
Materie wird in ihre Bestandteile zerlegt

2

Bis hierher hat die „klassische Physik“ sich mit „Mesonesien“ beschäftigt, unserer mit unseren Sinnen und deren „Verlängerungen“ (z. B. Mikroskop) erfassbaren Welt der mittleren Größenordnungen, der „Mittelwelt“ in unserem „m-kg-s-Messbereich“. Und damit mit der Welt, die durch unsere Erfahrung und unsere Logik erfassbar ist. Zeit ist Zeit und Raum ist Raum – bekannte Größen. Wie sollte es auch anders sein?! Auch das Kleinste und das Größte müssen bekannten Gesetzen gehorchen, die aus „unserer Welt“ stammen. Am Anfang, beim Einstieg in die Mikrowelt ist das ja auch noch so. Aber wie lange gilt das?

2.1 Eddi muss einen Barren Gold zerlegen

Gold war inzwischen wertvoll geworden, nach dem Verfall der Feuerstein-Preise.¹ Die Stammesfürsten und die Frauen *liebten* es. Es war selten und schön anzusehen, verlieh einem Schönheit, Ansehen und Macht.

Eddi traf Rudi, der gerade nachdenklich einen kleinen Klumpen in seiner Hand hatte. „Ich habe ihn gewogen“, sagte er, „Er hat ziemlich genau 197 g.“ „Wie kannst du denn *so* genau wiegen?!“ „Ich verwende einen Hebelarm eins zu zehn. Knapp zwei Kilosteine musste ich darauf legen. Das Hebelgesetz: Last mal Lastarm gleich Kraft mal Kraftarm.“ „Schön“, sagte Eddi unbeeindruckt. Rudi fuhr fort: „Damit machen wir ein Gedankenexperiment. Wir machen es nur im Kopf, theoretisch sozusagen, abstrakt – wie in der Mathematik. Nimm den Klumpen Gold und halbiere ihn.“ „Okay. 98,5 g.“ „Nimm eine Hälfte und halbiere sie.“ „Fertig. 49,25 g.“

¹ Vergl. Jürgen Beetz: $1+1=10$ – Mathematik für Höhlenmenschen. Springer, Heidelberg 2012, S. 317 f. Im Übrigen waltet hier dichterische Freiheit, denn die ältesten datierten Goldfunde gehen auf das Jahr 5000 v. Chr. zurück, 3000 Jahre nach Rudi.

„Nimm davon eine Hälfte und halbiere sie.“ „Hab' ich. 24,625 g.“ „Nimm davon eine Hälfte und halbiere sie.“ „Ja, und nun? 12,3125 g.“ „Nimm davon eine Hälfte und halbiere sie.“ „Du wiederholst dich! Wie oft soll ich das denn noch machen?! 6,15625 g.“

Rudi ließ nicht locker: „Was kriegst du denn als Ergebnis, wenn du immer weiter teilst?“ „Blöde Frage! Gold natürlich. Immer nur Gold! Zwar immer kleinere Stückchen, aber immer Gold. Bei der nächsten Teilung 3,078125 g.“ „Ist ja gut! Ich weiß, dass du rechnen kannst. Aber wie oft kannst du das machen?“ „Unendlich oft. Gold ist Gold!“ Rudi verzog sein Gesicht: „Uijuijui! 'Unendlich' ist ein gefährliches Wort. In deiner Mathematik gibt es das, in der realen Welt nicht. Irgendwann ist immer Schluss!“ Nun wurde Eddi nachdenklich: „Stimmt! Das habe ich *dir* doch schon erklärt! Es muss etwas Unteilbares geben! Wie wollen wir das nennen?“

„Atom“, so tönte Siggis Stimme aus dem Abseits, wo er sich unbemerkt aufgehalten hatte, „Die alten Griechen ...“ „Die in deiner *Zukunft* alten Griechen“, verbesserte Eddi, aber Siggis sprach weiter: „Sie nannten es *átomos*, ‚das Unteilbare‘. Oder irgendwelche Leute später, die gerne altgriechische Fremdwörter verwendeten, um ihre Bildung zu demonstrieren.“ „Du scheinst ja nicht sehr weit gekommen zu sein bei deiner Zukunftsreise ... Wer weiß, ob das Unteilbare nicht doch teilbar ist?!“ „Ist es nicht“, sagte Siggis kategorisch, „Gebt euch damit erst einmal zufrieden! Denkt darüber einmal genau nach, was das bedeutet. Denn ich sage euch, Eddi muss den Goldklumpen etwa 79-mal halbieren. Aber dann ist Schluss, endgültig. Ein Gold-Atom. *Eins*. Unteilbar, wie ich schon sagte.“

