

## Einleitung

Das Atomkonzept ist fundamental für unser modernes wissenschaftliches Verständnis der Welt. Der bedeutende Physiker Richard P. Feynman machte darauf aufmerksam, dass „Wenn in einer Sintflut alle wissenschaftlichen Kenntnisse zerstört würden und nur ein Satz an die nächste Generation von Lebewesen weitergereicht werden könnte, welche Aussage würde die größte Information in den wenigsten Worten enthalten? Ich bin davon überzeugt, daß dies die die Atomhypothese (oder welchen Namen sie auch immer hat) wäre, die besagt, daß alle Dinge aus Atomen aufgebaut sind - aus kleinen Teilchen, die in permanenter Bewegung sind, einander anziehen, wenn sie ein klein wenig voneinander entfernt sind, sich aber gegenseitig abstoßen, wenn sie aneinander gepreßt werden.“ (Feynman et al. , Bilingua, 1963, 1-3, Übers. V.S.). Dieses Zitat ist aus zahlreichen Gründen von Bedeutung bezüglich dieses historischen Hintergrunds: Auf der einen Seite macht Feynman in hohem Maße deutlich, wie wichtig das Konzept des Atomaufbaus von Materie für die moderne Wissenschaft ist. Dennoch bezieht er auch eine andere Angelegenheit mit ein, die sehr wichtig ist, wenn man die Entstehung dieses Konzepts analysiert: Feynman spricht in dieser Einleitung zu seiner ersten Vorlesung von der Atomhypothese. Auf diese Weise befasst er sich mit einem ausschlaggebenden Detail, doch ignoriert es gleichzeitig auch: Ist die Existenz des Atoms eine Hypothese, oder ist sie eine Tatsache? Und wenn letzteres der Fall ist, was ist dann wirklich Teil der Tatsache – welche Stufe der Beschreibung kann immer noch als Tatsache angenommen werden und was sind lediglich ergänzende Hypothesen? Feynman umgeht dieses Problem, indem er der Lese-rin/dem Leser überlässt, wie sie/er es nennen möchte – dies erscheint einem als eine irritierende Form des Relativismus, was sich möglicherweise erklären lässt, wenn man auf das Datum der Veröffentlichung schaut: Feynmans Vorlesungen fanden in den frühen 1960er Jahren statt. Für die damalige Zeit erscheint es fraglich, ob man andere Position in erkenntnistheoretischer Hinsicht möglich gewesen wäre. So eine Aussage wirkt aus unserer Sicht fragwürdig, doch sie zeigt auch, wie stark sich das Wissen über die Natur der Wissenschaft in den letzten Jahrzehnten entwickelt hat.

Um dieses zentrale Konzept vermitteln zu können, ist ein Gesichtspunkt von Bedeutung, der auch in der historischen Entwicklung wichtig war, jedoch nicht in diesem historischen Hintergrund behandelt wird: Die Idee eines chemischen Elements ist eine Bedingung für die Formulierung des Atommodells – dies ist in der historischen Analyse der Entwicklung in der griechischen Antike in der Neuzeit erkennbar. Außerdem kann diese Bedeutung auch in Alltagsvorstellungen wieder gefunden werden. Hierauf wird aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

## Frühere Auseinandersetzungen mit dem Aufbau der Materie

Die Frage nach dem Aufbau der materiellen Welt wurde speziell in der Griechischen Antike diskutiert (worüber wir vor allem aufgrund der Überlieferung aus der griechischen Antike in die Frühe Neuzeit etwas wissen).<sup>1</sup> In dieser Hinsicht wird die Thematik einer Ursubstanz, die alle anderen Elemente formt, relevant. Dies ist jedoch noch nicht einmal vergleichbar mit einem grob vereinfachten Atomkonzept, da die Ursubstanz ohne jegliche korpuskulare Struktur bestehen könnte. Philosophen, wie Thales von Milet, Anaximenes, Heraklit und Empedokles gehörten zu den Gelehr-

ten, die entsprechende Konzepte bildeten oder vorantrieben. Etwa 450 v. Chr. entwickelten zwei Philosophen Ideen, die für die Vorstellung des Atomkonzepts von Bedeutung sind: **Demokrit** und **Leukipp**. Beide setzten voraus, dass die materielle Welt aus sehr kleinen Partikeln bestünde, die selbst nicht noch weiter in kleinere Teile gespalten werden könnten. Diese Atome unterschieden sich in ihrer Form und Größe voneinander. Laut Demokrit bewegen sich diese Atom im leeren Raum und prallen aufeinander. Bei bestimmten Kombinationen entstehen neue Substanzen, doch diese Bindungen sind nicht von Dauer und die Atome können sich wieder trennen. Allerdings wurden die Konzepte von Leukipp und Demokrit von ihren Zeitgenossen nicht akzeptiert: „Zwei Faktoren sprachen gegen jegliche weit verbreitete Akzeptanz der klassischen Version des Atomismus. Der erste Faktor war der kompromisslose Materialismus dieser Philosophie. Durch die Erklärung von Empfindung und Gedanken durch Atombe-wegun, stellten die Atomisten das Selbstverständ-

<sup>1</sup> Es gibt auch Belege, dass Vorstellungen über die materielle Welt auch in der indischen und in der babylonischen Kultur existierten. Allerdings ist hier die Dokumentation sehr viel schlechter, zudem haben diese Vorstellungen keine (wesentliche) Rolle bei der Etablierung einer Atomtheorie in der westlichen Wissenschaft gespielt, daher wird auf sie auch hier nicht weiter eingegangen.

nis der Menschen infrage. Der Atomismus schien keinen Platz für geistige Werte zu lassen. Natürlich können Werte, wie Freundschaft, Mut und Gottesanbetung, nicht auf das Zusammentreffen von Atomen reduziert werden. Darüber hinaus ließen die Atomisten in der Wissenschaft keinen Platz für Überlegungen über den Zweck, weder in natürlicher noch in göttlicher Hinsicht. Der zweite Faktor war die Ad-hoc-Natur der Erklärung der Atomisten“ (Losee 2001, 25, Übers. V.S.). Hinzu kommt, dass ein rivalisierendes Konzept existierte, das überlegen schien, da es das Verhalten von Materie erklärte: die Idee der Vier Elemente, die jegliche existente Materie, einschließlich ihrer Eigenschaften, anhand von vier Elementen erklären konnte: Wasser, Luft, Feuer und Erde.<sup>2</sup>

