

Erscheint in: : Pierre Leich (ed.), *Leitfossilien naturwissenschaftlichen Denkens*, Würzburg: Königshausen & Neumann

Antoine L. Lavoisier und die Chemische Revolution

Martin Carrier

1. Lavoisier und die Entwicklung der Chemie

Antoine Laurent Lavoisier (1743–1794) ist der Urheber der Chemischen Revolution. Unter dem Einfluss seines Werks hat sich die Chemie der inhaltlichen Beschaffenheit und dem methodischen Zugang nach grundlegend gewandelt. Lavoisiers Arbeiten erschließen sich vergleichsweise leicht dem heutigen Leser, während die Abhandlungen der alten Chemie ohne langwierige Erläuterungen kaum zugänglich sind. Von der Antike an bildeten die sog. *Prinzipien* den Angelpunkt chemischen Denkens. Prinzipien sind Träger allgemeiner Eigenschaften wie Festigkeit, Flüchtigkeit oder Brennbarkeit. Die Eigenschaften von Stoffen verweisen darauf, welche Prinzipien in ihnen enthalten sind.¹ Bei chemischen Umwandlungsprozessen werden Prinzipien übertragen und ausgetauscht, woraus sich die Änderung der stofflichen Qualitäten der beteiligten Substanzen erklärt. Eine der nachhaltigen Wirkungen der Chemischen Revolution bestand in der Abschaffung der Prinzipien.²

Lavoisiers *Elementare Abhandlung der Chemie* (1789) liest sich nach Anlage und Darstellung wie ein etwas veralteter Vorgänger eines modernen Lehrbuchs. Es werden chemische Elemente vorgestellt, sowie deren Reaktionen und Verbindungen. Analysen und Synthesen werden in systematischem Zusammenhang und in vertrauter Begrifflichkeit präsentiert. In der alten Chemie werden dagegen in einer retrospektiv verwirrenden Weise Stoffe und Eigenschaften miteinander vermengt. Es ist zum Beispiel aus dem Kontext zu erschließen, ob der Ausdruck „Quecksilber“ die betreffende chemische Substanz oder das gleichnamige Prinzip, also die Eigenschaft der Flüchtigkeit bezeichnet und entsprechend auf ganz andere Substanzen Anwendung findet. Zwar haben spätere Einsichten nicht selten Lavoisiers Theorie korrigiert, aber in Begrifflichkeit und Zugangsweise hat sie die Chemie bis in die Gegenwart hinein geprägt.

Inhaltlich besteht Lavoisiers bekannteste Leistung in der Formulierung der Oxidationstheorie der Verbrennung. Danach stellt sich dieser Prozess als Verbindung zwischen dem brennenden

¹ Dabei wurde stets nur eine geringe Zahl von Prinzipien angenommen, jedem von diesen also eine Mehrzahl von Eigenschaften zugeordnet. Die Herausforderung bestand entsprechend darin, die Vielzahl der beobachtbaren Merkmale durch wenige Eigenschaftskombinationen zu erfassen.

² Allerdings entfalten die Prinzipien bei Lavoisier selbst noch eine spürbare Wirksamkeit (s.u. 6). Aber bei den Urhebern des Neuen finden sich in aller Regel noch Residuen des Alten. Galilei blieb lange im Bannkreis der Impetusphysik, und Darwin legte sich auf die Lamarckistische Vererbung erworbener Eigenschaften fest.

Material und dem Sauerstoff der Luft dar. Diese Lehre ersetzte die von Georg Ernst Stahl (1660-1734) um 1700 formulierte Phlogistontheorie, die als eine Spielart der Prinzipienchemie das Prinzip der Brennbarkeit, eben das *Phlogiston*, ins Zentrum rückte. Nach dieser herkömmlichen Vorstellung ist Verbrennung Zerlegung: bei der Verbrennung entweicht Phlogiston aus dem betreffenden Körper, und es bleibt unbrennbare Asche zurück. Feuer und Flamme führen schließlich zweifelsfrei vor Augen, daß etwas den brennenden Körper verläßt. Bei Stahl ist das Phlogiston ein „irdisches Prinzip“, also eine Unterform des Elements Erde; es ist nicht frei darstellbar, aber in öligfettigen Stoffen ebenso wie in Holzkohle und Ruß in besonders starkem Maß enthalten.

Charakteristisch für die Phlogistontheorie ist eine Universalitätsbehauptung des Inhalts, daß sämtliche Verbrennungsprozesse und überdies die sog. Kalzination von Metallen, d.h. deren Rösten zu Metallkalken (ihre „Oxidation“ in modernen Begriffen), als Phlogistonabgabe aufzufassen sind. Nicht allein brennbare Stoffe, auch Metalle weisen sämtlich einen Anteil Phlogiston auf. Für Stahl ist demnach die Kalzination von Blei zu Bleiglätte (PbO) chemisch von gleicher Art wie die Verbrennung von Holzkohle. Daß es sich in beiden Fälle um das gleiche Prinzip handelt, zeigt sich darin, daß Bleiglätte durch Glühen mit Holzkohle wieder in Blei verwandelt werden kann. Dabei wird offenbar das durch die Verbrennung aus der Holzkohle ausgetriebene Phlogiston vom Bleikalk aufgenommen und transformiert dieses in das zugehörige Metall. Der Verbrennung von Nichtmetallen und der Kalzination von Metallen liegt daher einheitlich die Freisetzung von Phlogiston zugrunde.

Seine gegenteilige Ansicht wird für Lavoisier zum Kristallisationskeim einer fundamentalen Umorientierung der Chemie. Lavoisier beschränkt sich dabei keineswegs auf eine neue Auffassung der Verbrennung, sondern schlägt auch eine neuartige Theorie der Säuren vor, derzufolge Sauerstoff wesentlicher und gemeinsamer Bestandteil aller Säuren ist (woran die Bezeichnung bis zum heutigen Tag erinnert). Daneben tritt bei Lavoisier die Ansicht, daß Wasser eine Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff ist und damit (wie zuvor schon die Luft) seine überlieferte Stellung als elementarer Grundstoff verliert. Endlich geht es Lavoisier um die Wärmestofftheorie, derzufolge Wärme eine unwägbare, unzerstörbare Substanz ist, die Verbindungen mit gewöhnlichen Stoffen eingehen kann.

Man sieht, Lavoisier hatte nicht in allem recht. Aber Wahrheit ist ein schwer greifbares Gut. Wissenschaftlicher Erfolg wird eher daran gemessen, daß eine Theorie einer großen Zahl von Befunden auf präzise Weise und in einem einheitlichen Begriffsrahmen Rechnung zu tragen vermag und dabei die wirksamen Kausalfaktoren zutreffend identifiziert. An diesen Maßstäben gemessen war die Oxidationstheorie der alten Lehre weit überlegen.

Lavoisier zeichnete sich durch herausragende Innovationskraft aus, die sich in neuartigen, fruchtbaren Deutungen der von anderen Wissenschaftlern gewonnenen Ergebnisse niederschlug, aber auch in der Konzeption aussagekräftiger Versuche. Seine Stärke lag in der schlüssigen theoretischen Interpretation empirischer Resultate und deren Stützung durch virtuose Experimente und geschickte Gegenproben. Eine seiner wichtigen methodischen Neuerungen war die Berücksichtigung von Gewicht und Volumen der an einer Reaktion beteiligten Substanzen. Zwar war auch zuvor schon in der Chemie auf solche als physikalisch geltenden Verfahren zurückgegriffen worden, aber erst Lavoisier machte von ihnen systematischen Gebrauch. Die Einklang einer Erklärung mit den beobachteten Gewichts- und Volumenverhältnissen wurde zu einem wesentlichen Prüfstein ihrer Korrektheit. Insgesamt prägte Lavoisier die Chemie als Theoretiker durch neue Fragestellungen, neue Begriffsbildungen und neue Erklärungsprinzipien. In dieser Hinsicht gleicht der Urheber der Chemischen Revolution dem Schöpfer der klassischen Mechanik: Lavoisier ist der Newton der Chemie.

2. Akademiker und Steuerpächter: Die frühe Karriere

Prägend für Lavoisiers Lebensweg war der Eintritt ins Collège Mazarin im Jahre 1754. Charakteristisch für diese herausragende Stätte höherer Bildung war der Einschluss der Naturwissenschaften in den Lehrkanon. Die Lektionen in Mathematik und Experimentalphysik beeindruckten den jungen Antoine nachhaltig und verstärkten seine Neigungen zu den empirischen Wissenschaften. Zusätzlich besuchte Lavoisier öffentliche Vorlesungen in der Chemie, die von François Rouelle gehalten wurden. Rouelle war ein begnadeter Lehrer, der mit seinen berühmten Demonstrationen im „Jardin du roi“, einer der führenden Forschungseinrichtungen der Zeit, eine große Zahl später bedeutender Gelehrter (darunter Diderot, d’Holbach und Rousseau) in seinen Bann zog. Auch Lavoisier wurde durch Rouelle für die Chemie gewonnen. Zugleich begründete der auf diese Weise erfahrene Kontrast zwischen begrifflicher Klarheit und deduktivem Aufbau der Physik auf der einen Seite und konfuser Terminologie und unsystematischer Faktizität der Chemie auf der anderen ein Leitmotiv von Lavoisiers Schaffen, nämlich die Chemie durch einen an der Physik orientierten methodischen Zugang zu reformieren. Durch rigoroses Messen und Wiegen sollte die Chemie den Zustand einer bloßen Tatsachensammlung hinter sich lassen; in einer quantitativ strukturierten Chemie würde den Befunden ihr Ort in einem Rahmenwerk theoretischer Grundsätze zugewiesen.

