

Günther Harsch, Hans-Dieter Barke, Christoph Bünthe

13. LAVOISIER – Oxidationstheorie und Erhaltung der Masse

„Die Chemie ist eine französische Wissenschaft. Sie wurde von dem unsterblichen Lavoisier begründet“ [1]. So beginnt der historische Teil einer Publikation von CHRISTOPH BÜNTE und GÜNTHER HARSCH [2].

LAVOISIER wurde am 26. August 1743 in Paris geboren. Sein Vater war ein Anwalt am Parlament von Paris und gehörte zum „Adel des Talars“ [3], einer gesellschaftlichen Schicht, die seinerzeit hohe Ämter in Staatsverwaltung und Justiz innehatte, auch seine Mutter entstammte einer wohlhabenden und angesehenen Familie. Als LAVOISIER fünf Jahre alt war, starb plötzlich seine Mutter. Nachdem einige Jahre darauf auch seine Schwester starb, galten die ganze Aufmerksamkeit und das gesamte Streben der Familie dem einzigen Sohn Antoine, der später auch das gesamte Vermögen erben sollte.

LAVOISIER entdeckte schon sehr früh sein Interesse und seine Begabung für die Naturwissenschaften, allerdings stellten sie zu dieser Zeit noch kein Betätigungsfeld dar, mit dem man dauerhaft seinen Lebensunterhalt finanzieren konnte. An der Pariser Sorbonne, der größten Universität des Landes, wurden die Naturwissenschaften nur als Teildisziplin der Pharmazie unterrichtet, der Schwerpunkt hingegen lag ganz klar auf den humanistischen und juristischen Fächern. Auf Grund der finanziellen Absicherung war es dem Vater möglich, seinen Sohn 1754 am angesehenen Collège Mazarin anzumelden, eine der wenigen Schulen, die auch im Unterricht schon humanistische und naturwissenschaftliche Bildung miteinander verknüpfte.

Von Beginn seiner Schulzeit an erwies sich LAVOISIER als guter und aufmerksamer Schüler, der nicht nur im Bereich der naturwissenschaftlichen Fächer sehr gute Ergebnisse erreichte. Um sich gesellschaftlich und finanziell abzusichern, schrieb er sich 1760 schon vor Beendigung seiner Ausbildung an der Pariser Sorbonne für ein Jurastudium ein, das er 1764 im Alter von nicht einmal 21 Jahren mit dem Dokortitel abschloss. Allerdings lassen die zahlreichen naturwissenschaftlichen Kurse, die LAVOISIER zeitgleich am College besuchte, den Schluss zu, dass er seine Zukunft eher in diesem Bereich sah. Drei dieser Kurse, die ganz offensichtlich einen starken Einfluss auf sein späteres Wissenschaftskonzept ausgeübt haben, sollen an dieser Stelle kurz erwähnt werden.

Zunächst einmal besuchte LAVOISIER ab 1760 Mathematikstunden bei dem berühmten Mathematiker und Astronom LE CAILLE. Dieser brachte ihm bei, dass bei der natur-

wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung alles durch schrittweise Entwicklung der Beweise miteinander verbunden ist und man auf diese Weise von einfachen Erkenntnissen zu einer immer komplexeren Wahrheit gelangt. Im Unterricht des Physikers NOLLET geriet er zum ersten Mal in seinem Leben in Kontakt mit wissenschaftlichen Experimenten und den speziell dafür entwickelten Apparaturen, er besuchte zudem einen Kurs in Chemie bei dem Pharmazeuten ROUELLE. Im Gegensatz zur Physik, wo experimentelles Arbeiten, empirische Auswertung von Messdaten und eine entsprechende theoretische Begründung im Prozess der Erkenntnisgewinnung schon selbstverständlich waren, stand die Chemie als eigenständige Wissenschaft zu dieser Zeit noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung. Sie war immer noch sehr stark geprägt von alchemistischen Vorstellungen – es gab weder eine etablierte wissenschaftliche Methode noch irgendein erkennbares Ordnungssystem für die Vielzahl an Phänomenen und Beobachtungen. Das Berufsbild des Chemikers existierte bis dato nicht – wer chemische Forschung betreiben wollte, musste dies auf eigene Kosten und im Privaten tun.



Abb. 13.1: Portrait von ANTOINE LAVOISIER [4]

Trotz oder vielleicht auch gerade wegen dieser offensichtlichen Schwächen entwickelte sich bei LAVOISIER schnell eine gewisse Begeisterung für die Chemie. Aus dem Jahr 1763 stammt sein erster Text, in dem er diesbezüglich seine Ideen festhält. So fordert er zum Beispiel, den Prozess der Erkenntnisgewinnung – der seinerzeit noch hauptsächlich auf qualitativen Überlegungen und Spekulationen beruhte – durch die experimentelle Forschung zu erweitern. In diesem Zusammenhang nennt er auch zahlreiche Apparaturen, die er wohl im Rahmen seines physikalischen Kurses kennen gelernt hat. Die Forderung nach genauen Messungen und exakten Wägungen, die sich in den folgenden Jahren wie ein roter Faden durch die Forschung zieht, hat hier ihren Anfang.

13.1 LAVOISIER'S wichtigste Forschungen

Nachdem er seine Ausbildung am College und sein Studium an der Sorbonne abgeschlossen hatte, bemühte sich LAVOISIER in den Folgejahren verstärkt um eine Aufnahme in die Académie des Sciences in Paris. Die Akademie stellte landesweit die einzige Organisation dar, in der die wissenschaftliche Forschung institutionalisiert und finanziert wurde: Mitglieder bekamen großzügige Stipendien, eigene Labore sowie eine große Bibliothek zur Verfügung gestellt. Im Gegensatz zu den Forschern an den Universitäten, die in der Regel gewisse staatlichen Vorgaben berücksichtigen mussten und den Auftragsforschern, die im Dienst eines Souveräns oder eines Fürsten arbeiteten, waren die Mitglieder der Akademie in ihrer Forschung weitestgehend autonom. Für LAVOISIER waren es sicherlich weniger die finanziellen Motive als der Zuwachs an Prestige, der die Mitgliedschaft in dieser Vereinigung für ihn interessant machte. Allerdings war die Zahl der Mitglieder auf 54 beschränkt, das Auswahlverfahren für Neumitglieder sehr streng und der Konkurrenzkampf groß.

Um sich für die Aufnahme in der Akademie zu bewerben, nutzte LAVOISIER in den folgenden Jahren jede Möglichkeit, um auf sich aufmerksam zu machen. So legte er 1765 im Rahmen eines Wettbewerbs eine Arbeit vor, die sich mit einer effizienteren und praktischeren Möglichkeit zur Beleuchtung der Stadt Paris bei Nacht befasste. Seine Arbeit wurde zwar nicht mit dem ersten Preis bedacht, dennoch hatte er durch sein sehr wissenschaftliches Vorgehen einen positiven und bleibenden Eindruck hinterlassen. Im selben Jahr legte er der Akademie eine neue Methode zur chemischen Analyse von Gips vor, die einige Zeit später auch in der von der Akademie herausgegebenen Fachzeitschrift publiziert wurde. Auch in dieser Arbeit lassen sich bereits Ansätze von seinen späteren Arbeitsmethoden und Ansichten erkennen, beispielsweise die Wichtigkeit exakter Wägungen und Messungen sowie die Berücksichtigung von physikalischen Eigenschaften auf chemische Untersuchungen [4].