Nun sah er zwei ratlose Forscher. Eddi rechnete: „79, also fast 80-mal? Zehnmal sind schon 0,197 g – du erinnerst dich an die Potenzrechnung: 2^{10} ist 1024. Und 2^{20} ist schon über eine Million – wie viel ist dann erst 2^{80} ? Nach den Potenzgesetzen der Mathematik ist 1024 etwa 10^3 – alles über den dicken Daumen geschätzt – und somit muss ich den Exponenten, also 80, durch 10 teilen und mal 3 nehmen, dann habe ich die Anzahl der Dezimalstellen, nämlich 24. Damit lande ich bei zirka 197×10^{-24} g – das wäre das kleinstmögliche Goldteilchen ... Das glaube ich nicht!² Und wie ist es mit Silber? Gibt es ein ‚kleinstes Silberteilchen‘, das nicht weiter zerlegbar ist?“

Siggis strich sich seinen Bart und nickte. Eddi fasste nach: „Und Wasser? Gibt es ein ‚Wasser-Atom‘? Siggis strich sich erneut seinen Bart und wiegte den Kopf hin und her: „Ja und nein. Es gibt ein kleinstes Wasser-Teilchen, aber das ist noch zerlegbar. Und man kann es sogar aus Atomen zusammensetzen. Sie nennen es ‚Molekül‘, aber es ist nicht elementar wie Gold oder Silber. Es besteht seinerseits

² Rudis Daumenrechnung war nicht schlecht. Er hat sich nur um den Faktor 1,66 verschätzt. Ein Goldatom wiegt ca. 327×10^{-24} g, also $1,66 \times 197 \times 10^{-24}$ g.

aus Atomen von Elementen. Denn alles, Steine, Flüssigkeiten, Luft, Pflanzen, Tiere und selbst wir bestehen nur aus etwa 100 Elementen. Mehr nicht. Und es kommt noch schlimmer: Je nachdem, wie man es rechnet, kommen davon etwa zehn bis zwanzig deutlich am häufigsten vor. Fast zwanzig Kilo von Rudis Körper sind reine Kohle. Das Element heißt „Kohlenstoff“.³

Die beiden Forscher waren stumm vor Staunen. Die ganze Welt, von der Erde bis zu den Sternen, besteht praktisch nur aus weniger als 100 Elementen. Der Rest ist deren schier unendliche Kombinationsfähigkeit zu allen Arten uns bekannter Materialien – tot oder lebendig. Unglaublich!

Unglaublich ist es in der Tat, und das Ergebnis einer Kette von bedeutenden Entdeckungen in der Physik. Denken wir das Ganze noch einmal durch: Wie lange können wir die Teilung des Goldbarrens³ fortsetzen, in Gedanken (ohne uns um technische Probleme wie die Größe der Säge oder der Winzigkeit des Körnchens zu kümmern)? Unendlich oft? Nein. Vorsicht mit der Unendlichkeit – sie ist nie zu Ende, wie der Begriff „un-endlich“ sagt. Diese fortlaufende Teilung stößt nämlich nach ziemlich genau 79 Halbierungen an ihre Grenze: das „Atom“. Der Name bedeutet „unteilbar“, wie Siggi schon sagte (auch der Begriff „In-dividuum“ bedeutet „un-teilbar“). Der Verdacht kam um 1740 auf, als man den gleichmäßigen Druck von Gasen auf die Behälterwände durch zahllose Stöße kleinster Teilchen erklärte. Dann wiesen auch chemische Experimente darauf hin, dass Elemente immer in Mengenverhältnissen kleiner ganzer Zahlen miteinander reagieren – eine weitere Stütze des Atomkonzeptes. Inzwischen wissen wir, dass man ein Atom sogar weiter spalten kann, dass es aus kleineren Bausteinen besteht – aber dann ist es kein Gold mehr. Ein Goldatom ist der kleinste Baustein von Gold. Sie hätten dasselbe auch mit Silber machen können oder mit einem Diamanten, bei dem Sie bei einem Kohlenstoffatom gelandet wären.

