

# Kontroversen in der Chemie: Wie beweist man ein Negativum? – Die Fälle Phlogiston und Kalte Fusion\*\*

Jay A. Labinger\* und Stephen J. Weininger\*

## Stichwörter:

Energieumwandlung · Kalte Fusion · Sauerstoff · Wissenschaftsgeschichte

In unserem ersten Essay dieser Reihe untersuchten wir zwei kontroverse Fälle zur Stereochemie, die nicht nur zeitlich weit auseinander lagen — einer aus den ersten Anfängen des Gebiets und ein recht neuer –, sondern auch hinsichtlich ihrer Tragweite völlig unterschiedlich waren, ganz zu schweigen davon, dass die Mitwirkenden über ganz verschiedene Experimentiermethoden und konzeptionelles Rüstzeug verfügten. Wie wir versuchten zu zeigen, stehen sie dennoch in engem Zusammenhang, was eine der grundlegendsten Fragen in der historischen Entwicklung einer Wissenschaftsdisziplin angeht: Wie eignet man sich darauf, was beim Lösen von Streitfragen als Beweis zählt.

Für unsere zweite Studie haben wir erneut zwei Fälle ausgewählt, die so verschieden wie nur möglich zu sein scheinen. Der erste Fall, der Untergang der Phlogiston-Theorie, datiert in die Ursprünge der modernen Chemie und wird heute als eine der zentralen Entwicklungen dieser Zeit betrachtet. Der zweite Fall, die Episode der kalten Fusion, ist erst 15 Jahre alt und wird inzwischen allgemein (aber keineswegs von jedermann) lediglich als ein Fehltritt auf dem langen historischen Weg der Che-

mie angesehen. Wir haben diese beiden Fälle miteinander verknüpft, weil wir glauben, dass sie – ähnlich wie in der vorherigen Studie – bei näherer Betrachtung erkennen lassen, wie Kontroversen ausgetragen werden und zugleich den Fortschritt der Wissenschaft beflügeln. Was zählt als Beweis? Diese Frage spielt auch hier eine Rolle, im Mittelpunkt steht aber das überzeugte Festhalten an einer Theorie oder Hypothese, deren *Nichtexistenz* schwer zu beweisen ist.

## Fall 1: Der Untergang von Phlogiston – was lernen wir daraus?

Phlogiston war lange ein Lieblingsthema von Schreibern, insbesondere Lehrbuchautoren, die historische Gegebenheiten gerne als Vehikel für ihre persönlichen Philosophien nutzten. Diese Erscheinung ist nicht neu. Wie viele Chemiker des 19. Jahrhunderts haben sich auch Roscoe und Schorlemmer für den Status der Chemie interessiert. In ihrer Arbeit *Treatise on Chemistry* von 1881 erklärten sie: „It is only after Stahl's labours [über Phlogiston] that a scientific chemistry becomes possible“.<sup>[1]</sup> Und auch Linus Pauling betonte später noch, dass Stahls Konzept einen passenden theoretischen Rahmen für die Chemie geliefert hätte:

„The phlogiston theory thus provided a general explanation of the chemical processes of oxidation and reduction ... It is interesting to consider the other ways in which chemical phenomena were accounted for by the phlogiston theory. The success of the theory in providing these explanations explains the fact that it had many strong adherents“.<sup>[2]</sup>

Diese anerkennenden Kommentare geben aber nicht die allgemeine Meinung der Lehrbuchautoren wieder. Die Geschichte von Phlogiston wird gewöhnlich als warnendes Beispiel präsentiert: „The phlogiston theory ... long outlived its usefulness, and the tenacity with which it maintained itself is an instructive illustration of the difficulty which most men have of freeing their minds from the authority of a long held theory“, eine Theorie, welche „delayed the development of chemistry as an exact science for three-quarters of a century“.<sup>[3]</sup>

Abgesehen von dem, was uns die Phlogiston-Episode angeblich über die Schwächen des menschlichen Verstands lehrt, ist es (einigen Autoren zufolge) auch ihr Verdienst, die Erfolge der Wissenschaft zu unterstreichen:

„Although the phlogiston theory is of no importance today, the way in which it was discarded is a good illustration of the manner in which the scientific method operates... It remained for Lavoisier, who had developed good equipment and a facility for accurate experimentation, to deliver the crushing blow to the theory“.<sup>[4]</sup>

Da das Ende der Phlogiston-Theorie nach allgemeiner Ansicht bereits um 1800 gekommen war, könnte man annehmen, dass sie heute kaum noch relevant ist. Aber offensichtlich haben noch nicht alle Wissenschaftler daraus gelernt: So hielt man es 1991 in der Zeitschrift *Chemtech* für notwendig, die Geschichte unter der Überschrift „A timely analysis of the persistence of lousy ideas“ noch einmal aufzuwärmen.<sup>[5]</sup> In diesem Teil unseres Essays

[\*] Dr. J. A. Labinger  
Beckman Institute  
California Institute of Technology, 139-74  
Pasadena, CA 91125 (USA)  
Fax: (+1) 626-449-4159  
E-mail: jal@its.caltech.edu  
Prof. S. J. Weininger  
Worcester Polytechnic Institute  
Worcester, MA 01609-2280 (USA)  
Fax: (+1) 508-831-5933  
E-mail: steveiw@wpi.edu

[\*\*] Kontroversen in der Chemie, Teil 2.  
Teil 1 siehe Lit. [25].

werden wir versuchen, zwei Fragen zu beantworten: War die Phlogiston-Theorie wirklich eine „lausige“ Idee? Und warum überdauerte sie länger als ein Jahrhundert?