1766 ergriff LAVOISIER erstmals die direkte Initiative, sich als Mitglied an der Académie des Sciences zu bewerben. Er richtete ein Schreiben an den Präsidenten der Organisation mit dem Vorschlag, die experimentelle Physik aufgrund ihrer rasant wachsenden Bedeutung als eigenständige Disziplin einzurichten und auch die Zahl der Mitglieder aufzustocken. Er selbst brachte sich in diesem Zusammenhang als neues Mitglied ins Gespräch. Auch wenn dieser Vorschlag keinen Erfolg mit sich brachte, hatte er sich den Mitgliedern durch seinen ungewöhnlichen Antrag wieder ins Bewusstsein gerufen [4]. Im Jahr 1768 schließlich erreichte LAVOISIER das angestrebte Ziel, als Mitglied in der Académie des Sciences aufgenommen zu werden (Abb. 13.1).



Abb. 13.2: LAVOISIER und Ehefrau [4]

LAVOISIER konnte auch in den folgenden Jahren ein immenses Vermögen anhäufen und in seine wissenschaftliche Forschung investieren. In seinen ersten Jahren als Mitglied der Akademie beschäftigte er sich vor allem damit, auf die Unzulänglichkeiten der Wissenschaft Chemie, ihrer Arbeitsweise und ihrer Methodik hinzuweisen. In diesem Zusammenhang stellte er immer wieder die Vorteile der experimentellen Physik und ihrer genauen, empirischen Vorgehensweise heraus, die in der Chemie noch nicht relevant war: der Einsatz einer genauen Waage im Verlauf eines chemischen Experiments, war für ihn maßgebend. Im Übrigen half ihm seine junge Ehefrau beim Experimentieren, beim Zeichnen der Apparaturen und beim Protokollieren der Ergebnisse (Abb. 13.2).

Ebenfalls zu dieser Zeit veröffentlichte LAVOISIER einige Schriften, in denen er das alchemistische Konzept der Transmutation angriff und seine Absurdität und Realitätsferne unterstrich. Während die meisten Physiker und Mathematiker diese Anregungen begeistert aufnahmen, fürchteten die Chemiker eine gefährliche Kursänderung und eine völlige Unterordnung ihres Fachs unter die Disziplin der Physik [5]. Schon in seiner Anfangszeit in der Akademie hatte LAVOISIER seitens der anderen Chemiker mit starkem Widerstand zu kämpfen, gewann allerdings auch den Eindruck, dass die Chemie als eigenständige Disziplin eine umfassende Reform sowohl in Bezug auf ihre Arbeits- als auch auf ihre Denkweise nötig hatte.

Die Oxidationstheorie. Um die herausragende Leistungen von LAVOISIER bei der Entwicklung eines neuen Erklärungsansatzes für zahlreiche chemische Prozesse entsprechend nachvollziehen zu können, ist es sinnvoll, zunächst einmal in der chemiehistorischen Entwicklung einige Jahrzehnte zurück zu gehen. Wie bereits angedeutet, wies die Chemie gegenüber der Physik bis in das 18. Jahrhundert hinein erkenntnistheoretisch erhebliche Defizite auf. Immer noch in starkem Maße durchdrungen von alchemistischen Ideen und okkulten Theorien, fehlte es in

erster Linie an einer allgemein gültigen Erklärungsgrundlage für die wichtigsten chemischen Prozesse, unter anderem auch für den Prozess der Verbrennung [6].

Gegen Ende des 17. Jahrhunderts entwarf der deutsche Mediziner GEORG ERNST STAHL (1660 – 1734) erstmals eine zusammenhängende Theorie, um eben diesen Prozess chemisch aufzuklären. Seine so genannte **Phlogistontheorie** sollte später einem ganzen Entwicklungsabschnitt der Chemie ihren Namen geben und fast ein ganzes Jahrhundert von den bedeutendsten Chemikern der gesamten Welt als allgemein gültig angesehen werden. STAHL behauptete, dass sich jeder Stoff aus zwei Teilen zusammensetzt, einem „verbrennbaren“ und einem unverbrennbaren“. Während der „unverbrennbare“ Teil von der Beschaffenheit des Stoffs abhängt, ist der „verbrennbare“ Teil – das so genannte Phlogiston – allen Stoffen gleich. Beim Verbrennungsvorgang entweicht das Phlogiston und wird von der umgebenden Luft aufgenommen. Je mehr Phlogiston ein Stoff wie etwa Kohle enthält, umso vollständiger verbrennt er.

Analog verläuft der Prozess bei der „Verkalkung“ von Metallen. Mit Hilfe der Phlogistontheorie war erstmals in der Geschichte der Chemie eine einheitliche, in sich abgeschlossene Erklärungsgrundlage für zahlreiche ähnlich verlaufende Prozesse gefunden worden, die folgendermaßen in heutigen Reaktionsgleichungen zu verstehen ist:



Um aus „Metallkalk“ (heute: Metalloxid) das Metall zu gewinnen, ist Phlogiston-reiche Kohle notwendig (STAHL hatte in den Thüringer Hütten beobachtet, wie aus einem Gemisch aus „Zinnkalk“ und Kohle beim Erhitzen silberglänzendes Zinn herausfloss):



Dass hierbei auch „fixe Luft“ (Kohlenstoffdioxid) entweicht, wurde von STAHL nicht bemerkt.

Die Resonanz der anderen Wissenschaftler war sehr positiv und schon wenige Jahre später war die Phlogistontheorie in der Chemie vollständig institutionalisiert und nahezu ohne Widerspruch akzeptiert worden. Dass sie rein qualitativer Art war, störte die meisten zeitgenössischen Wissenschaftler ebenso wenig wie die Tatsache, dass es STAHL Zeit seines Lebens nicht gelang, das Phlogiston experimentell zu isolieren und auf diese Art nachzuweisen. Darüber hinaus lieferte die Theorie ebenso wenig eine Erklärung für die damals schon festgestellte Massenzunahme der Metalle bei der Verkalkung [1].

Zu Beginn des 18. Jahrhunderts wandten sich immer mehr Wissenschaftler der Chemie der Gase zu und machten Entdeckungen, die sich nicht mehr mit den Ideen von STAHL vereinbaren ließen. Erweiterungen und Modifikationen der Phlogistontheorie wurden nötig, wollte man ihre Gültigkeit aufrechterhalten. Den Anfang machte JOSEPH BLACK (1728 – 1799),

der beim Glühen von Carbonaten „fixe Luft“ (Kohlenstoffdioxid) freisetzen und isolieren konnte [7]. Einige Jahre später entdeckte HENRY CAVENDISH (1731 – 1810) den Wasserstoff, den er durch die Reaktion von Metallen mit Salzsäure gewann (vgl. auch Kap. 11). Dies warf die Frage auf, warum sich diese beiden unsichtbaren Gase auffangen lassen, das Phlogiston jedoch nicht isolierbar ist. War die Phlogistontheorie über Jahrzehnte nahezu vorbehaltlos akzeptiert worden, so wies sie nun erste Risse und Probleme auf.