1761 schrieb sich Lavoisier für ein Jurastudium an der Sorbonne ein. Da es kaum Möglichkeiten gab, mit den Wissenschaften sein tägliches Brot zu verdienen, sollte das Recht die Lebensgrundlage Lavoisier sichern. Nach dem Abschluß 1764 gelang es ihm binnen vier Jahren, den Grundstein für eine akademische und eine bürgerliche Karriere zu legen. 1768 nämlich wurde La-

voisier (aufgrund von Arbeiten zur Chemie und Mineralogie) in die 1660 von Ludwig XIV. gegründete *Académie des sciences* gewählt. Diese Mitgliedschaft war eine Position von großem Prestige; sie versprach Aufmerksamkeit und Einfluß. Für den Erfolg im Brotberuf wesentlich – wenn auch letztlich fatal – war Lavoisiers Aufnahme in die *Ferme générale*, die Korporation der Steuerpächter. Diese *Fermiers généraux* trieben die königlichen Abgaben und Zölle von den Untertanen ein und entschädigten sich für ihre Mühen durch einen Aufschlag auf die an die Krone abzuführenden Beträge. Im Laufe der Jahre häufte Lavoisier auf diese Weise ein großes Vermögen an, aus dem er beträchtliche Summen für die Finanzierung seiner Forschungen einsetzte. In den 1780er Jahren zählte sein privates Labor zu den bestausgestatteten Einrichtungen der Epoche. 1771 heiratete Lavoisier Marie Anne Paulze, die 13-jährige Tochter des Hauptsteuerpächters. Obwohl dieser Ehe karrierepolitische Gründe zugrundelagen, wurde sie glücklich. Sie entwickelte sich nicht allein zu einer liebevollen Lebensgemeinschaft, sondern auch zu einer fruchtbaren wissenschaftlichen Zusammenarbeit (Beretta 1999, 8-9, 24, 29).

Die Tätigkeit in der *Ferme* ließ Lavoisier anfangs hinreichend Muße für seine wissenschaftlichen Aktivitäten, und nach einigen anderen Arbeiten wandte er sich 1772 dem Themenkreis von Verbrennung und Kalzination zu. Tatsächlich hatte sich dort gerade eine neue Problemlage ergeben. Die phlogistische Erklärung dieser Phänomene beinhaltete, daß die Asche und der Kalk jeweils leichter sollten als die Ausgangsstoffe; schließlich war einer der Bestandteile entwichen. Für Asche traf dies in der Tat zu, aber einige Metallkalke waren schwerer als die zugehörigen Metalle. Stahl selbst hatte diese Schwierigkeit für die Metalle Blei, Zink und Antimon anerkannt, deren Lösung aber der zukünftigen Forschung überantwortet (Partington 1962, 675). Zu Beginn des Jahres 1772 hatte Louis Bernard Guyton de Morveau (1737–1816) durch umfangreiche eigene Untersuchungen und sorgfältige Analyse der Resultate anderer Chemiker festgestellt, daß das Gewicht der Kalke ausnahmslos höher war als das der Metalle (Guerlac 1961, 124-125, 131-135). Es handelte sich also um einen universellen Effekt, der nicht mehr auf Besonderheiten des jeweiligen Einzelfalls zurückgeführt werden konnte.

Am 1. November 1772 hinterlegte Lavoisier beim Sekretär der königlichen Akademie der Wissenschaften eine versiegelte Note, in welcher er eine wichtige Entdeckung anzeigte. Die Form der Hinterlegung wurde gewählt, um sich einerseits Prioritätsansprüche zu sichern und um sich andererseits mit einer möglicherweise irrtümlichen Behauptung nicht öffentlich zu exponieren. Versiegelte Noten kann man widrigenfalls wieder stillschweigend zurücknehmen. In dieser Note hieß es: „Vor ungefähr acht Tagen habe ich entdeckt, daß Schwefel bei der Verbrennung keineswegs Gewicht verliert, sondern im Gegenteil Gewicht gewinnt [...]; das gleiche tritt beim Phosphor auf: Diese Gewichtszunahme stammt aus einer beträchtlichen Menge Luft, die während der

Verbrennung fixiert wird und die sich mit den Dämpfen verbindet. Diese Entdeckung [...] hat mich zu der Annahme geführt, daß das, was man bei der Verbrennung von Schwefel und Phosphor beobachtet, auch bei allen anderen Körpern auftreten könnte, deren Gewicht also bei der Verbrennung und Kalzination zunimmt“ (Lavoisier 1774, 103).

Lavoisiers Experimente übertrugen also Guytons Resultate für Metallkalke auf Verbrennungsprodukte. Da Kalzination und Verbrennung auf phlogistischer Grundlage von gleicher Art waren, handelte es sich um eine naheliegende Verallgemeinerung. Aber zum ersten Mal wurden nicht allein die festen Verbrennungsrückstände in Betracht gezogen, die Asche eben, sondern auch die flüchtigen Produkte aufgefangen und berücksichtigt. Auf diese Weise gelang Lavoisier die empirische Bestätigung dieser Vermutung und setzte damit einen Prozeß in Gang, der binnen zweier Jahrzehnte zur Verbannung des Phlogiston aus der Chemie führte.

3. Die Evolution der Verbrennungstheorie

Die Gewichtszunahme bei Verbrennung und Kalzination soll also aus der Bindung von Luft stammen. Damit setzt sich Lavoisier in Gegensatz zu einem weit verbreiteten Erklärungsansatz Robert Bolyes (1627–1691), der die Gewichtszunahme von Metallkalke auf die Bindung von Feuerteilchen zurückgeführt hatte. Diese sind fein genug, um die Wandungen geschlossener Gefäße zu durchdringen; sie treten beim Glühen des Metalls in dieses ein, verbinden sich mit dessen Teilchen und erhöhen auf diese Weise das Gesamtgewicht (Boyle 1772, 726-727). Lavoisier untermauert seine gegenteilige Ansicht durch Kalzinationsexperimente in verschlossenen Gefäßen. Dabei wird Zinn oder Blei in eine Retorte gegeben, diese hermetisch versiegelt und dem Feuer ausgesetzt; es bildet sich der zugehörige Metallkalk. Nach Lavoisiers Ansicht geht dabei die in der Retorte eingeschlossene Luft eine Verbindung mit dem Metall ein. Folglich sollte das Gewicht des Metalls um den Betrag zunehmen, um den das Gewicht der Luft verringert wird, so daß das Gesamtgewicht unverändert bleiben sollte. Nach Boyles Auffassung sollte hingegen das eindringende Feuer das Gewicht der verschlossenen Retorte erhöhen. Lavoisier zeigt, daß unter diesen Umständen keine Gewichtszunahme zu beobachten ist. Vielmehr tritt diese erst bei Öffnen des Gefäßes ein, wenn nämlich die im Kalk gebundene Luft durch Zustrom von außen ersetzt wird. Dabei ist die Gewichtszunahme der Retorte nach dem Öffnen gleich der Gewichtszunahme des Metalls durch die Kalzination, so daß die Aufnahme von Luft der einzige Grund dafür ist, daß der Kalk schwerer ist als das zugehörige Metall (Lavoisier 1774/1777, 105-113, 118-119).

Mit diesem einfachen und doch aussagekräftigen Experiment war es Lavoisier gelungen, die Theorie Boyles in Zweifel zu ziehen und die eigenen, entgegengesetzten Auffassungen zu bestätigen. Ein Experiment, das an solchen theoretischen Scheidewegen eine Richtung weist, heißt bei Francis Bacon „Experimentum crucis“: Zwei unterschiedliche Voraussetzungen haben gegenteili-

ge Konsequenzen, von denen sich eine in der Erfahrung bestätigt findet, die andere aber nicht. Für Bacon ist dann die Streitfrage entschieden (1620, § II.36). Zwar hat die wissenschaftsphilosophische Diskussion klar werden lassen, daß Bacon die Schlüssigkeit solcher „Instanzen des Kreuzwegs“ überschätzte, aber signifikante Befunde stellen sie in jedem Fall bereit. Tatsächlich führen Beispiele wie dieses Lavoisiers Fähigkeit vor Augen, Erklärungsalternativen zuzuspitzen und sie dem empirischen Urteil zu unterwerfen. Niemand zuvor war auf den Gedanken verfallen zu prüfen, ob bei der Kalzination in verschlossenen Gefäßen eine Änderung des Gewichts auftritt. Für Lavoisier wird dieses Nullresultat zu einer Stütze der neuen Verbrennungstheorie.

Andererseits zeigten diese Untersuchungen zur Kalzination, ebenso wie andere zur Verbrennung, daß es nicht die Luft zur Gänze ist, die sich mit dem betreffenden Stoff verbindet. Nach Messungen von Lavoisier und anderen kommen diese Prozesse nämlich zum Stillstand, wenn zwischen einem Sechstel und einem Viertel der verfügbaren Luft aufgezehrt ist. Diese Feststellung bildet die Grundlage für das nachfolgende Forschungsprogramm Lavoisiers, für die Frage nämlich, welcher Teil der Luft oder was für eine Art von Luft diese Verbindung eingeht. Hintergrund dieser Frage ist die neue pneumatische Chemie, die sich seit Mitte des 18. Jahrhunderts vor allem in England herausgebildet hatte. Eine Schlüsselstellung nimmt Joseph Black (1728–1799) ein, der 1756 aus „Magnesia alba“ (Magnesiumcarbonat, MgCO_3) eine besondere Art von Luft freigesetzt hatte. Diese Luftart war offenbar zuvor in dem Stoff gebunden gewesen und wurde daher „fixe Luft“ (*fixed air*) genannt; modern gesprochen handelt es sich um Kohlendioxid (CO_2). Wesentlich war Blacks Auffassung, daß fixe Luft von qualitativ anderer Beschaffenheit ist als gewöhnliche Luft. Die auch zuvor schon registrierten Unterschiede zwischen Gasen waren stets auf Beimengungen anderer Stoffe zur gewöhnlichen Luft zurückgeführt worden. Blacks Entdeckung eröffnete den neuen Forschungszweig des Studiums der Luftarten, der bald zur Darstellung weiterer Gase (wie Stickoxid oder Wasserstoff) führte.