Eine für die Ablehnung dieser Atomtheorie wichtige, möglicherweise zentrale Person war **Aristoteles**, der die Theorie der Vier Elemente befürwortete und das folgende fünfte Element hinzufügte: Äther, der den Raum zwischen den Himmelskörpern ausfüllte. Dies war – Aristoteles zufolge – von Bedeutung, da kein leerer Raum existieren konnte – der „horror vacui“, die „Angst“ der Natur vor der Leere. Gemäß dieser Konzeption ist alles in der Natur zweckgerichtet; keine Handlung ist zufällig. Zusätzlich besitzt jedes Objekt eine natürliche Position, und wenn es verschoben wird, strebt es danach, die ursprüngliche Position wieder einzunehmen. Folglich war Aristoteles in der Lage, bemerkenswerte Prozesse mithilfe seiner Prinzipien zu erklären. Die Atomisten waren nicht nur unfähig, eine überlegene Erklärung vorzuschlagen, sondern vermuteten darüber hinaus, dass Partikel existieren würden, die niemand sehen könnte. Dies war Aristoteles Hauptkritik an der Atomtheorie, und unabhängig davon akzeptierte er die Idee des leeren Raumes nicht, dessen Existenz laut seines eigenen Konzepts unmöglich war. Eine permanente Bewegung erschien Aristoteles Verständnis nach unsinnig. Im Großen und Ganzen lehnte er das Atomkonzept ab, da es im Widerspruch zu den meisten seiner Hauptvorstellungen stand. Dennoch ist er in gewissem Maße für die Entwicklung der modernen Atomtheorie von Bedeutung, da die Originalarbeiten von Leukipp und Demokrit verloren gingen und lediglich aufgrund von Aristoteles Kritik bekannt wurden.

<sup>2</sup> Es muss verstanden sein, dass diese Elemente nicht das waren, was wir als Feuer, Wasser, Erde und Luft bezeichnen, sondern eher als elementare Prinzipien (siehe hierzu auch den Hintergrund zum Periodensystem der Elemente).

Aristoteles Arbeiten wurden in der Islamischen Kultur bewahrt und erweitert. Mithilfe dieser Kultur kamen sie zurück nach Europa und das Abendland. In der Scholastik wurde das aristotelische Verständnis dominierend, vor allem, da es mit der Bibel übereinstimmte. Doch Astronomen und etwas später auch Naturphilosophen entwickelten ein anderes Verständnis natürlicher Prozesse – folglich wurde die Autorität von Aristoteles während des 17. und 18. Jahrhunderts mehr und mehr in Frage gestellt – am Ende dieses Zeitabschnitts war es der durch Versuche aufgeklärte Naturphilosoph, dem man es zutraute, fähig zu sein, die Gesetze und die Struktur der Natur aufzudecken. In diesem Prozess wurden einige Experimente und Überlegungen durchgeführt, und diese erschienen, als könnten sie die alte Atomhypothese noch bestärken. Von besonderer Bedeutung war die Vorführung der Existenz des Vakuums.<sup>3</sup> In einer anderen Debatte wurde argumentiert, dass man Weihrauch im ganzen Raum riechen kann, wenn nur ein kleines bisschen davon entzündet wird. Da der Raum erheblich größer ist, als der Platz, den der Weihrauch zunächst einnimmt, muss das anfängliche Teil in mehr als 750.000.000 Stücke aufgeteilt werden – diese Berechnungen waren dafür gedacht zu zeigen, wie klein die Partikel sein müssen, aus dem das Stück Weihrauch bestand. Doch diese Art der Diskussion erschöpfte sich in einfachen Berechnungen. Es gab keinerlei Annahmen darüber, dass Atome existieren würden oder welche Eigenschaften sie hätten. Ein solches Verständnis wurde erst im frühen 19. Jahrhundert entwickelt.

### Die Strukturierung von Materie: Dalton

Wenn man dem Ursprung der modernen Naturwissenschaften nachgeht, dann ist der erste Wissenschaftler, der ein Atomkonzept vorstellte, wahrscheinlich der Chemiker John Dalton, der Lavoisiers neues, quantitatives Vorgehen in der Chemie verfolgte. Die Nutzung einer Balkenwaage, um chemische Reaktionen zu untersuchen, stellte eine der größten Errungenschaften von Lavoisiers neuem chemischem System dar. Dies ermöglichte den Chemikern eine andere Sichtweise auf chemische Reaktionen. Lavoisier selbst begründete diverse Male den Unterschied zwischen der klassischen Chemie und der Neuheit seines Vorgehens, um nur ein Beispiel zu nennen: „Lavoisier schrieb im *Opuscules physiques et chimiques* (1774), dass , für die Chemie nicht nur

<sup>3</sup> Für einige der Kontroversen bezüglich der Existenz eines Vakuums und den damit zusammenhängenden philosophischen Implikationen siehe Shapin & Schaffer 1989.

Apparaturen und Methoden der Experimentalphysik galten, sondern auch der Geist der Genauigkeit und Berechnung, der diese Wissenschaft charakterisiert.“ (Nye 1993, 35, Übers. V.S.)