Anfang der Siebziger Jahre des 18. Jahrhunderts – nachdem er sich als Mitglied der Akademie bewährt hatte – wandte sich nun auch LAVOISIER den Gasen und dem Verbrennungsprozess zu. Erstaunlich ist in diesem Zusammenhang vor allem die Zielstrebigkeit und Strukturierung seiner Forschung. Zunächst einmal begann er damit, die verschiedenen Erkenntnisse, die in den vergangenen Jahrzehnten bekannt wurden, experimentell nachzuvollziehen. Dabei bezog er gleich von Beginn auch die Waage in seine Untersuchungen mit ein, um die quantitativen Veränderungen von Reaktionen entsprechend messen zu können [3].

Nach seinen eigenen Aufzeichnungen machte LAVOISIER die ersten wichtigen Entdeckungen bereits im Jahr 1772. In einem Brief, den er beim Sekretär der Akademie hinterlegte, beschrieb er die Massenzunahme von Schwefel und Phosphor im Verlauf der Verbrennung und äußerte die These, dass sie durch die Vereinigung der betreffenden Substanzen mit der Luft zustande kommen könne (vgl. Kap. 12, V12.10). Nachdem er diese Phänomene noch zwei weitere Jahre erforscht und jeden Zweifel an seiner Überlegung verloren hatte, veröffentlichte er die Ergebnisse 1774 in Buchform unter dem Titel „Opuscles Physiques et Chymiques“ [5]. Inhaltlich fasste die Arbeit in erster Linie die aktuelle Forschung zusammen und bot daher kaum Neues, methodisch gesehen war sie jedoch ausgesprochen innovativ: unter anderem schilderte er die Wichtigkeit der quantitativen Untersuchungen und bildete darüber hinaus zahlreiche Apparaturen ab, die er zu seiner Forschung herangezogen hatte.

Das Werk wurde auf eigene Kosten in einer Auflage von 1250 Exemplaren gedruckt und an sämtliche Akademien in Europa sowie an zahlreiche renommierte Wissenschaftler geschickt. LAVOISIER machte auf diese Weise deutlich, dass er sich als neuer Teilnehmer an der Diskussion um die Gase verstanden wissen wollte. Einer der folgenreichsten Kontakte, die er auf diesem Wege knüpfen konnte, war der zu dem schwedischen Pharmazeuten CARL WILHELM SCHEELE. Bereits seit 1772 beschäftigte dieser sich damit, der Wissenschaft Chemie neue theoretische Grundlagen zu geben, in deren Mittelpunkt die Rolle des Feuers stand. Im Rahmen seiner Untersuchung war es ihm gelungen, das Gas Sauerstoff freizusetzen (vgl. Kap. 12). SCHEELE (1742 – 1786) wählte hierfür den Namen „*Feuerluft*“, da diese besonders geeignet war, eine

Flamme am Brennen zu halten. In seiner Antwort an LAVOISIER forderte er ihn auf, diesen Versuch mit den in den „Opuscles“ abgebildeten Versuchsapparaturen zu wiederholen.

Neben SCHEELE gelang es zu derselben Zeit JOSEPH PRIESTLEY (1733 – 1804) Sauerstoff in reiner Form darzustellen. Er erhitzte im Jahr 1774 Quecksilberoxid mit einem Brennglas und setzte auf diese Weise ein Gas frei, dem er selber den Namen „dephlogisticated air“ gab. Schon der Name lässt darauf schließen, dass PRIESTLEY versuchte, die neu gefundenen Erkenntnisse mit Hilfe der Phlogistontheorie zu erklären. Das entdeckte Gas war seiner Meinung nach nichts anderes als besonders reine Luft – frei von ihrem entflammbaren Prinzip und daher fähig, besonders viel Phlogiston aufzunehmen. PRIESTLEY selbst behauptet in seinen Aufzeichnungen, er habe LAVOISIER im Rahmen einer Reise nach Paris im Oktober 1774 diese neue Methode dargelegt und ihm zudem die Eigenschaften des Gases in Experimenten vorgeführt [6].

Sowohl SCHEELE als auch PRIESTLEY haben unabhängig voneinander Möglichkeiten entdeckt, Sauerstoff zu isolieren (vgl. Kap. 12), es ist ebenfalls erwiesen, dass beide LAVOISIER von ihren Forschungsergebnissen berichtet haben. Dennoch lässt sich bis heute nicht einwandfrei feststellen, ob LAVOISIER die Experimente – etwa die Quecksilberoxid-Zerlegung (vgl. Abb. 12.6 und Experiment V12.9) – auf ihr Anraten wiederholt oder die Entdeckungen doch unabhängig von den beiden Forschern gemacht hat. Fest steht allerdings, dass LAVOISIER durch die Entdeckung des Sauerstoffs endlich den Grundpfeiler seiner Verbrennungstheorie experimentell untermauern konnte. Die neuen Erkenntnisse fasste er Ostern 1775 in einem Vortrag vor der Akademie zusammen. Zahlreiche Ideen, die er den Mitgliedern hier präsentierte, lassen sich bereits in der versiegelten Notiz finden, die er schon 1772 in der Akademie hinterlegt hatte. Jedoch boten erst die bereits angeführten experimentell neu gewonnenen Erkenntnisse die Möglichkeit, seine neue Oxidationstheorie auch zu beweisen [1].

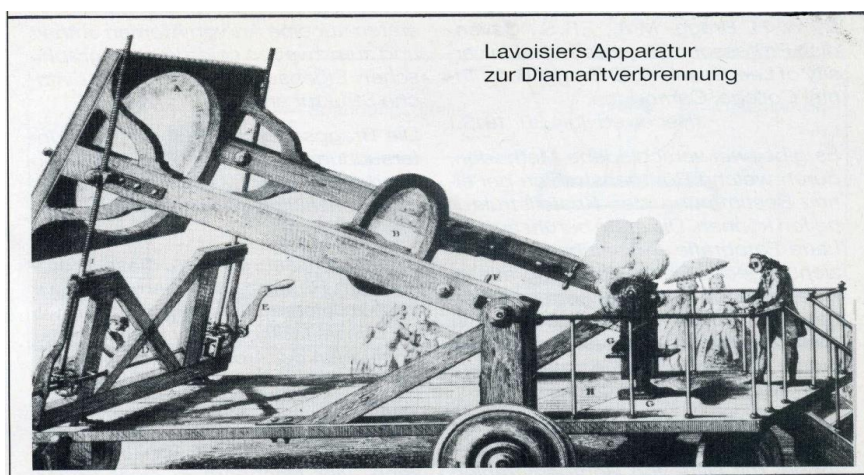


Abb. 13.3: Die Verbrennung eines Diamanten nach der Idee von LAVOISIER [4]

In diesem Punkt zeigt sich recht deutlich ein Grundsatz der Forschertätigkeit von LAVOISIER: konnte er eine Annahme nicht qualitativ und quantitativ beweisen, wurde sie so lange zurück gehalten, bis der entsprechende Beweis vorlag. Er versah in seinem Vortrag das neu entdeckte Gas mit dem Namen „l'air éminent respirable“ und stellte die These auf, dass eben dieses Gas ein elementarer Bestandteil der atmosphärischen Luft sei. Beim Verbrennungsprozess würde sich dieser Bestandteil in einem bestimmten stöchiometrischen Verhältnis mit der brennbaren Substanz vereinen und auf diese Weise die Verbrennung unterhalten. In diesem Zusammenhang zeigte LAVOISIER allen interessierten Bürgern von Paris auf spektakuläre Weise, dass ein Diamant aus reinem Kohlenstoff besteht, dass er mit Luftsauerstoff unter einem „prasselnden Geräusch“ zerstört wird und zu Kohlenstoffdioxid reagiert (Abb. 13.3).