Wir können mit der Beantwortung der ersten Frage beginnen, indem wir feststellen, wie irreführend die *Chemtech*-Überschrift ist – ein Umstand, der bei der Behandlung dieses Themas keineswegs ungewöhnlich ist. Der Artikel selbst ist die Adaptation eines Kapitels von James Bryant Conant, einem der wichtigsten Phlogiston-Historiker.<sup>[6]</sup> In Conants Arbeit taucht nirgends die Phrase „lousy idea“ auf, und er spottet weder über die Theorie noch verlacht er ihre Befürworter. Er merkt vielmehr an, dass das Konzept „provided a pattern into which a mass of otherwise unrelated phenomena could be fitted“.<sup>[7]</sup> Wie wir sehen werden, war Conants Respekt gegenüber Phlogiston und den Phlogistonisten völlig angemessen.<sup>[8]</sup>

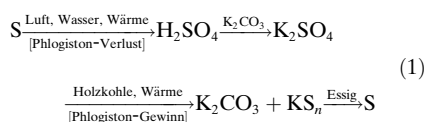
Die Grundkonzeption der Phlogiston-Hypothese wurde Mitte des 17. Jahrhunderts von Johann Joachim Becher entwickelt, aber erst durch die Arbeiten seines Studenten Georg Ernst Stahl, der später Professor für Medizin an der Universität Halle war (1694–1715) und den Begriff Phlogiston prägte, rückte Phlogiston in den Mittelpunkt des chemischen Denkens.<sup>[9]</sup> Das Konzept beruhte auf der damals verbreiteten Annahme, dass die Eigenschaften von Substanzen auf in ihnen enthaltene *Träger* dieser Eigenschaften zurückzuführen sind, die man *Prinzipien* nannte. Beispielsweise waren Substanzen metallisch, salzartig oder sauer, weil sie die Prinzipien für metallischen, salzartigen bzw. sauren Charakter enthielten. Ein Prinzip konnte Träger von mehr als einer Eigenschaft sein, und die Vielfältigkeit der Substanzen erklärte man damit, dass in jeder Substanz unterschiedliche Anteile der Prinzipien vorlägen.<sup>[10]</sup>

Das genaue Wesen dieser Prinzipien war umstritten. Manche Autoren klassifizierten sie als rein hypothetisch, manche als real, aber nicht wägbare (die meistenordneten Phlogiston dieser Kategorie zu), und manche als real und wägbare (später gehörte auch Phlogiston in diese Kategorie). Nach allgemeiner Ansicht konnten Prinzipien nicht in freiem Zustand isoliert werden, sondern

gingen bei chemischen Reaktionen von einer Substanz auf eine andere über.

Mit der Lehre von den Prinzipien ließen sich tatsächlich zahlreiche wohl-bekannte Phänomene erklären, darunter viele aus praktischen Fachgebieten wie Bergbau und Metallurgie. Beispielsweise war allgemein bekannt, dass brennbare Substanzen wie Holzkohle und Schwefel erdige Metallerze (Kalke genannt) in glänzende, formbare Metalle überführen. Stahl und seine Anhänger schrieben diese Umwandlung der Übertragung von Phlogiston, dem Prinzip von Brennbarkeit und Metallcharakter, von der Holzkohle oder dem Schwefel auf das Erz zu. Bemerkenswert an dieser Theorie ist, dass Metalle (die aus einem Kalk und Phlogiston bestanden) komplexer wären als ihre Kalke (Oxide). Die Sauerstofftheorie behauptete genau das Gegenteil, nämlich dass Metalle weniger komplex seien als ihre Kalke. Dieser Unterschied war einer der Hauptstreitpunkte zwischen den Phlogistonisten und den Antiphlogistonisten.

Die Beschreibung der Reduktion von Metallerzen durch Holzkohle als Phlogiston-Übertragung war mehr als nur ein Gedankenspiel. Sie wurde empirisch durch die Beobachtung reversibler chemischer Umwandlungen gestützt, z. B. die Verbrennung von Schwefel zu Schwefelsäure und seine Rückgewinnung aus dem erhaltenen Kaliumsulfat durch Reaktion des Salzes mit Holzkohle. Die Phlogistonisten vertraten die Auffassung, da die Verbrennung von Schwefel mit dem Verlust von Phlogiston verbunden sei, könne der Schwefel zurückgewonnen werden, indem man das Produkt mit einem Phlogiston-reichen Stoff wie Holzkohle verbindet – was exakt der Beobachtung entsprach [Gl. (1)].<sup>[11]</sup>



Mithilfe der Phlogiston-Theorie erkannte Stahl ferner, dass die Umkehr der Erzreduktion, die Verkalkung von Metallen, eine Form der Verbrennung war, die sich von der Verbrennung von Holzkohle nur in der Geschwindigkeit unterscheidet. Selbst Stahls entschei-

denste Gegner mussten zugeben, dass diese Entdeckung von größter Bedeutung war. Zudem betrachtete Stahl auch die Atmung als einen Phlogiston-Transfer, und stellte so eine konzeptionelle Verbindung zwischen der belebten und der unbelebten Welt her. Er glaubte zudem, Phlogiston bliebe erhalten und würde z. B. bei der Verbrennung von Holzkohle oder Schwefel an der Luft (die damals als Einzelsubstanz angesehen wurde) frei werden und von der Luft absorbiert. Damit die Luft atembar blieb, sollte das Phlogiston wiederum von lebenden Organismen absorbiert werden, womit der Phlogiston-Kreislauf in der Natur geschlossen wäre.<sup>[12]</sup>

Schließlich ist erwähnenswert, dass die Phlogiston-Theorie die erste echte chemische Theorie für chemische Erscheinungen war und bewusst als Gegenstück zur damals vorherrschenden mechanischen Theorie aufgestellt wurde, da diese die für chemische Prozesse so charakteristischen qualitativen Änderungen nicht überzeugend erklären konnte. Im Jahr 1770, zu einer Zeit, als auch Lavoisier begann, sich für Verbrennungsprozesse zu interessieren, war die Phlogiston-Theorie „not a decaying relic tradition ... but a work that symbolized for most chemists the achievement of autonomy for chemistry“.<sup>[13]</sup>

Der leidenschaftlichste Befürworter von Phlogiston war Joseph Priestley, der bis zu seinem Tod im Jahr 1804 daran glaubte.<sup>[14]</sup> Der unnachgiebigste Gegner des Phlogistons war Antoine-Laurent Lavoisier, der 1772 mit einer Reihe von Experimenten begann, die schließlich ihn und später alle Chemiker überzeugten, dass das Phlogiston-Konzept völlig überflüssig sei.<sup>[15]</sup> Dabei beriefen sich Priestley und Lavoisier auf dieselbe Versuchsreihe, um ihre sich widersprechenden Schlussfolgerungen zu stützen.

