

# Die Erfindung des Ballons und die Begründung der Chemie

Hinter den ersten Ballonfahrten vor 200 Jahren stand ein Umbruch im chemischen Denken, der mit den aristotelischen Vorstellungen auch in diesem Zweig der Naturwissenschaft brach. Die Väter der modernen Chemie ließen so den Menschheitstraum vom Fliegen Wirklichkeit werden.

Von Arthur F. Scott

Am 21. November 1783 erhoben sich im Garten des Schlosses von la Muette am westlichen Stadtrand von Paris zum ersten Mal Menschen in die Lüfte. Es waren Jean-François Pilâtre de Rozier, der junge Direktor eines Wissenschaftsmuseums in Paris, und François Laurent Marquis d'Arlandes, ein Armeeeoffizier mit guten Beziehungen zum Hof König Ludwigs XVI. Auf der Galerie eines von den Brüdern Joseph-Michel und Jacques-Étienne Montgolfier (Bild 3) konstruierten Heißluftballons blieben die beiden ungefähr 23 Minuten lang in der Luft. Nach einer Flugstrecke von nahezu neun Kilometern landeten sie wohlbehalten auf freiem Feld an der Straße nach Fontainebleau.

War der Flug an sich schon höchst beachtenswert, so verdeutlichte er zugleich einen gewaltigen Fortschritt in der Chemie: den Sturz der Phlogistontheorie, der die Entdeckung, daß es Gase mit unterschiedlichem Gewicht gibt, den Totensstoß versetzte. Die Namen von vier bedeutenden Chemikern – Joseph Black, Henry Cavendish, Joseph Priestley und Antoine Lavoisier – sind eng mit der Geschichte der ersten bemannten und unbemannten Ballonfahrten verknüpft. Ihre Arbeiten ebneten zugleich den Weg zu einem neuen Verständnis vom chemischen Aufbau der Materie.

Die Gebrüder Montgolfier lebten in Annonay, einer Stadt südlich von Lyon. Sie waren fasziniert von der Idee des Fliegens und kamen auf den Gedanken, eine mit dem Rauch eines Feuers gefüllte Papiertüte könne in die Luft aufsteigen. Gegen Ende des Jahres 1782 machten sie zwei Vorversuche, die sie zu der Überzeugung brachten, daß sich auch ein

größerer Papiersack, mit genügend Rauch gefüllt, vom Boden erheben könne. Am 4. Juni 1783 demonstrierten sie ihre Idee erstmals in der Öffentlichkeit (Bild 1). Ihr „Ballon“ war ein mit Papier ausgekleideter kugelförmiger Sack aus Leinen. Er hatte einen Durchmesser von etwa zwölf Metern und wog knapp 250 Kilogramm. Aufgeblasen wurde er über einem mit kleinen Strohbindeln genährten Feuer. Nach dem Loslassen erhob er sich in beträchtliche Höhe und kam erst nach rund zehn Minuten gut zwei Kilometer entfernt auf die Erde zurück. Die Begeisterung war groß, und die Neuigkeit verbreitete sich rasch durch Frankreich und ganz Europa.

## Wettstreit der Aeronautiker

Den nächsten Ballonversuch führte zwei Monate später eine andere Gruppe in Paris unter Leitung des Physikers Jacques Charles durch. Auf Grund seiner Kenntnis der jüngsten Entdeckungen in der Gaschemie ließ Charles den Ballon mit Wasserstoff füllen. Da Wasserstoff durch eine Papierhülle rasch entwichen wäre, wurde der Ballon aus dünnem Seidenstoff hergestellt und mit einer Gummilösung beschichtet. Den Wasserstoff gewann Charles, indem er Schwefelsäure auf Eisenspäne goß.

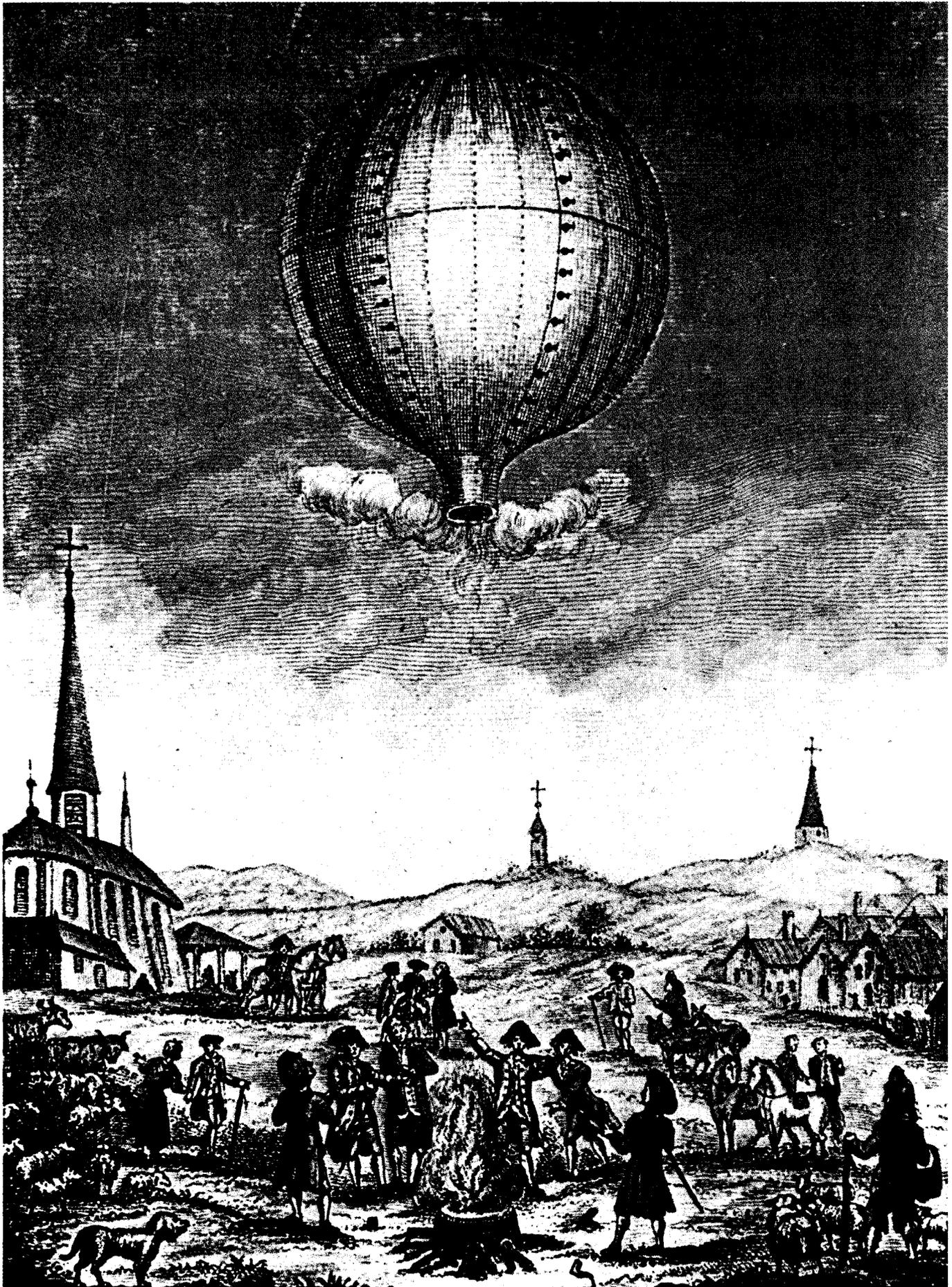
Es dauerte mehrere Tage, den Ballon auf seinen endgültigen Durchmesser von vier Metern aufzublasen. Dabei wurden 500 Pfund Säure und 1000 Pfund Eisen verbraucht. Eine riesige Menschenmenge bestaunte schließlich den Aufstieg vom Marsfeld am 27. August. Der Ballon blieb 45 Minuten in der Luft und landete etwa 25 Kilometer entfernt in

einem Feld bei Gonesse, wo er die Einwohner so erschreckte, daß sie ihn in Fetzen rissen.

