

Kapitel 1

Zur Einführung: Atome, und die zwei ersten wirklichen Elementarteilchen

Überblick

Seit den Anfängen des systematischen logischen Denkens in Zeiten der alten griechischen Philosophie wurde darüber spekuliert, ob die kontinuierlichen Erscheinungsformen von Raum, Zeit, Materie und Bewegung „wirklich“ sind oder ob ihnen ein diskretes, endliches Raster zu Grunde liegt, das für unsere Sinneswahrnehmungen nur zu fein ist.¹

Die bloße Idee solcher Rasterung oder Quantisierung muss dem Alltagsverstand früher vielfach als abwegig vorgekommen sein, bevor sich im digitalen Zeitalter die Erfahrung verbreiten konnte, dass mit genügend vielen Pixeln sich jedes „echte“ Bild „vortäuschen“ lässt.²

Zumindest für die Materie wurde die Frage nach der Existenz kleinster Einheiten am Ende des 19. Jahrhunderts entscheidungsreif. Es hatten einerseits Chemie und Physik große Fortschritte bei der Erklärung vieler kontinuierlich erscheinender Phänomene machen können, indem sie sich kleinste *unteilbare* Körperchen (daher der Name *Atom*) dachten und deren Zusammenwirken als verkleinerte („skalierte“) Ausgabe anschaulich gedachter mechanischer Systeme verstanden.

Sogar von der schier unvorstellbaren Kleinheit dieser unsichtbaren Teilchen hatte man schon recht genaue Kenntnis: 1 Kilomol (kmol) jedes Elements (z. B. 1 kg Wasserstoff) besteht aus ca. $6 \cdot 10^{26}$ Atomen – genannt die *Avogadro-Konstante*. Die ganze Materie erschien demnach zusammengesetzt aus etwa 70 bekannten (und einigen noch prognostizierten) Atomarten, die sich in chemisch reiner Form gewinnen ließen und deren Massen (*Atomgewicht*, definiert relativ zu Wasserstoff) zwischen 1 und etwa 240 lagen.

¹ Demokrit (*460 v. Chr., †371 v. Chr.), Leukipp (5. Jahrhundert v. Chr.) u. a.

² Die „echten“ oder *wahren* Bilder unseres *Wahr*-Nehmens, denen wir entnehmen, dass Raum und Zeit kontinuierlich sind, entstehen im Gehirn, und zwar ca. 20mal pro Sekunde aus den ca. $2 \cdot 10^8$ einzelnen Signalen der Sehzellen.

Andererseits standen große Forscher des 19. Jahrhunderts der Atom-Hypothese aber skeptisch bis ablehnend gegenüber. Denn mathematische, logische und damit prinzipielle Schwierigkeiten sprachen gegen die wirkliche Existenz unteilbarer Körperchen im herkömmlichen Sinn. Dazu kamen zahlreiche Beobachtungen, für die sich überhaupt kein Erklärungsansatz finden ließ; bei den Atomen z. B. ihre offenbar stabile Größe bei gleichzeitiger Existenz charakteristischer innerer Schwingungsfrequenzen (Spektrallinien). Diese Erscheinungen auf eine völlig unbekannte, aber sicher reichhaltige innere Struktur der Atome zu schieben, wäre zwar bequem gewesen, bot aber keinen Ausweg. Zum einen mussten dann die dort herrschenden physikalischen Gesetze völlig andere sein als alles sonst Bekannte, und zum anderen entstanden für die noch kleineren Einheiten, aus denen die Atome dann aufgebaut sein müssten, wieder nur die gleichen grundsätzlichen Probleme wie vorher.

Auf eine wissenschaftliche Erklärung der Anzahl verschiedener Atomsorten, der Gewichte und Größe der Atome und ihrer chemischen Reaktionsmöglichkeiten musste noch bis in die 1930er Jahre gewartet werden. Denn zur weiteren Lösung dieser Fragen war der Rahmen der klassischen Physik tatsächlich ungeeignet, und es ist kein Wunder, dass die moderne Physik mit vielen klassischen (und vor allem den anschaulichen) Vorstellungen brechen musste, oder besser gesagt: die Grenzen ihrer Anwendbarkeit entdeckte, um sie zu überschreiten.

Das 1. Kapitel verfolgt in groben Zügen den Weg zur heftig umkämpften Aufstellung des modernen Atombegriffs und weiter zur unerwünschten Erkenntnis am Ende des 19. Jahrhunderts, dass man auch aus diesen Atomen Bestandteile herauslösen konnte: die Elektronen. Diese, immerhin, sind die ersten auch nach heutiger Sicht wirklich elementaren oder *fundamentalen* Teilchen. Weiter wird über die damals völlig unvorhergesehene Entdeckung berichtet, dass selbst die Wellen – eigentlich auch heute noch ein Sinnbild für Kontinuität in der Bewegung – nur in Quantensprüngen entstehen und vergehen, jedenfalls zunächst die elektromagnetischen Wellen. Damit war als zweites der heute bekannten elementaren Teilchen das Photon aufgetaucht. Dieser Überraschungsfund (Plancksches Strahlungsgesetz von 1900, Einsteinsche Deutung von 1905 mittels „Lichtquanten“) hat so bedeutende Umwälzungen der physikalischen Grundbegriffe *Welle* und *Materie* ausgelöst, dass er oft als der eigentliche Beginn der *Modernen Physik* gesehen wird.³

1.1 Elementarteilchen: Die Ausgangslage um 1900

1.1.1 Gibt es überhaupt Atome?

Lauter Streit. „Elementarteilchen“ – die seit den alten Griechen gesuchten hypothetischen, umstrittenen, unveränderlichen und unteilbaren, kleinsten Bausteine aller Materie: Kurz vor 1900 wurden vielfach die Atome der chemischen Elemente

³ Ein häufig benutztes, aber formaleres Kennzeichen ist das Auftauchen der Planckschen Konstante $\hbar (= h/2\pi)$ in einer Gleichung.

dafür gehalten, wenn auch ihre wirkliche Existenz noch von vielen Naturwissenschaftlern bezweifelt (z. B. 1883 von Max Planck,⁴ der 1900 die für die Quantisierung entscheidende Naturkonstante $h (= 2\pi\hbar)$ entdeckte) oder sogar kategorisch verneint wurde (z. B. von Ernst Mach, dem bedeutenden Erforscher der Schallausbreitung in Gasen).