Bei der Reduktion von Metallkalken wird fixe Luft gebildet. Aber dieser Umstand stellt noch nicht außer Zweifel, daß wirklich fixe Luft im Kalk gebunden ist. Die Reduktion verlangt nämlich das Glühen mit einem Phlogistonspender wie Holzkohle (s.o. 1), so daß die freigesetzte fixe Luft auch eine Verbindung des gesuchten Gases mit einem Bestandteil der Holzkohle sein könnte. Dafür sprach, daß fixe Luft die Verbrennung nicht unterhält (was schlecht zu der Auffassung paßt, diese werde bei Verbrennung und Kalzination gebunden). Statt dessen favorisierte Lavoisier zunächst die These, bei der Verbrennung und Kalzination werde gewöhnliche Luft gebunden. Allerdings paßte dazu nicht die bemerkenswerte Entdeckung des Pariser Apothekers Pierre Bayen im Februar 1774, daß das „rote Präzipitat“ oder der rote Quecksilberkalk (Quecksilberoxid, HgO) auch durch bloßes Erhitzen und damit ohne Holzkohle zu metallischem Quecksilber redu-

ziert werden kann. Hier fehlt entsprechend der störende Einfluss eines zusätzlichen Materials, so daß sich die Beschaffenheit des gebundenen Gases direkt ermitteln lassen sollte. Bayens Resultat war, daß es sich um fixe Luft handelte (Conant 1950, 18; Ströker 1982, 227). Aus dieser verwirrenden Situation führte erst Priestleys Entdeckung des Sauerstoffs heraus.

Joseph Priestley (1733–1804) war der Ausbildung nach Theologe und als Prediger für unterschiedliche freikirchliche Gemeinden tätig. Daneben fühlte er sich zu verschiedenen Zweigen der Naturlehre hingezogen und konnte dieser Neigung aufgrund von Zuwendungen durch Josiah Wegwood, der im Keramikgeschäft zu Wohlstand gelangt war, tatsächlich nachgehen. Priestleys wissenschaftlicher Stil war demjenigen Lavoisiers gerade entgegengesetzt. Lagen Lavoisiers Stärken bei der theoretischen Interpretation, so war Priestleys Werk durch das rastlose Sammeln von Befunden gekennzeichnet. Von einem Baconschen Verständnis der wissenschaftlichen Methode geprägt, strebte Priestley danach, vorurteilsfrei registrierte Tatsachen in großer Zahl anzuhäufen. Die empirischen Verdienste, die sich Priestley dabei unzweifelhaft erwarb, gingen mit einer theoretischen Schwäche einher, die ihn schnell wechselnde und oft genug widersprüchliche Ansichten vertreten ließ. Eine Invariante allerdings blieb für sein Denken charakteristisch: er verteidigte das Phlogiston bis zum bitteren Ende.

Jedenfalls wandte sich Priestley 1770 der neuen Chemie der Gase zu und befaßte sich im Sommer 1774 mit Bayens Entdeckung. Dabei stellte Priestley schnell fest, daß es sich bei dem freigesetzten Gas keineswegs um Kohlendioxid handelte; statt dessen identifizierte er es als Lachgas (Distickstoffoxid). Im Oktober 1774 reist Priestley nach Paris, trifft dort unter anderem Lavoisier und berichtet ihm von diesen Ergebnissen. Anscheinend unter dem Einfluss dieses Berichts beginnt Lavoisier im November dieses Jahres ebenfalls Experimente mit dem roten Präzipitat. Unabhängig voneinander korrigieren beide Priestleys frühere Resultate und gelangen übereinstimmend zu dem Schluß, das freigesetzte Gas sei gewöhnliche Luft. Der Grund für dieses Fehltrail bestand darin, daß sich beide unabhängig voneinander durch eine bestimmte Indikatorreaktion in die Irre führen ließen (Conant 1950, 18-20). Im März 1775 stellt Priestley seinen Irrtum fest. Er bemerkt, daß sich die Eigenschaften der vom roten Präzipitat abgegebenen Substanz deutlich von gewöhnlicher Luft unterscheiden: eine Kerze brennt mit besonders heller Flamme, und Tiere können in einem gegebenen Volumen des Gases erheblich länger atmen. Damit gab Priestley eine Methode an, mit der man das Gas rein darstellen konnte und identifizierte es als eine spezifische Luftart. Der Sauerstoff war entdeckt.

Allerdings unterschied sich Priestleys Auffassung von seiner Entdeckung wesentlich von Lavoisiers späterer Sicht. Dabei ist zu beachten, auf welche Weise die Phlogistontheorie der Tatsache Rechnung trug, daß Verbrennung und Kalzination in verschlossenen Gefäßen nach einiger

Zeit zum Stillstand kommen. Die zunehmende Ansammlung von Phlogiston über dem betreffenden Stoff sollte nämlich den weiteren Austritt von Phlogiston blockieren. Die Rolle der Luft bei der Verbrennung und Kalzination bestand entsprechend darin, das austretende Phlogiston wegzuführen. Laufen diese Prozesse aber in verschlossenen Gefäßen ab, so wird die Luft mit Phlogiston übersättigt und kann die ihr zugeordnete Rolle nicht mehr übernehmen. Priestleys neues Gas unterhielt die Verbrennung besser und länger als gewöhnliche Luft und war daher in höherem Maße als diese fähig, Phlogiston aufzunehmen. Das bedeutete aber nichts anderes, als daß sie zuvor weniger Phlogiston enthielt. Im Selbstverständnis hatte Priestley also *dephlogistizierte Luft* entdeckt (Conant 1950, 46; Ströker 1982, 209).

Lavoisier hielt dagegen zunächst an dem Irrtum fest, das betreffende Gas sei gewöhnliche Luft. In der ersten Fassung des sog. Oster-Memorandums vom April 1775 kam Lavoisier zu dem Schluß, daß das Gas, das bei Erhitzen aus dem roten Präzipitat entweicht, „die Luft selbst ist, ganz, ohne Änderung, ohne Zerlegung“, wenn auch „noch reiner“ als die atmosphärische Luft (Lavoisier, in: Conant 1950, 23). Im November 1775 wies Priestley Lavoisier darauf hin, das fragliche Gas sei tatsächlich von gewöhnlicher Luft verschieden; es handele sich vielmehr um eine spezifische Luftart, eben dephlogistizierte Luft (Conant 1950, 32-33). Ab dem Frühjahr 1776 übernahm Lavoisier wieder die Führung und gewann zunehmend Klarheit über die wahre Beschaffenheit von Priestleys Luftart. Lavoisier faßte nun Luft als Zusammensetzung zweier qualitativ verschiedener Gase auf, der „reinen Luft“ (*air pur*) oder „Lebensluft“ (*air vital*) und der „schädlichen Luft“ (*air méphitique*) oder dem „Stickstoff“ (*azote*). Priestley hingegen akzeptierte niemals, daß seine dephlogistizierte Luft eine einfache Substanz und Bestandteil der Atmosphäre ist.

In der 1778 veröffentlichten korrigierten Fassung des Oster-Memorandums hat Lavoisiers neue Theorie feste Gestalt angenommen. Die Kalzination beinhaltet die Verbindung des Metalls mit der reinen Luft der Atmosphäre. Wird ein Kalk mit Holzkohle reduziert, so verbindet sich die freigesetzte reine Luft mit der Holzkohle zu fixer Luft (Lavoisier 1775/1778, 127-128). Gleiches gilt sinngemäß auch für die Verbrennung; die Kalzination ist nichts als eine langsame Verbrennung (Lavoisier 1789, 65). Ebenso beinhaltet die Atmung eine Verbindung mit reiner Luft; Atmung ist von chemisch gleicher Art wie Verbrennung und Kalzination.

4. Die Erweiterung: Aggregatzustände und Säuren

Die Vorstellung der Bindung eines Gases bei der Kalzination sah sich dem Einwand ausgesetzt, es sei schlechterdings ausgeschlossen, eine expansive Substanz auf den kleinen Raum einer Metallprobe zusammenzupressen. Dies erfordere gewaltige Drücke, die bei gewöhnlichen Kalzinationsversuchen nicht vorlägen (Partington 1962, 607). Lavoisier gibt eine chemische Antwort auf diese physikalische Herausforderung und formuliert die erste konsequente Wärmestofftheorie. Wäh-

rend zuvor die Annahme vorherrschte, Wärme sei innere Bewegung des betreffenden Körpers, betrachtet Lavoisier Wärme als stoffliche Substanz. Die Anhäufung von Wärmestoff in einem Körper ist die physikalische Basis der Wärmeempfindung.³ Aufgrund ihrer stofflichen Beschaffenheit ist die Wärme unzerstörbar; für sie gilt also ein Erhaltungssatz. Die Teile oder Teilchen des Wärmestoffs stoßen einander ab. Diese Abstoßung manifestiert sich in der thermischen Ausdehnung der Körper und führt zu einem Gleichverteilungsstreben des Wärmestoffs, das sich im Ausgleich von Temperaturunterschieden niederschlägt.