Dasselbe hätten wir auch durch Verdünnung erreicht: Wäre Gold flüssig und wasserlöslich, hätten wir es in den 70 bis 80 Schritten jeweils 1 : 2 verdünnen können. Rein theoretisch, wie gesagt. Wie viele Goldatome waren also im ursprünglichen Barren? Das könnte man über die Häufigkeit der Teilungen errechnen, aber die Zahl ist bereits bekannt: die „Avogadro-Konstante“, etwa 602 Trilliarden Teilchen.⁴ „Trilliarde“, das ist ja nur ein Wort, werden Sie sagen. Schon eine Milliarde

³ Wenn Sie sich über das merkwürdige Gewicht von 197 g wundern: Das ist genau ein „mol“ Gold. Das „mol“ ist das Äquivalent des Molekulargewichtes in Gramm, wie Sie gleich sehen werden.

⁴ Die Avogadro-Konstante ist für alle Elemente in einer bestimmten (unterschiedlichen) Gewichtsmenge gleich. Sie hat den Wert $6,022141... \times 10^{23}$. So viele Atome sind in 107 g Silber oder 12 g Kohlenstoff oder 16 g Sauerstoff (jeweils 1 mol) enthalten. Eine Zahl mit 23 Nullen. Man kann ausrechnen, dass $6 \times 10^{23} \approx 2^{79}$ ist, also sind es fast exakt 79 Teilungen.

können Sie sich kaum vorstellen: 1 Mrd. mm=1000 km. Eine Trilliarde sind tausend Milliarden Milliarden.⁵ Das ist also die Zahl 602, wenn man noch 21 Nullen anfügt. Entsprechend groß bzw. klein sind die Atome – etwa ein Zehntel eines Milliardenstel Meters. Diese Zahlen können Sie sich nicht vorstellen? Rechnen wir eine Analogie aus: Wenn ein Goldatom so groß wie eine Glasmurmelt wäre, 1 cm im Durchmesser – wie groß müsste unser Goldbarren sein, um die 602 Trilliarden Murmeln zu enthalten? Ein Würfel von 100 m Kantenlänge? Oder 1000 m? Oder 10 km? Oder ... Halten Sie sich fest: es ist ein Würfel von etwa 844 km Kantenlänge, ein Tafelberg von 844 km Länge, 844 km Breite und 844 km Höhe (wo vielleicht Fernmeldesatelliten in der Erdumlaufbahn mit ihm kollidieren).⁶ Pures Gold, wenn ein Goldatom so groß wie eine Glasmurmelt wäre. Wenn Sie sich auch einen solchen Würfel nicht vorstellen können, so rechnen Sie ihn doch in eine Platte um: 602.000.000 km³ Gold auf der Gesamtfläche der Erde mit 510.000.000 km² (einschließlich der Meeresoberfläche!) aufgeschichtet bedeckt eine Höhe von 1180 m ... mit Goldmurmeln. Aus einem 200-g-Barren!

Wären Sie gerne Milliardär? Um jedem Menschen dieser Erde (ca. 7 Mrd.) *eine Milliarde* Goldatome zu schenken, bräuchten Sie nur ca. 2 mg (Milligramm, also 2/1000 g).⁷ So klein ist ein Atom. Die Atome sind so klein, dass sie zum Teil ganz andere Eigenschaften haben als ein Goldbarren bzw. nicht haben: Ein Goldatom z. B. hat keine goldgelbe Farbe. Sie können es – im Unterschied zu einem Goldklümpchen – auch nicht auf 50 °C erhitzen, denn ein Atom hat keine Temperatur. Apropos „Temperatur“: Die gedachten Goldmurmeln liegen natürlich nicht still – sie bewegen sich unruhig hin und her, und zwar umso mehr, je höher die Temperatur des Murmelhaufens ist. Erst beim absoluten Nullpunkt, 0 K, ist Ruhe im goldenen Tafelberg. Denn Temperatur ist nichts anderes als Bewegung von vielen Atomen.

Wie viele verschiedene Arten von Atomen gibt es? So viele, wie es unterschiedliche chemische Elemente gibt: Bis jetzt hat man 118 Stück gefunden bzw.

Benannt ist sie nach dem italienischen Naturwissenschaftler Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro, Conte di Quaregna e Cerreto (1776–1856).

⁵ 1 Mrd. mm=1000 km: $10^9 \times 10^{-3} = 10^3 \times 10^3$. 1 Trilliarde=1000 Mrd. Mrd.: $10^{21} = 10^3 \times 10^9 \times 10^9$.

