsylvania Press.
- Priesner, C. (2011): *Geschichte der Alchemie*, München: Beck.
- Primas, H. / Müller-Herold, U. (1990): *Elementare Quantenchemie*, Stuttgart: Teubner.
- Priestley, J. (1774): *Experiments and Observations on Different Kinds of Air*, London: J. Johnson.
- Priestley, J. (1778–1780 [1772–1774]): *Versuche und Beobachtungen über verschiedene Gattungen der Luft*, Bd. I und II, übers. v. C. Ludwig, Wien/Leipzig: Weygand.
- Pringle, J. (1783 [1773]): *A discourse on the different kinds of air, delivered at the anniversary meeting of the Royal Society, November 30, 1773*, in: A. Kippis (Hrsg.), *Six discourses, delivered by Sir John Pringle*, London: Royal Society.

- Roberts, L. (1992): Condillac, Lavoisier, and the Instrumentalization of Science, in: *The Eighteenth Century* 3 (33), S. 252–271.
- Sarasin, Ph. (2011): *Was ist Wissenschafts-geschichte?*, in: Erhart, W./Bachleitner, N./Begemann, C./Hübinger, G. (Hrsg.): *Internationales Archiv für Sozialgeschichte der deutschen Literatur*, Bd. 36, Nr. 1, Berlin/Boston: De Gruyter, S. 159–172.
- Scheele, C. W. (1777): *Chemische Abhandlung von der Luft und dem Feuer*, Upsala/Leipzig: Magn. Swederus.
- Schelling, F. W. J. (1799): *Erster Entwurf eines Systems der Naturphilosophie zum Behuf seiner Vorlesungen*, Jena/Leipzig: bey C. E. Gabler.
- Schelling, F. W. J. (1803): *Ideen zu einer Philosophie der Natur. Als Einleitung in das Studium dieser Wissenschaft*, 2. Aufl. Landshut: bei P. Krüll.
- Schönbein, C. F. (1855): *Menschen und Dinge. Mittheilungen aus dem Reisetagebuch eines deutschen Naturforschers*, Stuttgart: Besser.
- Schönbein, C. F. (1861): *Ueber die nächste Phase der Entwicklung der Chemie*, in: *Album von Combe-Varin zur Erinnerung an Theodor Parker und Hans-Lorenz Küchler*, Zürich: Schnabelitzsche Buchhandlung 1861, S. 297–308.
- Soentgen, J. (2019): *Konfliktstoffe: Über Kohlendioxid, Heroin und andere strittige Substanzen*, München: oekom.
- Soentgen, J. (2021): *Pakt mit dem Feuer. Philosophie eines weltverändernden Bundes*, Berlin: Matthes und Seitz.
- Tröndle, A. (1925): *Geschichte des Atmungs- und Ernährungsproblems bei den Pflanzen*, Zürich/Leipzig: Orell Füßli.
- Vernadskij, W. (1930): *Geochemie in ausgewählten Kapiteln*, übers. v. E. Kordes, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.
- Wolff, S. L. (1995): *Clausius' Weg zur kinetischen Gastheorie*, in: *Sudhoffs Archiv*, Bd. 79, S. 54–72.