Von besonderem Belang ist der Umstand, daß Wärme als stoffliche Substanz auch mit chemischen Eigenschaften ausgestattet ist. Der Wärmestoff geht also Verbindungen ein, in denen seine Eigenschaften (wie bei anderen Stoffen auch) verändert erscheinen. Insbesondere äußert sich gebundener Wärmestoff nicht mehr als Wärme. Dagegen behält er seine expansive Kraft bei und teilt sie den Materialien mit, mit denen er eine Verbindung eingeht. Diese innere Elastizität tritt bei den Gasen markant zutage. Gase sind demnach chemische Verbindungen zwischen einer jeweils spezifischen Basis und Wärmestoff. Bringt man Wasser zum Kochen, so erhöht sich die Temperatur trotz anhaltender Wärmezufuhr nicht; statt dessen bildet sich gasförmiger Wasserdampf. Für die Wärmestofftheorie wird hierbei die zugeführte Wärme vom Wasser gebunden und bleibt aus diesem Grunde ohne Auswirkung auf die Temperatur, während zugleich die abstoßenden Kräfte innerhalb des Wärmestoffs die Teile des Dampfs auseinandertreiben. Das Wasser wird zum Gas.

Die chemische Bindung reiner Luft bei der Verbrennung und Kalzination stellt sich als Umkehrung dieses Prozesses dar. Gebundener Wärmestoff wird abgespalten, was mit einer Temperaturerhöhung verbunden ist (wie sie ja bei solchen Reaktionen typischerweise beobachtet wird). Zugleich verliert die reine Luft dadurch ihre Elastizität und verkleinert folglich ihren Rauminhalt ohne physikalische Kompression. Eine wichtige allgemeine Folge dieser Konzeption ist, daß im Grundsatz sämtliche Stoffe durch Wärmezufuhr in den gasförmigen Zustand überführt werden können. Zuvor galten gasförmige Eigenschaften als Besonderheit spezifischer Stoffe; einige Materialien sind ihrer Natur nach gasförmig, andere nicht. Durch Lavoisiers Wärmestofftheorie wird Gasförmigkeit zu einem allgemeinen Materiezustand, einem Aggregatzustand (Lavoisier 1789, 17–31).

Ausgangspunkt von Lavoisiers Säuretheorie sind die Beobachtungen, daß eine Zahl von Verbrennungsprodukten bei Einleitung in Wasser sauer reagieren (etwa Phosphor, Schwefel und Kohle) und daß umgekehrt Säuren reine Luft enthalten (etwa Salpetersäure, Kohlensäure, Schwe-

³ Zwar hatte bereits Hermann Boerhaave (1668–1738) die Idee eines Wärmestoffs vorgetragen, jedoch dessen Bewegungen für die fühlbare und meßbare Wärme verantwortlich gemacht. Lavoisier ist hier konsequenter und weist die thermische Relevanz sämtlicher innerer Bewegungen ab.

felsäure und Phosphorsäure). Lavoisier sieht sich dadurch zu der Vermutung berechtigt, daß Sauerstoff für die sauren Eigenschaften verantwortlich ist. Sauerstoff (*oxygène*) ist das säurebildende Prinzip (wie die Bezeichnung bis heute anzeigt). „Man sieht, daß Sauerstoff das allen [Säuren] gemeinsame Prinzip ist und daß er ihre sauren Eigenschaften ausmacht. Die Säuren unterscheiden sich dann durch die Natur der gesäuerten Substanz voneinander“ (Lavoisier 1789, 57). Jede Säure ist also die Verbindung eines besonderen Grundstoffs mit Sauerstoff.

Diese Vermutung wird durch den weiteren Befund untermauert, daß die Stärke der Säuren mit ihrem Sauerstoffanteil verknüpft ist. Dies ist augenfällig bei salpetriger Säure und Salpetersäure sowie bei schwefliger Säure und Schwefelsäure. Die stärkere Säure enthält jeweils mehr Sauerstoff. Zugleich erklärt dieser Zusammenhang, daß Verbindungen mit geringem Sauerstoffanteil wie die Metallkalke nicht erkennbar sauer reagieren (Lavoisier 1777/1779, 249; Lavoisier 1789, 50-57, 61-67).

Allerdings gelang es Lavoisier trotz intensiver Bemühungen nicht, auch in der Salzsäure (HCl) Sauerstoff nachzuweisen. In der Sache unbeirrt führte Lavoisier diesen Fehlschlag darauf zurück, daß die Bindung zwischen dem Grundstoff der Salzsäure und dem Sauerstoff besonders fest ist, so daß letzterer aus der Verbindung nur schwer zu isolieren ist (Lavoisier 1789, 61). Eine interessante Verwicklung ergab sich durch eine Entdeckung des schwedischen Apothekers Carl Wilhelm Scheele (1742–1786) aus dem Jahre 1774. Scheele hatte Salzsäure mit Braunstein reagieren lassen und ein grünliches, stechend riechendes Gas (Chlor, Cl₂) unter gleichzeitiger Reduktion des Kalks erhalten ($\text{MnO}_2 + 4\text{HCl} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{MnCl}_2 + \text{Cl}_2$). In phlogistischem Rahmen interpretierte Scheele die Reduktion des Braunstein als Phlogistonaufnahme und identifizierte naheliegenderweise die Salzsäure als Phlogistonquelle. Bei dem entweichenden Gas sollte es sich folglich um dephlogistizierte Salzsäure handeln.

Lavoisier deutete generell Phlogistonabgabe in Sauerstoffaufnahme um und schloß daher, daß die Salzsäure Sauerstoff aus dem Braunstein freigesetzt und absorbiert hatte. Das entstandene Gas galt ihm somit als oxidierte Salzsäure. Dann aber sollte es auch gelingen, den Sauerstoff aus dieser zu isolieren. Claude Louis Berthollet (1748–1822) setzte daraufhin 1785 eine wässrige Lösung oxidiertes Salzsäure dem Sonnenlicht aus und fand, daß aus ihr Sauerstoffbläschen entweichen, während sich die Lösung gleichzeitig in gewöhnliche Salzsäure umwandelte (Berthollet 1785, 18-19). Berthollet sah Lavoisiers Sicht glänzend bestätigt: „Diese Experimente sollten alle Zweifel über die Natur der dephlogistizierten Salzsäure zerstreuen; letztere wird offenbar durch Verbindung von Lebensluft mit Salzsäure gebildet“ (Berthollet 1785, 20). Tatsächlich hat hier (blaues oder ultraviolette) Licht das Chlormolekül in zwei Radikale aufgespalten, die mit Wasser

reagieren. Es ist dessen Sauerstoff, der entweicht, nicht derjenige des Chlors ($2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{HCl} + \text{O}_2$).

Die Schwierigkeit ist, daß oxidierte Salzsäure nur überaus schwache saure Eigenschaften besitzt, was Lavoisiers Ansicht zuwiderlief, die Säurestärke steige mit dem Sauerstoffanteil. Als Reaktion kreierte Lavoisier eine besondere Oxidationsstufe, die Stufe der Sauerstoffübersättigung (*oxygéné*), die mit einer geringeren Säurestärke verbunden sein soll (Lavoisier 1789, 61-62).

Obwohl die Säuretheorie nach Lavoisiers Tod mit weiteren Mißerfolgen zu kämpfen hatte, etwa dem Scheitern des Bemühens, Sauerstoff in der Blausäure (HCN) nachzuweisen, blieb sie zunächst weithin akzeptiert. Ihr Ende wurde erst 1810 durch Humphry Davys (1778–1829) vergebliche Versuche zur Freisetzung von Sauerstoff aus der oxidierten Salzsäure eingeläutet. Davy unterwarf Chlor einer Vielzahl von Reaktionen, ohne dabei jemals auf Sauerstoff zu stoßen. Insbesondere erreichte er selbst mit einem im Chlorgas auf elektrischem Wege zur Weißglut erhitzten Kohlestab keinerlei Zerlegung. Davys Schluß war, daß weder im Chlor noch in der Salzsäure Sauerstoff enthalten war, was nicht allein die oxidierte Salzsäure, sondern Lavoisiers Sauerstofftheorie der Säuren insgesamt zugrunderichtete (Partington 1964, 54-55).

5. Cavendishs Experimente und die zusammengesetzte Natur des Wassers

Auch an einer anderen Stelle klappte in Lavoisiers Theorie anfangs eine Erklärungslücke. Sie enthielt nämlich keinerlei überzeugenden Ansatz für ein Verständnis der Herstellung sog. brennbarer Luft (*inflammable air*), dem Wasserstoff (H_2). Henry Cavendish (1731–1810) hatte 1766, also Jahre vor Beginn der Untersuchungen Lavoisiers, eine die Gestalt der späten Phlogistontheorie prägende Entdeckung gemacht; er hatte nämlich das Phlogiston in reiner Form dargestellt. In der prinzipienchemischen Tradition ist Phlogiston ein Eigenschaftsträger und als solcher nicht mit einem konkreten Stoff identisch; die Prinzipien sollten stoffliche Eigenschaften erklären und konnten daher nicht sinnvoll selbst als Stoffe gelten (Llana 1985, 74). Aber schon bei Stahl selbst und noch stärker bei seinen Anhängern im 18. Jahrhundert vermischte sich dieser Ansatz auf letztlich inkohärente Weise mit einer operationalen Auffassung chemischer Elemente, derzufolge sich auch die Prinzipien dem Zugriff der chemischen Analyse nicht entziehen dürften. Die Darstellung von Phlogiston galt entsprechend zunehmend als Herausforderung der chemischen Forschung.