⁶ Zur Kontrolle: $8,44 \times 8,44 \times 8,44$ ist ungefähr 601. Weil $10 \times 10 \times 10 = 1000$ ist (3 Nullen hinter der 1) und $100 \times 100 \times 100 = 1.000.000$ ist (6 Nullen hinter der 1), braucht man nur die Zahl der Nullen mit 3 zu multiplizieren. Die Avogadro-Konstante ist 602 mal eine 1 mit 21 Nullen dahinter, also 10.000.000 (7 Nullen) dreimal mit sich selbst multipliziert. 10 Mio. cm sind 100.000 m=100 km. Also $8,44 \times 100 \text{ km} = 844 \text{ km}$.

⁷ Überschlägige Rechnung: $7 \times 10^9 \text{ Menschen} \times 10^9 \text{ Atome/Mensch} \approx 7 \times 10^{18} \text{ Atome}$. 200 g (1 mol): $6 \times 10^{23} \text{ Atome} = x \text{ [g]}$: $7 \times 10^{18} \text{ Atome} \Rightarrow x \approx 200 \times 10^{-5} = 2 \times 10^{-3} \text{ g}$.

experimentell hergestellt.⁸ Daraus besteht alles: Das Weltall, die Erde ... und Sie. Sie enthalten bei 70 kg Gewicht etwa 43 kg Sauerstoff und 7 kg Wasserstoff – hauptsächlich in Form von Wasser, also zu Molekülen zusammengefügteten Atomen. Dazu kommen ca. 16 kg Kohlenstoff, das wichtigste Atom in „organischen“ Verbindungen, die in allem Lebendigen vorkommen. Plus fast 2 kg Stickstoff, aber nur 4 g Eisen, 7 mg Arsen und etwa 35 weitere Elemente.⁹ Aber natürlich nicht in reiner Form: Die Atome der Elemente verbinden sich – ein chemischer Prozess – zu „Molekülen“. Aber dazu kommen wir später.

Noch eine Anmerkung: normalerweise spielt die Avogadro-Zahl im täglichen Leben keine große Rolle. Doch in der Homöopathie taucht sie auf. Nehmen wir zum Beispiel *Nux vomica D30*, ein Homöopathikum aus der „Gewöhnlichen Brechnuss“. „D30“ bedeutet eine dreißigfache Verdünnung in der Dezimalpotenz (Verdünnung 1: 10, man nennt es „Potenzen“), also eine Verdünnung von $1:10^{30}$. Wir können auch 10^{-30} schreiben, eine 1 mit 30 Nullen hinter dem Komma. Die „Avogadro-Konstante“ besagt, dass sich in 18 g Wasser (H_2O) ca. 6×10^{23} Moleküle befinden – wie schon gesagt: ein kleines Schnapsglas voll. Also brauchen wir $18 \times 10^{30} / 6 \times 10^{23} \approx 3 \times 10^7$ g Wasser, damit sich noch ein einziges Brechnuss-Molekül darin befindet. Das sind 30 T Wasser – ein kleiner Pool voll. Dies wird in kleinen 10-ml-Fläschchen verkauft, von denen wir drei Millionen Stück zu je 6 € herstellen können. In welchem sich wohl das Brechnuss-Molekül befindet? Ein gutes Geschäft!

2.2 Materie scheint nicht immer stabil zu sein

Im Jahre 1896 entdeckte der französische Physiker Antoine Henri Becquerel, dass Uransalz gut verpackte fotografische Platten schwärzte, also offensichtlich etwas die Verpackung durchdringen konnte. Diese Uranverbindungen lagen einfach so herum, zerfielen aber anscheinend ohne erkennbaren Grund spontan in andere Elemente und gaben dabei eine Art von „Strahlung“ ab. Die Physikerin Marie Curie beschloss, die „Becquerel-Strahlung“ für ihre Doktorarbeit zu untersuchen. Marie und Pierre Curie fanden dann 1898 zwei bisher unbekannte chemische Elemente, das Radium und das Polonium, als Zerfallsprodukte der Pechblende (einem uranhaltigen Mineral), und 1903 wurde die Arbeit der drei mit dem Nobelpreis für Physik belohnt.

⁸ Die meisten jenseits von Uran (92 Protonen, Atomgewicht 238) sind „superschwere Elemente“ oder „Transurane“, die in der Natur nicht vorkommen und erst nach 1940 entdeckt bzw. hergestellt wurden.