Viele dieser Versuche beschäftigten sich mit der Herstellung und Unterscheidung einer Reihe neuer Gase (damals als „Lüfte“ bezeichnet). Einer der wichtigsten führte zur Entdeckung einer neuen „Luft“: Die thermische Zersetzung von HgO lieferte „eine überaus atembare Luft“, welche die Verbrennung und lebende Organismen weit besser unterhielt als gewöhnliche Luft. Für Priestley war das Gas „dephlogistierte Luft“ – gewöhnliche Luft, der das Phlogiston fehlte. Für Lavoisier war es

„Oxygenium“, eine „einfache Substanz“, die mit anderen Stoffen unter Verbrennung oder Verkalkung reagierte. Um zwischen diesen beiden Alternativen unterscheiden zu können, musste das Verhalten verschiedener „Lüfte“ unter verschiedenen chemischen und biologischen Bedingungen beobachtet und interpretiert werden.

Folgt man der Standardversion über das Ende der Glaubwürdigkeit von Phlogiston, so entdeckte Lavoisier unerwartet, dass die Verbrennung von Substanzen mit einer Gewichtszunahme verbunden war, obwohl sie angeblich Phlogiston verloren. Dadurch sahen sich die Anhänger der Phlogiston-Theorie gezwungen, absurderweise anzunehmen, Phlogiston habe ein negatives Gewicht – was bis auf wenige Dickschädel alle von der Überlegenheit der Sauerstofftheorie der Verbrennung überzeugte.

Die wirklichen Ereignisse sind, wie oft in solchen Fällen, nicht annähernd so überschaubar. Schon 1630 hatte Jean Rey nachgewiesen, dass Metallkalk mehr wogen als die Metalle, aus denen sie erhalten wurden, und im 18. Jahrhundert bestätigten Forscher diese Beobachtung.<sup>[16]</sup> Die Phlogistonisten betrachteten dieses Ergebnis nicht als fatal für ihre Theorie, sondern erklärten es in deren Rahmen.

Es gab in der Tat mehrere konkurrierende Modelle, die alle auf der plausiblen Annahme beruhten, dass Phlogiston leichter ist als Luft. Eine Erklärung für die Gewichtszunahme war beispielsweise, dass bei der Verkalkung eines Metalls das Phlogiston in seinem Inneren durch Luft ersetzt wird. Dass die Verkalkung nicht ausnahmslos zu einer Gewichtszunahme führte – durch die manchmal sehr hohen Temperaturen verdampfte das Produkt teilweise, was in einer Gewichtsabnahme resultierte –, schwächte die Wirkung dieses Angriffs zusätzlich.

Auch von anderen experimentellen Ergebnissen glaubt man, dass sie die Phlogiston-Hypothese entkräftet haben. Wie bereits erwähnt wurde, kommt dabei der thermischen Zersetzung von Quecksilberkalk (HgO) besondere Bedeutung zu.<sup>[17]</sup> Bei diesem Experiment wird ein Gas freigesetzt und das Metall Quecksilber bleibt zurück. Lavoisier betrachtete die Ergebnisse als entschei-

dende Bestätigung für die Sauerstofftheorie, da Quecksilber seinen metallischen Zustand ohne jede externe Phlogiston-Quelle wie Holzkohle zurückgewinnt. Die Phlogistonisten hielten aber eine andere Erklärung bereit. Nach 1780 waren die meisten von ihnen der Auffassung, dass bei der Verkalkung das Phlogiston in den Poren des Metalls durch Luft ersetzt wird. Diese so genannte „fixierte Luft“ (über deren Zusammensetzung erhebliche Uneinigkeit herrschte) wurde als reich an Phlogiston angesehen. Man nahm an, das Phlogiston ginge beim Erhitzen auf den Quecksilberkalk über, und dieser würde dadurch wieder in den metallischen Zustand versetzt. Die übrige, dephlogistierete Luft wurde wie beobachtet abgegeben.

Schon diese kurze Zusammenfassung zeichnet das Bild zweier konkurrierender Theorien, von denen sich schließlich diejenige durchsetzte, die den passenderen Erklärungsrahmen für ständig neue experimentelle Ergebnisse bot.<sup>[18]</sup> Lavoisiers Bilanzmethode berücksichtigte die Gewichte aller Reaktanten und Produkte und zeigte, dass nichts Wägbares geschaffen oder zerstört wurde; dies überzeugte andere Chemiker besonders nachhaltig von seiner Theorie. Für die strikte Anwendung seiner Methode musste Lavoisier aber einige Prämissen des Systems übernehmen, das er eigentlich widerlegen wollte. Um beispielsweise die drei Zustände der Materie und die bei Oxidationsreaktionen frei werdende Wärme erklären zu können, postulierte Lavoisier, dass alle Substanzen einen Wärmestoff, die materielle Basis der Wärme, in unterschiedlichen Mengen enthielten. Da seinen Beobachtungen zufolge die Gewichte von Reaktanten und Produkten nahezu perfekt übereinstimmten – so genau, dass einige seiner Gegner verständliche Zweifel hegten<sup>[19]</sup> –, hielt Lavoisier es für nötig anzunehmen, dass der Wärmestoff zwar real, aber ein nicht wägbares Fluidum sei. Phlogiston lässt grüßen!

Gerade die nicht wägbaren Aspekte von chemischen Erscheinungen, wie Wärme, Licht und Elektrizität, waren ein Grund, aus dem die Sauerstofftheorie für unzureichend befunden wurde. So konnte eine kleine Gruppe von Naturphilosophen Sauerstoff als „eine der

größten Entdeckungen in der Physik“ (nach den Worten des berühmten Geologen James Hutton) feiern, aber gleichzeitig an Phlogiston festhalten. Die Realität von Phlogiston, so behauptete Hutton, bliebe „those philosophers, who, with the balance in their hands refuse to admit into the rank of chymical elements substances which do not ponderate...“ immer verborgen.<sup>[20]</sup> Bis zur Entwicklung des Energiebegriffs Mitte des 19. Jahrhundert war Huttons Kritik nicht völlig von der Hand zu weisen.