Dennoch waren es nicht nur dieser methodologische Schritt oder die konzeptionellen Verbesserungen, die dazu führten, dass sich Lavoisiers Chemie vom vorherigen Verständnis unterschied. Ein Schlüsselement seiner Chemie war die andere Auffassung von chemischen Reaktionen, was ihm dabei half, die quantitative Beschreibung zu nutzen, und das Verständnis, dass man „einfache Substanzen“ als Elemente deutet, die nicht weiter gespalten werden können. In dieser Hinsicht behauptete Lavoisier deutlich: „Ich werde daher zu diesem Thema nur noch hinzufügen, dass, falls mit dem Begriff *Elemente* jene einfachen und unteilbaren Atome bezeichnet werden, aus denen Stoffe zusammengesetzt sind, dann ist es sehr wahrscheinlich, dass wir nichts über diese wissen, aber wenn wir aber den Begriff *Elemente*, oder *Prinzipien der Körper*, anwenden, um unsere Vorstellungen über den letzten Bereich, den wir analytisch noch erreichen können, auszudrücken, dann müssen wir alle Substanzen als Elemente auffassen, in die wir Substanzen zerlegen können“ (Lavoisier 1794, xxii, Übers. P.H.) Bemerkenswerterweise verwendete Lavoisier bereits den Begriff *Atom*, obwohl er von keiner Atomtheorie Gebrauch macht. Dennoch ist diese Vorstellung vom Element, die im Zitat offensichtlich wird, für die Einführung der Atomtheorie von Bedeutung.

Ein Schlüsselverständnis resultierte aus den quantitativen Beobachtungen gegen Ende des 18. Jahrhunderts: die meisten Stoffe sind das Ergebnis einer Reaktion von spezifischen Masseverhältnissen von Elementen, die diesen Stoff bilden. Diese Regel wurde schließlich bekannt als Gesetz der konstanten Proportionen. Obwohl das Gesetz für die chemischen Reaktionen, die quantitativ analysiert wurden, gültig schien, gab es einen weiteren auffallenden Aspekt, der zuerst von John Dalton beschrieben wurde. Dalton bemerkte, dass es einige chemische Reaktionen gab, bei denen verschiedene Stoffe trotz einer Kombination der gleichen Elemente entstanden (d.h. bei einer Reaktion von Kupfer und Sauerstoff können zwei verschiedene Stoffe entstehen, ähnlich ist es auch bei Kohlenstoff und Sauerstoff, und so weiter). Der resultierende Stoff hing von der Menge der zwei anfänglichen Substanzen ab, die miteinander reagierten. Dennoch gab es dabei auch eine Regelmäßigkeit, die Dalton bemerkte: es gab einen Anteil von kleinen ganzen Zahlen zwischen den Massen von

Element A, das mit der gleichen Menge von Element B reagierte und zwei verschiedene Stoffe ergab. Aufgrund dieser Entdeckung formulierte Dalton ein weiteres Gesetz. Das Gesetz der multiplen Proportionen besagt, dass wenn zwei miteinander reagierende Elemente möglicherweise zu mehr als einem neuen Stoff führen, die Massen von Element A, das mit der gleichen Menge B reagiert, kleine ganzzahlige Vielfache ergeben. Dieses Gesetz bildet gemeinsam mit dem Gesetz der konstanten Proportionen den Beginn des stöchiometrischen Ansatzes in der Chemie.

Obwohl dieses Gesetz auf empirischen Belegen basierte, war es nicht der einzige Rückschluss, den Dalton aus seinen Experimenten zog: In einem Vortrag, der von der Royal Institution London<sup>4</sup> überliefert wurde, schlug er die folgenden Ideen vor, die die Basis der modernen Atomtheorie bilden:

*„Jeder Stoff besteht aus Atomen.  
Atome können weder hergestellt noch zerstört werden.  
Alle Atome desselben Elements sind identisch.  
Unterschiedliche Elemente bestehen aus unterschiedlichen Arten von Atomen.  
Chemische Reaktionen treten auf, wenn Atome neu angeordnet werden.  
Stoffe werden aus Atomen der konstituierenden Elemente gebildet.“<sup>5</sup>*

Offenbar ist Daltons Gebrauch des Begriffs Atom anders als der von Lavoisier. Daltons Konzept der Atome zeichnet sich durch deren Berechenbarkeit aus, sie besitzen ein gewisses Gewicht und so weiter, während bei Lavoisiers Konzept eher die chemischen Eigenschaften relevant sind, und es sogar unklar ist, ob ein Atom tatsächlich ein Partikel ist.

Seine Annahme ermöglichte Dalton, eine Erklärung für die stöchiometrischen Gesetze zu erarbeiten, die er und weitere formuliert hatten. Seinem Verständnis zufolge ergibt sich das Gesetz der konstanten Proportionen sowohl aus dem Verständnis, dass alle Atome desselben Elements identisch sind, als auch daraus, dass chemische Reaktionen das Ergebnis einer Neuordnung der Atome sind. Das Gesetz der multiplen Proportionen kann demnach als Ergebnis verschiedener Anordnungen der Atome, aus denen sich neue

<sup>4</sup> Nach Clarke (1803) fand die erste Präsentation in der Manchester Philosophical Society statt.

<sup>5</sup> <http://www.rsc.org/chemsoc/timeline/pages/1803.html>, letzter Zugriff 18. April 2012