⁹ Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Häufigkeiten_chemischer_Elemente#Zusammensetzung_des_menschlichen_Körpers_\(ca._70_kg\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Häufigkeiten_chemischer_Elemente#Zusammensetzung_des_menschlichen_Körpers_(ca._70_kg)).

Aber was waren das für „Strahlen“? 1898 gelang dem Atomphysiker Ernest Rutherford, zwei offensichtlich unterschiedliche Arten von Strahlung durch ihr unterschiedliches Durchdringungsvermögen von Materialien zu unterscheiden. Er nannte sie „Alphastrahlen“ und „Betastrahlen“. Anderen Physikern gelang es, sie mit einem Magnetfeld abzulenken und so zu trennen: Die „Alphastrahlen“ sind positiv geladen und die „Betastrahlen“ negativ. Dann kam wieder Rutherford zum Zuge: Er verglich Spektrallinien bei Gasentladungen mit den Alphateilchen und konnte sie 1908 als Teilchen identifizieren, die irgendetwas mit Helium zu tun hatten.

Also musste man offensichtlich erst einmal in die Winzigkeit der Atome, in ihr Inneres, eindringen. Sie sind keineswegs die Unteilbaren, für die man sie gehalten hatte. Jetzt musste man herausfinden, wie denn dieses Helium „von innen“ aussah – und die anderen etwa 100 Elemente auch.

2.3 Wir schauen uns ein Atom genauer an

Das ist leichter gesagt als getan. Das Auflösungsvermögen optischer Mikroskope beträgt ungefähr die halbe Wellenlänge des Lichts, ca. $d = \lambda/2$. Der Teil des elektromagnetischen Spektrums, den wir als Licht bezeichnen, reicht von etwa 380 nm (violett) bis 780 nm (dunkelrot) für die Wellenlänge λ . Also ist die Grenze im Extremfall ca. $\frac{1}{2} \times 380 \times 10^{-9} = 1,9 \times 10^{-7} \text{ m} = 190 \text{ nm}$.

„Wie groß ist denn ein Atom?“, werden Sie fragen. Machen wir eine grobe Schätzung: In 197 g Gold sind 6×10^{23} oder 600×10^{21} Goldatome. Bei einer Dichte von $19,3 \text{ g/cm}^3$ sind das ca. 10 cm^3 Gold. An jeder Kante des Würfels – er hat die Kantenlänge $\sqrt[3]{10} = 2,154 \text{ cm}$ – reihen sich $\sqrt[3]{600} \times 10^7 \approx 8,4 \times 10^7$ Goldatome auf. Keines kann also größer als $0,3 \times 10^{-7} \text{ cm} = 3 \times 10^{-10} \text{ m}$ sein, grob ein Tausendstel der optischen Auflösungsgrenze. Also: Wie Sie sehen, sehen Sie *nichts*! So funktioniert Physik über den dicken Daumen ...

Ein *sehr* dicker Daumen ... Denn ein Atom ist nur etwa $0,1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$ „groß“. Also brauchen wir „Licht“ mit kürzerer Wellenlänge λ . Dazu eignet sich die Röntgenstrahlung mit einer Wellenlänge von 10^{-8} bis 10^{-11} m , wobei die „weiche“ Röntgenstrahlung mit den größeren Wellenlängen auch ausscheidet. Doch was man „sieht“, ist auch nur ein unscharfes, merkwürdig strukturiertes Wattlebällchen.¹⁰

Um 1900 herum wollte man nun wissen, wie ein Atom von innen aussieht. Man experimentierte schon mit Kathodenstrahlen, also mit Elektronen (ohne es zu ahnen). Man wusste, dass die kleinsten Teilchen aus zwei verschiedenen Ladungen

¹⁰ Vergl. z. B. „Unsere Quantenwelt/Atome“ in http://de.wikibooks.org/wiki/Unsere_Quantenwelt/_Atome.