„Kann man denn Atome sehen?“ – fragte Mach, einer der einflussreichsten Gegner der Atomhypothese, jeden Atomisten bis weit ins 20. Jahrhundert.⁵ Noch 1896 erwähnt er in seinem Lehrbuch *Die Principien der Wärmelehre* die Atome und Moleküle nur um zu fordern, „die Darstellung der Forschungsergebnisse von [solchen] überflüssigen unwesentlichen Zuthaten zu reinigen, welche sich durch die Operation mit Hypothesen eingemengt haben“ [135, S. 363].

Von so heftigen und damals weit verbreiteten Angriffen sah sich z. B. Ludwig Boltzmann, obwohl er die ganz auf diese Atom-Hypothese gegründete kinetische Gastheorie und statistische Mechanik schon zu großen Höhepunkten geführt hatte, in die Defensive gedrängt. In seinem Lehrbuch *Gastheorie* vom selben Jahr wich er bis an die Schmerzgrenze zurück und wollte „die Vorstellungen der [kinetischen] Gastheorie [nur noch] als mechanische Analogien bezeichnen“ [36, S. 4]: „Weg mit jeder Dogmatik in atomistischem und antiatomistischem Sinne!“ Man brauche ja an wirkliche Atome nicht zu glauben, jedoch seien sie zur Veranschaulichung und Berechnung der Vorgänge in Gasen, in der Chemie und Kristallographie eine ungeheuer nützliche Hypothese.

Dabei war, nach heutigem Maßstab, allein durch die kinetische Gastheorie die Existenz von Atomen und Molekülen schon damals nicht schlechter gesichert als, nur als Beispiel, durch die heutige Elementarteilchenphysik die Existenz der modernen Elementarteilchen: Nämlich indem die Annahme ihrer Existenz die Möglichkeit eröffnet, eine Fülle weit gestreuter *makroskopisch beobachtbarer* Phänomene⁶ miteinander in Verbindung zu bringen, sie zu veranschaulichen, zu berechnen und somit zu „erklären“.

Während im Jahr 1895 Boltzmann den 2. Band seines Buches wegen der „herrschenden feindseligen Stimmung“ so schrieb, dass, „wenn man wieder zur [kinetischen] Gastheorie zurückgreift, nicht allzuviel noch einmal entdeckt werden muss“, hatte indes die Ära der Röntgenstrahlen und der Radioaktivität begonnen, die der Hypothese real existierender Atome endlich zum Durchbruch verhalf. Allerdings

⁴ [45, S. 47]. Siehe Literaturliste im Anhang.

⁵ Machs polemische Frage beruht auf dem aus heutiger Sicht grundlegenden Missverständnis, auch die elementarsten Teilchen müssten mit den Begriffen der makroskopischen Sinneswelt adäquat zu beschreiben sein (ganz zu schweigen davon, dass auch die „unmittelbare Wahrnehmung“ einen höchst verwickelten physikalischen Prozess durchläuft, worauf in Abschn. 13.3.3 und 14.5.3 noch kurz eingegangen wird). Zweifellos förderte Mach durch seine Fragerei auch noch die Verbreitung dieses Denkfehlers.

⁶ Auch Elementarteilchen-Physiker machen nur makroskopische Beobachtungen: sichtbare Spuren in Fotoplatten, hörbare Klicks im Zählrohr etc. [188].

verloren sie dabei, wie in einer Ironie der Geschichte, ihre wesentlichsten definierenden Eigenschaften: *elementar* und *unveränderlich* zu sein.

Anfänge des modernen Atomismus. Wie hatte sich die Atom-Hypothese (im naturwissenschaftlichen, quantitativen Sinn) bis dahin entwickelt? Manche Charakteristika der wechselvollen Geschichte des modernen wissenschaftlichen Fortschritts zeigten sich schon damals. Als frühe Vorläufer gelten:

- in der Physik: Daniel Bernoulli (ab etwa 1750), Joseph Louis Gay-Lussac (ab 1800), zur Erklärung der (idealen) Gasgesetze,
- in der Chemie: John Dalton (ab 1803), Amedeo Avogadro (1811), zur Interpretation der einfachen Massen- und Volumen-Beziehungen bei chemischen Reaktionen (sofern diese analysiert wurden mittels der neu definierten *chemischen* Elemente, die Antoine Lavoisier (1789) an die Stelle der *Vier Elemente der Alchemie* – Feuer, Wasser, Luft, Erde – gesetzt hatte). Dafür musste Avogadro neben der Hypothese, alle Gase enthielten (bei gleichem Volumen V , Druck P , Temperatur T) die gleiche Anzahl kleinster Teilchen, eine zweite wagen: Diese Teilchen sollen immer aus mindestens 2 Atomen zusammengesetzt sein, selbst bei den chemisch elementaren Gasen wie Wasserstoff (H_2), Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2).

Auch ein frühes „Atom-Modell“ datiert aus dieser Zeit: Alle Atome sollen aus den leichtesten, den Wasserstoff-Atomen zusammengesetzt sein (William Prout 1815).

Grundlage für diese Idee war vermutlich die Ganzzahligkeit der 20 Atomgewichte A (relativ zu Wasserstoff mit $A = 1$), wie sie von Dalton 1808 publiziert worden waren, obwohl er es 1803 schon besser gewusst hatte. So musste Prouts Modell bald wieder aufgegeben werden, als die Nicht-Ganzzahligkeit der Atomgewichte sich doch in immer mehr Fällen als definitiv herausstellte. Prouts Vorstellung wäre den Atomisten bei ihrer Suche nach einer einheitlichen Ursubstanz aller Materie höchst willkommen gewesen. Sie wurde 100 Jahre später auch sogleich wiederbelebt, als die Atome endlich als reale Materieteilchen anerkannt waren. Sein Gedanke konnte – in abgewandelter Form – sogar bestätigt werden, als man gelernt hatte, dass selbst die meisten chemisch reinen Elemente noch Gemische sind und physikalisch feiner aufgeteilt werden können in die *Isotope*, die nun endlich ganzzahlige Atomgewichte aufwiesen.⁷

So soll der Name „Proton“ für den massiven, positiv geladenen Baustein aller Atome (vermutlich) auch an Prout erinnern.