Darüber hinaus verlieh die teilweise Entschlüsselung von Lavoisiers System dem Schicksal von Phlogiston vorübergehend Auftrieb. Beispielsweise machte die kinetische Wärmetheorie den Wärmestoff überflüssig.<sup>[21]</sup> Ein noch härterer Schlag war die Entdeckung, dass Sauerstoff kein essenzieller Bestandteil von Säuren ist. Es wird oft vergessen, dass sich Lavoisiers Theorie genauso auf die Acidität wie auf die Verbrennung bezog.<sup>[22]</sup> („Oxygenium“ wurde aus den griechischen Worten für „Säurebildner“ abgeleitet.) Lavoisier beschrieb Sauerstoff als das Prinzip von Säuren – eine unglückliche Wiederholung von Stahls Formulierung, wonach Phlogiston das Prinzip der Brennbarkeit war. Als Humphrey Davy 1810 bewies, dass Muriatische Säure (HCl) keinen Sauerstoff enthält und die so genannte „oxygenierte Muriatische Säure“ in Wirklichkeit elementares Chlor ist, erhoben sich von manchen Seiten Zweifel an der Lebensfähigkeit der Sauerstofftheorie.<sup>[23]</sup> Davy selbst stand im ersten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts Phlogiston wohlwollend gegenüber, und seine Ergebnisse mit HCl und Cl<sub>2</sub> riefen Bedenken hervor, denen zufolge „future discoveries shall ... utterly destroy the merits of the later improvements in pneumatic chemistry and bring us back to the doctrine of phlogiston ...“.<sup>[24]</sup>

Dennoch blieben die Sauerstofftheorie der Verbrennung, die Nomenklaturreform und weitere Pfeiler der Chemischen Revolution unerschüttert. Wie wir in unserem früheren Essay anmerkten, bedarf es gewöhnlich mehr als nur empirischer Gegenbeweise, um eine Theorie zu widerlegen, die in Schlüsselfragen erfolgreiche Vorhersagen machen konnte.<sup>[25]</sup> Wie lassen sich nun die gegensätzlichen Schicksale der Sauerstoff- und der Phlogiston-Theorie

erklären? In den beiden letzten Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts konnten die Phlogistonisten lediglich Erklärungen für bekannte Ergebnisse liefern, während Lavoisier und seine Anhänger bis dahin unbekannte Phänomene vorhersagten. Auch um die experimentellen Ergebnisse zu erklären, die eine so entscheidende Rolle im Streit zwischen den beiden Theorien spielten, griffen die Phlogistonisten ständig auf Ad-hoc-Hypothesen zurück. Schließlich charakterisierte Lavoisier das Phlogiston vollkommen berechtigt als „a veritable Proteus that changes its form every instant!“<sup>[26]</sup> Ihre Langlebigkeit verdankte diese proteische Vorstellung aber weitgehend dem Umstand, dass der Beweis ihrer Nichtexistenz mit großen Schwierigkeiten verbunden war.<sup>[27]</sup>

## Fall 2: Das kurze Leben (und längere Nachleben) der kalten Fusion

In unserem ersten Essay dieser Reihe haben wir mit der Kontroverse über die Bindungslängenisomerie eine jüngere Auseinandersetzung diskutiert, die selbst den meisten Chemikern kaum bekannt und anderen Naturwissenschaftlern völlig unbekannt war. Die etwa zeitgleiche Kontroverse um die kalte Kernfusion war das genaue Gegenteil. Sie gehörte 1989 mehrere Monate zu den aktuellsten Themen überhaupt – nicht nur in wissenschaftlichen Zeitschriften, sondern auch in Tageszeitungen, Magazinen und Fernsehsendungen. Wir können uns an keine andere chemische Geschichte erinnern, die vergleichbare Beachtung fand. Ihre Darstellung in der Öffentlichkeit verdient eigentlich eine gesonderte Betrachtung, die über den Rahmen dieses Essays aber weit hinausgehen würde. Es fehlt auch der Platz, um Behauptungen und Gegenbehauptungen in allen Einzelheiten zu berücksichtigen; die meisten Leser sind vermutlich ohnehin zumindest mit den Grundzügen der Kontroverse vertraut. Nachstehend geben wir eine kurze Zusammenfassung; wer mehr wissen möchten, sei auf ausführliche Darstellungen in Büchern verwiesen, die in den ersten Jahren nach der Kontroverse erschienen und unterschiedliche Perspektiven widerspiegeln (z. B. die eines

ablehnenden Wissenschaftlers,<sup>[28]</sup> eines agnostischen/skeptischen Wissenschaftlers,<sup>[29]</sup> eines ablehnenden Wissenschaftlers/Wissenschaftsjournalisten,<sup>[30]</sup> eines befürwortenden Wissenschaftlers/Wissenschaftsjournalisten<sup>[31]</sup> und eines ablehnenden Wissenschaftsjournalisten<sup>[32]</sup>). Im Internet findet man leicht eine Reihe weiterer Bibliographien.

Die Kontroverse begann im März 1989, als Stanley Pons und Martin Fleischmann, Elektrochemiker an der University of Utah, eine Pressekonferenz abhielten und verkündeten, dass die Elektrolyse von D<sub>2</sub>O an einer Palladiumelektrode anomale Effekte hervorrief: Unter anderem wurde mehr Energie freigesetzt als eingebracht – in einem Fall so viel, dass die Pd-Kathode schmolz und die Apparatur zerstört wurde. Eine wenig später erscheinende (aber vor der Pressekonferenz eingereichte) Publikation lieferte Details und beschrieb zudem Neutronenflüsse,  $\gamma$ -Strahlen mit der für Proton-Neutron-Reaktionen charakteristischen Energie und die Anreicherung von Tritium im Elektrolyt.<sup>[33]</sup> Ähnliche, aber weit weniger spektakuläre Ergebnisse (deutlich weniger Neutronen, kein Wärmeüberschuss) wurden um die gleiche Zeit von Steve Jones veröffentlicht, einem Physiker an der Brigham Young University.<sup>[34]</sup> (Beide Forschergruppen wussten von der Arbeit der anderen. Daher waren Prioritätsinteressen – insbesondere Patentrechte – ohne Zweifel der Anlass für die unorthodoxe Veröffentlichung über eine Pressekonferenz; sie bestimmten auch in hohem Maß den Stil der folgenden Ereignisse.) Nach Ansicht der Autoren waren ihre Beobachtungen nur mit einer auf irgendeine Art im Pd-Gitter katalysierten Kernfusion zu erklären.