In den Folgejahren beschäftigte sich LAVOISIER vor allem damit, die Eigenschaften dieses neu entdeckten Gases zu prüfen. So veröffentlichte er im Mai 1777 eine Abhandlung, in der er die Atmung von Tieren untersuchte. Unter Berücksichtigung der neuen Erkenntnisse, die er über die Zusammensetzung der Luft gewonnen hatte, stellte er die These auf, dass nur ein kleiner Bestandteil (nämlich der Sauerstoff) geeignet sei, die Atmung aufrecht zu erhalten. Darüber hinaus vermutete er, dass der Sauerstoff der Luft Nährstoffe auf das menschliche Blut überträgt und daher auch für dessen spezifische rote Farbe verantwortlich sei. Es ist erstaunlich, wie nah sich LAVOISIER ohne Grundkenntnisse in der Physiologie und der Medizin mit seinen Ideen hier dem real ablaufenden Atmungsprozess näherte [5].

Der Säurebegriff. LAVOISIER weitete seine neue Verbrennungstheorie im Laufe der Zeit immer stärker aus. Stand am Anfang noch die Verbrennung als Prozess im Mittelpunkt seines Interesses, so stellte er ab 1775 immer stärker den Sauerstoff als Substanz in das Zentrum seiner Forschung. Er veröffentlichte 1779 eine Abhandlung über die Zusammensetzung von Säuren und stellte aufgrund seiner Beobachtungen, dass Nichtmetalloxide in Wasser saure Lösungen bilden (V13.1) die These auf, der Sauerstoff sei das universelle Prinzip dieser Stoffklasse und daher auch in jeder sauren Substanz enthalten. Statt „l'air éminent respirable“ – wie er den Sauerstoff vorher genannt hatte – schlug er daher an dieser Stelle den Namen „principe oxygine“ vor und führte den Elementnamen Oxygen („Säurestoff“ oder Sauerstoff) und auch die Begriffe Oxidation und Oxid ein, die bis heute verwendet werden [8]. Auch wenn die Behauptung, das gemeinsame Prinzip der Säuren sei der Sauerstoff, sich aus heutiger Sicht als Irrtum herausgestellt hat (tatsächlich ist Wasserstoff bzw. das H^+ -Ion das Prinzip der Säuren), so erwies sich das Sauerstoffprinzip für viele Säuren wie Schwefelsäure, Salpetersäure oder „Kohlensäure“ als zutreffend. Allerdings konnte er die Wirkung der Salzsäure nicht erklären und behalf sich mit

der Hypothese, dass Chlor kein Element sei, sondern das Oxid eines noch unbekannten Elements. Somit entsprach die Salzsäure doch seiner Theorie.

Erhaltung der Masse bei chemischen Reaktionen. Es mag verwundern, dass LAVOISIER trotz der zahlreichen neu gewonnenen Erkenntnisse die Phlogistontheorie nie direkt angriff oder kritisierte. Bei näherer Betrachtung liegt der Grund für dieses Verhalten jedoch auf der Hand: Es gab einen chemischen Prozess, den er noch nicht erklären konnte: die Verbrennung von Wasserstoff. Die Lösung für dieses Problem lieferte 1784 CAVENDISH, indem er experimentell bewies, dass bei dieser Reaktion als Produkt Wasser entsteht (vgl. Kap. 12 und Experiment V12.5). Durch diese Beobachtungen konnte LAVOISIER nun seine Theorie auf einen weiteren Teilbereich ausweiten – auf die Chemie des Wassers.

Unmittelbar nachdem sie bekannt geworden waren, wiederholte LAVOISIER die Versuche von CAVENDISH in seinem Pariser Labor und entwickelte kurz darauf eine Versuchsanordnung, die es ihm erlaubte, aus Wasser das Element Wasserstoff zu entwickeln, indem er in einen stark erhitzten Flintenlauf tropfenweise Wasser gab und das entstehende Gas pneumatisch auffing (Abb. 13.4): Eisen + Wasser \rightarrow Eisenoxid + Wasserstoff. Auf diese Weise war er der Erste, der Wasser als zusammengesetzten Stoff nachwies und zeigte, dass es kein chemisches Element ist, wie es viele Chemiker seiner Zeit aufgrund der griechischen Naturphilosophie noch annahmen.

Nachdem LAVOISIER das Gas Wasserstoff experimentell zur Verfügung hatte und auch die Synthese von Wasser aus den Elementen mit der Waage verfolgte, konnte er feststellen, “dass bei der Verbrennung von 15 Gran entzündlichem Gas (Wasserstoff) und 85 Gran Lebensluft (Sauerstoff) genau 100 Gran Wasser entstehen, was man umgekehrt bei der Zersetzung des Wassers in demselben Gewichtsverhältnis wieder findet“ [9]. Heute kennen wir das Verhältnis $m(\text{Wasserstoff}) : m(\text{Sauerstoff}) = 2 : 16$ – der Wert 15 : 85 war noch ungenau.

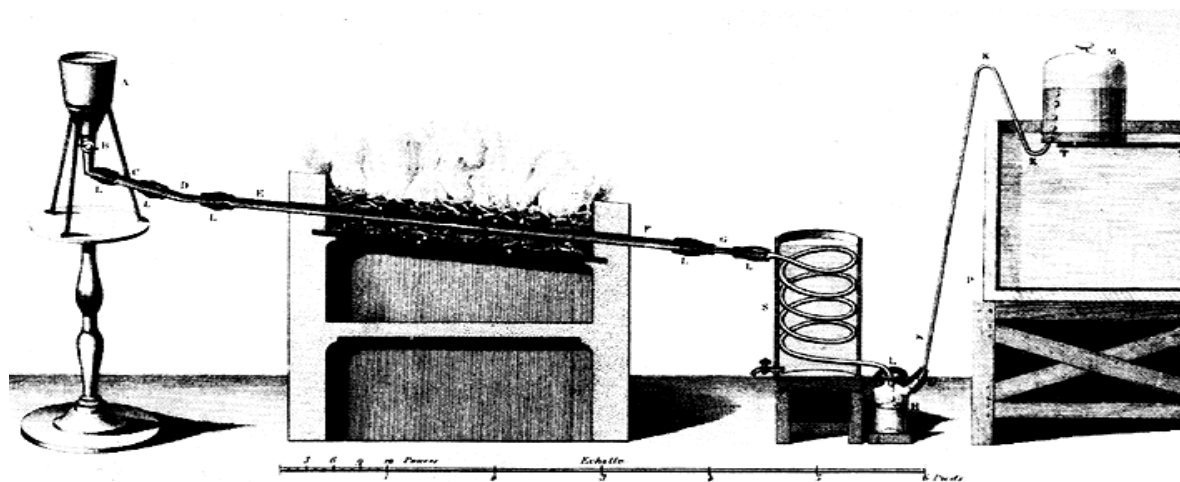


Abb. 13.4: Die Zersetzung des Wassers mit Hilfe eines Flintenlaufs aus Eisen [4]