Etwa drei Wochen später wiederholte Jacques-Étienne Montgolfier das Experiment von Annonay in Versailles, diesmal in Gegenwart Ludwigs XVI und seines Hofes. Verglichen mit der Vorbereitungszeit für den Aufstieg des ersten Wasserstoffballons, machte das Füllen mit Heißluft nicht viel Mühe. Nach zehn Minuten war der Ballon startklar. Für diese Demonstration hatte man einen Weidenkorb daran befestigt, in dem sich ein Hammel, ein Hahn und eine Ente befanden. Der Ballon selbst bestand nicht mehr aus einem schlichten Papiersack wie beim ersten Aufstieg, sondern war mit Ölfarben bunt angemalt. Der Flug endete nach drei Kilometern in einem Wald. Die ersten Flugreisenden hatten ihn unversehrt überstanden.

Nachdem die Durchführbarkeit von Ballonflügen einmal bewiesen war, wurden die praktischen Möglichkeiten schnell erprobt. Im Oktober stieg de Rozier in einem an Seilen gehaltenen Montgolfier-Ballon auf rund 25 Meter Höhe und blieb dort für etwa vier Minuten. Einen Monat später machten de Rozier und der Marquis d'Arlandes ihren historischen Flug über Paris (Bild 2).

Charles gab sich jedoch nicht geschlagen und startete nur zehn Tage später, am 1. Dezember, mit einem zweiten Passagier an Bord von Paris aus zur ersten Fahrt im Wasserstoffballon (Bild 4). Sie dauerte zwei Stunden und führte die beiden Männer in das rund 40 Kilometer entfernte Städtchen Nesle. Dort setzte Charles seinen Mitfahrer ab und stieg allein auf etwa drei Kilometer Höhe empor. Innerhalb von nur sechs Monaten



**Bild 1:** Die erste öffentliche Vorführung eines Heißluftballons durch die Gebrüder Montgolfier am 4. Juni 1783 in Annonay bei Lyon. Der Ballon,

ein mit Papier ausgekleideter, kugelförmiger Leinensack, war 12 Meter dick und wog rund 250 Kilogramm. Der Flug dauerte zehn Minuten.

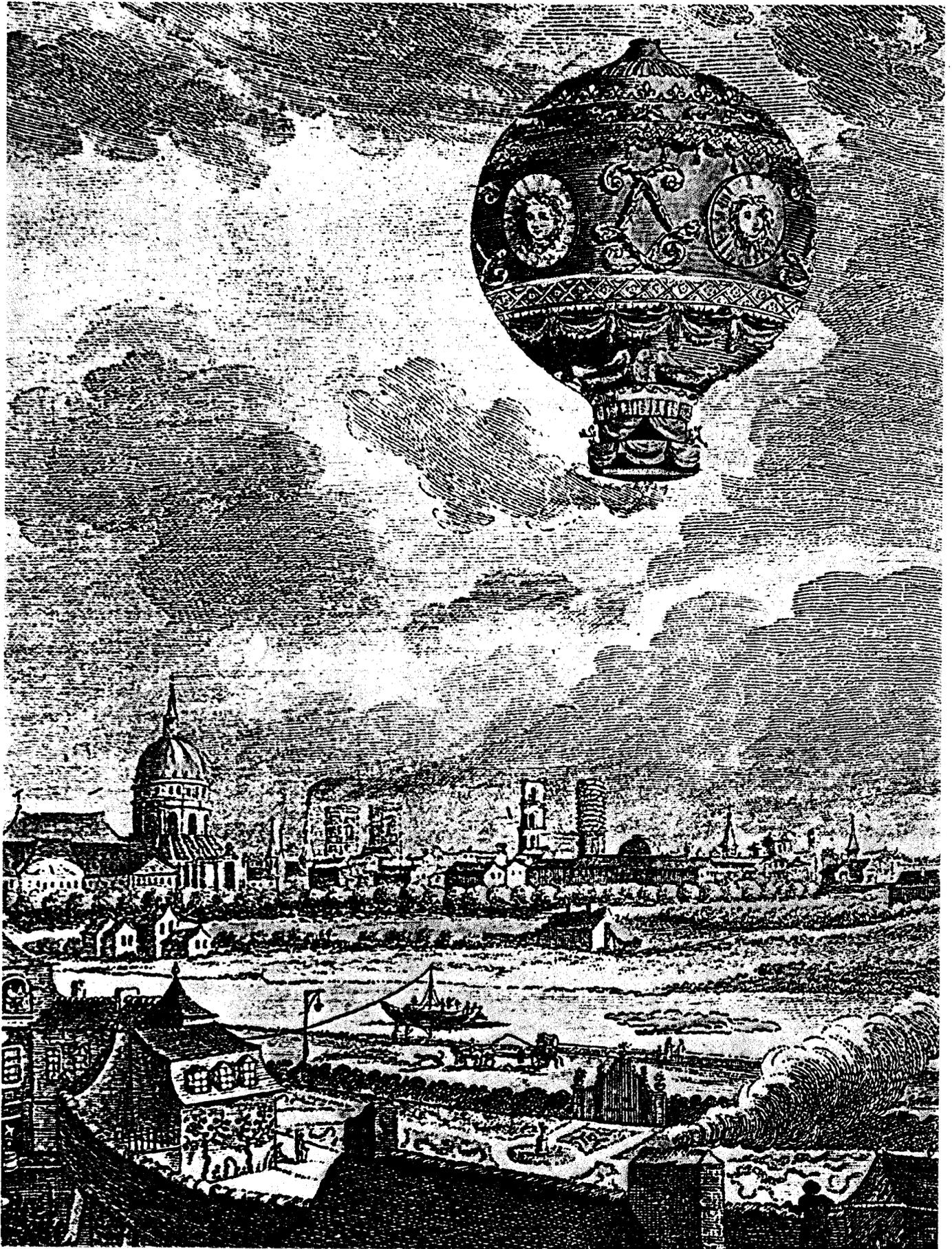


Bild 2: Der erste freie Flug eines bemannten Heißluftballons fand am 21. November 1783 über Paris statt. Der besonders kunstvoll geschmückte Ballon, von den Gebrüdern Montgolfier entworfen, hatte einen Durchmesser von 15 Metern und war 22 Meter hoch. Mit seinen zwei Passagie-

ren, Pilâtre de Rozier und dem Marquis d'Arlandes, wog er gut 700 Kilogramm. Nach 23 Minuten landeten die ersten Luftfahrer neun Kilometer von ihrem Aufstiegsort entfernt an der Straße nach Fontainebleau. Die Ansicht stellt angeblich den Blick von Benjamin Franklins Haus in Passy dar.

hatte die Menschheit also die Luft erobert und das Fliegen gelernt.

In den Jahren nach 1783 fanden überall in Europa Ballonflüge statt. Besonders beachtenswert war ein Aufstieg mit Joseph Montgolfier als Navigator, dem einzigen der Montgolfier-Brüder, der je selbst geflogen ist. Er startete am 19. Januar 1784 von Lyon mit der „Flesselles“. Mehr als 50 Meter hoch und mit einem Durchmesser von etwa 30 Metern, war sie der bis dahin größte Ballon. Durch ein Strohfeuer in nur 17 Minuten aufgeblasen, erhob sich die heiße Kugel mit sieben Personen an Bord für zwölf Minuten auf etwa 1000 Meter Höhe.

Erfolg reihte sich nun an Erfolg. Im August 1784 stieg der französische Chemiker Guyton de Moreau in Begleitung des Abbé Bertrand auf über drei Kilometer Höhe, wo die beiden Daten über Temperatur und Druck der Atmosphäre sammelten. Im Januar des folgenden Jahres schließlich gelang dem französischen Aeronauten Jean Pierre Blanchard gemeinsam mit dem amerikanischen Arzt John Jeffries die erste Kanalüberquerung (von Dover nach Calais).

Nach dem ersten Ballonaufstieg in Annonay setzte die französische Akademie der Wissenschaften auf Ersuchen der Regierung eine Kommission ein, die über dieses Experiment berichten und weitere Experimente planen sollte. Führendes Mitglied dieser Kommission war Lavoisier, der französische Chemiker, dessen wissenschaftliche Entdeckungen mit die Grundlagen zu den ersten Ballonfahrten geliefert hatten. Die französische Regierung betrachtete die Erfindung des Ballons offensichtlich als sehr bedeutsam, denn sie finanzierte einige der Fahrten, die später unter der Regie der Kommission durchgeführt wurden.