Die potenzielle Bedeutung einer solchen Entdeckung lag auf der Hand, und so wollten viele die scheinbar einfach durchführbaren Versuche wiederholen. Innerhalb weniger Wochen wurde eine Reihe positiver Ergebnisse verkündet (meist durch Pressemitteilungen, nach dem Vorbild des Originals): Wärmefreisetzung (Texas A&M, Stanford), Neutronen (Georgia Tech) und Tritium (Washington, eine andere Arbeitsgruppe bei Texas A&M). Eine Sonderveranstaltung über die kalte Fusion beim ACS National Meeting im April

1989 zog etwa 7000 (meist) enthusiastische Chemiker an. Unmittelbar danach wurden aber auch starke Zweifel laut, denn einige der hoch gelobten „Bestätigungen“ wurden mit dem Hinweis auf experimentelle Schwierigkeiten zurückgezogen. Bei einer Sonderveranstaltung anlässlich des American Physical Society Meetings Anfang Mai wurden eine Reihe negativer Ergebnisse vorgestellt. Ein Teilnehmer (Nate Lewis, der seine Resultate später veröffentlichte<sup>[35]</sup>) berichtete ausführlich darüber, dass seine Forschergruppe keinerlei Wärmeüberschuss nachweisen konnte, gab mögliche Gründe an, warum man (irrtümlich) experimentell einen Wärmeüberschuss ermitteln *könnte*, und widerlegte die von Pons und Fleischmann geäußerten Vermutungen, die seiner Ansicht nach dazu geführt hatten, aus nicht überzeugenden Daten einen Wärmeüberschuss abzuleiten. Noch im Mai erschien eine Publikation, die bewies, dass es sich bei der angeblichen  $\gamma$ -Strahlung um ein Artefakt handelte.<sup>[36]</sup>

Während des nächsten Jahres dauerte die Kontroverse an, da regelmäßig weitere positive wie negative Ergebnisse erschienen. Eine Abteilung des Department of Energy (DOE) untersuchte das Thema während des Sommers und veröffentlichte einen – deutlich negativen – Bericht im Oktober. Im August 1989 wurde in Salt Lake City das National Cold Fusion Institute (NCFI) eröffnet; die Mittel dafür stellte der Staat Utah, nachdem die bundesstaatliche Unterstützung verweigert worden war. Hier wurde im März 1990 die First Annual Conference on Cold Fusion abgehalten, an der in erster Linie (und beabsichtigt) diejenigen teilnahmen, die positive Ergebnisse vorzuweisen hatten. Die meisten Kritiker waren ohnehin zu dem Schluss gekommen, dass es kaum noch etwas zu kritisieren gab, und hatten das Interesse weitgehend verloren. Gegen Ende des Jahres 1990 hatten sowohl Pons als auch Fleischmann Utah verlassen, das NCFI schloss im folgenden Juni. Die Kontroverse um die kalte Fusion war endgültig beendet.

Das gilt aber *nicht* für die kalte Fusion: Die Forschung wurde in geringem Ausmaß bis zum heutigen Tag fortgesetzt. Viele dieser Arbeiten wurden nicht in großen Journalen, sondern in anderen (für diesen Zweck gegrün-



deten) Zeitschriften oder elektronisch publiziert. Hin und wieder erschienen auch Berichte in renommierten Organen; beispielsweise wurde 1993 von *Physics Letters A* ein Beitrag von Pons und Fleischmann über Kalorimetrie angenommen.<sup>[37]</sup> Diese Publikation ist auch aus anderen Gründen erwähnenswert: Sie beschreibt die anscheinend letzte gemeinsame experimentelle Arbeit von Fleischmann und Pons über die kalte Fusion. Vielleicht noch wichtiger ist, dass sie zu den letzten Arbeiten zur kalten Fusion gehört, die ein Skeptiker aus technischen Gründen formell angezweifelt hat.<sup>[38]</sup> Spätere Behauptungen ignorierte die breite Masse der Wissenschaftler fast völlig, und die Populärmedien zogen mit wenigen Ausnahmen nach. Zusammenstellungen dieser Arbeiten findet man auf einer Reihe von Internetseiten, zu erwähnen ist die LENR-CANR-Seite (low energy nuclear reactions/chemically assisted nuclear reactions),<sup>[39]</sup> deren bibliographisches Material und Zusammenfassungen die Handschrift starker Befürworter der kalten Fusion tragen.

Eine ganz andere (und interessante) Perspektive kann man einem neueren Buch des Wissenschaftssoziologen Bart Simon entnehmen: Er schlägt darin ein Modell vor, das erklären soll, wie und warum Forschungsgebiete über den Punkt hinaus bestehen, an dem die überwältigende Mehrheit der Fachleute sie als beendet betrachtet – als das, was er „untote Wissenschaft“ nennt.<sup>[40]</sup>

Zur Betrachtung wissenschaftlicher Kontroversen wurden zwei weniger phantasievolle, dafür aber ziemlich widersprüchliche Konzepte angeboten: eins aus interner Sicht und ein eher externes – und *beide* scheinen recht gut auf die Saga der kalten Fusion zu passen. Das erste Modell ist das der „pathologischen Wissenschaft“; es wurde 1953 zuerst von Irving Langmuir in einem Vortrag beschrieben (eine Neuveröffentlichung erschien 1989 in *Physics Today*<sup>[41]</sup>) und später von Denis Rousseau aktualisiert.<sup>[42]</sup> Nach Rousseau hat die pathologische Wissenschaft drei Haupteigenschaften:

1. Die beobachteten Effekte liegen nahe der Nachweisgrenze und/oder sind statistisch gerade noch signifikant; ihre Größe kann durch Variieren experimenteller Parameter

nicht systematisch verändert werden.

2. Die Unvereinbarkeit mit anerkannten Theorien oder Prinzipien wird ohne weiteres ignoriert.
3. Die Forscher vermeiden die Durchführung entscheidender Versuche, die die Effekte möglicherweise nicht bestätigen, und weigern sich, die Ergebnisse anderer aus derartigen Versuche zu akzeptieren.

Rousseau zufolge treffen alle drei Punkte auf Pons und Fleischmann zu (zwei weitere, von ihm untersuchte Fälle waren „Polywasser“ und Benvenistes „unendliche Verdünnung“), wobei er besonders auf die völlig fehlende Übereinstimmung zwischen dem behaupteten Wärmeüberschuss und den nachgewiesenen Anteilen nuklearer Nebenprodukte (Punkt 2) sowie die Unterlassung jeglicher Kontrollversuche mit gewöhnlichem Wasser (Punkt 3) hinwies. Der erste Punkt betrifft die Frage des Wärmeüberschusses selbst (auch wenn Rousseau dazu nicht konkret Stellung nimmt): Sogar in der Originalarbeit<sup>[33]</sup> scheinen einige Ergebnisse (dort in Tabelle 2) für Effekte zu sprechen, die sich umgekehrt zur Eingabe ändern; eine spätere Analyse bestätigte, dass vielen der eindrucksvollsten Behauptungen in Wirklichkeit winzige, durch zweifelhafte Annahmen aufgeblähte Zahlen zugrunde lagen.<sup>[35]</sup>