Aus diesen und weiteren Messungen an Metall-Sauerstoff-Reaktionen folgte LAVOISIER das *Gesetz von der Erhaltung der Masse bei chemischen Reaktionen*, wie es heute noch in allen Schulbüchern steht. Allerdings muss er sich den Ruhm um diese Gesetzmäßigkeit mit dem russischen Wissenschaftler MICHAEL Wassiljewitsch LOMONOSSOW (1711 – 1765) teilen, der bereits im Jahre 1760 in der Schrift „Abhandlungen über die Festigkeit und Flüssigkeit der Körper“ formuliert hatte: „Alle Veränderungen, die in der Natur geschehen, sind derart, daß ebenso viel, wie von einem Körper absetzt, bei einem anderen hinzukommt, so daß, wenn sich irgendwo etwas Materie vermindert, sie an anderer Stelle zunimmt. Dieses allgemeine Naturgesetz erstreckt sich selbst auf die Regeln der Bewegung: denn ein Körper, der durch seine Kraft einen anderen bewegt, teilt dem anderen, der von ihm die Bewegung empfängt, genau so viel Kraft mit, wie er selbst verliert“ [15]. Damit hat LOMONOSSOW nicht nur den Satz von der Erhaltung der Masse vorweggenommen, sondern auch den Impulserhaltungssatz als Spezialfall des Satzes von der Erhaltung der Energie. Da er seine Erkenntnisse in russischer Sprache publizierte, blieben sie in Westeuropa nahezu unbeachtet.

Im Jahr 1785 schließlich war die Oxidationstheorie so weit ausgearbeitet, dass LAVOISIER erstmals direkt Stellung zu STAHLs Ideen bezog. Er legte der Akademie einen Aufsatz mit dem Titel „Betrachtungen über das Phlogiston“ vor und zeigte auf eindrucksvolle Weise, dass man alle bekannten chemischen Prozesse auch ohne die Berücksichtigung des Phlogistons erklären konnte. Bei zahlreichen Phänomenen bot seine eigene Theorie des Sauerstoffs sogar wesentliche Vorteile. Neben der ausführlichen Darstellung seiner eigenen Ideen ging es LAVOISIER in diesem Aufsatz in erster Linie darum, die Widersprüche und Fehlinterpretationen aufzuzeigen, mit denen zahlreiche Wissenschaftler seiner Zeit immer noch argumentierten, weil sie an der Phlogistontheorie festhielten.

Die Vehemenz und Entschlossenheit, mit der LAVOISIER in diesem Aufsatz die Phlogistontheorie kritisierte, mag angesichts seines bis hierhin eher zurückhaltenden Auftretens überraschen. Es verdeutlicht aber auch, dass er seine Theorie des Sauerstoffs soweit ausgebaut und experimentell fundiert hatte, dass er jeden Zweifel an ihrer Richtigkeit ausschließen konnte. In den Folgejahren beschäftigte sich LAVOISIER damit, die von ihm gemachten Entdeckungen zu einem vollständigen System mit einheitlicher Sprache auszubauen.

Die neue chemische Fachsprache. Im Gegensatz zu den fundamentalen Entdeckungen und weitreichenden Erkenntnissen, die LAVOISIER im Laufe seiner Karriere als Wissenschaftler gewonnen hatte, war die Anzahl seiner Publikationen eher überschaubar. Neben den „Opuscles physiques et chimiques“, die er im Jahr 1774 veröffentlicht hatte, beschränkte sich sein

wissenschaftlicher Diskurs hauptsächlich auf das Verfassen von Artikeln und auf Vorträge vor der Akademie. Nachdem er 1785 zu seinem schweren Schlag gegen die Phlogistontheorie ausgeholt hatte, musste LAVOISIER jedoch feststellen, dass sich zahlreiche zeitgenössische Chemiker seinen modernen Ansichten nicht anschließen wollten.

Im Jahr 1787 beschloss LAVOISIER deshalb, auf Basis der von ihm entwickelten Oxidationstheorie eine neue chemische Fachsprache zu entwerfen. In dieser Zeit wurde die Wissenschaft Chemie immer noch stark durch alchemistische Begriffe und Symbole definiert, eine einheitliche Begriffsgrundlage fehlte ebenso wie ein umfassendes Ordnungsprinzip für die verschiedenen bis dahin entdeckten Substanzen. Seine eigenen Ideen präsentierte LAVOISIER schließlich in seinem Werk „Méthode de nomenclature chimique“ ([3], [16]).

Im Zentrum dieses fundamentalen Werks stand zunächst einmal die Definition des Elementbegriffs. LAVOISIER verstand unter einem Element jede Substanz, die bis zu diesem Zeitpunkt chemisch noch nicht zerlegt werden konnte. Dies traf auf insgesamt 55 Substanzen zu, unter denen sich allerdings auch heutige Verbindungen wie Magnesiumoxid oder Calciumoxid befunden haben – sie waren mit den damaligen Mitteln nicht in die Elemente zu zerlegen.

Bezüglich der Nomenklatur unterschied LAVOISIER – so gut wie möglich – zwischen Elementen und Verbindungen. Die Namen der chemischen Verbindungen wurden dabei immer aus dem Wortstamm der Elemente entwickelt. Die Schwefeloxide beispielsweise erhielten ihren Namen aus der Kombination der Stammsubstanz Schwefel und dem – wie er annahm – universellen Bestandteil aller Säuren, dem Sauerstoff. Wollte man die ursprünglichen „Metallkalke“ benennen, so konnte man dem Metallnamen den Begriff –oxid anhängen, also etwa die Namen Eisenoxid oder Kupferoxid kreieren. Sie existieren noch heute!

Darüber hinaus schlug er in seinem Werk weitere Suffixe zur Benennung vor, beispielsweise die Endungen -id, -it und -at für die Bezeichnung der verschiedenen Salze wie etwa die Sulfide, Sulfite und Sulfate. Eine interessante Neuerung war die Einführung eines allgemeinen Zeichensystems zur Bezeichnung der Elemente, das sich aber nicht durchsetzen konnte. Etwa 50 Jahre später wurden von BERZELIUS (1779 – 1848) die Buchstabensymbole in der heutigen Form vorgeschlagen (vgl. Kap. 17).

Nachdem LAVOISIER die Sprache der Chemie durch seine Nomenklatur de facto neu erfunden hatte, ging er noch einen Schritt weiter und machte sich daran, ein Werk zu verfassen, das einen Gesamtüberblick über seine Oxidationstheorie verschaffen und diese detailliert beschreiben sollte. Offensichtlich hatte er erkannt, dass seinen Ideen, die er bis zu diesem Zeitpunkt hauptsächlich in Zeitschriftenartikeln und Vorträgen verbreitet hatte, die nötige Durchschlagskraft fehlte [5]. Die Idee, eine allgemeine Schrift zu verfassen, trug LAVOISIER

vermutlich schon seit 1780 mit sich herum, jedoch sorgten die zahlreichen öffentlichen Aktivitäten, in die er eingespannt war, dafür, dass diese Idee immer weiter aufgeschoben wurde. So trat LAVOISIER beispielsweise energisch dafür ein, die Lebensbedingungen in den öffentlichen Krankenhäusern und den Gefängnissen zu verbessern, darüber hinaus beschäftigte er sich ebenso intensiv mit der landwirtschaftlichen Produktionsverbesserung. Auch sein Amt als Steuerbeamter brachte am Vorabend der französischen Revolution einen erheblichen Arbeitsaufwand mit sich [3].