Die Reaktion der britischen Wissenschaftler auf die Ballonflüge war dagegen weit weniger enthusiastisch. So hatte im November 1783 König Georg III und sein Hof in Windsor bereits die Vorführung eines Wasserstoffballons erlebt. Beindruckt schrieb der Monarch an Sir Joseph Banks, den Präsidenten der Royal Society in London, und bot ihm finanzielle Unterstützung für weitere Experimente an. Als Antwort kam der Bescheid, die Gesellschaft sei nicht interessiert, da von solchen Experimenten „no good whatsoever“ („ganz und gar nichts Gutes“) erwartet werden könne.

Die mögliche militärische Bedeutung der Ballone wurde dagegen schnell erkannt. Ein Flugblatt zu diesem Thema erschien noch im Monat der Vorführung in Windsor. Benjamin Franklin brachte die Situation in einem wenig später datierten Brief klar zum Ausdruck: „Die Erfindung des Ballons scheint, wie Sie wohl bemerken werden, von großer



**Bild 3:** Die Gebrüder Montgolfier, Joseph-Michel (links) und Jacques-Étienne (rechts), in Kupferstichen des 19. Jahrhunderts. Bei ihren

ersten Ballonflügen war Joseph 43 und Étienne 38 Jahre alt. Das Bild von Étienne entstand nach einem Porträt, das seine Tochter anfertigte.

Tragweite zu sein. So könnte sie die Herrscher von der Torheit kriegerischer Unternehmungen überzeugen, da sie auch dem mächtigsten unter ihnen die Möglichkeit nimmt, sein Reich zu schützen. Fünftausend Ballone, die je zwei Mann tragen können, dürften nicht mehr als fünf Kriegsschiffe kosten; und wo ist der Prinz, der es sich leisten könnte, sein Land so dicht mit Verteidigern zu überziehen, daß zehntausend Menschen, die aus den Wolken herabschweben, nicht an vielen Stellen unermesslichen Schaden anrichten könnten, bevor eine Streitmacht zusammengebracht wäre, sie zurückzuschlagen?“

### Von der Alchemie zum Phlogiston

Die spektakulären Entwicklungen beim Ballonflug waren die unausweichliche Konsequenz eines drastischen Wandels im Naturverständnis. Die einzige Wissenschaft, die zu jener Zeit diesen Namen verdiente, war die Mechanik, und zwar vor allem die Himmelsmechanik, die sich mit den Bewegungen der Himmelskörper befaßte. Die Chemie hatte sich gerade erst vom Dogma der Alchemie befreit, und die Biologie sowie alle anderen Naturwissenschaften befanden sich noch im frühen Stadium des reinen Beobachtens.

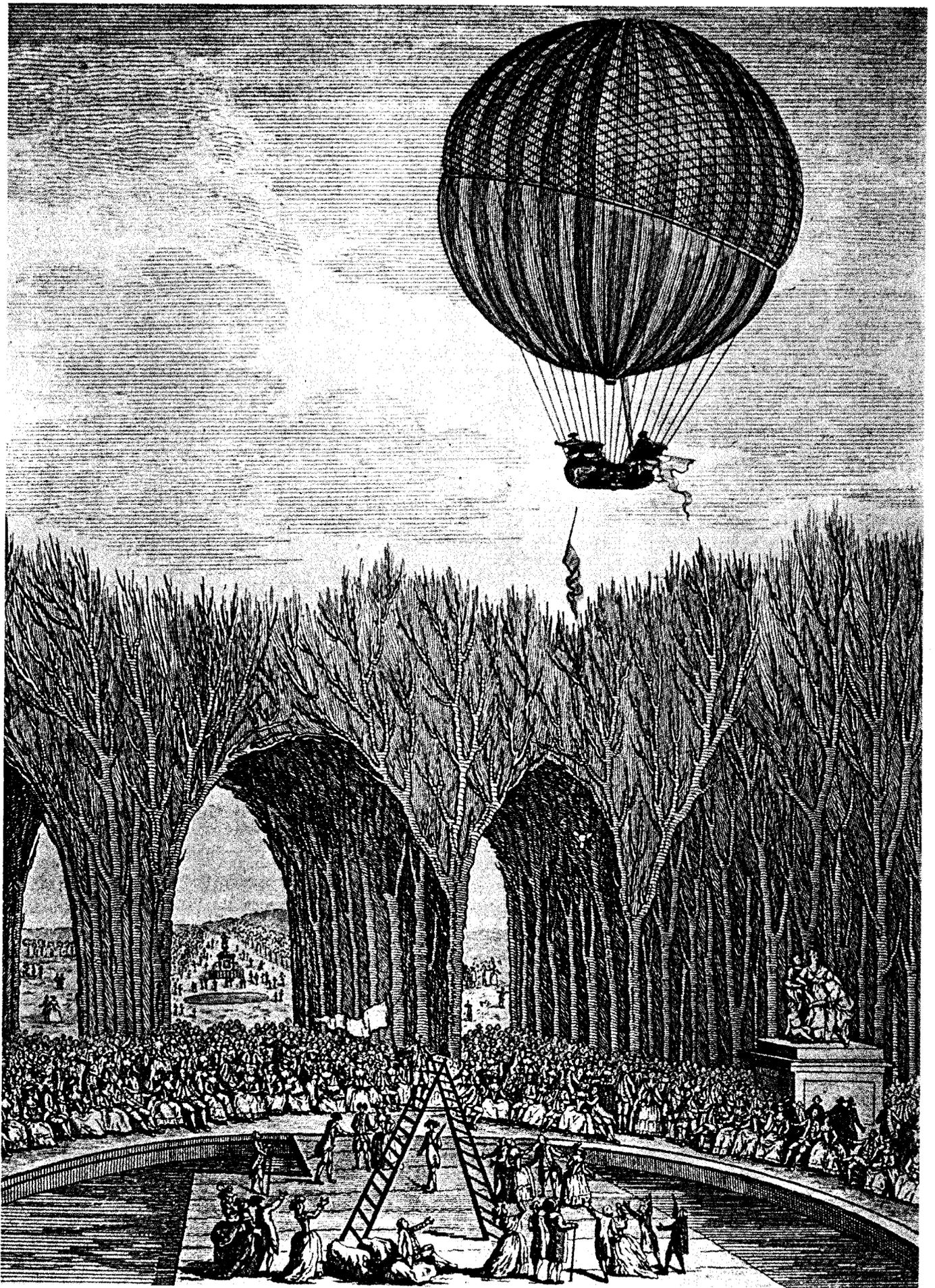
Es war eine Zeit, da ein Gelehrter noch alle Wissenschaften beherrschen konnte und zu Recht als Naturphilosoph bezeichnet werden durfte. Vier dieser Naturphilosophen beeinflussten die Erfindung des Ballons ganz wesentlich: Black, Cavendish, Priestley und Lavoisier. Alle vier würde man heute Chemiker nennen.

Wer mit den heutigen wissenschaftlichen Vorstellungen vertraut ist, kann über den primitiven Zustand der Chemie zu Beginn des 18. Jahrhunderts nur staunen. Die alchemistische Idee, daß alle Materie aus den vier irdischen Elementen Luft, Erde, Feuer und Wasser zusammengesetzt sei, war noch weit verbreitet. Vor etwa 2000 Jahren von Aristoteles in seinem später „Naturwissenschaft“ genannten Werk aufgestellt, hatte sie unter anderem zu dem Irrglauben geführt, verschiedene Stoffe ließen sich ineinander umwandeln.

Das rechte zur illusorischen Suche nach dem Stein der Weisen an, der Eisen und Blei in Gold verwandeln sollte. Ein Erbe der aristotelischen Ideen war aber auch die Phlogistontheorie, die das Denken der Chemiker im größten Teil des achtzehnten Jahrhunderts trübten und verwirren sollte.

Die Phlogistontheorie entstand im Bestreben, das Wesen des Feuers zu erklären. Schon aus den frühesten, prähistorischen Erfahrungen der Menschheit wußte man, daß gewisse Stoffe brennen und andere nicht. Die Alchemisten hatten zudem festgestellt, daß bei genügend großer Hitze auch gewöhnliche Metalle verbrennen und eine von ihnen Kalk genannte Asche hinterlassen, die nicht weiter verbrannt werden kann. Was war der Grund?