Cavendish gelang es, diese Herausforderung zu bestehen. Er gab die Metalle Eisen, Zink und Zinn in Salzsäure und verdünnte Schwefelsäure und bemerkte, daß eine spezifische, zuvor unbekannt Luftart entwich. Die bei der Gabe von Eisen in Salzsäure ablaufende Reaktion ist, modern gesprochen, $\text{Fe} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2$; gebildet hat sich also Wasserstoff. Cavendish stellte fest, daß das neue Gas extrem leicht und gut brennbar war und dabei ohne erkennbaren Rückstand

verbrannte.⁴ Von zentralem Belang war Cavendishs Feststellung, daß die Beschaffenheit der brennbaren Luft unabhängig von der Natur der verwendeten Säure war. Diese führte ihn zu dem Schluß, daß das neue Gas nicht aus der Säure stammte. Das aber ließ nur das Metall als Quelle der brennbaren Luft übrig. Und bei einem leichten, gut brennbaren und rückstandsfrei verbrennenden Gas aus Metallen drängt sich die Hypothese nachgerade auf, daß es sich um reines Phlogiston handelt. Als Gegenprobe gab Cavendish phlogistonfreie Metallkalke in die Säuren. Unter diesen Umständen dürfte keine brennbare Luft entstehen, und genau dies wurde beobachtet. Damit hatte Cavendish die für die späte Phlogistontheorie charakteristische Interpretation formuliert: Phlogiston ist identisch mit brennbarer Luft (Cavendish 1766, 78-80; Ströker 1982, 187-192; Carrier 1992, 38-39).

Priestley schwenkte schnell auf diese Sichtweise ein und erreichte 1782 eine glänzende empirische Bestätigung dieser Identifikation durch den Nachweis, daß brennbare Luft Metallkalke in Metalle umzuwandeln vermochte (was zu den charakteristischen Fähigkeiten des Phlogiston zählte, s.o. 1). Priestley erhitzte mit dem Brennglas Bleimennige (Pb_3O_4) in brennbarer Luft und stellte fest, daß metallisches Blei entsteht und die brennbare Luft weniger wird oder bei geeigneter Mengenanpassung vollständig verschwindet. Auf phlogistischem Boden folgt sofort, daß der Bleikalk die brennbare Luft aufgenommen hat und dadurch wieder zu metallischem Blei geworden ist. Das Experiment demonstriert folglich, daß brennbare Luft ebenso wie die phlogistonreiche Holzkohle Metallkalke zu Metallen reduzieren kann und untermauert damit die Identität von brennbarer Luft und Phlogiston. Priestley sieht die Phlogistontheorie glänzend bestätigt: „Da ich sah, daß das Metall in erheblicher Menge wieder erschien und zugleich die Luft abnahm, konnte ich nicht zweifeln, daß der Kalk tatsächlich etwas aus der Luft aufnahm; und aufgrund seiner Wirkung, den Kalk in ein Metall zu umzuwandeln, konnte es sich um nichts anderes handeln als das, dem die Chemiker einhellig den Namen Phlogiston gegeben haben“ (Priestley, in: Partington 1963, 268; vgl. Lavoisier 1783, 344).

Während die Phlogistontheorie demnach Erfolge feierte, stand Lavoisier vor einem Rätsel. Lavoisier hielt Metalle für elementar, so daß diese nicht den Ursprung der brennbaren Luft bilden konnten. Damit blieb nur die Säure als Quelle übrig, und diese Vermutung unterzog Lavoisier einer empirischen Prüfung. Wenn die brennbare Luft aus der Säure stammte, dann sollte deren Verbindung mit Sauerstoff (als dem säurebildenden Prinzip) wieder eine Säure entstehen lassen. Aber alle Versuche, aus dem Wasserstoff durch Verbrennung eine Säure zu erzeugen, schlugen fehl (Lavoisier 1783, 336-337).

⁴ Zwar registrierte Cavendish das bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehende Wasser, hielt dieses jedoch für eine Ablagerung der im Gas enthaltenen Feuchtigkeit.

Ausgerechnet Cavendish selbst half Lavoisier aus dieser Sackgasse. Er entdeckte 1781 die Knallgasreaktion, stellte also fest, daß brennbare Luft (Wasserstoff) und dephlogistizierte Luft (Sauerstoff) zu Wasser reagieren. Bei einem Volumenverhältnis von 2:1 findet man die vollständige Kondensation beider Gase. Eine Gewichtsveränderung tritt nicht auf, so daß das Gewicht des entstandenen Wassers gleich dem Gewicht der Ausgangsgase ist (Cavendish 1784, 167). Da er einige weitere Aspekte des Experiments für klärungsbedürftig hielt, verzichtete Cavendish zunächst auf die Veröffentlichung seiner Resultate. Im Juni 1783 hielt sich Charles Blagden, der damalige Sekretär der Londoner *Royal Society*, in Paris auf und berichtete auch Lavoisier von Cavendishs Untersuchungen. Lavoisier wandte sich umgehend diesem Problemkreis zu, reproduzierte Cavendishs Ergebnis und trat im November 1783 mit der These vor die Akademie, Wasser sei eine Verbindung. „Dieses einzige Experiment der Verbrennung der beiden Luftarten, und ihre Umwandlung in Wasser, Gewichtsteil für Gewichtsteil, erlauben kaum noch Zweifel daran, daß diese Substanz, die bislang als Element betrachtet wurde, ein zusammengesetzter Stoff ist“ (Lavoisier 1783, 340-341). Die Verbrennung brennbarer Luft ist als Synthese von Wasser zu deuten. Nach der Luft hatte Lavoisier damit dem zweiten der bereits bei den Vorsokratikern, vor allem aber bei Aristoteles angenommenen Grundstoffe (nämlich Erde, Wasser, Luft und Feuer) die elementare Natur bestritten.

Lavoisier wird nicht selten vorgeworfen, er habe Cavendish die Anerkennung der Entdeckung der zusammengesetzten Natur des Wassers verweigert (Partington 1963, 440-444; Ströker 1982, 245). Richtig ist, daß Lavoisier generell die eigenen Prioritätsansprüche mit großer Hartnäckigkeit verfocht, die Leistungen anderer hingegen weit weniger skrupulös erwähnte. Für den fraglichen Fall gilt dies jedoch gerade nicht. Lavoisier erwähnt in seiner Darstellung sowohl Cavendishs Experimente als auch den Umstand, daß er durch Blagden von diesen erfahren hatte (Lavoisier 1783, 338). Er sagt nicht, daß Cavendish aus seinen Befunden den Schluß gezogen hätte, Wasser sei kein Element. Aber diesen Schluß hatte Cavendish tatsächlich auch gar nicht gezogen (was nicht selten übersehen wird). Cavendish selbst hatte die von ihm entdeckte Reaktion keineswegs als Synthese von Wasser interpretiert, sondern als dessen Freisetzung aus den beteiligten Gasen.⁵ Priestley faßt einige Jahre später Cavendishs Sichtweise dahingehend zusammen, „dass das Wasser in die Zusammensetzung aller Arten von Luft eingehe und ihre gleichsam eigentliche Basis sey“ und erklärt, dadurch werde die Annahme der Zusammensetzung des Wassers „unnötig“

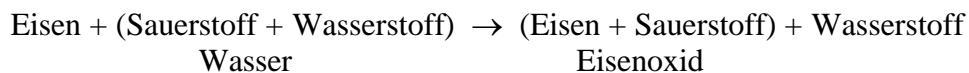
⁵ Cavendish 1784, 171-172. Für eine Rekonstruktion von Cavendishs Theorie vgl. Carrier 1992, 44-50. Nach Cavendishs eigener Darstellung hat Blagden Lavoisier lediglich mitgeteilt, daß dephlogistizierte Luft tatsächlich phlogistonfreies Wasser sei (Cavendish 1784, 170).

(Priestley 1788, 107). Die Absage an die elementare Natur des Wassers geht tatsächlich auf Lavoisier zurück.

Seine neuartige Auffassung unterwirft Lavoisier einer experimentellen Gegenprobe. Wenn in der Knallgasreaktion tatsächlich Wasser synthetisiert wird, dann sollte auch dessen Analyse gelingen. Wasser sollte also in seine Bestandteile zerlegbar sein. Dazu leitet Lavoisier Wasserdampf über rotglühende Eisenspäne und stellt fest, daß das metallische Eisen zu Eisenoxid wird (wie es in gleicher Weise bei der Kalzination von Eisen in Sauerstoff gebildet wird) und daß brennbare Luft entsteht. Die Deutung dieses Prozesses als Zerlegung des Wassers wird durch charakteristische Zusammenhänge zwischen den betreffenden Gewichten bestätigt: Die Gewichtszunahme des Eisens und das Gewicht der erzeugten brennbaren Luft zusammen addieren sich gerade zu dem Gewicht des beteiligten Wassers (Meusnier & Lavoisier 1784, 362-364, 369).

Abbildung: Die Zerlegung des Wassers (aus: Œuvres II, Pl. III): Der Wasserdampf wird durch ein Rohr mit glühendem Eisen geleitet und dort in seine Bestandteile aufgespalten. Das unzerlegte Wasser wird im Kondensator gesammelt, der freigesetzte Wasserstoff im Behältnis aufgefangen.