Eine ganz andere Sichtweise hat der Wissenschaftssoziologe Harry Collins vorgebracht. Bei einer Diskussion über die Suche nach Gravitationswellen wurde die „Regression des Experimentators“ eingeführt, nach der es unmöglich ist, Fragen zur Existenz oder Nichtexistenz eines neuen Phänomens von Fragen über die Gültigkeit der für seinen Nachweis entwickelten Experimente zu trennen:

„When the normal criterion – successful outcome – is not available, scientists disagree about which experiments are competently done. Where there is disagreement about what counts as a competently performed experiment, the ensuing debate is coextensive with the debate about the proper outcome of the experiment.“<sup>[43]</sup>

Diese Aussage lässt sich eindeutig auf die kalte Fusion anwenden (was Collins und ein Kollege taten<sup>[44]</sup>): Jedes negative Ergebnis kann immer als inkorrekt durchgeführt angezweifelt werden. Und das geschah auch: zum Beispiel durch die Behauptung, die falsche Elektrodenart sei verwendet worden.

Die Tatsache, dass diese gegensätzlichen Kennzeichnungen beide zutreffen, hat viel mit dem Fortbestand der Forschung zur kalten Fusion zu tun – wenn auch nur als Geisterwesen, wie Simon es nennen würde. Wie sollten wir neue Ergebnisse in Anbetracht der früheren, erheblich diskreditierten Arbeiten beurteilen? Pons und Fleischmann und andere haben einige große Fehler gemacht, die zu Berichten über beträchtliche Effekte führten – einem Wärmeüberschuss von mehr als 1000 %, hohe Mengen an Neutronen oder Tritium –, sodass ein Skeptiker bequem den Schluss ziehen kann, die nun beschriebenen, im Allgemeinen wesentlich kleineren Effekte resultierten aus subtileren Fehlern. Umgekehrt können Befürworter logischerweise argumentieren, ihre neuen Experimente würden sehr wohl frühere Kritikpunkte berücksichtigen und dürften nicht automatisch als mit den gleichen alten Fehlern behaftet angesehen werden; sie erhalten jedoch nie die Gelegenheit, sich zu verteidigen, da niemand sich auch nur die Mühe macht, sie zu kritisieren. Hierzu wurde 2003 in *Chemical & Engineering News* ein (klagender) Brief veröffentlicht,<sup>[45]</sup> der überhaupt keine Resonanz hervorrief. Dazu merkt Simon an:

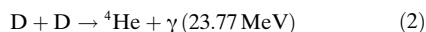
„No matter what kinds of new experiments and data CF researchers present, their critics (if even listening) always drag them back to debates from 1989. There seems to be no escape ... Their collective identity as a group as well as their scientific practice is organized to a large degree around reclaiming scientific legitimacy by constantly revisiting the criticisms of 1989–1990. In part they have no choice, since there are few extant criticisms of work after 1990 that they can address.“<sup>[46]</sup>

Einen weiteren Beitrag zum Fortbestand der kalten Fusion leistete ihr fraglos chimärenhaftes Wesen. Welche

der im Zusammenhang mit der kalten Fusion beschriebenen Phänomene – Wärmeüberschuss, Neutronen, Tritium, Röntgen-Strahlen,  $\gamma$ -Strahlen, Helium, sogar Transmutation<sup>[47]</sup> – sind grundlegend für welche Vorgänge (wenn diese überhaupt ablaufen)? Zumindest einige dieser Berichte sind unbestritten falsch, aber was bedeutet das für die anderen? Der Wissenschaftsphilosoph William McKinney behauptete beispielsweise, man könne der „Regression des Experimentators“ durch die objektive Analyse von Experimenten entgehen, und nahm an, die kalte Fusion habe den „Knockout“ erhalten, als die  $\gamma$ -Strahlung anhand ihrer Signatur eindeutig als Artefakt entlarvt wurde (was die Neutronenbehauptung unterminierte).<sup>[48]</sup> Befürworter der kalten Fusion halten jedoch an keiner Theorie fest, und so muss der Wärmeüberschuss (ihrer Ansicht nach) nicht an Neutronen gebunden sein. Da niemand ernsthaft behauptet hat, die Phänomene auf der Basis einer einigenden Theorie zu verstehen, müssen zwischen den untersuchten Erscheinungen keine echten Zusammenhänge bestehen. Aus streng logischer Sicht müsste jedes Einzelexperiment für sich untersucht werden: Wird eine Reihe von Behauptungen für jeden zufriedensstellend entkräftet, so widerlegt dies nicht unbedingt eine andere.

Tatsächlich wird in einer neueren Untersuchung (von dem oben zitierten Briefschreiber Melvin Miles) über den Nachweis von  $^4\text{He}$  und mehr oder weniger gleich große Wärmeüberschüsse berichtet, wenn man voraussetzt, dass die Wärme durch Fusion von zwei Deuteronen zu  $^4\text{He}$  und Energie entsteht [Gl. (2)]. Außerdem behauptet er, obwohl die Erzeugung des Wärmeüberschusses nicht immer reproduzierbar sei, korrelierten die beiden Erscheinungen aber gut. Auch sei das lange geforderte Kontrollexperiment durchgeführt worden: Versuche mit Leichtwasser ergaben weder einen Wärmeüberschuss noch  $^4\text{He}$ .<sup>[49]</sup> Natürlich ist die  $\text{D}+\text{D}$  „Standardfusion“ in Gleichung (2) im Vergleich zu Reaktionen, die Neutronen und Tritium erzeugen,<sup>[50]</sup> ein wenig wahrscheinlicher Reaktionsweg, und man müsste auch erklären, warum die freigesetzte Energie vollständig als Wärme und nicht als Strahlung auftritt (um nur einen von vielen Punkten zu nen-

nen). Wenn man aber bereit ist, die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, dass innerhalb des Pd-Gitters ein ungewöhnlicher Kernprozess abläuft (für viele ist das sehr fraglich, aber die Befürworter der kalten Fusion scheint es nicht sehr beunruhigt zu haben), gibt es a priori keinen Grund dafür, über diese und andere Ergebnisse hinwegzugehen. Die Experimente könnten in verschiedener Hinsicht kritisiert werden, aber die Arbeiten der letzten zehn Jahre sind ja – wenn überhaupt – kaum genauer geprüft worden.