Die Erklärung, die der Leibarzt des preußischen Königs Georg Stahl in den ersten Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts gab, basierte auf einer Idee seines Lehrers Johann Becher. Becher hatte die aristotelischen Elemente um die „terra pinguis“, die „brennliche Erde“, erweitert; sie sollte beim Verbrennen einer Substanz freigesetzt werden. Stahl entwickelte die Idee weiter und behauptete, ein



Metall sei nichts weiter als eine Verbindung aus brennlicher Erde und dem Metallkalk (Phlegma). Demnach war die Verbrennung die Freisetzung der brennlichen Erde, die Stahl in Phlogiston umbenannte (nach griechisch *phlogistos*, verbrannt).

Die Phlogistontheorie war so vielseitig wie erfolgreich. So erklärte sie, warum ein Metallkalk beim Erhitzen mit Holzkohle wieder das ursprüngliche Metall lieferte: Holzkohle, eine brennbare Substanz, enthält viel Phlogiston, während der nicht brennbare Metallkalk keines besitzt. Also überträgt die Holzkohle ihr Phlogiston auf den Kalk, erzeugt dabei das Metall und hinterläßt Holzkohlensche. Erfolge wie dieser verhalfen der Theorie zu allgemeiner Anerkennung, und so sollte das Phlogiston fast das gesamte folgende Jahrhundert lang das chemische Denken beherrschen.

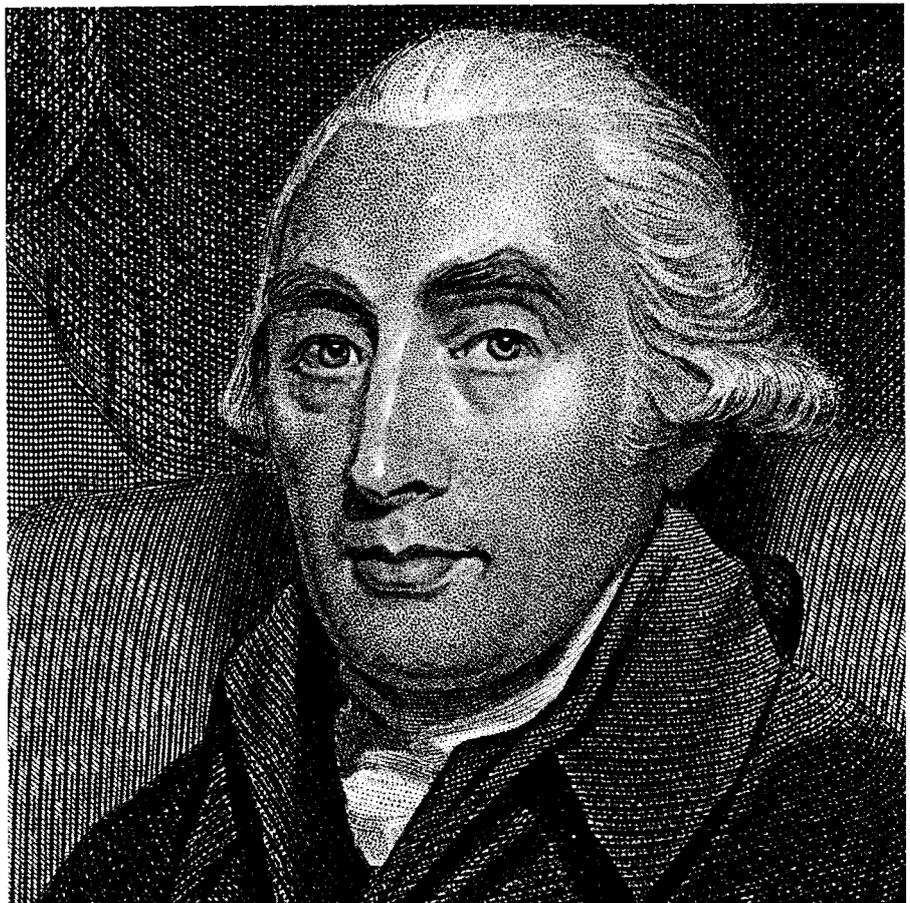
Black, Cavendish, Priestley und Lavoisier waren zu Beginn ihrer Chemiker-Karriere durchweg überzeugte „Phlogistonisten“. In der Tat erklärten die drei Erstgenannten ihre Entdeckungen oft mit der Phlogistontheorie.

Nur Lavoisier besaß das Genie, die neuen Erkenntnisse zusammen mit älteren Tatsachen in ein System der Chemie einzuordnen, in dem kein Platz mehr für das Phlogiston war. Obwohl die Arbeiten von Cavendish und Priestley ganz entscheidend zum Sturz der Phlogistontheorie beitrugen, gab paradoxerweise keiner der beiden Männer die Theorie jemals auf. Priestley war selbst im Jahre 1800, lange nachdem der von ihm entdeckte Sauerstoff als Ursache der Verbrennung akzeptiert war, noch so überzeugt von dieser Theorie, daß er sein letztes Werk „The Doctrine of Phlogiston Established“ („Der Beweis der Phlogistontheorie“) nannte.

#### Anfänge der pneumatischen Chemie

Zum ersten Bruch mit den chemischen Vorstellungen des Aristoteles führten die Experimente des Jan van Helmont, der die Ergebnisse seiner Untersuchungen im frühen 17. Jahrhundert veröffentlichte. Obwohl den Alchemisten schon früher bewußt war, daß bei Prozessen wie der Gärung oder dem Verbrennen von Holzkohle Gase freigesetzt wurden,

**Bild 4: Der erste freie Flug eines bemannten Wasserstoffballons startete am 1. Dezember 1783 in den Tuileries in Paris. Die Passagiere waren der Physiker Jacques Charles und ein Assistent, M.-N. Robert. Der Flug dauerte etwa zwei Stunden, nach deren Ablauf Robert ausstieg und Charles allein weiterflog, wobei er eine Höhe von rund drei Kilometern erreichte.**



**Bild 5: Joseph Black (1728 bis 1799) gab den Anstoß zu den Entdeckungen, die letztlich zur Erfindung des Ballons führten. Schon in den fünfziger Jahren des 18. Jahrhunderts, als er noch Medizinstudent in Edinburgh war, identifizierte er das Gas, das bei der Einwirkung von**

hielten sie diese nur für eine Form von gewöhnlicher Luft. Durch einfache chemische Experimente erzeugte van Helmont jedoch Gase, die er von normaler Luft unterscheiden konnte. Er gab ihnen so anschauliche Namen wie Windgas, Fettgas und Rauchgas. Zwar führte er weder chemische Tests mit ihnen durch, noch versuchte er, sie zu isolieren; aber ihm gebührt das Verdienst, das Wort „Gas“ in den wissenschaftlichen Sprachschatz eingeführt zu haben. Das Studium der Gase entwickelte sich zu einem eigenständigen Zweig der Chemie: der pneumatischen Chemie, als deren Begründer van Helmont gilt.

Die pneumatische Chemie lag bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts gleichsam in einem Dornröschenschlaf. Dann plötzlich erwachte sie zu neuem Leben, änderte ihre Zielsetzung und erbrachte überraschende Resultate. Torbern Bergmann, ein schwedischer Chemiker des 18. Jahrhunderts, beschrieb es so: „Während der letzten zehn Jahre hat sich die Chemie nicht nur in das Reich der unsichtbaren, luftigen Substanzen

Säuren auf Magnesia (Magnesiumcarbonat) entsteht, als von gewöhnlicher Luft verschiedenen Stoff. Die neue Substanz, die er gebundene Luft nannte, wurde später in Kohlendioxid umbenannt. Dieser Stahlstich ist die Kopie eines Gemäldes von Sir Henry Raeburn.

aufgeschwungen, sondern auch gewagt, die Natur dieser Stoffe zu untersuchen und nach ihren Aufbauprinzipien zu forschen.“ In der Tat war 1779, als diese Zeilen geschrieben wurden, die Zusammensetzung von acht Gasen schon mit Sicherheit bekannt.