Doch zunächst blieben die Atome weitgehend unbeachtet, ihre weiteren Eigenschaften unbekannt oder rätselhaft, die Frage ihrer realen Existenz daher bestenfalls umstritten. Avogadros Hypothese stets gleicher Teilchenzahlen in allen Gasen (bei gleichem Volumen, Druck, Temperatur) wurde fast vergessen. Die Wende kam um 1860, als die Fruchtbarkeit der Atomhypothese in der Chemie unübersehbar geworden war und in Karlsruhe der weltweit erste internationale Naturwissenschaftler-Kongress einberufen wurde, um die Begriffe sauber zu vereinbaren. Seit dem gilt:

⁷ So jedenfalls mit der damaligen Messgenauigkeit (Abschn. 4.1.3). Zu den kleinen später doch gefundenen und höchst bedeutsam gewordenen Abweichungen siehe Abschn. 4.1.6.

- Atom (von griech. „unteilbar“) ist die kleinste Masseneinheit eines chemischen Elements. Atome eines Elements wurden als untereinander *völlig gleich, unteilbar und unveränderlich*⁸ in ihren Eigenschaften angenommen, wie mit besonderem Nachdruck J. C. Maxwell forderte.
- Molekül (von lat. „Körperchen“) ist die aus mehreren Atomen bestehende chemisch und physikalisch kleinste Masseneinheit eines homogenen Stoffes (besonders von Gasen).

Damit konnten den hypothetischen Atomen zwei Eigenschaften zugeschrieben werden, obschon beobachtbar nur in Relation zu anderen – ebenso hypothetischen – Atomen: ihr chemischer Charakter und ihre Masse. Viel wurde gerätselt über eine mögliche Ordnung zwischen beiden. Den Durchbruch schaffte Dimitrij Mendelejew 1869 mit seiner Veröffentlichung „Ueber die Beziehungen der [chemischen] Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente“ (siehe Abb. 1.1 und Erläuterungen dort). Sein Vorschlag, wie die Teilchen nach ihrer Masse in Zeilen und Spalten zu gruppieren seien, ließ mit gewisser Regelmäßigkeit in etwa gleichen Abständen der Masse Ähnlichkeiten hinsichtlich der chemischen Eigenschaften auftauchen. Die „laufende Nummer“ in dieser Auflistung wurde zur *chemischen Ordnungszahl* des Elements.

Im Licht der erheblichen Umwälzungen, die die Physik der kleinsten Teilchen noch erleben sollte,⁹ klingen die Argumente, mit denen Mendelejew sein Schema vorstellte, überraschend modern. Mit recht ähnlichen Beobachtungen begründete Murray Gell-Mann 1963 sein ebenso bahnbrechendes Schema für die damals nicht weniger unübersichtliche Schar der damaligen Elementarteilchen – den „Teilchenzoo“ (vgl. Abschn. 11.3), aus dem das heutige Standardmodell hervorging.

Neben den chemischen Eigenschaften und der Masse der Atome konnte aus der Dichte der Elemente und ihrer Verbindungen auch deren durchschnittlicher Platzbedarf ermittelt werden – natürlich auch nur als relative Größe. Dass die Atome verschiedener Elemente sich stärker in ihrer (durchschnittlichen) Masse unterscheiden müssten als in ihrer Größe, war damit schon bekannt.

Frage 1.1. *Wie ist diese Beobachtung einfach zu gewinnen?*¹⁰

Antwort 1.1. *Die Atomgewichte variieren von 1 bis (heutiger Wert für Uran:) 238. Wenn das Volumen der Atome zu ihrer Masse proportional wäre, hätten sie alle*

⁸ letzteres in besonders markantem Gegensatz zur immer noch nicht ganz verdrängten Alchemie

⁹ Erst ab 1925 wurde durch die Quantenmechanik klar, wie die chemischen Eigenschaften des Atoms durch die Anzahl Z der Elektronen bestimmt werden, die ein Kern der Ladung $+Ze$ in seiner Hülle bindet; und erst 1935 ergab sich in Form des Tröpfchenmodells (siehe Abschn. 4.2) eine erste Erklärung dafür, wie der Kern aus Z Protonen und N ungefähr gleich schweren Neutronen zusammengesetzt sein muss, um ein stabiles Isotop mit dem Atomgewicht $A = Z + N$ zu bilden.

¹⁰ Die Fragen bilden keine Aufgaben zur systematischen Überprüfung sondern sind eher Zwischenfragen oder Anregungen, kurz über Querverbindungen nachzudenken.

Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Von D. Mendelejeff. — Ordnet man Elemente nach zunehmenden Atomgewichten in verticale Reihen so, dass die Horizontalreihen analoge Elemente enthalten, wieder nach zunehmendem Atomgewicht geordnet, so erhält man folgende Zusammenstellung, aus der sich einige allgemeinere Folgerungen ableiten lassen.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
		Ni =	Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
H = 1			Zn = 65,2	Cd = 112	
	Be = 9,4	Mg = 24	? = 68	Ur = 116	Au = 197 ?
	B = 11	Al = 27,4	? = 70	Sn = 118	
	C = 12	Si = 28	As = 75	Sb = 122	Bi = 210 ?
	N = 14	P = 31	Se = 79,4	Te = 128 ?	
	O = 16	S = 32	Br = 80	J = 127	
	F = 19	Cl = 35,5	K = 39	Rb = 85,4	Tl = 204
Li = 7	Na = 23	Ka = 40	Sr = 87,6	Cs = 133	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92	Ba = 137	
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6]	Th = 118 ?		