Das Experiment ist entsprechend so zu deuten, daß das Wasser durch die chemische Einwirkung von Eisen in seine Bestandteile zerlegt wird. Brennbare Luft ist daher richtiger als „Wasserstoff“ zu bezeichnen, als *hydrogène*, als wasserbildende Substanz (Lavoisier 1789, 68-77). Die unterstellte Reaktion hat also die Gestalt:



Dies erlaubt endlich die Erklärung von Cavendishs ursprünglichen Experimenten zur Erzeugung von Wasserstoff aus Metallen. Lavoisier nimmt nun an, daß der Wasserstoff durch Zerlegung des Wassers gebildet wird. Die Idee ist, daß das Metall durch Einwirkung der Säure oxidiert und daß der dafür erforderliche Sauerstoff aus der Spaltung des Wassers stammt. Es ist der dabei freigesetzte Wasserstoff, der entweicht (Lavoisier 1783, 342-343). Cavendishs Experimente gelten Lavoisier damit als weiterer Beispielfall für die angegebene Reaktionsgleichung. Diese Hypothese erklärt zugleich, warum bei der Lösung eines Metalloxids kein Wasserstoff entsteht: da die Wasserzerlegung zur Oxidation des Metalls dient, tritt sie bei Metalloxiden nicht auf. Ebenso werden Priestleys Experimente zur Reduktion von Metallkalken in Wasserstoff erklärbar. Priestley hatte angenommen, daß der Kalk Wasserstoff aufnimmt. Lavoisier setzt dem die Deutung entgegen, der Kalk gebe Sauerstoff ab, und dieser verbinde sich mit dem Wasserstoff zu Wasser. Für Lavoisier ist somit „klar, daß Monsieur Priestley Wasser hergestellt hat, ohne es zu ahnen.“ (Lavoisier 1783, 345).

Allerdings konnte Lavoisiers Resultaten auch im Rahmen der späten Phlogistontheorie Rechnung getragen werden. Angenommen wird, daß Wasserstoff mit Phlogiston identisch ist, so

daß der in Lavoisiers Experiment freigesetzte Wasserstoff aus dem Metall stammen muß. Weiterhin tritt in diesem Experiment mehr Wasserdampf in die Apparatur ein als aus, so daß an irgendeiner Stelle Wasser aufgenommen worden sein muß. Die einzige plausible Option ist die Absorption von Wasser durch das Eisen. Dies legt insgesamt nahe, daß der Wasserdampf in das Metall eintritt und dort das Entweichen von Phlogiston (also Wasserstoff) verursacht. Dadurch wiederum wird das Metall zum Kalk (Partington 1963, 270). Dieser Ansatz reproduziert überdies Lavoisiers Gewichtsergebnisse. Das Gewicht des Metalls ist nämlich durch diesen Prozeß um das Gewicht des Wassers vermehrt und um das Gewicht des Wasserstoffs vermindert worden, während es bei Lavoisier um das Gewicht des Sauerstoffs vermehrt ist. Beides läuft offenbar auf dasselbe hinaus.

Eine Schwierigkeit blieb in Lavoisiers Ansatz ohne überzeugende Lösung. Das Oxid des Wasserstoffs hätte nämlich (wie erwähnt) eine Säure sein sollen, und dies trifft offenbar nicht zu. Lavoisier behilft sich, indem er Wasser als niedrige Oxidationsstufe des Wasserstoffs einschätzt, wie sie auch bei den Metallkalken vorliegt und in der keine sauren Eigenschaften ausgeprägt sind (Lavoisier 1789, 143; s.o. Abs. 4). Allerdings hatte Lavoisier selbst den Sauerstoffanteil im Wasser zu 85% bestimmt (Lavoisier 1789, 76), so daß die Zuordnung zu einer niedrigen Oxidationsstufe wenig plausibel schien. Die phlogistischen Widersacher vergaßen selten, auf diese Schwierigkeit zu verweisen (Gren 1792, 205-212; Richter 1793, 213).

6. Die Chemische Revolution

Die Chemische Revolution umfaßt die Ersetzung der Phlogistontheorie durch Lavoisiers Oxidationstheorie. Lavoisier hatte zunächst zwei Anomalien oder Gegenbeispiele für die Phlogistontheorie aufgewiesen, nämlich die Gewichtszunahme bei Kalzination und Verbrennung und die Reduktion von rotem Quecksilberkalk mit dem Brennglas, also ohne erkennbare Phlogistonquelle. Beide Schwierigkeiten betrafen sowohl die traditionelle, Stahlische Variante der Theorie, in der Phlogiston als „irdisches Prinzip“ eingeführt worden war (s.o. 1), als auch die von Cavendish konzipierte Fassung, in deren Rahmen Phlogiston mit Wasserstoff identifiziert wurde (s.o. 5). Phlogiston sollte danach Gewicht besitzen und seine Freisetzung folglich den betreffenden Stoff leichter werden lassen. Und die Erzeugung von Quecksilber aus seinem roten Kalk sollte nicht ohne Einsatz von Holzkohle oder Zusatz von Wasserstoff gelingen. Beide Tatsachen waren mit den phlogistischen Grundsätzen unverträglich.

In seinen „Überlegungen zum Phlogiston“ (1783) griff Lavoisier die Theorie erstmals frontal an und brachte einen weiteren anomalen Befund gegen sie zum Tragen. Nach phlogistischer Ansicht sollte das aus dem betreffenden Körper entweichende Phlogiston von der Luft aufgenommen werden und diese phlogistizieren. Kommt die Kalzination also in einem verschlossenen Gefäß nach einiger Zeit zum Stillstand, so hat sich phlogistizierte Luft gebildet, deren Phlogistonübersät-

tigung den Austritt weiteren Phlogistons blockiert (s.o. 3). Bei einer Kalzination in dephlogistizierter Luft ist die Aufnahmefähigkeit für freigesetztes Phlogiston erhöht, so daß der Prozeß über längere Zeit anhält; am Ende sollte jedoch wieder phlogistizierte Luft entstanden sein. Aus Lavoisiers Perspektive hingegen ist die sog. phlogistizierte Luft tatsächlich Stickstoff, ein Bestandteil der Atmosphäre, der bei Oxidationsprozessen keine Rolle spielt. Bei der Oxidation in reinem Sauerstoff sollte demnach keineswegs Stickstoff entstehen. Lavoisier berichtet von Experimenten zur Kalzination von Quecksilber in reinem Sauerstoff, bei denen sämtliches Gas „bis zum letzten Tropfen absorbiert“ wurde. Überdies ist bei einer vorzeitigen Unterbrechung der Kalzination das verbleibende Gas unverändert Sauerstoff. Folglich ist hier kein Phlogiston ausgetreten; zumindest hat es keinerlei chemisch faßbare Wirkungen (Lavoisier 1777/1783, 636-637).

Im Zentrum von Lavoisiers Angriff in den „Überlegungen“ stehen jedoch nicht diese beiden herkömmlichen Varianten der Phlogistontheorie, sondern eine 1779 von Pierre Joseph Macquer (1718–1784) formulierte Fassung (deren Grundgedanke auf Priestley zurückgeht). Der Grund für Lavoisiers Aufmerksamkeit besteht darin, daß diese Fassung den drei genannten Gegenbeispielen ohne weiteres Rechnung zu tragen vermag. Nach Macquer ist Phlogiston der reine Lichtstoff und als solcher in der Lage, Gefäßwände zu durchdringen. Zweitens wird anerkannt, daß bei der Verbrennung und Kalzination Sauerstoff gebunden wird. Es soll aber dieser Prozeß der Sauerstoffbindung sein, der Phlogiston freisetzt. Schließlich demonstriert das Leuchten von Flammen zweifelsfrei, daß bei der Sauerstoffbindung Licht entsteht. In diesem Rahmen ergibt sich die Gewichtszunahme gerade wie bei Lavoisier durch die Aufnahme von Sauerstoff, bei der Reduktion von rotem Quecksilberkalk mit dem Brennglas stellt das konzentriert einfallende Licht das erforderliche Phlogiston bereit, und bei der Kalzination in reinem Sauerstoff entweicht das freigesetzte Phlogiston durch die Wände des Gefäßes. Lavoisiers drei Anomalien sind phlogistisch aufgelöst.

In seiner Erwiderung weist Lavoisier darauf hin, daß nur eine kleine Zahl von Kalken ausschließlich durch Licht reduzierbar ist, während die Überzahl eine greifbare Phlogistonquelle, etwa Holzkohle, benötigt. Dieser Befund ist schwer mit Behauptung in Einklang zu bringen, Licht sei reines Phlogiston, da dann das Brennglas die Phlogistonversorgung optimal sicherstellen sollte (Lavoisier 1777/1783, 637). Über solche Hinweise auf empirische Schwierigkeiten einzelner phlogistischer Versionen hinaus rückt Lavoisier aber die Versionenvielfalt in den Mittelpunkt und betont die gegensätzlichen Eigenschaften, die dem Phlogiston auf diese Weise zugeschrieben werden. Zuweilen durchdringt er Gefäßwände, zuweilen nicht; manchmal ist er im Licht enthalten, manchmal in der Holzkohle. Indem die Theorie solche Widersprüche in Kauf nimmt, paßt sie sich

an unterschiedliche Problemlagen an. Das Phlogiston „ist ein wirklicher Proteus, der jeden Augenblick seine Gestalt wechselt.“⁶

Tatsächlich hatte die Wucht von Lavoisiers Angriff die Kreativität der Phlogistiker in starkem Maße angeregt und eine fast unübersehbare Variantenvielfalt hervorgebracht. In ihrer Spätphase zerfiel die Phlogistontheorie in eine Unzahl disparater Erklärungsansätze, jeweils um bestimmte Phänomene herum entworfen und mit anderen unverträglich. Zum Beispiel erklärte Priestley die Kalzination von Eisen bei Lavoisiers angeblicher Wasserzerlegung durch die Bindung von Wasser (s.o. 5), während Macquer Kalzination stets auf die Bindung von Sauerstoff zurückführte. Eine der in der Agonie entworfenen phlogistischen Konzeptionen sah in der Tat auch ein negatives Gewicht für das Phlogiston vor, so daß sein Entweichen eine Gewichtszunahme zur Folge haben sollte. Allerdings handelte es sich dabei um eine bloß randständige Ansicht, der bei weitem nicht die Bedeutsamkeit zukam, die ihr im nachhinein gelegentlich zugeschrieben wird. Weit nachteiliger als die Unplausibilität dieser oder jener Fassung der Theorie war ihre Aufspaltung in eine große Zahl gegensätzlicher Doktrinen. Jeremias Benjamin Richter (1762–1807), selbst von phlogistischer Gesinnung und dabei ähnlicher Ansicht wie Macquer, erkennt diesen Klagepunkt an. Fatal ist nämlich, daß sich die Verteidiger des Phlogiston „nicht einig wären, was das Phlogiston sey, indem es der eine für Lichtmaterie, ein anderer für brennbare Luft, ein dritter für die Verbindung der Feuermaterie mit einer Erde, der eine für schwer, der andere für nicht schwer, wiederum ein dritter für negativ schwer halte.“ (Richter 1793, 203)