#### Künstliche Lüfte

Obwohl Black, Cavendish, Priestley und Lavoisier nicht eng zusammenarbeiteten, bauten ihre wissenschaftlichen Beiträge doch aufeinander auf und entwickelten sich zu dem, was wir heute als „Wissenschaftliche Revolution“ bezeichnen.

Den Reigen der Entdeckungen eröffnete Black (Bild 5). Als Medizinstudent an der Universität Edinburgh untersuchte er in den fünfziger Jahren des 18. Jahrhunderts mit großer Sorgfalt das Gas, das durch Einwirkung von Säuren auf Magnesia (Magnesiumcarbonat) entsteht. Eigentlich wollte er die „antisauren“ Eigenschaften von Magnesia ver-

stehen lernen; doch dann stellte er fest, daß das freigesetzte Gas ein chemisch eigenständiger Stoff und nicht mit Luft identisch ist.

Black nannte die neue Substanz „fixed air“, gebundene Luft, da sie im Magnesiumcarbonat gebunden schien. Zu jener Zeit wußte man noch nicht, daß sie in Wahrheit eine Verbindung aus mehreren chemischen Elementen ist, und so vergingen noch mehrere Jahrzehnte, bis sie nach ihren Bestandteilen in Kohlendioxid umbenannt wurde.

Indem Black Gasblasen durch Kalkwasser leitete und auf eine verräterische milchige Trübung achtete, konnte er zeigen, daß gebundene Luft sowohl beim Verbrennen von Holzkohle als auch bei der Atmung und bei der Gärung freigesetzt wird. Black wurde einer der bekanntesten „chemischen Philosophen“ seiner Zeit. Er lehrte als Professor für Chemie zunächst in Glasgow und später in Edinburgh.

Einer der ersten Wissenschaftler, der die Eigenschaften von gebundener Luft untersuchte, war Cavendish (Bild 6). Er war der Prototyp des frühen Naturphilosophen: reich, exzentrisch und menschenscheu. Als Erbe eines riesigen Vermögens (er gehörte zeitweilig zu den reichsten Männern Englands) führte er freiwillig ein Leben in mönchischer Abgeschiedenheit, ganz seinen Experimenten hingegen.

Im Jahre 1766 veröffentlichte er drei Artikel mit dem Titel „Experiments on Factitious Air“ („Experimente über künstliche Luft“). Unter künstlicher Luft verstand er jede Art von Gas, die „in anderen Körpern enthalten ist, . . . und aus ihnen“ durch chemische Manipulationen „erzeugt wird“. Vor Cavendish fiel nur Blacks gebundene Luft in diese Kategorie. Auch Cavendish stellte nach Blacks Methode gebundene Luft her, indem er Säure auf Magnesia einwirken ließ. Das freiwerdende Gas fing er jedoch anders als Black in Tierblasen auf. Indem er die Blase zunächst mit normaler und dann mit gebundener Luft füllte und jeweils wog, entdeckte Cavendish, daß gebundene Luft 1,47mal schwerer ist als normale Luft.

Von Neugier getrieben, ging Cavendish einen Schritt weiter. Was würde passieren, wenn man das Magnesia aus Blacks Experiment durch ein gewöhnliches Metall wie Eisen ersetzte? Wieder entwickelten sich Gasblasen, und wieder fing sie Cavendish in einer Blase auf. Diese künstliche Luft jedoch lieferte keinen Niederschlag in Kalkwasser und war auch nicht schwerer, sondern elfmal leichter als normale Luft. Überdies rief sie, statt wie gebundene Luft eine Flamme auszulöschen, eine Explosion hervor, wenn sie mit einer Flamme in Berührung

kam. Offensichtlich hatte Cavendish ein zweites künstliches Gas entdeckt, das er „brennbare Luft“ nannte.

Die Arbeiten von Black und Cavendish machten klar, daß es verschiedene Arten von Gasen gab. „Luft“ konnte also nicht länger als eines der vier Grundelemente der Materie betrachtet werden. Wie aber stand es mit Erde, Feuer und Wasser?

#### Keine Verwandlung von Wasser in Erde!

„Erde“ als Grundelement schied als nächstes aus, und zwar durch einen einfachen Versuch, den der junge französische Aristokrat Lavoisier etwa zur gleichen Zeit unternahm. Er wiederholte ein altes Experiment, das die aristotelische Auffassung zu stützen schien, Erde sei ein chemisches Element. Dazu erhitzte man Wasser lange Zeit in einem geschlossenen „Pelikan“. (So sah das damals übliche Reaktionsgefäß, eine Retorte, ungefähr aus.) Nach einiger Zeit zeigte sich am Boden des Gefäßes eine kleine Menge Feststoff. Dieses Experiment war als Umwandlung von Wasser in „Erde“ gedeutet worden.

Lavoisier beschloß, die gängige Interpretation des Versuchs mit der Waage zu überprüfen. Er wog den leeren Pelikan und goß gereinigtes Wasser hinein. Nachdem er die Spitze versiegelt hatte, notierte er das Gewicht des gefüllten Gefäßes. Dann ließ er das Wasser 101 Tage lang sanft vor sich hin sieden. Nach Ende des Experiments wog er den gefüllten und den geleerten Pelikan noch einmal. Das Gesamtgewicht hatte sich nicht verändert, aber das Gefäß selbst war leichter geworden. Dabei entsprach sein Gewichtsverlust genau dem Gewicht des Bodensatzes, der sich gebildet hatte. Offensichtlich war diese „Erde“ vom Wasser aus dem Glaspelikan herausgelöst worden und nicht durch Umwandlung des Wassers entstanden. Zusammen mit den Arbeiten von Black und Cavendish begründete Lavoisiers Experiment ernste Zweifel an den aristotelischen alchemistischen Theorien.

Den letzten Akt der wissenschaftlichen Revolution leiteten weitere Entdeckungen in der pneumatischen Chemie ein, die vor allem Priestley (Bild 7) machte. Er war ein Mann mit vielen Talenten und Interessen. Ausgebildet als Nonkonformistenprediger, hatte er mehrere Karrieren hinter sich: als Verleger, Autor (von 106 Büchern) und zuletzt als Chemiker.

Im Jahre 1772 veröffentlichte er den Artikel „Observations of Different Kinds of Air“ („Beobachtungen verschiedener Arten von Luft“), in dem er

die Herstellung mehrerer neuer Gase beschrieb. Im Laufe der nächsten zehn Jahre bis zur Erfindung des Ballons, fügte er seiner Liste von Entdeckungen acht weitere Gase hinzu.

Kernpunkt des Erfolges von Priestley war eine wesentlich verbesserte Technik zum Auffangen von Gasen. Zuvor hatten Chemiker das Gas zu diesem Zweck in eine wassergefüllte Glasglocke geleitet, die vorsichtig umgestülpt und in eine Wasserwanne gesetzt worden war. Während sich das Gas oben in der Glocke sammelte, verdrängte es Wasser aus ihr in die Wanne. War ein Gas jedoch wasserlöslich, ließ es sich mit dieser Methode nicht auffangen. Indem Priestley einfach das Wasser durch flüssiges Quecksilber ersetzte, konnte er viele neue Gase sammeln und analysieren.



Bild 6: Henry Cavendish (1731 bis 1810) untersuchte die Eigenschaften von „gebundener Luft“ sowie von einer anderen Art „künstlicher Luft“, die er „brennbare Luft“ nannte und die sich als elfmal leichter als gewöhnliche Luft erwies: Wasserstoff. Die Zeichnung von W. Alexander, das einzige zeitgenössische Porträt Cavendishs, befindet sich im British Museum.

Seine bedeutendste Entdeckung machte Priestley im Jahre 1774. Er erhitzte das rote Quecksilber-Präzipitat, ein den Alchemisten schon lange bekanntes Pulver, indem er Sonnenlicht durch eine Linse mit 30 Zentimeter Brennweite darauf fallen ließ. Auch dabei entstand ein Gas, so wie Black beim Verbrennen von Holzkohle eine Gasentwicklung beobachtet hatte, aber es war nicht gebundene Luft. Dieses Gas hatte ganz neue, bemerkenswerte Eigenschaften: Es ließ Kerzen heller brennen, und eine Maus überlebte in ihm doppelt so lange wie in der gleichen Menge gewöhnlicher Luft.