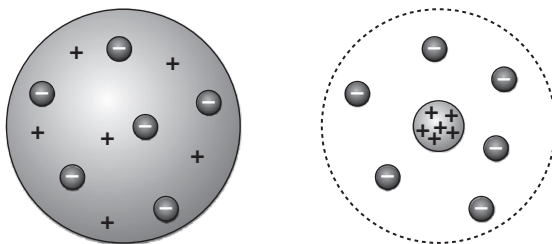


Abb. 2.1 Thomson'sches und Rutherford'sches Atommodell

bestehen mussten, positiven und negativen. Man hatte festgestellt, dass die negativen Elektronen von Atomen absorbiert werden. Jetzt lag die Vermutung nahe, dass ein Atom eben nicht unteilbar sei, sondern mindestens aus solchen positiven und negativen Einzelteilen bestand. Sir Joseph J. Thomson entwickelte daraus ein erstes Atommodell, das manche mit feinem englischem Humor als Plumpudding- oder Rosinenkuchenmodell bezeichneten (Abb. 2.1 links).¹¹ Das Atom war in dieser Vorstellung ein positiv geladener Knödel, in den so viele Elektronen als Rosinen eingebacken waren, wie der positiven Ladung des Knödels entsprach.

„Das wollen wir doch einmal sehen!“, dachte sich ein paar Jahre später Ernest Rutherford. Er beschoss die Atome in einer superdünnen Goldfolie mit radioaktiven Strahlen, eigentlich mit subatomaren Teilchen (anders gesehen: mit zweifach ionisierten Heliumatomen), seinen „Alphastrahlen“. Das ging als „Streuexperiment“ in die Geschichte ein.¹² Aus Gold lassen sich besonders dünne Folien schlagen (Blattgold), die eine dünne Schicht der vermuteten schweren und dicken „Knödel“ bilden. Das Ergebnis war auf den ersten Blick enttäuschend: Die Teilchen gingen durch den Knödel wie Schrotkugeln durch Butter. Aber nicht alle. Einige – extrem wenige, nur etwa eins von vielen Millionen – wurden gestreut oder sogar reflektiert. Das erlaubte nur eine Erklärung: Der Knödel, also der harte Kern mit der positiven Ladung, ist extrem klein (Abb. 2.1 rechts). Nur der Kern streut die „Schrotkugeln“ – und da das so selten passiert, muss er im Vergleich zur Größe des Atoms winzig sein. Auch wenn die „Rosinen“ die Strahlen gestreut hätten, hätten bei einem *dicken* positiven Kern nicht die allermeisten glatt hindurch fliegen

¹¹ Siehe http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Atommodelle und alle dort genannten Modelle.

¹² Die „Rutherford-Streuung“ wurde 1909 bis 1913 untersucht. Siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Streuexperiment>, <http://de.wikipedia.org/wiki/Rutherford-Versuch>. Siehe auch Geiger, H. et al.: *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. Proc. Roy. Soc. 1909 A vol. 82, pp. 495–500 (<http://chemteam.info/Chem-History/GM-1909.html>).

dürfen. Das Atom ist „leer“! Es wirkt als Ganzes durch seine stabile Elektronenhülle, hat aber nur einen winzigen schweren Kern, in dem fast seine gesamte Masse versammelt ist. Denn man wusste schon, dass die Elektronen viel leichter als die Kernbestandteile sind. Das verblüffte den Entdecker so, dass er einen plastischen Vergleich zog: „Es ist so ziemlich das unglaublichste Ereignis, das mir je in meinem Leben passierte. Es war fast genauso unglaublich, als ob Sie eine 38-cm-Granate gegen ein Stück Seidenpapier abfeuern, und sie kommt zurück und trifft Sie.“¹³ So hat der 1. Baron Rutherford of Nelson gewissermaßen aus dem Rosinenkuchenmodell „die Rosinen herausgepickt“. 1919 entdeckte Rutherford, dass der Kern des Wasserstoff-Atoms aus einer einzigen positiven Ladungseinheit besteht. Es ist das kleinste, am einfachsten aufgebaute Atom. Deshalb wurde dem positiven Teilchen der Name Proton (griechisch: *prōton* „das erste“) gegeben.

¹³ Quelle: M. Hecker: Der Rutherfordsche Streuversuch (© 1997 by Prof. Dr. Volker Schubert) in [http://groups.uni-paderborn.de/cc/arbeitsgebiete/rutherford/\(mit schöner Animation des Streuversuchs\).](http://groups.uni-paderborn.de/cc/arbeitsgebiete/rutherford/(mit%20sch%C3%B6ner%20Animation%20des%20Streuversuchs).)

<http://www.springer.com/978-3-658-11104-5>

Atomphysik für Höhlenmenschen und andere Anfänger
Das Universum von innen: Moleküle, Atome und
Elementarteilchen

Beetz, J.

2016, XIII, 45 S. 12 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-11104-5