Diese krebsartige Wucherung von Versionen trug wesentlich zum Ableben des Phlogiston bei. Schon in den „Überlegungen“ hatte Lavoisier dieses Leitmotiv angeschlagen: Durch ihre Zersplitterung wird die Theorie vage und widersprüchlich und bringt es letztlich zu keinerlei überzeugenden Erklärungsleistungen mehr. Die Oxidationstheorie soll die Chemie auf den Weg der begrifflichen und argumentativen Strenge zurückführen (Lavoisier 1777/1783, 640). Tatsächlich ist Lavoisier bei diesem Unternehmen erfolgreich. Nach 1785 schwenkt die französische Chemie auf Lavoisiers Linie ein, ab 1790 die englische und ab 1795 auch die deutsche. Nur Priestley bleibt hart und verfaßt bis zu seinem Tode 1804 immer wieder neue Traktate zur Widerlegung Lavoisiers und zum Beweis des Phlogiston.

Tatsächlich beinhaltete die Aufgabe der Phlogistontheorie einen tiefgreifenden Wandlungsprozeß, der eine Umorientierung der Chemie nach Erscheinungsbild und Methode umfaßte. Lavoisiers Theorie stellte einen einheitlicheren Ansatz dar, der weniger Raum für Beliebigkeit bot

⁶ Lavoisier 1777/1783, 640. Proteus ist der Meergreis der griechischen Mythologie, der (wie das Meer) in tausenderlei Gestalt auftritt.

und die chemischen Befunde enger an die Grundsätze anband. Den oftmals willkürlichen Anpassungen der Phlogistontheorie setzte Lavoisier einen strengeren Interpretationsrahmen entgegen.

Zudem verschob Lavoisier den Fokus chemischer Erklärungen. Durch ihn wurden die Gewichts- und Volumenverhältnisse bei Reaktionen zum Prüfstein für theoretische Ansätze; vordem hatten diese Größen als Teil der Physik gegolten und waren als für die Chemie belanglos eingestuft worden. Komplementär traten bei Lavoisier Eigenschaften wie Festigkeit oder Metallizität in den Hintergrund, zu deren Erklärung die Prinzipienchemie eingeführt worden war. Zwar blieben Residuen der traditionellen Denkweise erhalten: Sauerstoff ist das *Prinzip* der Säuren (Lavoisier 1777/1779, 259; 1789, 57), Wärmestoff der Ursprung der Elastizität oder Flüchtigkeit (und damit dem alten Quecksilberprinzip ähnlich (s.o. 4)). Aber abgesehen von diesen Rückständen wurden die Prinzipien aus der Chemie verbannt. Insbesondere galten Lavoisier die Metalle als elementar; die Gemeinsamkeit ihrer Eigenschaften wird nicht mehr durch den gemeinsamen Bestandteil Phlogiston erklärt. Mit der Aufgabe der Säuretheorie zwei Jahrzehnte nach Lavoisiers Tod verschwanden auch diese prinzipienchemischen Reste. Der Wirkung nach beseitigte die Chemische Revolution die Prinzipien aus der Chemie.

Mit dieser Abwendung ist die Annahme eines stärker operational geprägten Elementbegriffs verbunden, demzufolge die Endpunkte der chemischen Analyse das Elementare bestimmen. Was nicht weiter zerlegt werden kann, ist elementar (Lavoisier 1789, 7). In der Prinzipienchemie wurde diese Forderung der isolierten Darstellung der Elemente dagegen abgewiesen (s.o. 5). Allerdings ist die von Lavoisier in dieser Frage herbeigeführte Wendung wenig markant. Eher schreibt er einen säkularen Trend fort. Schon vor Lavoisier bekennen sich Phlogistiker ganz explizit zu einem operationalen Elementbegriff (etwa Macquer 1767, 71); umgekehrt hält Lavoisier Chlor, die oxidierte Salzsäure, trotz aller gescheiterter Zerlegungsversuche keineswegs für elementar (s.o. 4).

Trotz aller Kontinuität in dieser oder jener Hinsicht, insgesamt beinhaltet die Chemische Revolution einen ausgeprägten wissenschaftshistorischen Bruch. Bei Lavoisier ist die Theoriebildung systematischer, durchsichtiger und auch in den Einzelheiten besser durch Erfahrung gestützt. Die Erklärungen verlieren an Beliebigkeit und gewinnen theoretische Strenge. Durch Lavoisier wird die Chemie aus einer locker verbundenen Kollektion von Tatsachen in eine rationale Wissenschaft transformiert.

Teil dieser Umorientierung ist die Terminologiereform, die Lavoisier 1787 initiierte. Ziel war es, die verwirrenden Trivialnamen der Tradition oder die irreführenden phlogistischen Bezeichnungen durch klare Begriffe zu ersetzen, die die Beschaffenheit der Stoffe vor Augen führten. Einfache Stoffe wurden durch einfache Namen bezeichnet, komplexe Stoffe durch Namen, die

deren Zusammensetzung deutlich macht (Lavoisier 1789, 8). So sollten Lavoisiers vier Oxidationsstufen *oxyde*, *-eux* (wie *acide sulfureux*, schweflige Säure), *-ique* (wie *acide sulfurique*, Schwefelsäure) und *oxygéné* den Anstieg des Sauerstoffgehalts erkennen lassen. Diese Idee, in der Bezeichnung eines Stoffs seine Zusammensetzung zum Ausdruck zu bringen, ist bis zum heutigen Tag bewahrt und schlägt sich in Bezeichnungen wie Kohlendioxid oder Distickstoffoxid nieder. In diesem Bemühen, die Verworrenheit des Hergebrachten durch die Durchsichtigkeit einer vernünftigen Neuordnung zu ersetzen, gliedert Lavoisier die Chemie in die Aufklärung ein. Durch Lavoisier wird die Chemie zu einer Disziplin nach dem Maß der Epoche.

7. Gesellschaftlicher Aufstieg und Fall

Lavoisier war ein rastloser Geist. Den Morgen und den Abend eines jeden Tages widmete er der Wissenschaft, unterstützt von seiner Frau, die etwa die Experimente protokollierte oder Übersetzungen fremdsprachiger Arbeiten (insbesondere aus dem Englischen) für ihren wenig sprachgewandten Ehemann anfertigte. Den Tag über trieb Lavoisier seine bürgerlichen Karriere voran. Er reinvestierte konsequent seine Gewinne in die *Ferme générale* und stieg dadurch in der Organisation der Steuerpächter beständig weiter auf. Lavoisiers ausgeprägter Geschäftssinn drückte sich unter anderem in der Errichtung der Pariser Mauer aus. Auf seine Veranlassung hin wurde Paris zum Zweck der effizienteren Eintreibung von Gebühren mit einer Mauer umgeben. Die *Fermiers généraux* waren unter anderem dazu berechtigt, Zoll auf den Transport von Waren zu erheben und verloren durch Schmuggel erhebliche Summen. Lavoisiers tatkräftig ans Werk gesetztes Unternehmen Stadtmauer sollte den Schmugglern das Handwerk legen und den Gewinn der Steuerpächter mehren. Es nimmt nicht wunder, daß diese fiskalische Maßnahme der Reputation Lavoisiers bei der Pariser Bevölkerung nicht eben förderlich war.

Während Lavoisier damit einerseits Bestandteil des *Ancien régime* war, teilte er andererseits die Ideale und Ziele der Aufklärung. Lavoisier war stellvertretender Abgeordneter des Dritten Standes in der 1787 einberufenen Versammlung der Generalstände und setzte sich 1788, also noch vor der Revolution, für die Abschaffung der Steuerprivilegien von Adel und Klerus ein. Die Besteuerung sollte einheitlich nach wirtschaftlicher Leistungskraft erfolgen. Obwohl dies bei seiner hohen gesellschaftlichen Stellung nicht ohne weiteres zu erwarten war, zählte Lavoisier zu den 1789ern, also den Anhängern der vom liberalen Bürgertum getragenen ersten Phase der Französischen Revolution.

Lavoisier war von starkem Geltungsbedürfnis getrieben. In wissenschaftlicher Hinsicht dokumentiert sich dieser Charakterzug in der wiederholten Betonung der eigenen Leistungen und in der eher nachlässigen Anerkennung der Beiträge anderer. In gesellschaftlicher Hinsicht drückt sich der gleiche Zug darin aus, daß Lavoisier Ämter an sich zog und sie alle mit Energie und Tatkraft

ausfüllte. 1775 übernahm er die Leitung der staatlichen Pulververwaltung und steigerte die französische Produktion von Schießpulver nach Quantität und Qualität beträchtlich. Lavoisiers Tätigkeit in der *Régie des poudres* gilt als gelungene Verknüpfung von wissenschaftlichem Sachverstand und organisatorischer Innovationskraft (Beretta 1999, 47).