Als Anhänger der Phlogistontheorie deutete Priestley diese Eigenschaften verständlicherweise im Einklang mit der von ihm vertretenen Lehre. Denken Sie daran, daß man annahm, aus einer brennenden Substanz würde Phlogiston entweichen. Da es ja nicht verschwinden konnte, überlegte Priestley, daß es wohl von dem neuen Gas aufgenommen worden sei. Also mußte das Gas ursprünglich frei von Phlogiston gewesen sein. Priestley nannte es daher „dephlogisticated air“ („entphlogistonierte Luft“).

Dieser Name sollte freilich nicht lange bestehenbleiben. Schon bald darauf wurde das Gas im Labor von Lavoisier in Sauerstoff umbenannt und diente als Eckpfeiler in der modernen Theorie der Verbrennung.

### Lavoisiers Verbrennungstheorie

Etwa um diese Zeit nämlich kamen Lavoisier ernsthafte Zweifel an der Phlogistontheorie. 1772 hatte er eine Abhandlung über das Verbrennen von Schwefel und Phosphor an Luft verfaßt. Wieder wog er Ausgangs- und Endprodukte und stellte so fest, daß beide Substanzen beim Verbrennen schwerer wurden. Diese Gewichtszunahme erklärte er mit der Aufnahme von Luft.

In seinem Artikel ging Lavoisier noch weiter und vermutete, daß „das, was wir beim Verbrennen von Schwefel und Phosphor beobachten, ebensowohl bei allen anderen Substanzen stattfinden mag . . . und ich bin überzeugt, daß die Gewichtszunahme von Metallkalken die gleiche Ursache hat“. In Einklang mit seinen Überlegungen fand Lavoisier, daß beim Erhitzen von Bleikalk (Bleioxid) mit Holzkohle, „gerade als sich der Kalk in Metall verwandelte, eine große Menge Gas freigesetzt wurde“.

Diese Beobachtungen und Spekulationen standen in krassem Widerspruch zur Phlogistontheorie, nach der ja aus einer Substanz beim Brennen Phlogiston entwich, so daß sie leichter werden sollte. Der junge Lavoisier, das Revolutionäre

seiner Idee klar erkennend, übermittelte seine Abhandlung als versiegelte Notiz der französischen Akademie und sicherte sich so das Prioritätsrecht auf diese bahnbrechenden Gedanken, falls künftige Arbeiten sie bestätigen sollten.

Lavoisiers ausgereifte Vorstellungen über die Verbrennung und seine Theorie der Verbrennung erschienen in seiner berühmten Abhandlung von 1783: „Réflexions sur le phlogistique“ („Überlegungen zum Phlogiston“). Dort faßte er seine zahlreichen Argumente gegen die Phlogistontheorie zusammen. Für ihn lagen die Dinge so klar, daß er schreiben konnte: „Die einzige Absicht, die ich mit diesem Bericht verfolge, ist es, die 1777 von mir verkündete Verbrennungstheorie auszuweiten; zu zeigen, daß Stahls Phlogiston reine Phantasie ist, daß die Annahme seiner Existenz in Metallen, Schwefel, Phosphor und allen brennbaren Stoffen jeder Grundlage entbehrt und daß sich alle Vorgänge bei der Verbrennung und Kalzinierung viel leichter und einfacher ohne es erklären lassen.“

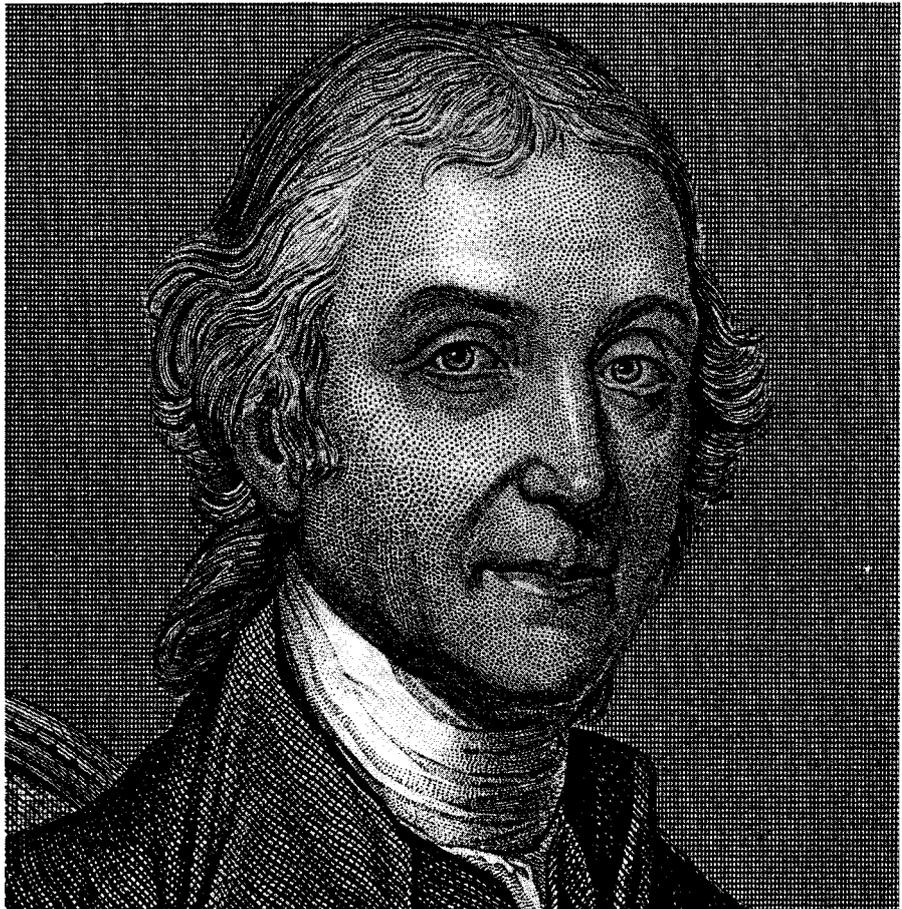
Lavoisiers Erklärung war in der Tat einfach: Nicht Phlogiston entwich bei einer Verbrennung, sondern der Sauerstoff der Luft verband sich mit der Sub-

stanz. Mit Lavoisiers Hypothese waren alle beobachteten Fakten – und zwar auch quantitativ – zu erklären. Dazu zählte etwa die Tatsache, daß die Gewichtszunahme einer Substanz beim Verbrennen exakt dem Gewicht des dabei verschwindenden Sauerstoffgases entsprach.

### Wasser ist kein Element

Zu dieser Zeit fanden die Forschungsergebnisse der pneumatischen Chemie weite Verbreitung. Große Fortschritte im Verständnis der Materie waren begleitet von der Entdeckung weiterer Gase mit ungewöhnlichen neuen Eigenschaften. So hatte Priestley, mit den Eigenschaften von Blacks gebundener Luft wohlvertraut, diese in Wasser gelöst und festgestellt, daß die Mischung angenehm schmeckt. Das neue „Sodawasser“ erfreute sich in der europäischen Gesellschaft sofort großer Beliebtheit.

Auch die Gebrüder Montgolfier erfuhr von den Untersuchungen über Gase und übertrugen sie auf ihre Vorstellung von Ballonen. Aber noch bedurfte es eines weiteren Durchbruchs, um die wissenschaftliche Revolution und



**Bild 7: Joseph Priestley (1733 bis 1804) konnte im Jahrzehnt vor der Erfindung des Ballons, acht weitere Gase isolieren. Als treuer An-**

**hänger der Phlogistontheorie identifizierte er die bedeutendste von ihm entdeckte Substanz – Sauerstoff – als „entphlogistonierte Luft“.**

die Entwicklung des Ballons zum Abschluß zu bringen.

Diese Tat wurde in England vollbracht. Wie zuvor schon Priestley benutzte Cavendish elektrische Funken, um neue Gase zu untersuchen. Besonders interessierte er sich für das leichte Gas, das er früher brennbare Luft genannt hatte. So zündete er Gemische dieses Gases mit entphlogistonierter Luft. Der Funken erzeugte eine bläuliche Flamme, wobei sich das Volumen des Gases verminderte und ein kleiner Tropfen Flüssigkeit entstand, den Cavendish Tau nannte.