Stoffe ergeben, interpretiert werden. Auf diese Weise wurde das Wissen über quantitative chemische Analysen auf einem ersten Paradigma im Kuhnschen Sinne begründet (und in dieser Hinsicht könnte man damit argumentieren, dass dieses Ergebnis die stöchiometrische Chemie im Kuhnschen Sinne in eine Wissenschaft verwandelte). Doch so einfach war das alles nicht: Obwohl Daltons Theorie sehr schnell von diversen Chemikern angenommen wurde, lehnten andere sie ab. Ein Schlüsselproblem war die Annahme, dass jedes Element aus einem anderen Atom gebildet wurde. Daraus ergaben sich etwa 30 verschiedene Atome zu Beginn des 19. Jahrhunderts, und ihre Anzahl stieg weiter an. Anstatt die Struktur der Materie zu vereinfachen, machte Daltons Atomtheorie demnach die Natur nur noch komplexer. Trotz dieser Kritik wurden die stöchiometrischen Gesetze von Chemikern angewandt, und einige von ihnen nutzten Bruchzahlen, um die Masseanteile auszudrücken – somit machten sie darauf aufmerksam, dass es keine untrennbaren Partikel gab. Dies war nicht bloß ein Problem der anfänglichen Akzeptanz, sogar 60 Jahre später wurde die Zurückhaltung gegenüber dieser Theorie eindeutig dargelegt; z.B. erklärte der Vorsitzende der Chemischen Gesellschaft Williamson in einer Rede im Jahre 1869: „... dass auf der einen Seite alle Chemiker die Atomtheorie nutzen, und auf der anderen Seite eine erhebliche Anzahl von ihnen die Theorie mit Misstrauen, einige auch mit positiver Abneigung, betrachtet.“ Zu Beginn des 20. Jahrhunderts lehnten einige angesehene Chemiker und Physiker die Atomtheorie immer noch ab – auf diese Angelegenheit kommen wir später zurück. Dennoch wurde das Atom insbesondere für Chemiker zu einem Objekt, von dem sie für ihre Analysen chemischer Reaktionen Gebrauch machten. Allerdings wurde es nicht für real gehalten (weder im positivistischen Sinne noch im Sinne einer relevanten theoretischen Beschreibung), sondern diente lediglich als heuristisches Werkzeug, das sehr passend für die Bedingungen zum Beschreiben von chemischen Reaktionen war, doch nichts mit dem eigentlichen Verständnis von Materie zu tun hatte.

### Das Atom wird etabliert

Trotz der Diskussionen unter den Chemikern, die das Atom als nützliche Hypothese akzeptierten, begannen die Physiker damit, das Atom als reales Objekt mit Erklärungskraft zu gebrauchen. Insbesondere die sich entwickelnde Wissenschaft der Thermodynamik spielte eine wichtige Rolle in der Etablierung des physikalischen Atoms, das für

die kinetische Theorie (Atome in Bewegung bilden Wärme) entscheidend ist. Doch dieses Verständnis wurde besonders in der deutschsprachigen wissenschaftlichen Gesellschaft von bedeutenden Wissenschaftlern, wie Ernst Mach, Wilhelm Ostwald und Georg Helm, stark kritisiert.<sup>6</sup> Die Debatte zwischen diesen Forschern (Ostwald gewann 1909 den Nobelpreis, und auch Mach war zu seiner Zeit sehr prominent) und den Befürwortern einer statistischen Interpretation (insbesondere **Boltzmann**) beruhte nicht nur auf physikalischen Angelegenheiten, sondern bezog auch tiefgehende philosophische Fragen mit ein. Ein Schlüsselaspekt war in dieser Hinsicht die Frage danach, ob einzelne Atome gesehen werden können, oder ob es irgendeinen Beweis für deren Existenz gibt.

Tatsächlich schien es zu Beginn des 20. Jahrhunderts so, dass man in Erwägung zog, die Atomtheorie zu stürzen, und Boltzmann als Relikt des 19. Jahrhunderts ansah. Die Dinge änderten sich maßgeblich, als Plancks Theorie der Strahlung etabliert wurde, und etwa zur selben Zeit veröffentlichten Einstein und Smoluchowski ihre Interpretation der Brown'schen Molekularbewegung. Dies war ein Phänomen, das bereits im 18. Jahrhundert von mehreren Beobachtern beschrieben worden war. Jedoch wurde es dem Biologen **Robert Brown** zugeschrieben, der im frühen 19. Jahrhundert (1827) bemerkte, dass sich kleine Pollen und Staubpartikel, die auf Wasser trieben, in unbeständiger Art und Weise bewegten. Das bemerkenswerte Detail bei dieser Bewegung war, dass sie niemals zu stoppen schien, zudem waren die bewegten Partikel sicher nicht am Leben. Für etwa ein halbes Jahrhundert blieb es eine offene Frage, wie man diese Bewegung interpretieren sollte. Obwohl einige Forscher gegen Ende des 19. Jahrhunderts Lösungen vorschlugen, die mit unserer Interpretation übereinstimmen, stellten erst im Jahre 1905/06 **Albert Einstein** und **Marian Smoluchowski** unabhängig voneinander ihre mathematische Analyse der Brown'schen Molekularbewegung vor (tatsächlich war Einsteins Artikel einer der drei berühmten in seinem *annus mirabilis*. Die anderen zwei behandelten von dem photoelektrischen Effekt und der speziellen Relativitätstheorie). Beide Forscher waren in Lage zu erklären, dass die Bewegung von der kinetischen Ener-

<sup>6</sup> Aus anderen Gründen kritisierte auch Max Planck ursprünglich den Atomismus wie er ihn in Boltzmanns statistischer Interpretation verstand, vgl. Müller (2008). Diese Diskussion war nicht auf die deutschen Wissenschaftler beschränkt, ein weiteres Beispiel für den Widerstand gegen die Atomtheorie ist Poincaré.

gie der sich bewegenden Wasserteilchen verursacht werden konnte – folglich schien die Brown'sche Molekularbewegung einen der ersten makroskopischen Effekte darzustellen, die mit der Annahme kleinster Partikel erklärt werden mussten und somit einen empirischen Beweis für die kinetische und folglich auch Atomtheorie bildeten. Tatsächlich gilt Ostwald als jemand, der von der Angemessenheit der Atomtheorie durch die Übereinstimmung der Beschreibung und der empirischen Daten überzeugt werden musste. Etwa zur gleichen Zeit gab es einen weiteren empirischen Beleg für die Angemessenheit der Atomtheorie, und dieser gilt als jenes experimentelle Ergebnis, das Mach überzeugte: Werden radioaktive Partikel neben einer fluoreszierenden Leinwand platziert, so können winzige Lichtblitze beobachtet werden, die man als Ergebnis einzelner Alphateilchen interpretiert. Demzufolge hatte sich das Verständnis des Atomismus innerhalb weniger Jahre von fast vollständiger Ablehnung hin zur beinahe kompletten Akzeptanz gewandelt. Boltzmann, der große Befürworter der Atomtheorie, war zu dieser Zeit bereits verstorben – er beging im September 1906 Selbstmord.