Die Sachlage ist also folgende: Weder konnte ein Befürworter der kalten Fusion bisher das Stigma „pathologische Wissenschaft“ beseitigen, indem er exakt und reproduzierbar Effekte nachwies, die groß genug sind, um die Möglichkeit eines Irrtums auszuschließen (z. B. durch Konstruktion eines funktionierenden Stromgenerators), noch kann man eindeutig den Schluss ziehen, dass das offensichtlich anomale Verhalten insgesamt auf einen Fehler zurückzuführen ist. Daher entschloss sich das DOE zu einer weiteren Untersuchung, die noch nicht abgeschlossen war, als dieser Essay geschrieben wurde (im Sommer 2004). Die zahlreichen Kommentare zur Ankündigung dieser Untersuchung lassen es aber sehr unwahrscheinlich erscheinen,<sup>[51]</sup> dass der Bericht die strittigen Fragen klären wird – die Zitate in der rechten Spalte geben eine Kostprobe.

Zwischen den beiden besprochenen Fällen bestehen deutliche Unterschiede: Während es bei der Phlogiston-Kontroverse darum ging, den besten theoretischen Rahmen zur Erklärung einer Reihe von experimentellen Beobachtungen zu wählen, stehen bei der kalten Fusion keine nennenswerten Theoriegerüste zur Auswahl. Statt dessen haben wir es mit einer Reihe von Beobachtungen zu tun, die sich nicht mit einer bekannten Standardtheorie erklären lassen, und müssen entscheiden, ob es sich dabei (zum Teil) um echte Anomalien handelt, die neue Vorstellungen erfordern, oder um bloße Fehler. Die Mehrheit der Wissenschaftler hat sich (explizit oder implizit) für die zweite Interpretation entschieden, genau wie

„There are quite a few people who are putting their time into this. They are working under conditions that are bad for their careers. They think they are doing something that may result in some important new finding. I think scientists should be open minded. Historically, many things get overturned with time.“

„The critical question is, How good and different are [the cold fusion researchers'] new results? If they are saying, 'We are now able to reproduce our results', that's not good enough. But if they are saying, 'We are getting 10 times as much heat out now, and we understand things', that would be interesting. I don't see anything wrong with giving these people a new hearing.“

„I think a review is a waste of time. But if you put together a credible committee, you can try to put the issue to bed for some time. It will come back. The believers never stop believing.“

sich am Ende des 18. Jahrhunderts die Mehrheit gegen Phlogiston ausgesprochen hat. Die Standpunkte der Minderheit wurden aber, damals wie heute, noch wesentlich länger vertreten. Diesen anhaltenden Irrglauben kann man leicht durch Unvernunft erklären, dies wäre jedoch (wie wir versucht haben zu zeigen) eine unangebrachte Vereinfachung. Die beiden Fälle verdeutlichen, dass es manchmal sehr schwierig sein kann, die Nichtexistenz eines Gedankens zu beweisen, der einmal von der menschlichen Vorstellung Besitz ergriffen hat.

Übersetzt von Dr. Kathrin-M. Roy, Langenfeld

- [1] H. E. Roscoe, C. Schorlemmer, *Treatise on Chemistry*, Vol. 1, Macmillan, London, 1881, S. 14.
- [2] L. Pauling, *General Chemistry: An Introduction to Descriptive Chemistry and Modern Chemical Theory*, 2. Aufl., W. H. Freeman, San Francisco, 1953, S. 120.
- [3] A. Findlay, *The Spirit of Chemistry: An Introduction to Chemistry for Students of the Liberal Arts*, Longman Green, London, 1930, S. 143.