1. Die nach der Grösse des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen eine stufenweise Abänderung in den Eigenschaften.
2. Chemisch-analoge Elemente haben entweder übereinstimmende Atomgewichte (Pt, Ir, Os), oder letztere nehmen gleichviel zu (K, Rb, Cs).
3. Das Anordnen nach den Atomgewichten entspricht der *Werthigkeit* der Elemente und bis zu einem gewissen Grade der Verschiedenheit im chemischen Verhalten, z. B. Li, Be, B, C, N, O, F.
4. Die in der Natur verbreitetsten Elemente haben *kleine* Atomgewichte

Abb. 1.1 Das Periodensystem der Elemente – hier der erste Versuch von Dimitrij Mendelejew 1869, die vermutlichen Elementarteilchen von damals in eine Ordnung zu bringen [142]. Trotz der Fehler war dies Schema erfolgreicher als andere damals vorgeschlagene. Die spaltenweise aufsteigenden Zahlen sind die Atomgewichte A , die Spalten sind so versetzt (und einige Plätze darin frei gelassen oder vertauscht), dass chemisch ähnliche Elemente sich in derselben Zeile wiederfinden. Der Zuwachs der Masse von Spalte zu Spalte lässt eine angenäherte Regel erkennen: 2-mal $\Delta A \approx 16$, 2-mal $\Delta A \approx 36$. Einzelne Lücken beim Abgleich der Spalten wurden als Vorhersage neuer Elemente gedeutet (z. B. bei $A \approx 68$ u. 70: Ga, Ge, entdeckt 1875 bzw. 1886). Nur die Zeile für die Edelgase fehlt noch völlig (unter F-19 einzufügen). Die große Lücke $140 \leq A \leq 180$ wurde (im wesentlichen in den 1880er Jahren) durch die Seltenen Erden geschlossen. Thorium (Th, $A = 232$) und Uran („Ur“, $A = 238$) sind fälschlich noch mit dem halben Atomgewicht eingeordnet. Mit ihren angenähert richtigen Werten erschienen sie erst zwei Jahre später, wodurch sich nun eine neue große Lücke zum bis dahin schwersten Element ($A = 210$, Wismut Bi) auftat. Diese wurde 30 Jahre später durch kurzlebige radioaktive Elemente gefüllt. (Moderne Version des Periodensystems in der heute gewohnten Form mit Vertauschung von Zeilen und Spalten in Abb. 3.12)

die gleiche Dichte. Dann hätte auch alle kondensierte Materie, wenn sie – näherungsweise – aus dicht gepackten Atomen besteht, in etwa dieselbe gleiche Dichte. Die Dichten kondensierter Materie variieren aber ums 40fache (ca. 0,5–20 g/ml). Wenn andererseits die Größe der Atome konstant wäre, müssten die Dichten etwa

wie die Atomgewichte variieren, d. h. von 1 bis 238. Die Wahrheit liegt offenbar dazwischen. Mit wenigen Ausnahmen bleiben die so relativ zueinander bestimmbaren Atom-Radien innerhalb eines Faktors 2 gleich.

Doch zeigte sich in den Variationen der Radien die gleiche Periodizität wie im chemischen Verhalten, das war 1870 der Beitrag von Julius Lothar von Meyer zur Entwicklung des Periodensystems. Zum Beispiel bilden die größten Atome, jeweils um ein mehrfaches größer als ihre Nachbarn, die Gruppe der Alkali-Metalle (Li, Na, K, Rb, Cs). Über absolute Werte für Größe und Masse der einzelnen – immer noch hypothetischen – Atome oder Moleküle aber wusste man damals nichts.

Skalenfaktor. Dazu hätte man die Anzahl der Atome in Substanzmengen alltäglicher Größenordnungen kennen müssen, den fundamentalen *Skalenfaktor zwischen makroskopischer und atomarer Welt*. Mit den Kenntnissen Mitte des 19. Jahrhunderts – das waren hier die Massenbilanzen von chemischen Reaktionen und die physikalische Zustandsgleichung des idealen Gases – war aber jede Unterscheidung unmöglich, ob statt der tatsächlichen Anzahl Teilchen nicht z. B. die doppelte Anzahl halb so großer und schwerer Teilchen vorgelegen hatte.

Dieser fundamentale Skalenfaktor für den Unterschied zwischen der alltäglichen und der atomaren Welt konnte erst bestimmt werden, nachdem Rudolf Clausius (der spätere Entdecker der Zustandsgröße Entropie) und James C. Maxwell (der spätere Vollender der elektrodynamischen Grundgleichungen) ab 1858 die *kinetische Gastheorie* im heutigen Sinn zu entwickeln begannen. Indem sie (erstmal!) auch Zusammenstöße zwischen den umherfliegenden Teilchen in Betracht zogen, kamen sie auf den Begriff der *mittleren freien Weglänge*. So fanden sie, über die makroskopische *Zustands-Gleichung* hinaus, die atomistische Deutung makroskopischer *Prozesse*, z. B. der drei Transportprozesse Wärmeleitung, Diffusion und innere Reibung. Demnach würde ein (gegebenener) Diffusions-Prozess um so langsamer ablaufen, je kleiner und zahlreicher die Teilchen sind, die ihn verursachen. Damit konnte Maxwell aus der von Stokes gemessenen inneren Reibung (= Diffusion von Impuls, der nicht-turbulente Teil des Luftwiderstands)¹¹ die mittlere freie Weglänge in Luft zu etwa 62 nm ermitteln, und daraus Johann Loschmidt schon 1865 die „Groesse der Luftmolecule“ zu $(0,1-1) \text{ nm} = (10^{-10}-10^{-9}) \text{ m}$ abschätzen. Mit seinem – wenn auch auf Umwegen erhaltenen – Wert lag er bereits größenordnungsmäßig richtig.

Den Skalenfaktor zwischen makroskopischer und atomarer Welt drückt man heute häufig durch die *Avogadro-Konstante* aus, das ist die universell gleiche Teilchenzahl N_A in der Menge „1 kmol“ eines jeden chemischen Elements oder Verbindung (z. B. Anzahl H-Atome in 1 kg bzw. H₂-Moleküle in 2 kg Wasserstoffgas, C-Atome in 12 kg Kohlenstoff, H₂O-Moleküle in 18 kg Wasser).