### Das Atom bekommt eine Grundstruktur

Noch bevor Einsteins und Smoluchowskis Arbeit dabei half, eine Einigkeit über die Korrektheit der atomaren Beschreibung von Materie zu begründen, etablierten einige Forscher empirische Ergebnisse, die eigentlich dem anfänglichen Verständnis eines untrennbaren Atoms widersprachen: **Faradays** Arbeit über die Elektrolyse – welche sich auf die 1830er Jahre zurück datieren lässt – könnte einige Fragen über die von Dalton formulierte, fundamentale und untrennbare Natur des Atoms aufgebracht haben: Faradays Untersuchungen zufolge wird beim Vorgang der Elektrolyse ein gewisser Anteil eines Elements durch eine bestimmte Menge Elektrizität freigesetzt. Doch dieses empirische Ergebnis erhob letztendlich doch keine Fragen bezüglich der atomaren Natur von Materie, im Gegenteil: Es blieb wohl bis ins 20. Jahrhundert unklar, ob Elektrizität eine atomare Struktur besaß, oder ob das Verhältnis von elektrischer Ladung und frei gegebener Materie der Durchschnitt zahlreicher Reaktionen war, die zur gleichen Zeit stattfanden. Erst in den 1920er Jahren, als Millikans Messungen der Elementarladung mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden, war diese Angelegenheit endgültig geklärt (zumindest für die weitgehende Mehrheit der Wissenschaftler, siehe Holton 1978). Doch gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurden weitere Bewei-

se hergestellt, die den unteilbaren Charakter des Atoms anzweifeln. Eigentlich begann alles mit der Forschung, die im Nachhinein als weiterer Beleg für die Atomtheorie angesehen werden kann, obwohl sie nicht in diesem Sinne in der Vergangenheit interpretiert wurde. In den 1860er Jahren zeigte der Chemiker Bunsen gemeinsam mit dem Physiker Kirchhoff, dass die Lichtemission einer Substanz sehr typisch ist und dass nur spezielle Frequenzen (oder Linien, wenn man das Spektrum analysiert) emittiert werden. Diese Entdeckung lieferte ebenso eine Methode, um neue Elemente identifizieren zu können, und die Anzahl stieg in den nächsten Jahren somit erheblich an. Die Spektralanalyse wurde zur Hauptangelegenheit und man weitete sie auf das Analysieren von Kathodenstrahlen und ihre Wechselwirkungen mit Gasen aus, die man in die Röhren füllte. Von dieser Methode hatten Experimentalforscher sich erhofft, ein weiteres Verständnis über den Zustand von Materie entwickeln zu können. Insbesondere die Analyse der Kathodenstrahlen schien sehr viel versprechend zu sein; inmitten der Forscher, die in diesem Feld arbeiteten, war auch **J. J. Thomson** zu finden. Thomson analysierte die o. g. Kathodenstrahlen und ermittelte, dass sie aus Partikeln geformt sind, die etwa eine Masse von einem Tausendstel eines Wasserstoffatoms besitzen.<sup>7</sup> Darüber hinaus war er dazu in der Lage, das Masse-Ladungsverhältnis zu bestimmen, indem er diese Teilchen in einem magnetischen Feld ablenkte. Doch für diese Diskussion mögen die Experimente relevanter sein, in denen er verschiedene Kathodenmaterialien nutzte, um die Strahlen zu emittieren (die normalerweise durch das Erhitzen der Kathode emittiert wurden, anschließend beschleunigte er die Strahlen mithilfe des magnetischen Felds). Thomson konnte zeigen, dass alle Teilchen dieselben Eigenschaften besaßen, egal von welchem Material sie ausgingen. Dies könnte als Hinweis angesehen werden, dass diese Partikel (Korpuskel, wie Thomson sie nannte) einen fundamentalen Teil der Materie ausmachten. Doch es gab ein Problem: Wenn diese Korpuskel so leichtgewichtig waren, doch gleichzeitig elektrisch geladen, und einen Teil der Materie bildeten, wie konnte dann Stabilität erschaffen werden? Thomson dachte sich schließlich eine Lösung aus: „Wir

<sup>7</sup> Es ist bemerkenswert, dass sein Sohn George Paget Thomson ebenfalls den Physiknobelpreis für die Arbeit zur Streuung von Elektronen erhielt. In gewisser Weise kann (zugegebenermaßen sehr vereinfacht) argumentiert werden, dass J.J. Thomson den Nobelpreis für den Nachweis der Teilchenstruktur der Elektronen erhielt, während sein Sohn die gleiche Auszeichnung für die Demonstration erhielt, dass Elektronen keine Teilchen sind, sondern auch Wellencharakter haben.

schlagen vor, dass das Atom aus einer Zahl von Korpuskeln besteht, die sich in einer Sphäre von einheitlich positiver Elektrifizierung bewegen ...“ (Thomson 1904, 255, Übers. V.S.).<sup>8</sup>

Dies bedeutete, dass das (zur damaligen Zeit immer noch umstrittene) Atom nicht länger unteilbar war und dass das Atommodell verändert werden musste. Schon bald war eine weitere Modifizierung nötig, welche sich auf einen anderen Bereich bezog, der im frühen 20. Jahrhundert aufkam: Radioaktivität – diese wird im nächsten Kapitel näher betrachtet. Einer der Forscher, die ihre wissenschaftliche Karriere durch die Analyse des o.g. Phänomens begründeten, war **Ernest Rutherford**, ein Physiker aus Neuseeland, der seine frühen Forschungen (die ihm den Nobelpreis einbrachten) in Kanada betrieb und später zurück nach England zog. Im Cavendish-Labor führten zwei seiner Assistenten – **Marsden** und **Geiger** – einen Versuch durch, um Alpha-Teilchen mithilfe von Metallfolie zu streuen.