Dieser Tau weckte Cavendishs Neugier, und so ersann er ein zweites Experiment, um größere Mengen davon zu sammeln. „Die Substanz“, so schrieb er, „war geschmack- und geruchlos und hinterließ beim Verdampfen weder einen erkennbaren Rückstand, noch gab sie einen stechenden Geruch dabei ab; kurz, es schien reines Wasser zu sein.“ Die weitere Untersuchung erwies, daß es genau das war.

Dieses berühmte Experiment wurde schon 1781 durchgeführt, aber erst 1784 der Royal Society berichtet. Die formale Veröffentlichung verzögerte sich vor allem deshalb, weil Cavendish zunächst noch eine merkwürdige Beobachtung weiter untersuchen wollte. Er hatte festgestellt, daß das entstandene Wasser sauer reagierte, wenn er im Experiment statt entphlogistonierter gewöhnliche Luft einsetzte. Als Grund für die Azidität erkannte er die Gegenwart von Salpetersäure, deren Zusammensetzung er als erster zu bestimmen vermochte.

Cavendish hatte also gezeigt, daß Wasser entstand, wenn man ein Gemisch von brennbarer und entphlogistonierter Luft entzündete. Für ihn hieß das freilich nicht, daß Wasser eine Verbindung aus Sauerstoff und Wasserstoff war – nicht für einen überzeugten Phlogistonisten! Er schrieb vielmehr: „Es gibt also allen Grund anzunehmen, daß entphlogistonierte Luft nichts anderes ist als Wasser, dem das Phlogiston entzogen wurde, und daß brennbare Luft entweder, wie schon früher gesagt, mit Phlogiston angereichertes Wasser oder aber reines Phlogiston ist – höchstwahrscheinlich jedoch das erstere.“ Mit anderen Worten: Cavendish glaubte, daß Wasser in beiden Lüften enthalten sei und durch die Reaktion zwischen ihnen nur freigesetzt würde. Bei diesem Vorgang ginge das Phlogiston von der phlogistonreichen brennbaren auf die phlogistonlose entphlogistonierte Luft über.

Am 12. November 1783 hielt Lavoisier bei einem öffentlichen Treffen der Akademie einen Vortrag mit dem langen Titel: „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 recomposition.“ („Bericht, in dem bewiesen werden soll, daß Wasser keine einfache Substanz, sprich Element, ist, sondern daß es zersetzt und wieder zusammengesetzt werden kann.“) Obwohl sich seine Methoden und Ergebnisse mit denen Cavendishs nicht messen konnten, war Lavoisier kühn genug, den Sprung zu wagen und zu behaupten, Wasser sei eine Verbindung aus Sauerstoff und Wasserstoff.

Er hatte sich allerdings zusätzlich ein raffiniertes Experiment ausgedacht, um zu zeigen, daß sich Wasser in seine elementaren Bestandteile zerlegen läßt. Seine Idee fußte auf der Beobachtung, daß sich bei der Reaktion von Wasserdampf mit rotglühendem Eisen (in seinem Experiment ein Gewehrlauf) das Wasser unter Bildung von Wasserstoff und Eisenoxid zersetzt. Aber erst als er bei einem Nebenversuch feststellte, daß die gleiche Reaktion mit rotglühendem Kupfer nicht ablief, konnte er das Experiment ausführen, das ihm vorschwebte.

Den erfolgreichen Versuch machte er mit einem Kupferrohr, das kleine Eisenstückchen enthielt. Er tropfte eine abgewogene Menge Wasser in das rotglühende Rohr. Das Wasser verdampfte, reagierte mit dem Eisen und zersetzte sich. Der nichtzersetzte restliche Dampf wurde kondensiert und gewogen. Die bei der Zersetzung gebildete Gasfraktion (Wasserstoff) fing Lavoisier über Wasser auf und bestimmte gleichfalls ihr Gewicht. Schließlich wurde auch das Eisen im Kupferrohr zurückgewogen und seine Gewichtszunahme ermittelt. Aus diesen Daten berechnete Lavoisier, daß Wasser aus einem Gewichtsteil Wasserstoff und 6,5 Gewichtsteilen Sauerstoff bestehen sollte. (Der richtige Wert ist 1:8.)

Diese anschauliche Demonstration, daß sich Wasser zerlegen und wieder zusammensetzen läßt, paßte so gut in Lavoisiers Vorstellung von der Materie, daß sie der Phlogistontheorie den letzten Schlag versetzte. Mehr als das: Das Experiment markierte das Ende der vier aristotelischen Elemente.

### Ein neues System der Chemie

Mit der erfolgreichen Deutung dieses Versuchs war Lavoisier in der Lage, ein neues, logisches System der Chemie aufzustellen. Er beschrieb es in seinem Lehrbuch „Traité élémentaire de chimie“ im Jahre 1789. Darin tauchen sowohl Sauerstoff als auch Wasserstoff in einer Liste von 33 Elementen auf, von denen alle bis auf zwei auch im heutigen Periodensystem zu finden sind. Das Er-

scheinen dieses Buches markiert den Beginn der wissenschaftlichen Revolution und die Geburt der modernen Chemie.

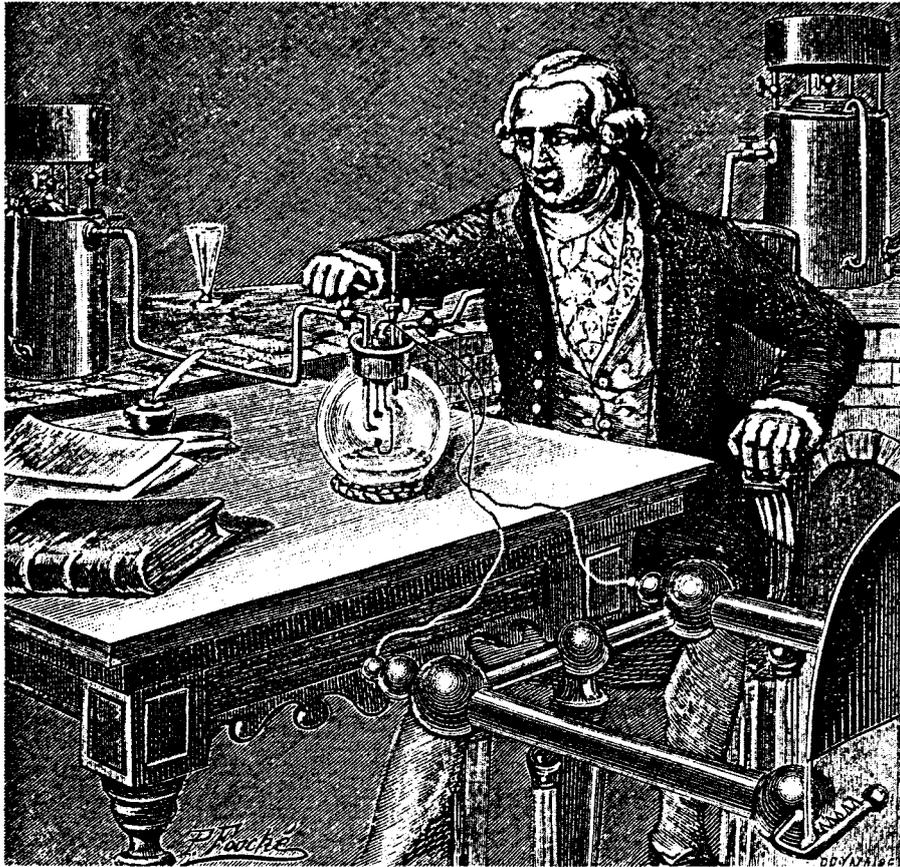
Denkt man an die Geschichte der ersten Ballonaufstiege, so ist der Einfluß der parallel verlaufenden revolutionären Entwicklungen in der Chemie auf die Anfänge der Luftfahrt und insbesondere die Erfindung des Wasserstoffballons offensichtlich. Aber die Verknüpfung zwischen beiden war noch viel enger.