- [4] R. A. Day, Jr., R. C. Johnson, *General Chemistry*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, **1975**, S. 5.
- [5] J. B. Conant, *Chemtech* **1991**, 592–596.
- [6] a) J. B. Conant, *Science and Common Sense*, Yale University Press, New Haven, **1951**; b) Conants Hauptarbeit über Phlogiston ist eine seiner berühmten Fallstudien: „The Overthrow of the Phlogiston Theory: The Chemical Revolution of 1775–1789“: *Harvard Case Studies in Experimental Science*, Vol. 1 (Hrsg.: J. B. Conant, L. K. Nash), Harvard University Press, Cambridge, **1966**, S. 65–115.
- [7] Lit. [5], S. 592.
- [8] Die Geschichte von Phlogiston war für Wissenschaftshistoriker wie für die Wissenschaftler selbst von großem Interesse. Sie diente als paradigmatischer Fall für eine umstrittene philosophische Theorie zum Wandel von Wissenschaft: T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 2. erw. Aufl., University of Chicago Press, Chicago, **1970**, S. 52–56, 69–72. Eine frühe soziologische Studie: H. G. McCann, *Chemistry Transformed: The Paradigmatic Shift from Phlogiston to Oxygen*, Ablex, Norwood, **1978**. In zwei weiteren Büchern ist Phlogiston ein wichtiges Thema (auch wenn es nicht in den Titeln erwähnt wird): E. Ströker, *Theoriawandel in der Wissenschaftsgeschichte: Chemie im 18. Jahrhundert*, Klostermann, Frankfurt am Main, **1982**; und K. Hufbauer, *The Formation of the German Chemical Community (1720–1795)*, University of California Press, Berkeley, **1982**.
- [9] W. H. Brock, *The Norton History of Chemistry*, W. W. Norton, New York, **1993**, S. 79–84.
- [10] a) B. Bensaude-Vincent, I. Stengers, *A History of Chemistry*, Harvard University Press, Cambridge, **1996**, S. 57–63; b) zu einer umfassenden Diskussion über Prinzipien und ihre Rolle in der Chemie siehe M. G. Kim, *Affinity, That Elusive Dream: A Genealogy of the Chemical Revolution*, MIT Press, Cambridge, **2003**, S. 84–110.
- [11] Lit. [9], S. 82. Wir danken den Professoren Lawrence Principe und William Brock für die hilfreiche Korrespondenz zu dieser Umwandlung.
- [12] Lit. [9], S. 83.
- [13] Lit. [10a], S. 58.
- [14] T. L. Davis, *J. Chem. Educ.* **1927**, 4, 176–183.
- [15] Es gab natürlich noch einen Dritten, der bei der Entdeckung von Sauerstoff eine wichtige Rolle spielte, den schwedischen Apotheker Carl Wilhelm Scheele (1742–1786): W. A. Smeaton, *Endeavour* **1986**, 45, 28–30; W. A. Smeaton, *Endeavour* **1992**, 51, 128–131. Scheele isolierte zwar als erster das Gas, seine Arbeit blieb aber relativ unbekannt, und da er vor Lavoisier und Priestley starb, gehörte er nicht zu den Hauptakteuren der Phlogiston-Kontroverse. Die unabhängige und fast gleichzeitige Entdeckung von Sauerstoff durch drei Forscher lieferte einen hervorragenden Stoff für Untersuchungen zur Bedeutung von „Entdeckungen“: A. Musgrave in *Method and Appraisal in the Physical Sciences* (Hrsg.: C. Howson), Cambridge University Press, Cambridge, **1976**, S. 181–209, auf S. 194–195. Die drei Konkurrenten wurden sogar zu Charakteren eines Dramas: C. Djerassi, R. Hoffmann, *Oxygen*, Wiley, New York, **2001**.
- [16] Musgrave, Lit. [15], S. 182–185.
- [17] Lit. [6b], S. 93–104.
- [18] F. L. Holmes, *Isis* **2000**, 91, 735–753.
- [19] J. Golinski in *The Values of Precision* (Hrsg.: N. M. Wise), Princeton University Press, Princeton, **1995**, S. 72–91. Mehrere Zweifler betrachteten die unglaublich genauen Zahlenangaben (auf acht Dezimalstellen!) lediglich als rhetorischen Einfall.
- [20] D. Allchin, *Ambix* **1992**, 39, 110–116, auf S. 110, 112.
- [21] S. Brush, *The Kind of Motion We Call Heat: A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century*, North-Holland, Amsterdam, **1986**.
- [22] H. E. Le Grand, *Ann. Sci.* **1972**, 29, 1–18; M. Crosland, *Isis* **1973**, 64, 306–325.
- [23] D. M. Knight, *The Transcendental Part of Chemistry*, Dawson, Folkestone, **1978**, S. 125–153.
- [24] Zitiert nach *Edinburgh Review*, **1811**, in Lit. [23], S. 139–140.
- [25] J. A. Labinger, S. J. Weininger, *Angew. Chem.* **2004**, 116, 2664–2672, auf S. 2668; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, 43, 2612–2619, auf S. 2616.
- [26] Lit. [9], S. 112.
- [27] Ein aus den 1950er und 1960er Jahren stammendes und als „Phlogiston des 20. Jahrhunderts“ bezeichnetes Beispiel war die erfolglose Suche nach nichtexistenten energiereichen Molekülen in der Zelle: D. Allchin, *Perspect. Sci.* **1997**, 5, 81–127. Auch in diesem Fall war es eine mühsame Aufgabe, die Nichtexistenz von Substanzen zu beweisen, die durch Hinweise und beträchtliche Denkanstrengungen gestützt wurden.
- [28] J. R. Huizenga, *Cold Fusion: the Scientific Fiasco of the Century*, University of Rochester Press, Rochester, **1992**.
- [29] N. Hoffman, *A Dialogue on Chemically Induced Nuclear Effects: A Guide for the Perplexed about Cold Fusion*, American Nuclear Society, La Grange Park, **1995**.
- [30] F. Close, *Too Hot to Handle: The Race for Cold Fusion*, Princeton University Press, Princeton, **1991**.
- [31] G. Mallove, *Fire from Ice: Searching for the Truth Behind the Cold Fusion Furor*, Wiley, New York, **1991**.
- [32] G. Taubes, *Bad Science: The Short Life and Weird Times of Cold Fusion*, Random House, New York, **1993**.
- [33] M. Fleischmann, S. Pons, *J. Electroanal. Chem.* **1989**, 261, 301–308.
- [34] S. E. Jones, E. P. Palmer, J. B. Czirr, D. L. Decker, G. L. Jensen, J. M. Thorne, S. F. Taylor, J. Rafelski, *Nature* **1989**, 338, 737–740.
- [35] N. S. Lewis, C. A. Barnes, M. J. Heben, A. Kumar, S. R. Lunt, G. E. McManis, G. M. Miskelly, R. M. Penner, M. J. Sailor, P. G. Santangelo, G. A. Shreve, B. J. Tufts, M. G. Youngquist, R. W. Kavanagh, S. E. Kellogg, R. B. Vogelaar, T. R. Wang, R. Kondrat, R. New, *Nature* **1989**, 340, 525–530; G. M. Miskelly, M. J. Heben, A. Kumar, R. M. Penner, M. J. Sailor, N. S. Lewis, *Science* **1989**, 246, 793–796.
- [36] R. D. Petrasso, X. Chen, K. W. Wenzel, R. R. Parker, C. K. Li, C. Fiore, *Nature* **1989**, 339, 183–185.
- [37] M. Fleischmann, S. Pons, *Phys. Lett. A* **1993**, 176, 498–502.
- [38] D. R. O. Morrison, *Phys. Lett. A* **1994**, 185, 118–129.
- [39] <http://www.lenr-canr.org/>.
- [40] B. Simon, *Undead Science: Science Studies and the Afterlife of Cold Fusion*, Rutgers University Press, New Brunswick, **2002**.
- [41] I. Langmuir (Hrsg.: R. N. Hall), *Physics Today* **1989**, 42, 36–48.
- [42] D. L. Rousseau, *Am. Sci.* **1992**, 80, 54–63.
- [43] H. M. Collins, *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*, University of Chicago Press, Chicago, **1992**, S. 89.
- [44] H. Collins, T. Pinch, *The Golem: What Everyone Should Know About Science*, Cambridge University Press, Cambridge, **1993**, S. 57–78.
- [45] M. H. Miles, Letter to the Editor, *Chem. Eng. News* **2003**, 81 (24. November), 6.
- [46] Lit. [40], S. 217.
- [47] Lit. [40], S. 150–153.
- [48] W. J. McKinney in *A House Built on Sand: Exposing Postmodernist Myths about Science* (Hrsg.: N. Koertge), Oxford University Press, Oxford, **1998**, S. 133–150.
- [49] M. Miles, *Correlation Of Excess Enthalpy And Helium-4 Production: A Review. Tenth International Conference on Cold Fusion*, Cambridge, **2003**. Erhältlich über <http://www.lenr-canr.org/LibFrame1.html>.
- [50] Lit. [28], S. 6–7.
- [51] T. Feder, *Phys. Today* **2004**, 57, 27–28.