Am 17. Januar 1789 schließlich schaffte es LAVOISIER, den „*Traité élémentaire de chimie*“ [17] in zwei Bänden zu veröffentlichen. Diese Arbeit fasst alle wesentlichen Erkenntnisse zusammen, die er im Lauf seiner wissenschaftlichen Karriere gesammelt hatte und bildet ein theoretisches Grundgerüst der Chemie, dessen Prinzipien teilweise bis heute nichts von ihrer Gültigkeit verloren haben. In der ausführlichen Einleitung seines Werks beschreibt LAVOISIER unter anderem die Genese seiner Theorie sowie die Prinzipien, denen er in seiner wissenschaftlichen Karriere stets gefolgt war. Erwartungsgemäß werden die Rolle einer einheitlichen Sprache und einer experimentellen Fundierung der aufgestellten Thesen an dieser Stelle besonders hervorgehoben. Den Kern der Arbeit bildet jedoch die Beschreibung all der Phänomene, die LAVOISIER bereits in seinen Aufsätzen und Vorträgen ausführlich dargelegt hatte. Dabei berücksichtigt er vor allem die Chemie der Gase, die Theorie des Sauerstoffs und die Bildung der Oxide, Reaktionen der Metalle bzw. des Wasserstoffs und das Gesetz von der Erhaltung der Masse, die Untersuchungen zur Atmung.

Mit dem „*Traité élémentaire de chimie*“ hatte LAVOISIER seine nunmehr über 20 Jahre andauernde Forschungsarbeit gekrönt und ein Werk geschaffen, das in der Lage war, die Wissenschaft Chemie in ihrer Entwicklung ein entscheidendes Stück voranzubringen. Durch die neue Nomenklatur und die einheitliche theoretische Erklärungsgrundlage hatte die Chemie nun endlich ein System bekommen, das auch über Ländergrenzen hinweg von allen Chemikern verstanden werden konnte und ihnen den wissenschaftlichen Diskurs erheblich vereinfachte. Das Werk wurde rasch in mehrere Sprachen übersetzt.

Die Revolution in Frankreich. Die letzte Phase im Leben von LAVOISIER war geprägt durch die Ereignisse im Rahmen der französischen Revolution. Bei den zahlreichen Modernisierungs- und Reformbewegungen, die unmittelbar nach Beginn der bürgerlichen Revolution einsetzten, nahmen LAVOISIER und andere bedeutende Wissenschaftler zunächst eine herausragende Rolle ein. Sie sollten die politische, soziale und ökonomische Struktur des „Ancien Régime“ von Grund auf reformieren. LAVOISIER wurde in diesem Zusammenhang unter anderem in eine

Kommission aufgenommen, die sich mit der Reform der Gewichte und Maße befasste. Ein Produkt dieser Arbeit war unter anderem das noch heute gültige dezimale Maßsystem [5].

Wie aus dem Briefverkehr mit anderen Wissenschaftlern sowie seinen Aufzeichnungen hervorgeht, war LAVOISIER ein durchaus überzeugter Anhänger der revolutionären Ideen und schaltete sich zunächst auch sehr engagiert in die politische Debatte ein. Er weigerte sich jedoch in der Folgezeit, sich einer politischen Partei anzuschließen und geriet so in der öffentlichen Debatte immer mehr ins Abseits. Trotz seiner zahlreichen Verdienste, die LAVOISIER als Teilnehmer verschiedener Reformkommissionen erworben hatte, spitzte sich seine persönliche Situation mit der Radikalisierung der Revolution 1793 immer stärker zu. Der Hauptgrund hierfür war seine Mitgliedschaft bei der „Ferme Générale“, die ihm neben einem beträchtlichen Vermögen nun auch den Hass und den Missmut der Bevölkerung einbrachte. Die Ferme wurde im Verlauf der Revolution immer stärker mit dem „Ancien Régime“ verknüpft, schon ab 1790 wurden Ermittlungen gegen die Mitglieder der Institution eingeleitet [5].

Im November des Jahres 1793 schließlich wurde ein Haftbefehl gegen LAVOISIER erlassen und er wurde zusammen mit zahlreichen anderen Mitgliedern der Ferme inhaftiert. Am 8. Mai des nächsten Jahres wurde LAVOISIER schließlich zum Tode verurteilt und auf dem Place de la Révolution vor den Augen seiner Frau und seiner Kollegen aus der Akademie geköpft [3]. Sein Freund, der italienische Mathematiker und Astronom JOSEPH-LOUIS LAGRANGE (1736 – 1812) resümierte verbittert: „Es dauert nur Sekunden, um einen Kopf abzuhacken, aber hunderte Jahre dürften keinen ähnlichen hervorbringen können wie diesen Lavoisier“ [4].

13.2 Chemiedidaktische Relevanz

Da die Oxidationstheorie bezüglich der Sauerstoffreaktionen in allen Schulbüchern für die Sekundarstufe I zu finden ist, erscheint es wichtig, den Namen LAVOISIER, die Jahreszahl 1789 und vielleicht den historischen Zusammenhang mit der französischen Revolution zu erläutern und herauszustellen, dass ein hunderte Jahre langer Weg erforderlich war, um die verschiedenen farblosen Gase und insbesondere die Rolle des Sauerstoffs zu entdecken. Ausgehend von den alternativen Vorstellungen ist es auch für Schüler und Schülerinnen ein langer Weg von der Vernichtungsvorstellung kommend, einen „Conceptual Change“ [10] zur Oxidationstheorie zu realisieren und den Satz von der Erhaltung der Masse bei chemischen Reaktionen zu akzeptieren [10]. Sobald das Daltonsche Atommodell und die erste Atommassentabelle im Unterricht hinzukommen, ist die Erklärung der Massenerhaltung dann einfach: Atome oder Ionen gruppieren sich bei chemischen Reaktionen von den Strukturen der

Ausgangsstoffe um zu denen der Endstoffe, es gehen dabei weder Atome oder Ionen verloren, noch kommen neue oder andere hinzu.

Da im 20. Jahrhundert die Redoxtheorie mit dem Transfer von Elektronen entwickelt worden ist und heute ausschließlich bei Experten angewandt wird, ist es vielleicht von Vorteil, die historischen Erklärungen von Oxidations- und Reduktionsreaktionen nicht mit dem Begriff „Redoxreaktion“ zu bezeichnen, um diesen Begriff für die moderne viel weiter reichende Theorie zu verwenden [11]. Es erscheint auch ein Vorteil, die historischen Oxidations- und Reduktionsreaktionen nur mit Reaktionssymbolen in Worten zu beschreiben – anderenfalls kommt man in den Konflikt, anstelle der Atomsymbole teilweise auch fachlich korrekt Ionensymbole notieren zu müssen. Sie sollen der modernen Redoxreaktion vorbehalten bleiben.