Rutherford hatte bereits vermutet, dass eine Streuung möglich wäre, als er beobachtete, wie Alpha-Teilchen Glimmerplatten durchliefen. Dieses Experiment wurde wieder aufgenommen und das Ergebnis war mehr als verwirrend (wenn auch nicht vollkommen unerwartet): Geiger und Marsden beobachteten, dass obwohl der Großteil der Alpha-Teilchen die Metallfolie (im Zuge dieses Experiments nutzten sie Goldfolie, da diese besonders dünn angefertigt werden konnte) ohne weiteres passierte, einige von ihnen gestreut und relativ viele sogar reflektiert wurden.

„Im Nachhinein war Marsdens Erfindung das ‚unglaublichste Ereignis‘, das ihm jemals zugestoßen war, beinahe so unglaublich, als würde eine 15-Zoll Granate gegen ein Taschentuch geschossen werden, abprallen und den Schützen selbst treffen. Dass die Militärmetaphern und die Unglaublichkeit letztendlich nur Lügenmärchen sind, kann man leicht einem von Rutherford überlieferten Vortrag entnehmen ... sechs Monate nach der Entdeckung der diffusen Reflexion.“ (Heilbron 1981, 264f., Übers. V.S.)

Mag diese Aussage sein, wie sie will, das Ergebnis war zweifellos unerwartet für die wissenschaftliche Gemeinschaft, und Rutherford brachte eine Lösung, die sicherlich genau so unerwartet war: Er berechnete anhand der Verhaltensweise

der Alpha-Teilchen, dass das Atom einen kleinen positiv geladenen Kern besaß, der beinahe die gesamte Masse ausmachte, während der Großteil des Atoms mit Ausnahme der Elektronen, die irgendwo in der Hülle umher schwirrten, leer war.

### Atome können sich verändern

Wie bereits erwähnt, wurde Rutherford durch seine Forschungen über Radioaktivität berühmt – dennoch war er nicht derjenige, der dieses Feld eröffnete. Der erste Forscher, der Radioaktivität beobachtete, war der französische Physiker **Henri Becquerel** – seine Entdeckung (und man kann diesen Ausdruck so nutzen, als sei er völlig unerwartet, obwohl bereits ein Empfindungsvermögen für Strahleneffekte aufgrund von Röntgens Vorführung der gleichnamigen Röntgenstrahlen existierte) eröffnete ein neues Forschungsfeld. Doch dieses Feld wurde nicht sofort von Becquerel oder anderen Wissenschaftlern betreten, da die Strahlen, die Uransalze emittierten, nur als Merkwürdigkeit angesehen wurden und sie keine weitere wissenschaftliche Aufmerksamkeit Wert zu sein schienen. Erst die Zusammenarbeit einer jungen polnischen Chemikerin mit einem französischen Physiker, machte die Bedeutung dieses neuen Felds offensichtlich: **Marie und Pierre Curie** konnten die Strahlen nutzen, um zu zeigen, dass neben Uran auch andere radioaktive Elemente existieren mussten da die Strahlen der Proben stärker waren, als diejenigen, die reines Uran emittierte. Nach einer langen und mühseligen Analyse konnten sie schließlich reine Portionen der Elemente Polonium und Radium herstellen. Vor allem Radium gelang ins Zentrum der radioaktiven Forschung, da es ziemlich energiereich war und verschiedene Strahlen emittierte. Doch es wurde deutlich, dass viele weitere chemische Elemente die Fähigkeit besaßen, solche Strahlen abzugeben. Dennoch stellten sich zahlreiche Dinge als überraschend heraus – dazu zählte gewiss die Umwandlung eines Elements in ein anderes beim Vorgang des radioaktiven Alpha- oder Betazerfalls. Dies wird in einer Anekdote deutlich, die uns zurück zu Rutherford führt: „**Rutherford und Soddy** fanden zum Beispiel heraus, dass sich radioaktives Thorium schrittweise, Atom für Atom, in Radium umwandelte. In dem Moment, als Soddy das herausfand, platze aus ihm hinaus, ‚Rutherford, das ist eine Transmutation!’

„Um Himmels Willen Soddy“, schoss es von seinem Gefährten zurück, „nennen Sie es nicht *Transmutation!* Man wird uns noch als Alchemisten verdammen“.

<sup>8</sup> Der japanische Physiker Nagaoka kam bereits ein Jahr zuvor zu einer vergleichbaren Lösung.

Die Arbeit der Curies hatte bereits eine fundamentale Idee hervorgebracht: Die Strahlung eines Elements hängt mit einigen Eigenschaften des Elements zusammen. Uran hat eine andere Strahlung als Polonium und Radium, und so weiter. Darüber hinaus wurde durch weitere Experimente deutlich, dass die Aktivität einer Probe nach einiger Zeit nachlässt – was auch offensichtlich ist, wenn man die Umwandlung der Atome in jene eines anderen Elements in Betracht zieht. Jedoch gab es ein Problem in Bezug auf die Abnahme der Aktivität, es wurde klar, dass die Halbwertszeit kein Wert war, den man für irgendein Atom nutzen konnte, ganz im Gegenteil. Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls galt nur für eine statistische Auswahl, eine Prognose über das Verhalten einzelner Atome war unmöglich. Zunächst nahm man dies als Anhaltspunkt für die erforderliche Weiterentwicklung in der Atomphysik, doch am Ende wurde deutlich, dass es einfach nicht möglich war und dass der Zerfall nur in mathematischen Termen über die Statistiken der Proben beschrieben werden konnte. Darüber hinaus konnten drei verschiedene Arten identifiziert und bald auch charakterisiert werden, indem man die Strahlen untersuchte. Für eine weitere Überraschung sorgten die Alpha-Teilchen – sie stellten sich als Helium heraus, ein Element, das bis dahin nur in der Sonne entdeckt wurde (mit spektroskopischen Methoden) und scheinbar nicht auf der Erde existierte. Da die Alpha-Teilchen positiv zu sein schienen, während die Beta-Strahlung offensichtlich aus Elektronen bestand, bedeutete dies, dass nicht bloß positive, sondern auch negative Teilchen emittiert werden konnte.