¹¹ Die Messung galt als *experimentum crucis* der kinetischen Gastheorie, weil es ihre befremdliche Vorhersage prüfte, die innere Reibung des Gases sei unabhängig von seiner Dichte. Doch dies erwies sich als zutreffend.

Zum Merken: die *Avogadro-Konstante* ist $N_A = 6 \cdot 10^{26} / \text{kmol}$.

Natürlich ist dies keine Gleichheit im mathematischen Sinn, sondern eine gute Näherung für Abschätzungen. Gibt man eine Messgröße ohne den unvermeidlichen Unsicherheitsbereich an, sollte dieser nicht größer sein als der Rundungsfehler der letzten Ziffer. Bei der Avogadro-Zahl ist es besser. Der international akzeptierte Messwert ist $N_A = 6,02214179(30) \cdot 10^{26} / \text{kmol}$, wobei der Unsicherheitsbereich in Klammern hinzugesetzt ist und sich auf die letzten angegebenen Dezimalstellen bezieht [146].

Der Versuch, die Größe dieser Zahl der Vorstellung näher zu bringen, brachte Scherzfragen wie die folgende hervor:

Frage 1.2. *Wieviele Atome Kohlenstoff aus Ihrem Körper hatte schon Caesar in seinem (unter der ebenso scherzhaft gemeinten Annahme, sie hätten sich inzwischen gleichmäßig verteilt)?*

Antwort 1.2. *Kohlenstoff macht im Körper (ca.) 1,5 kmol aus. Um die gesuchte Zahl auf keinen Fall zu überschätzen, setzen wir gleichmäßige Verteilung in der gesamten Biosphäre an, die etwa $4,5 \cdot 10^{13}$ kmol [218] enthält. Das bedeutet Verdünnung um einen Faktor $3 \cdot 10^{13}$. Von den $9 \cdot 10^{26}$ Atomen Caesars finden sich (bei vollständiger Durchmischung) also um die $3 \cdot 10^{13}$ in jedem anderen Kilomol wieder.¹²*

Die Moderne Physik kündigt sich an. Bezweifelt wurde die Atomhypothese aber weiter, u. a. auch deshalb, weil nach Avogadros befremdlicher Hypothese (s. o.) die chemischen Atome anscheinend nie einzeln, sondern nur zu mehreren verbunden im Molekül existieren konnten.

Ein Phänomen, das sich ein Jahrhundert und mehrere Revolutionen in der Elementarteilchenphysik später wiederholte: Auch die um 1970 noch recht hypothetischen Quarks wurden trotz intensiver Suche nie als einzelne Teilchen beobachtet, was ihre allgemeine Anerkennung als Bausteine der Materie deutlich verzögerte (siehe Kap. 13).

Der Widerstand hielt auch noch an, nachdem die kinetische Gastheorie dank Boltzmann ab 1876 detaillierte Belege und einleuchtende Erklärungen für Avogadros Hypothese geben konnte. Sie sind ein schönes Beispiel für die Schlussweise, die bei der Erforschung des unsichtbar Kleinen typisch werden sollte.

Schlüsselbegriff war hier die Anzahl f aller Koordinaten des Moleküls, die in der Formel für seine Energie vorkommen müssen (Zahl der *Freiheitsgrade*). Ein

¹² Die große Zahl kann überraschen. Indes wird noch viel weniger eingängig sein, dass es sich hier um eine physikalisch unzulässige Frage handelt. Dass man einem Kohlenstoff-Atom nicht ansehen kann, ob es einmal Caesar gehört hat, ist kein Problem der begrenzten Genauigkeit physikalischer Messungen, sondern rührt an eins der neuen Prinzipien der Modernen Physik. Das zu dieser Frage gehörige Experiment mit Kohlenstoff-Atomen wurde gemacht (siehe die Winkelverteilung nach Zusammenstößen in Abb. 5.8 auf S. 152). Es zeigt: Jeder Versuch, gleiche Atome nach ihrer Herkunft zu unterscheiden, wird von der Natur vereitelt und ist darüberhinaus ein logischer Fehler. Näheres in Abschn. 5.7 und 9.3.3.

starrer Körper hat für die kinetische Energie der Schwerpunktsbewegung (Translation) $f_{\text{trans}} = 3$ Freiheitsgrade und ebenso viele für die möglichen Drehungen (Rotation), zusammen $f = f_{\text{trans}} + f_{\text{rot}} = 6$.¹³ Kommen innere Schwingungen hinzu, wird f noch größer. Weniger als $f = 6$ wäre nur für den Massenpunkt möglich, der aber eine mathematische Abstraktion ist und keinen realen Körper ganz beschreiben kann. Da Wärmeenergie sich auf alle Freiheitsgrade verteilt (Gleichverteilungssatz von Clausius/Boltzmann), kann die kinetische Gastheorie eine Voraussage für die spezifische Wärme liefern: eine lineare Abhängigkeit von f . Im Quotienten c_P/c_V der beiden spezifischen Wärmen eines idealen Gases bei konstantem Druck P bzw. konstantem Volumen V heben sich alle weiteren Faktoren heraus, es bleibt einfach: $c_P/c_V = (f + 2)/f$ (Maxwell 1860). Das würde $c_P/c_V = 5/3 \approx 1,67$ für den Massenpunkt (f_{trans}) geben, aber $c_P/c_V \leq 4/3 \approx 1,33$ für reale Moleküle in Form starrer oder schwingungsfähiger Körper ($f \geq 6$).

Diese theoretisch einfache Größe hat den Vorzug, über eine Resonanzmethode auch mit hoher Genauigkeit einfach messbar zu sein. Die Schallgeschwindigkeit in einem Gas (Dichte ρ , Druck P) ist $v = \sqrt{(c_P/c_V)(P/\rho)}$ („Mach 1“, nach Ernst Mach), und man kann sie (z. B.) über die Resonanzfrequenz $v = v/2L$ einer stehenden Schallwelle der Wellenlänge $\lambda = 2L$ in einem Rohr der Länge L messen.¹⁴

Für mehratomige Gase lagen die Messwerte wirklich etwas unter 1,33, für Luft aber mit $c_P/c_V = 1,3945 - 1,4130$ genau im unmöglichen Bereich, ebenso für andere 2-atomige Gase, und Maxwell wandte sich 1860 sehr enttäuscht von dieser Theorie ganz ab.