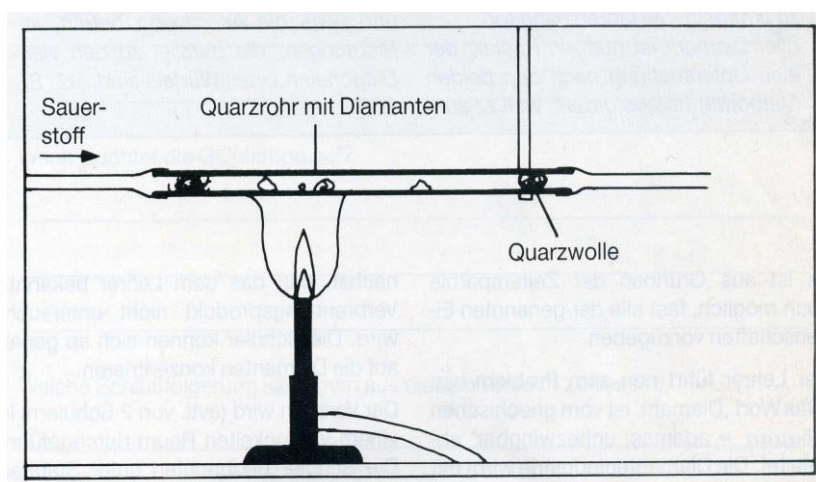
In den Kapiteln 11 und 12 sind bereits die bekanntesten Experimente zu Massenvergleichen bei chemischen Reaktionen zu finden, sodass sie hier nicht beschrieben werden.

V13.1: Reaktion eines Diamanten mit Sauerstoff

LAVOISIER hat im Jahr 1775 mit Hilfe zweier großer Brennlinsen und der gebündelten Sonnenstrahlen einen Diamanten in Sauerstoffatmosphäre so hoch erhitzt, dass er sich entzündete und mit gleißend hellem Licht verbrannte (vgl. Abb. 13.3). JANSEN [10] griff diesen Zusammenhang für das historisch-problemorientierte Unterrichtsverfahren [11] auf und hat in seinem Aufsatz über den kognitiven Konflikt seiner Schüler und Schülerinnen berichtet, die einerseits von der „Unvergänglichkeit eines Diamanten“ lesen und andererseits in einem einfachen Experiment beobachten können, dass ein Diamant im Sauerstoffstrom zu reinem Kohlenstoffdioxid reagiert. Insofern scheint eine solche Unterrichtseinheit sehr motivierend für den Unterricht zu sein, dass es sich lohnt, einige billige Industriediamanten bei den Lehrmittelfirmen zu kaufen und für das Experiment bereit zu legen. DUCCI und OETKEN haben das Experiment im Rahmen des Projekts „Chemistry and Cinema“ [12] erneut aus der Taufe gehoben, indem sie Ausschnitte aus einem James Bond-Film zeigen und den Zusammenhang zu einem Diamantenschatz herstellen, der vom Agenten vor dem Verbrennen in einem Krematorium gerettet wird.

Durchführung. Ein Quarzrohr mit kleinem Durchmesser wird mit einigen kleinen Industriediamanten versehen und eingespannt (vgl. Bild [12]), ein schwacher Strom von Sauerstoff wird eingestellt (wenn er zu schnell fließt, kühlt er). Ein oder zwei gute Brenner werden auf die Diamanten so lange fokussiert, bis die Diamanten zünden und leuchtend hell brennen (Raum möglichst abdunkeln). Nach der Diskussion der „verschwundenen Diamanten“ und der Hypothese, dass Diamanten aus reinem Kohlenstoff bestehen, wird ein Gefäß mit Kalkwasser an

die Apparatur angeschlossen und im 2. Experiment der Test auf Kohlenstoffdioxid durchgeführt. Mit einem Graphitkristall kann das gleiche Experiment durchgeführt werden.



Beobachtung. Die Bruchstücke der Diamanten glühen hell auf und verbrennen mit gleißendem Licht. Das Kalkwasser wird im zweiten Experiment deutlich getrübt.

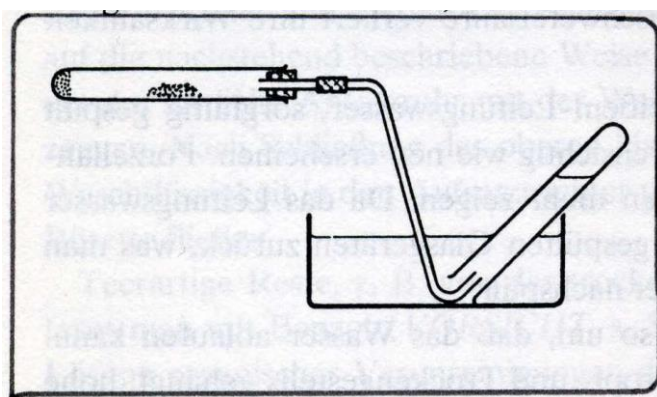
Auswertung. Diamanten sind reiner Kohlenstoff und reagieren mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid.

Graphit und Diamant sind zwei Erscheinungsformen für dasselbe Element Kohlenstoff, die C-Atome sind in beiden Fällen unterschiedlich angeordnet.

V13.2: Herstellung von Wasserstoff aus Wasser

In seinem bekannten Experiment mit dem Flintenlauf (vgl. Abb. 13.4) hat LAVOISIER gezeigt, dass Wasser zu Wasserstoff reagiert, also Wasser kein Element ist, sondern eine Verbindung aus Wasserstoff und Sauerstoff – das Symbol für Wasser-Moleküle kannte LAVOISIER noch nicht, erst die Chemiker späterer Generationen beschrieben kleinste Wasser-Teilchen mit H_2O -Molekülen. Das Experiment ist nachzuvollziehen, indem man ein gewinkeltes Eisenrohr nimmt, stark an der Krümmung erhitzt, Wasser aus einem Tropftrichter dazu tropft und Wasserstoff pneumatisch auffängt. Steht ein solches Eisenrohr nicht zur Verfügung, kann Wasserstoff auch durch Reaktionen der Metalle mit Wasser im Reagenzglas erzeugt werden.

Durchführung. Ein Reagenzglas wird waagrecht eingespannt, mit wenig nassem Sand und mit einigen Spatelspitzen Eisenpulver oder Magnesiumspänen versehen (Bild). Ein Stopfen mit Ableitungsrohr verschließt das Glas und endet in der pneumatischen Wanne mit Wasser-gefülltem Reagenzglas oder Stand-

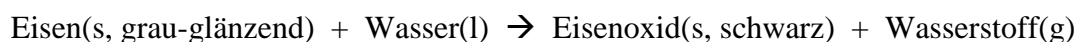


zylinder. Mit dem Brenner wird zunächst das Metall stark erhitzt bis es glüht, dann wird der Sand erhitzt und die Reaktion mit Wasserdampf eingeleitet, dazu wird wechselseitig Metall und Sand erhitzt. Die Reaktion wird beendet, indem das Ableitungsrohr entfernt wird – andererseits

steigt das Wasser aus der Wanne in das heiße Reagenzglas. Der Standzylinder wird mit dem Deckglas verschlossen, an der Brennerflamme geöffnet.

Beobachtung. Eine Gasentwicklung setzt ein, das Gas sammelt sich in Reagenzglas oder Zylinder. An der Brennerflamme entzündet sich das Gas und bildet an der Innenwand des Gefäßes einen Beschlag aus Wassertröpfchen, der allerdings bald verschwindet.