### **Physikalische Atome und chemische Atome**

Die Bestimmung der Eigenschaften verschiedener Strahlen war eine der ersten Aufgaben der Experimentatoren, als klar wurde, dass dieses Thema von großer Bedeutung war. Neben anderen Dingen wurden Masse und Ladung der Teilchen, die die Strahlen bildeten, bestimmt. Dies tat man, indem man ein genau bestimmtes Magnetfeld anwandte, das im rechten Winkel zur Richtung der Strahlen stand – anhand der Ablenkung konnten Masse- und Ladungsmenge bestimmt werden. Ein vergleichbarer Aufbau wurde genutzt, um Atome zu analysieren. Das lieferte zum einen weitere Einblicke in deren Struktur, und löste zum anderen eines der übrig gebliebenen Probleme. Insbesondere durch die Arbeit von Francis Aston, der aus diesem Aufbau ein Massenspektrometer abwandelte, wurde deutlich, wenn auch nur aus chemischer Sichtweise, dass alle Atome eines

Elements nicht zu unterscheiden sind. Aus physikalischer Sicht war dies aber nicht der Fall. Aston konnte zeigen, dass für diverse Elemente verschiedene Atome existierten, die durch ihre Masse bestimmt werden konnten. Dies half bei der Erklärung, weshalb bestimmte Elemente ein atomares Gewicht besaßen, das kein ganzzahliges Vielfaches der Masse eines Wasserstoffatoms war. Aus Astons Daten wurde klar, dass das atomare Gewicht das gewogene Mittel der atomaren Masse ausmachte. Betrachtete man die Massen jeglicher Atome (die bereits vor Rutherfords Mitarbeiter Soddy als Isotope prognostiziert und bezeichnet wurden) wurde offensichtlich, dass das atomare Gewicht jedes einzelnen Isotops (innerhalb der Genauigkeit) ein ganzzahliges Vielfaches des Wasserstoffatoms war.

### **Atome können verändert werden**

Während die meisten Experimente mit radioaktiven Substanzen die Strahlenanalyse erzielten, versuchten einige Forscher auch, die Atome zu modifizieren (künstliche „Transmutation“). Zunächst wurden Alpha-Teilchen genutzt, sie wurden gegen Materie geschossen und man konnte beobachten, dass einige Atome dazu in der Lage waren, das Alpha-Teilchen in den Kern einzubauen, also ein neues Element zu schaffen. Der erste, der dieses Experiment einführte, war erneut Rutherford. Er konnte zeigen, dass, wenn man Alpha-Teilchen durch Stickstoff schickte, Wasserstoff und Sauerstoff nachweisbar waren. Rutherford interpretierte dies so, dass der Stickstoffkern ein Alpha-Teilchen absorbierte, und dass der daraus neu entstandene Kern sofort einen Wasserstoffkern emittieren würde. Dies war der erste erfolgreiche Versuch, ein Element zu modifizieren und ein neues zu erschaffen – andere Experimente dieser Art folgten schon bald. Dennoch muss verstanden werden, dass hier keine Kernspaltung stattfand, diese hielt man immer noch für unmöglich.

Rutherford benannte den Wasserstoffkern Proton und postulierte, dass dieses Proton ein elementarer Bestandteil aller Kerne sei. Doch die Masse der Kerne bildete kein ganzzahliges Vielfaches der Masse des Protons, was immer noch ein hauptsächliches Problem war. Zur gleichen Zeit gab es zwei weitere Fragen: Wie können positive Protonen den Kern bilden, und wie soll man den Beta-Zerfall erklären? Rutherford nahm an, dass sich auch Elektronen im Kern befanden, die mit den Protonen Paare bildeten, und diese Paare soll-

ten die Elementarteilchen im Kern zusammenhalten.

Zu den Forschern, die versuchten, den Kern und das Atom durch Wechselwirkungen mit Alpha-Teilchen zu untersuchen, gehörten auch **Irène Joliot-Curie** (Tochter von Marie Curie) und ihr Ehemann **Frédéric**. Sie wiederholten einige Experimente, die in Berlin durchgeführt wurden: Beryllium wurde mit Alpha-Teilchen bestrahlt; als Ergebnis konnte man eine erhebliche Strahlung beobachten, die sie zunächst für Gamma-Strahlen hielten. Die Teilchen dieser Strahlung waren nicht geladen und schienen einen hohen Energiegehalt zu besitzen. Obwohl die Teilchen nicht geladen waren, konnten sie mit Wasserstoff in Wechselwirkung treten und Elektronen freisetzen. Während die Joliot-Curies ihre Interpretation der Ergebnisse ihrer Experimente als Gamma-Strahlen beibehielten, wählte **James Chadwick**, der mit Rutherford zusammen arbeitete, eine andere Interpretation. Chadwick zufolge musste diese Strahlung mit einem neuen Korpuskel erklärt werden, weshalb er hier von einer komplett neuen Strahlenart ausging. Weitere Experimente zeigten, dass die Teilchen eine Restmasse besaßen, die dem Proton ähnelte, und ebenfalls als Teilchen angesehen wurde. Diese Restmasse ersetzte darüber hinaus das von Rutherford vermutete Proton-Elektron-Paar, das die (relative) Stabilität des Kerns erklären sollte.

Das Neutron ermöglichte weitere Experimente über die Transmutation, und da es neutral ist, gab es keine abstoßende elektrostatische Kraft, die ein Problem beim Versuch darstellte, ein Alpha-Teilchen in den Kern einzubauen. Diverse Forscher arbeiteten in diesem Bereich, da ihnen ermöglicht wurde, neue radioaktive Isotope sowie Zerfallsprodukte zu erschaffen. Zu diesen Forschern gehörten die **Joliot-Curies** in Paris, **Fermi** in Italien, und **Hahn** und **Strassmann** in Berlin. Alle strebten an, ein Neutron in einen Urankern einzubauen. Uran war zur damaligen Zeit das schwerste Element. Die Idee war, Transurane herzustellen, Elemente mit einer größeren Ordnungszahl als Uran. Dies schien die einzige Möglichkeit zu sein, neue Elemente zu entwickeln, da das Periodensystem als vollständig angesehen wurde.