In den 1780er Jahren wirkte der mittlerweile berühmte Wissenschaftler als Mitglied oder Vorsitzender in diversen königlichen Kommissionen mit. Dabei widmete er sich unter anderem der Verbesserung der zum Teil menschenunwürdigen Verhältnisse in Krankenhäusern und Gefängnissen. Zentrales Anliegen Lavoisiers war dabei die Erhöhung der Luftqualität. Darin verbanden sich eigene Erkenntnisse über den Sauerstoffverbrauch bei der Atmung mit der traditionellen Miasmentheorie, derzufolge Krankheiten durch verdorbene Luft entstehen. Lavoisiers zentrale Reformempfehlung bestand stets in der Verbesserung der Belüftung, was aber kaum jemals umgesetzt wurde. Nach der Revolution setzte Lavoisier seine Kommissionstätigkeit nahtlos fort. Er wurde Mitglied der nationalen Schatzkommission und wirkte an herausgehobener Stelle bei der Konzeption des durchgängig dezimalen Maßsystems mit, dem wir unter anderem Meter und Gramm (und damit Kilometer und Kilogramm) verdanken. Lavoisier zählte vor und nach der Revolution zu den Spitzen der Gesellschaft.

Diese herausgehobene Stellung ließ ihn auch dann noch an seine persönliche Unantastbarkeit glauben, als die Schreckensherrschaft heraufzog. Tatsächlich wurden jedoch im November 1793 sämtliche Steuerpächter des *Ancien régime* verhaftet – darunter auch Lavoisier. Im Mai 1794 wurden alle in einem Sammelverfahren ohne Würdigung des Einzelfalls zum Tode verurteilt. Am 8. Mai 1794 bestieg Lavoisier das Schafott.

In der älteren Wissenschaftsgeschichtsschreibung ist die Hinrichtung Lavoisiers mit einer wissenschaftsfeindlichen Haltung der Revolution in Verbindung gebracht worden. Bei Lavoisiers Verurteilung soll der Richter geäußert haben, die Revolution brauche keine Wissenschaftler („*La révolution n'a pas besoin de savants*“). Aber dies ist keinesfalls glaubhaft. Erstens findet sich diese Äußerung nicht in den Quellen und taucht erst in späteren Darstellungen auf. In den Quellen ist nur summarisch von der Hinrichtung der 28 *Fermiers généraux* die Rede. Lavoisier ist nicht als Wissenschaftler hingerichtet worden, sondern als Mitglied der verhaßten *Ferme*. Zweitens war die Revolution insgesamt keineswegs wissenschaftsfeindlich. Vielmehr galten wissenschaftliche Rationalität und Effizienz weithin als Vorbild der staatlichen Einrichtungen. Die Revolution zählte die Wissenschaft zu ihren Verbündeten, was sich nicht zuletzt darin ausdrückte, daß nicht wenige Wissenschaftler bedeutende politische Ämter bekleideten. Lavoisiers tragisches Ende hatte nichts mit seiner wissenschaftlichen Aktivität zu tun, sondern mit seiner bürgerlichen Stellung und – vor allem – mit einer außer Kontrolle geratenen Blutjustiz. Lavoisier war eines der zahllosen unschul-

digen Opfer dieses organisierten Justizmordens, das noch zwei weitere Monate durch das Land raste, bevor es auch seine Urheber hinwegfegte.

Literatur

- F. Bacon (1620)
Neues Organon I-II, ed. W. Krohn, lat./dt., Hamburg: Meiner, 1990.
- M. Beretta (1999)
Lavoisier. Die Revolution in der Chemie (Spektrum der Wissenschaft Biographie), Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft Verlag.
- C.L. Berthollet (1785)
 “Memoir on Dephlogisticated Marine Acid”, in: Alembic Club (ed.), *The Early History of Chlorine (Alembic Club Reprints No. 13)*, Edinburgh: William F. Clay, 1969, 11-31.
- R. Boyle (1772)
 “A Discovery of the Perviousness of Glass to Ponderable Parts of Flame”, in: ders., *The Works III*, ed. T. Birch, London 1772, Hildesheim: Olms 1966, 723-727.
- J.B. Conant (1950)
The Overthrow of the Phlogiston Theory. The Chemical Revolution of 1775 – 1789, Cambridge Mass.: Harvard University Press, 1968.
- M. Carrier (1992)
 „Cavendishs Version der Phlogistonchemie, oder: Über den empirischen Erfolg unzutreffender theoretischer Ansätze“, in: J. Mittelstraß & G. Stock (eds.), *Chemie und Geisteswissenschaften. Versuch einer Annäherung*, Berlin: Akademie-Verlag, 33-52.
- H. Cavendish (1766)
 “Three Papers, containing Experiments on factitious Air, Part I. Containing Experiments on Inflammable Air”, in: Thorpe (1921), 77-87.
- H. Cavendish (1784)
 “Experiments on Air”, in: Thorpe (1921), 161-181.
- A. Gren (1792)
 „Antwort des Herausgebers auf vorstehendes Schreiben“, *Journal der Physik* 6, 205-212.
- H. Guerlac (1961)
Lavoisier: The Crucial Year. The Background and Origins of his First Experiments on Combustion in 1772, Ithaca N.Y: Cornell University Press.
- A.L. Lavoisier (1774)
 » Analyse du mémoire sur l’augmentation du poids des métaux par la calcination », in : Œuvres II, 97-104.
- A.L. Lavoisier (1774/1777)
 » Mémoire sur la calcination de l’étain dans les vaisseaux fermés et sur la cause de l’augmentation du poids qu’aquiert ce métal pendant cette opération », in : Œuvres II, 105-121.
- A.L. Lavoisier (1775/1778)
 » Mémoire sur la nature du principe qui se combine avec les métaux pendant leur calcination et qui augmente leur poids », in : Œuvres II, 122-128.
- A.L. Lavoisier (1777/1779)
 » Considérations générales sur la nature des acides et sur le principes dont ils sont composés », in : Œuvres II, 248-260.

- A.L. Lavoisier (1777/1783)
 » Réflexions sur le phlogistique, pour servir de suite à la théorie de la combustion et de la calcination », in : Œuvres II, 623-655.
- A.L. Lavoisier (1783)
 » Mémoire dans lequel on a pour objet de prouver que l'eau n'est point une substance simple, un élément proprement dit, mais qu'elle est susceptible de décomposition et de re-composition », in : Œuvres II, 334-359.
- A.L. Lavoisier (1789)
Traité élémentaire de chimie, in : Œuvres I, 1-438.
- A.L. Lavoisier (Œuvres)
Œuvres de Lavoisier, I–VI, ed. J.B. Dumas & E. Grimaux, Paris : Imprimerie impériale et Imprimerie nationale, 1862–1893.
- J.W. Llana (1985)
 "A Contribution of Natural History to the Chemical Revolution in France", *Ambix* 32, 71-91.
- P.J. Macquer (1767)
Dictionnaire de chymie I, Yverdon.
- J.B. Meusnier & A.L. Lavoisier (1784)
 » Mémoire où l'on prouve, par la décomposition de l'eau, que ce fluide n'est point une substance simple, et qu'il y a plusieurs moyens d'obtenir en grand l'air inflammable qui y entre comme principe constituant », in : Œuvres II, 360-373.
- J.R. Partington (1962/1963/1964)
A History of Chemistry II (1962), III (1963), IV (1964), London: MacMillan.
- J. Priestley (1788)
 „Versuche und Beobachtungen über den sauren Grundstoff, die Zusammensetzung des Wassers, und das Phlogiston“, *Journal der Physik I* (1791), 247-253.
- J.B. Richter (1793)
Über die neuern Gegenstände der Chemie. Drittes Stück. Versuch einer Kritik des antiphlogistischen Systems, Breslau: Johann F. Korn.
- E. Ströker (1982)
Theoriewandel in der Wissenschaftsgeschichte. Chemie im 18. Jahrhundert, Frankfurt: Klostermann.
- E. Thorpe (ed.) (1921)
The Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish, F.R.S., Vol II, Chemical and Dynamical, Cambridge: Cambridge University Press.

Lavoisier: wichtigste Werke

HAUPTWERK:

Traité élémentaire de chimie, Paris 1789. Repr. als *Œuvres de Lavoisier I*, Paris : Imprimerie impériale, 1864.

Engl. *Elements of Chemistry*, trans. R. Kerr, Edinburgh 1790.

Dt. *System der antiphlogistischen Chemie*, trans. S.F. Hermbstädt, Berlin: Nicolai, 1792.

BÜCHER:

Opuscules physiques et chimiques, Paris 1774.

Méthode de nomenclature chimique (mit L.B. Guyton de Morveau, C.L. Berthollet, A.F. Fourcroy), Paris 1787.

WERKAUSGABEN

Œuvres de Lavoisier, I–VI, ed. J.B. Dumas, E. Grimaux, Paris : Imprimerie impériale et Imprimerie nationale, 1862–1893.

Correspondance, I–VI, ed. A. Michel, Académie des sciences, Paris 1955–1997.

Physikalisch-chemische Schriften, I–V, ed./trans. C.E. Weigel, Greifswald 1783–1794.

WICHTIGE ABHANDLUNGEN:

« Mémoire sur la calcination de l'étain dans les vaisseaux fermés » (1774/1777), in : *Œuvres de Lavoisier II*, Paris : Imprimerie impériale, 1862, 105–121.

« Réflexions sur le phlogistique » (1777/1783), in : *Œuvres de Lavoisier II*, Paris : Imprimerie impériale, 1862, 623–655.

« Mémoire dans lequel on a pour objet de prouver que l'eau n'est point une substance simple » (1783), in : *Œuvres de Lavoisier II*, Paris : Imprimerie impériale, 1862, 334–359.

Zwei Abhandlungen über die Wärme (mit P.S. de Laplace) (*Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften 40*), Leipzig: Wilhelm Engelmann, 1892.

Das Wasser (*Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften 230*), Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1930.