Kurz darauf wurde aber das erste chemisch 1-atomige Gas gefunden, Quecksilber-Dampf (Hg). Kundt und Warburg maßen 1876 die Schallgeschwindigkeit in Hg-Dampf von 300°C [126]. Ergebnis: $c_P/c_V = 1,666$, genau der vorhergesagte Wert – für Massenpunkte. Einerseits eine Bestätigung für die grundlegenden Begriffe der kinetischen Gastheorie, aber andererseits ein neues Rätsel: Wie können Hg-Atome wirklich punktförmig sein? Boltzmanns Deutung 1876 [35], auch heute noch richtig: Hg-Atome *verhalten* sich hier wie Massenpunkte, weitergehende Strukturen und Freiheitsgrade (die sie sicher haben) spielen bei den Stößen im Gas keine Rolle – dem Gleichverteilungssatz der Thermodynamik zum Trotz.

So ist schon 1876 zum ersten Mal die direkte Messung und korrekte Interpretation einer *nicht-trivialen*¹⁵ Eigenschaft des einzelnen Atoms gelungen. Sie ist, lange bevor Moderne Physik, Atomphysik oder gar Elementarteilchenphysik ihre eigenen Namen bekamen, deren erste Botschaft, indem sie ein völlig neuartiges Verhalten

¹³ Zum Beispiel ausgedrückt durch die Vektoren \vec{v} und $\vec{\omega}$ für die momentane Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit mit ihren jeweils drei Komponenten.

¹⁴ Die Apparatur dazu ist das aus dem physikalischen Praktikum bekannte *Kundtsche Rohr*. Die Bestimmung einer Größe mittels eines räumlich oder zeitlich periodischen Vorgangs ist in der Experimentalphysik häufig der Weg zu größter Messgenauigkeit gewesen. Siehe z. B. die Präzisionsmessung der Atommasse (4.1.7), des magnetischen Moments bzw. Magnetfelds (7.3.1–7.3.4).

¹⁵ Das heißt einer Eigenschaft, die sich aus makroskopischen Werten nicht durch einfache Division mit dem Skalenfaktor N_A gewinnen lässt.

dieser Objekte erkennen lässt. Es ist instruktiv und beeindruckend, sich die Spannweite dieser physikalischen Argumentation zu verdeutlichen:

Ein mikroskopisches Modell der Materie (die kinetische Gastheorie) stellt einen Zusammenhang her zwischen einer makroskopisch gut bekannten Erscheinung (Schallgeschwindigkeit) und möglichen angenommenen Formen der unsichtbar kleinen Bausteine (je kleiner die Anzahl ihrer Freiheitsgrade, desto schneller der Schall im Gas bei gleichem Druck und gleicher Dichte). Die Messung führt dann auf die eindeutige Schlussfolgerung: Hg-Atome haben die theoretische Minimalzahl möglicher Freiheitsgrade, denkbar nur für echte Massenpunkte.

Solche modellgestützten Rückschlüsse von sichtbaren Beobachtungen auf Eigenschaften unsichtbarer Teilchen sind charakteristisch für die ganze moderne Mikro-Physik geworden.

Die heutige Erklärung. Das von Boltzmann hier entdeckte Phänomen heißt heute *eingefrorener Freiheitsgrad* und ist ohne Quantenphysik in keiner Weise zu deuten. Um das hier schon kurz zu erklären, müssen wir daher bis Ende der 1920er Jahre vorgeifen. Dies soll¹⁶ auch ein erstes Beispiel für die vielen folgenden *größenordnungsmäßigen Abschätzungen* sein, die beim Zurechtfinden in der Mikrowelt von unschätzbarem Wert waren und noch sind, und deshalb schon fast den Rang einer eigenen *Methode* beanspruchen dürfen. Im Rückgriff auf Vor-Wissen des Lesers aus dem Grundkurs Physik (bzw. Vorgriff auf Kap. 7) können wir die Frage diskutieren:

Warum spielt bei Atomen die Rotation keine Rolle für die spezifische Wärme?

Antwort: Natürlich kann ein Hg-Atom auch rotieren. Zur Abschätzung der Energie kann man mit klassischen Formeln $E_{\text{rot}} = I^2/2\Theta$ ansetzen, für das Trägheitsmoment $\Theta \simeq m_e R_{\text{Atom}}^2$ (ein äußeres Elektron im Abstand des Atomradius R_{Atom}), für den Drehimpuls aber die *gequantelten* Werte $I = 0, 1\hbar, 2\hbar, \dots$. Die Mindestenergie oberhalb $I = 0$ wäre damit¹⁷

$$\begin{aligned} E_{\text{rot}} &= \frac{I^2}{2\Theta} = \frac{\hbar^2}{2m_e R_{\text{Atom}}^2} = \frac{(\hbar c)^2}{2 \cdot (m_e c^2) \cdot R_{\text{Atom}}^2} \\ &\simeq \frac{(200 \text{ eV nm})^2}{2 \cdot 511\,000 \text{ eV} \cdot (0,05 \text{ nm})^2} \simeq \frac{40\,000 (\text{eV})^2}{2\,500 \text{ eV}} = 16 \text{ eV}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Das entspricht – der Größenordnung nach, mehr soll gar nicht erwartet werden – völlig richtig einem angeregten Zustand der Atomhülle mit höherem Drehimpuls (Messwerte z. B. 4,9 eV bei Hg, 10 eV bei H). Solche Anregung macht sich durch Emission von (UV-)Licht bemerkbar. Bei den viel kleineren Energieumsätzen, wie sie bei gewöhnlichen thermischen Stößen ausgetauscht werden, ca. $k_B T_{\text{Raum}} \simeq \frac{1}{40} \text{ eV}$, ist die Anregung von Rotationen bei

¹⁶ nach der Scherzfrage 1.2

¹⁷ Die drei in der Rechnung benutzten Zahlenwerte für $\hbar c$, $m_e c^2$, R_{Atom} , die nun auch immer wieder vorkommen werden, sollte man auswendig kennen (siehe auch die Zusammenstellung im Kasten 2.1 „Formeln und Konstanten“ auf S. 45).