Obwohl die Geschichte des Wasserstoffballons in Cavendishs Laboratorium begann, wo dieser als erster „brennbare Luft“ erzeugte und herausfand, daß sie viel leichter als gewöhnliche Luft ist, war es doch Black, der als erster die Möglichkeit demonstrierte, ein Objekt herzustellen, das leichter ist als Luft. Thomas Thomson, der Nachfolger Blacks auf dem Chemie-Lehrstuhl in Glasgow, beschreibt diese erste „Flugdemonstration“ wie folgt:

„Bald nach Erscheinen des Artikels von Mr. Cavendish über Wasserstoffgas, in dem er das spezifische Gewicht dieser Substanz abschätzt und zeigt, daß sie mindestens zehnmal leichter als gewöhnliche Luft ist, lud Dr. Black einige Freunde zum Abendessen ein mit der Ankündigung, daß er ihnen etwas Merkwürdiges zu zeigen habe. Dr. Hutton, Mr. Clarke aus Eldon und Sir George Clarke aus Pennicuik waren unter den Gästen.

Sobald sich die Geladenen versammelt hatten, bat Dr. Black sie in einen Nebenraum, wo er die Allantois [die dünne Fruchtblase] eines Kalbes mit Wasserstoffgas gefüllt hatte. Losgelassen, stieg sie auf und blieb unter der Decke hängen. Das Phänomen wurde schnell erklärt: Man hielt es für ausgemacht, daß ein dünner Faden an der Allantois befestigt und durch die Decke geführt worden wäre und daß irgend jemand in der oberen Wohnung die Fruchtblase an dem Faden zur Decke gezogen hätte und dort festhielt. Diese Erklärung war so wahrscheinlich, daß die ganze Gesellschaft ihr beipflichtete; aber, wie so viele einleuchtende Theorien, erwies sie sich als gänzlich haltlos; denn als die Allantois wieder heruntergeholt wurde, fand man keinen Faden daran befestigt.“

Jahre später, 1784, schrieb Black einen Brief, in dem er seine Gedanken über dieses Experiment darlegte: „Da Sie von der ‚Geburt‘ aerostatischer Experimente sprechen, bitte ich um Erlaubnis, Ihnen meine Gedanken zu diesem Gegenstand etwas ausführlicher mitteilen zu dürfen. Zunächst möchte ich auf keinen Fall meinen Anspruch auf Verdienste um die Erfindung von Maschinen für allgemeine Flüge und Exkursionen anmelden, obwohl das, was ich Ihnen schon berichtet habe, absolut wahr ist. Das Experiment mit der Blase, das ich



**Bild 8:** Antoine Lavoisier (1743 bis 1794) führt auf diesem handkolorierten Kupferstich aus dem 19. Jahrhundert ein Experiment durch, bei dem er, um die Zusammensetzung von Wasser zu bestimmen, ein Gemisch aus Wasserstoff- und Sauerstoffgas mit einem elektrischen Funken entzündet. Es war Lavoisier, der die Phlo-

gistontheorie endgültig widerlegte und bewies, daß Wasser kein Element ist. Auch bei der Planung der frühen Ballonexperimente und bei der Berichterstattung darüber spielte er als Mitglied einer zu diesem Zweck im Juli 1783 von der französischen Akademie der Wissenschaften gebildeten Kommission eine führende Rolle.

als schlagenden Beweis für Mr. Cavendishs Entdeckung anregte, war so offensichtlich, daß jeder hätte darauf kommen können; mir selbst kam es allerdings nie in den Sinn, große künstliche Blasen herzustellen und davon schwere Lasten heben und Menschen in die Luft tragen zu lassen. Ich hege nicht den geringsten Verdacht, daß diese Idee bereits irgendwo geboren wurde, bevor wir von solchen Versuchen in Frankreich gehört haben, und ich bezweifle auch nicht, daß das, was in den Zeitungen steht, absolut wahr ist, daß nämlich Mons. Mongolfier [*sic*] schon vor einiger Zeit die Idee hatte, mit Hilfe einer sehr großen Tüte oder eines Ballons voll gewöhnlicher Luft, die durch die Hitze einer Flamme verdünnt wurde, in die Luft aufzusteigen.

Da die Idee auf einem Prinzip gründet, das schon seit langem bekannt ist und nichts mit Mr. Cavendishs Entdeckung zu tun hat, erstaunt es eigentlich, daß Mons. Mongolfier sie nicht schon eher in die Tat umsetzte. Ich glaube daher, daß er, obwohl er das Projekt möglicherweise schon lange Zeit vorhatte, nicht eher zur Tat angespornt wurde, bis andere daran

dachten, mit Hilfe von brennbarer Luft zu fliegen. Wer die Methode erdachte, vermag ich nicht zu sagen, da ich nichts über die Geschichte der Experimente gelesen habe; sie interessierten mich nie im geringsten.“

#### **Black inspirierte die Gebrüder Montgolfier**

Welche Spekulationen veranlaßten die Gebrüder Montgolfier wirklich, ihre Experimente mit dem Heißluftballon durchzuführen? Die Antwort auf diese Frage ist schwer zu geben und muß wohl gleichfalls Spekulation bleiben. James Glaisher stellte in der Ausgabe der „Encyclopaedia Britannica“ von 1878 fest: „Die Gebrüder Montgolfier dachten, daß die Hülle flog, weil der Rauch oder ein anderer Dampf, der von dem brennenden Stroh ausging, besonders leicht sei; und es dauerte geraume Zeit, bis man erkannte, daß die Kraft zum Aufstieg einfach von der Leichtigkeit der erwärmten Luft im Vergleich zu einem gleichgroßen Volumen Luft bei tieferer

Temperatur herrührte.“ Offensichtlich hatten die Montgolfiers den Eindruck, daß der vom Stroh abgegebene Dampf brennbare Luft oder etwas Ähnliches sei. Black wußte es jedoch besser. In seinem Brief stellte er eindeutig fest, daß die wärmere Luft einfach „verdünnt“ ist.

Es gibt einen weiteren Anhaltspunkt dafür, daß sich die Gebrüder Montgolfier über die Natur des von Feuer erzeugten Rauches und Dampfes täuschten. In der Korrespondenz von Sir John Sinclair, einem damals in England politisch aktiven Juristen, findet sich folgende Geschichte: „Gegen Ende des Jahres 1785 traten Umstände ein, die mich zu einem kurzen Ausflug von London nach Paris veranlaßten, und zufällig reiste ich in Gesellschaft von drei angesehenen Ausländern, nämlich Argand, so wohlbekannt durch seine Verbesserungen in der Kunst der Lampenherstellung, Reuillon, dem damals größten Hersteller von Papiertapeten, ... und Joseph Montgolfier, so gefeiert wegen seiner Erfindung des Ballons. Aus der Konversation dieser intelligenten Männer konnte ich vieles erfahren, und ich erinnere mich besonders daran, daß der letztgenannte einen Bericht über den Ursprung seiner Entdeckung gab, der den folgenden Inhalt hatte.

Montgolfier sagte, daß er und sein Bruder zwar Papierfabrikanten aus dem Languedoc seien, er sich aber immer schon stark zu chemischen Forschungen hingezogen gefühlt habe. Das habe sie dazu gebracht, sich alle ihnen zugänglichen Informationen über diesen Gegenstand zu beschaffen. Es scheint, daß Montgolfier und sein Bruder schon sehr früh über die Möglichkeit gesprochen hatten, selbst aufzusteigen oder große Objekte von der Erde emporzuschicken, ohne allerdings irgendwelche Experimente gemacht zu haben, um die Durchführbarkeit ihrer Idee zu prüfen. Doch als er zufällig einen Bericht über einige von Dr. Blacks Experimenten las, in dem dieser die Natur der verschiedenen Lüfte oder Gase und insbesondere ihre unterschiedlichen Gewichte erklärte, sagte er sofort zu seinem Bruder: „Die Möglichkeit, das auszuführen, worüber wir vor einiger Zeit sprachen, scheint von einem ausländischen Chemiker bewiesen worden zu sein.“ Der Punkt, von dem die Allgemeinheit Kenntnis erlangen sollte, ist der, daß ohne die Entdeckungen von Dr. Black die Gebrüder Montgolfier wahrscheinlich kein Experiment versucht hätten. Dies kann ich unter Berufung auf den älteren Montgolfier versichern, der einer der aufrichtigsten und fähigsten Männer ist, denen ich je begegnet bin, und der von Dr. Black immer mit jener Hochachtung sprach, auf die dieser ein so besonderes Anrecht hat.“