Auswertung. Eisen reagiert mit Wasser zu Eisenoxid und Wasserstoff:



Wasserstoff reagiert nach Entzündung mit dem Sauerstoff aus der Luft und bildet Wasserdampf, der teilweise kondensiert – allerdings verdampft die feine Wasserschicht wieder schnell.

V13.3: Saure Reaktion einiger Nichtmetalloxide mit Wasser

Die Verbrennung von Phosphor und Schwefel und entsprechende Massenvergleiche interessierten LAVOISIER schon sehr frühzeitig (vgl. auch Kap. 12 und V12.10). Natürlich hatte er die Reaktionsprodukte auch in Wasser gelöst und durch die seit BOYLE verwendeten Säure-Base-Indikatoren gezeigt, dass die Lösungen sauer reagieren. Er musste allerdings erst die Rolle des Sauerstoffs erkennen, um mit dem „principe oxigine“ die saure Reaktion als gemeinsame Eigenschaft der Nichtmetalloxid-Lösungen erklären zu können. Heute wissen wir allerdings, dass Hydronium-Ionen als die Grundlage zur Erklärung saurer Reaktionen gilt: Diese Erkenntnis hat erst ARRHENIUS in den Jahren 1884 bis 1887 gewonnen (vgl. Kap. 22).

Durchführung. Kleine Portionen von Phosphor und Schwefel werden mit Hilfe des Verbrennungslöffels im Standzylinder verbrannt, der Zylinder wird mit dem Deckglas verschlossen (Abzug). Es wird feuchtes Universalindikator-Papier kurz in die Zylinder gehalten, wenig Wasser in die Zylinder gegeben, die Lösung jeweils mit dem Indikatorpapier geprüft. Die Lösungen werden für V13.4 aufgehoben.

Beobachtung. In beiden Fällen färbt sich das Indikatorpapier rot, es sind saure Lösungen.

Auswertung. Heute erklären wir die saure Reaktion der Lösungen durch die Anwesenheit von Hydronium-Ionen, die für die Indikatorreaktionen verantwortlich sind.

V13.4: Alkalische Reaktion einiger Metalloxide mit Wasser

Man wusste durch die Arbeit mit den verschiedenen „Metallkalken“ schon lange vor LAVOISIER, dass sie in Wasser Lösungen bilden, die „die Hände seifig machen“, die alkalisch reagieren. Seit LAVOISIER die „Kalke“ als Metall-Sauerstoff-Verbindungen erkannt hatte und den Begriff Metalloxyd einführte, bot es sich an, parallel zu seiner Säure-Definition auch die Definition von Laugen einiger Metalloxide festzulegen: gelöst in Wasser reagieren sie alkalisch.

Heute wissen wir, dass bei diesen Reaktionen Hydroxid-Ionen gebildet werden, die – wie ARRHENIUS es erkannte (vgl. Kap. 22) – für die alkalische Reaktion verantwortlich sind.

Mit sauren und alkalischen Lösungen sind zusätzlich Aspekte der Neutralisation zu demonstrieren, wenn man beide Lösungen zusammengibt und mit Hilfe von Indikatoren beobachtet. Auf dem historischen Niveau von LAVOISIER kann man lediglich das Phänomen der entstehenden Salzlösung beschreiben – heute wissen wir im Falle starker Säuren und Basen von der Reaktion der Hydronium- und Hydroxid-Ionen zu Wasser-Molekülen.

Durchführung. Kleine Portionen Calciumoxid und Bariumoxid werden in ein Reagenzglas mit Wasser gegeben, die Lösungen vom Bodensatz abfiltriert. In beide Filtrate wird kurzzeitig Universalindikatorpapier eingetaucht und beobachtet. Flüssige Indikatorlösung wird in beide Laugen gegeben, die sauren Lösungen aus V13.3 so lange hinzu gegeben, bis die Indikatorfarbe von blau nach rot umschlägt.

Beobachtung. Es bildet sich eine Suspension der Metalloxide, die Bodenkörper lassen sich abfiltrieren, sodass klare Lösungen entstehen. Das Indikatorpapier wird durch die Lösungen in beiden Fällen blau gefärbt, beide Lösungen sind alkalisch reagierende Laugen. Beim Eingießen der sauren Lösungen wechselt bei bestimmten Mengen der sauren Lösungen die Farbe zu rot.

Auswertung. Heute wissen wir, dass die alkalische Reaktion durch die Hydroxid-Ionen verursacht wird. Diese Hydroxid-Ionen können durch die Hydronium-Ionen der sauren Lösungen neutralisiert werden: $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$. Dabei bleiben die Ionen der entsprechenden Salze übrig, sie können durch Abdampfen des Wassers aus den Lösungen als weiße Kristalle erhalten werden.

Literatur

- [1] Brock, W. H.: Viewegs Geschichte der Chemie. Braunschweig/ Wiesbaden 1993 (Vieweg)
- [2] Bünte, Ch., Harsch, G.: Antoine Lavoisier (1743 – 1794). Ein Unterrichtskonzept zur Chemiegeschichte. Universität Münster 2010 (Verlag Schöningh)
- [3] Szababadváry, F.: Antoine Laurent Lavoisier. Der Forscher und seine Zeit 1743 – 1794. Stuttgart 1973 (Große Naturforscher)
- [4] Wikipedia: Lavoisier
- [5] Beretta, M.: Lavoisier. Die Revolution in der Chemie. Heidelberg 1999 (Spektrum der Wissenschaft)
- [6] Ströker, E.: Theoriewandel in der Wissenschaftsgeschichte. Chemie im 18. Jahrhundert. Frankfurt am Main 1982.
- [7] Simon, G.: Kleine Geschichte der Chemie. Köln 1981 (Aulis)

- [8] Rossa, E.: Zu den Ursprüngen der Worte. In: Rossa, E.: Die Fundgrube für den Chemieunterricht in der Sekundarstufe 1. Berlin 2001
- [9] Speter, M.: Lavoisier. In: Bugge, G.: Das Buch der Großen Chemiker. Band 1. Weinheim 1965 (Chemie)
- [10] Barke, H.-D.: Chemiedidaktik – Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen. Heidelberg 2006 (Springer)
- [11] Barke, H.-D.: Der einfache und erweiterte Redoxbegriff: Schülervorstellungen und deren Prävention im Chemieunterricht. PdN-Chemie 61 (2012), Heft 4
- [12] Jansen, W., u.a.: Diamant und Graphit – eine Unterrichtseinheit. NiU-PC 35 (1987)
- [13] Jansen, W., u.a.: Geschichte der Chemie im Chemieunterricht – das historisch-problemorientierte Unterrichtsverfahren. Teile 1 und 2. MNU 39 (1986)
- [14] Ducci, M., u.a.: Chemistry and Cinema – das Projekt ChemCi. PdN-ChiS 58 (2009)
- [15] Lomonossow, M. W.: Ausgewählte Schriften, Band 1. Berlin 1961 (Akademie-Verlag)
- [16] Morveau, Lavoisier, Berthollet, Fourcroy: Methode der chemischen Nomenklatur für das antiphlogistische System. Nebst einem neuen Systeme der dieser Nomenklatur angemessenen Zeichen von Hassenfratz und Adet. Wien 1793. Nachdruck: Georg Olms Verlag, Hildesheim 1978
- [17] Lavoisier, A.: Traité élémentaire de chimie, présenté dans un ordre nouveau et après les découvertes modernes. Paris 1789