Atomen demnach unmöglich und darf vernachlässigt werden. (Schließlich leuchten Gase bei Raumtemperatur ja nicht, jedenfalls nicht im sichtbaren oder gar UV-Bereich.) Dieser Schluss gilt selbst dann noch, wenn unsere kleine Abschätzung vom Ansatz oder von den Zahlen her um eine ganze Zehnerpotenz falsch wäre. Auf größere Genauigkeit kommt es also gar nicht an, wenn wir nur das Phänomen der eingefrorenen Rotation verstehen wollen.

Boltzmann, auch ohne die von ihm entdeckte Unterdrückung der Rotation erklären zu können, zog gleich eine wichtige Konsequenz: Wenn Rotation der Atome um ihren Mittelpunkt thermisch nicht vorkommt, dann kann auch ein 2-atomiges Molekül nicht um die Verbindungslinie seiner Atome rotieren, sondern nur um die dazu senkrechten Achsen – die Zahl der Rotationsfreiheitsgrade senkt sich von $f_{\text{rot}} = 3$ auf $f_{\text{rot}} = 2$, damit die Gesamtzahl von $f = 6$ auf $f = 5$, es folgt $c_P/c_V = (f + 2)/f = 1,40$ – Maxwells Rätsel ist gelöst. Der Widerspruch zwischen der Avogadro-Hypothese (Luft u. ä. Gase 2-atomig) und der früheren kinetischen Gastheorie (c_P/c_V entweder $= 1,67$ oder $\leq 1,33$) verwandelt sich in gegenseitige Bestätigung.

Frage 1.3. *Warum ist die Rotation quer zur Molekülachse nicht genau so eingefroren wie die um ihre Längsachse?*

Antwort 1.3. *Für das Luft-Molekül als (um den Schwerpunkt) rotierende Hantel muss man in der Abschätzung nach Gl. (1.1) statt der Elektronenmasse m_e die 30 000fache größere Masse des O- oder N-Atoms einsetzen. Dann kommt tatsächlich ein verglichen mit $k_B T_{\text{Raum}}$ sehr kleiner Energiebetrag heraus, der die Anregung von Rotation durch gaskinetische Stöße sehr wahrscheinlich macht.*

Anmerkungen:

- Diese Anregungsstufen der Molekülrotation entsprechen der Emission und Absorption von Mikrowellen (GHz–THz). In diesem Spektralbereich also „leuchten“ die Gase auch schon bei Zimmertemperatur selber, und zwar mit eindeutig charakteristischen Wellenlängen. Die Mikrowellen-Spektroskopie ist daher z. B. eine empfindliche Methode zur Detektion von Spurengasen in der Atmosphäre (H_2O , O_3 , CO , ...)
- Auch diese Molekülrotation friert ein, wie bei Wasserstoff 1910 gefunden wurde. Wenn man H_2 auf $T \simeq 100$ K abkühlt, wird wieder $c_P/c_V = 1,67$ gemessen. Das passt zu unserer Abschätzung, denn für H_2 ist in Gl. (1.1) nur die 2 000fache Elektronenmasse einzusetzen. Doch erwuchs aus den damaligen Messungen gleich ein neues Rätsel, eine anomale T -Abhängigkeit der spezifischen Wärme. Sie ließ sich nur durch zwei weitere Neuheiten der Modernen Physik deuten (1928): die Annahmen eines nie verschwindenden Eigendrehimpulses und einer über die bloße perfekte Gleichheit noch hinausgehenden absoluten *Ununterscheidbarkeit* der Kerne der beiden H-Atome im Molekül (siehe Abschn. 7.1.4ff und Abschn. 9.3.3).
- Auch die Schwingungen der Atome gegeneinander sind bei den 2-atomigen Gasen eingefroren, nicht aber bei Festkörpern (wo sie sogar den Hauptanteil an

der Wärmekapazität ausmachen). Warum? Schwingungen kann man als stehende Wellen ansehen: Im Molekül kann die halbe Wellenlänge dann nicht größer als der Moleküldurchmesser sein, in makroskopischen Systemen aber makroskopische Ausmaße haben und daher sehr geringe Frequenz ω , sprich Anregungsenergie $\hbar\omega$ (Debyesches Modell für die spezifische Wärme der Festkörper, 1912).

Anhaltende Kontroverse. Jedoch fand Boltzmanns richtige Erklärung damals nicht viel Glauben. So wurde nicht einmal der in der wissenschaftlichen Welt sonst selbstverständliche Versuch gemacht, die (schwierige) Messung an Hg-Dampf anderswo zu wiederholen. Dass Atome nicht einzeln existieren können, blieb Allgemeingut¹⁸ und bestärkte die Zweifler. Mach verliert in seinem Lehrbuch von 1896 über all dies kein Wort, obwohl damals bei der chemischen Analyse und der Verflüssigung der Luft schon weitere Gase mit $c_P/c_V = \frac{5}{3}$ entdeckt worden waren – die Edelgase.

Für das damalige Periodensystem (vgl. Abb. 1.1) kamen die Edelgase 1894 völlig unerwartet und waren gleich zwei Nobelpreise wert (William Ramsay, Nobelpreis für Chemie 1904, Lord Rayleigh, Nobelpreis für Physik 1904). Indes erwies es sich insofern doch als das geeignete Schema, als es diese Elemente durch Erweiterung um eine neue Spalte einfach aufnehmen konnte (siehe Abb. 3.12). Ein ähnliches Ereignis verschaffte 1974 der Quark-Hypothese den Durchbruch (siehe Kap. 13).