Besonders der Chemiker Hahn war sehr unzufrieden mit den Ergebnissen: Es schien, als hätte sich Uran durch die Experimente in Barium verwandelt – das erheblich weniger atomare Masse besaß, als Uran. Hahn befasste sich mit dieser

Angelegenheit in einem Brief an **Lise Meitner**. Sie hatte lange Zeit mit Hahn zusammengearbeitet, doch war kürzlich gezwungen, vor den Drohungen des faschistischen Deutschlands nach dem Anschluss Österreichs nach Schweden zu fliehen. Meitner antwortete zunächst, dass so ein Ergebnis nicht plausibel wirkte.<sup>9</sup>

Doch es hatte so viele Überraschungen in der Geschichte der Radioaktivität gegeben, worauf sie im gleichen Brief hinwies, dass man kaum sagen könne, dies oder das sei unmöglich. Hahn bestand darauf, dass er Barium verifiziert hatte, und Meitner machte in einem anderen Brief, der einige Tage später geschrieben wurde, darauf aufmerksam, dass zumindest aus energetischer Sicht eine Kernspaltung stattgefunden haben könnte. In einer Diskussion, die Meitner mit ihrem Neffen Frisch führte, kam sie auf die Idee, dass das Atommodell möglicherweise als Tropfen gedacht sein müsste – wenn ein Objekt mit angemessener Energie auf diesen Tropfen trifft, teilt er sich in zwei kleinere. Hahn veröffentlichte schlussendlich seine Entdeckungen (gemeinsam mit Strassmann) und machte deutlich, dass sich die resultierenden Isotope für ihn als Chemiker wie Barium verhalten, dennoch behauptete er, dass er von der physikalischen Sichtweise aus noch nicht davon überzeugt war, dass dieses Element in so einem Versuch erschaffen werden kann. Dies änderte sich jedoch sehr schnell, und Wissenschaftler machten sofort klar, dass während so einer Reaktion zum einen eine erhebliche Menge an Energie freigesetzt werden würde, zum anderen aber auch andere Neutronen. Folglich schien eine Kettenreaktion denkbar zu sein.

#### Hinweis:

Einige Interviews mit Protagonisten der hier dargestellten Entwicklung (Thomson, Rutherford, Hahn) können unter <http://www.aip.org/history/mod/fission/fission1/01.html> heruntergeladen werden.

#### Bibliographie

Berr, F., & Pricha, W. (1997). *Atommodelle* (3. Auflage ed.). München: Deutsches Museum.

<sup>9</sup> Bevor diese Experimente ausgeführt worden waren hatte Ida Noddack bereits 1934 das Prinzip der Kernspaltung formuliert, als sie die Interpretation der entsprechenden Experimente Fermis kritisiert hatte.



- Blackmore, J. (1995). *Ludwig Boltzmann: His Later Life and Philosophy, 1900-1906. The philosopher*. Dordrecht: Kluwer.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. L. (1963). *The Feynman lectures on physics*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
- Geiger, H., & Marsden, E. (1909). On a Diffuse Reflection of the  $\alpha$ -Particles. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 82(557), 495-500.
- Görs, B. (1999). Chemischer Atomismus: Anwendung, Veränderung, Alternativen im deutschsprachigen Raum in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Berlin: ERS.
- Heidelberger, M. (1993). *Die innere Seite der Natur : Gustav Theodor Fechners wissenschaftlich-philosophische Weltauffassung*. Frankfurt am Main: Klostermann.
- Heilbron, J. L. (1981). *Historical studies in the theory of atomic structure*. New York: Arno Press.
- Holton, G. J. (1978). *The scientific imagination : case studies*. Cambridge [Eng.]; New York: Cambridge University Press.
- Lavoisier, A. L. (1794). *Elements of Chemistry*. Transl. by Kerr, 4<sup>th</sup> ed., Edinburgh: William Creech.
- Losee, J. (2001). *A historical introduction to the philosophy of science*. Oxford [England]; New York: Oxford University Press.
- Morgenweck-Lambrinos, V., & Trömel, M. (2001). Wissenschaft und Legende: eine Nachbetrachtung zu Lise Meitner, Otto Hahn und die Kernspaltung: eine Legende aus unseren Tagen. *NTM*, 9, 29--40.
- Müller, F. (2004). *Gasentladungsforschung im 19. Jahrhundert*. Berlin: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik.
- Müller, I. (2008). Ein Leben für die Thermodynamik. Vom Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zum Planckschen Wirkungsquantum. In: *Physik Journal* 7/3, 39-45.
- Nye, M. J. (1993). *From chemical philosophy to theoretical chemistry : dynamics of matter and dynamics of disciplines, 1800-1950*. Berkeley u.a.: Univ. of California Press.
- Rife, P. (1992). *Lise Meitner: –Ein Leben für die Wissenschaft*. Hildesheim: Claasen.
- Shapin, S., & Schaffer, S. (1989). *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life* (1st Paperback Edition ed.). Princeton: UP.
- Sichau, C. (2005). *Atomphysik : historische und fachliche Materialien zur Unterrichtsvorbereitung*. Oldenburg: Didakt. Zentrum (diz).
- Simonyi, K. (1995). *Kulturgeschichte der Physik: von den Anfängen bis 1990* (2. Aufl. ed.). Thun, Frankfurt/Main: Deutsch.
- Thomson, J.J. (1904). "On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure". In: *Philosophical Magazine* 6 Volume 7, Issue 39, 237-265
- Tilden, W. A., & Glasstone, S. (1926). *Chemical discovery and invention in the twentieth century*. London: Routledge.
- Weart, S. R. (1988). *Nuclear fear : a history of images*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

---

**Hintergrund Atome** was translated by Vanessa Schmid.

---

**Hintergrund Atome** was written by Peter Heering with the support of the European Commission (project 518094-LLP-1-2011-1-GR-COMENIUS-CMP) and The University of Flensburg, Germany. This publication reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.