So war im ausgehenden 19. Jahrhundert einerseits ein konsistentes atomistisches Bild von der Materie in ihren verschiedenen Erscheinungsformen entstanden, ausgedrückt z. B. durch die Zustandsgleichung realer Gase (Johannes D. van der Waals 1873, Nobelpreis 1910): In Gasen fliegen Moleküle in großen Abständen durcheinander (Boltzmanns „molekulares Chaos“), in kondensierter Materie aber sind sie recht eng gepackt und sorgen durch ihre eigene Undurchdringlichkeit für die geringe Kompressibilität von Flüssigkeiten und festen Körpern. Die Atome sind demnach als kompakte Körperchen von einander ähnlicher Größe vorzustellen, die sich durch Anziehungskräfte kurzer Reichweite unter festen Regeln miteinander zu Molekülen verbinden können.

Andererseits wurde die kinetische Gastheorie und mit ihr gleich der ganze Atomismus um 1900 herum noch immer weithin abgelehnt, und dies aus prinzipiellem Grund: Es konnte doch nicht sein, dass die zeitlich *reversiblen* Gleichungen der (klassischen) Punktmechanik, die laut der kinetischen Gastheorie für die Bewegungen der vollkommen elastischen Moleküle gelten sollten, eine Erklärung bieten könnten für die *irreversiblen* thermodynamischen, chemischen und überhaupt Alltags-Vorgänge, also für das Grundgesetz vom Anwachsen der Entropie, und damit sogar für die Kausalität (d. h. die zeitliche Ordnung von Ursache und Wirkung) schlechthin? Dass Boltzmann auf der Grundlage des Atomismus die (heute gültige!) Wahrscheinlichkeits-Deutung für den Entropie-Satz hatte entwickeln können, sprach daher in den Augen vieler Physiker gleich gegen die ganze begriffliche Grundlage, eben die Atomhypothese.

¹⁸ Zum Beispiel Artikel *Atom* in einem maßgeblichen *Konversations-Lexikon* 1882 [42].

Schlimmer noch in den Augen der Anti-Atomisten: Umkehrungen irreversibler Prozesse – wörtlich genommen ein Widerspruch in sich – wären nach der kinetischen Theorie der Wärme nicht nur nicht verboten, sondern wurden sogar vorhergesagt, wenn auch nur im Rahmen von statistischen Schwankungserscheinungen. Doch gerade diese Voraussage wurde bestätigt (s. u.).

Die Gegner des Atomismus – Ernst Mach, Wilhelm Ostwald (Chemie-Nobelpreis 1909 für Forschungen zur Katalyse) u. v. a. – favorisierten eine Kontinuumsvorstellung namens „Energetik“. Ein Energiefeld, dessen Eigenschaften sich nur durch partielle Differentialgleichungen im Raum-Zeit-Kontinuum letztlich verstehen ließen, sei die allem zu Grunde liegende Ursubstanz. – Wir, von dem damaligen Kriegsgeschrei nicht mehr Betroffene, können zugeben, dass die heutige relativistische Quanten-Feldtheorie durchaus in dieses Schema passen könnte (näheres ab Kap. 9). Man konnte sie allerdings nur deshalb entwickeln, weil zunächst Boltzmann gegen die Energetiker in allem Recht bekommen sollte.¹⁹

Atome. Der Umschwung zur allgemeinen Anerkennung des Atomismus kam Anfang des 20. Jahrhunderts vor allem auf Grund von Beobachtungen auf zwei Feldern:

- Radioaktivität: 1896 von Henri Becquerel entdeckt, dauerte es nicht lange, bis Emissionsakte radioaktiver Strahlung einzeln beobachtet werden konnten und mit energiereichen Umwandlungen *einzelner* Atome identifiziert wurden (siehe Abschn. 2.1 und 6.1.1).
- Statistische Schwankungen: In der Alltags-Physik wirklich nicht zu bemerken,²⁰ werden sie jedoch *relativ* immer größer, je kleiner die betrachteten – immer noch makroskopischen – Systeme sind. Die in einem Lichtmikroskop gerade noch gut sichtbaren Beispiele wie Rußpartikel in Wasser oder Fetttropfchen in Milch zeigen die vorausgesagten Schwankungserscheinungen deutlich:
 - Brownsche Bewegung: Sie wurde als mikroskopische Zufalls-Beobachtung 1835 an Pollen entdeckt und unabhängig davon 1905 theoretisch „vorhergesagt“ von Einstein in seiner Doktorarbeit; im Experiment quantitativ bestätigt an makroskopischen Teilchen durch Jean B. Perrin 1909;
 - Sedimentationsgleichgewicht: Quantitative Bestätigung der Gültigkeit der barometrischen Höhenformel für aufgeschwemmte Partikel in Wasser durch Perrin ab 1909 (Nobelpreis 1926).

Ungeklärt musste aber vorerst bleiben, ob die Atome eines Elements bzw. Moleküle eines Gases, wie von Maxwell 1860 postuliert, wirklich unveränderlich und in allen Eigenschaften einander exakt gleich sind oder nur ungefähr, wie vielleicht Sandkörner oder Erbsen. Auch hierzu hat die Moderne Physik in Experiment und Theorie eine Antwort gefunden, die im klassischen Weltbild keinen Platz hat (siehe Abschn. 9.3.3 zur Ununterscheidbarkeit der Elementarteilchen).

¹⁹ Allerdings erst posthum. Boltzmann beging 1906 Selbstmord.

²⁰ Abgesehen vielleicht vom Blau des Himmels, das durch Lichtstreuung an statistischen Dichteschwankungen in der Luft von der Größe von Licht-Wellenlängen erklärt wird, so dass man aus der Bläue des Himmels auch die Avogadro-Konstante bestimmen konnte.

Heute verfügen wir über dies atomistische Bild von der Materie und den sich darin abspielenden Vorgängen mit einer Selbstverständlichkeit, die hier doch noch einmal ins rechte Licht gerückt werden sollte. Richard Feynman, einer der Großen in der Elementarteilchen-Physik, stellte in seinen seit den 1960er Jahren legendären *Feynman Lectures on Physics* eingangs die Frage, welche Erkenntnis der Physik man (vor einer drohenden Katastrophe, in der alles Wissen vielleicht verloren gehen würde) für die Nachwelt aufbewahren sollte, wenn man dafür nur einen einzigen Satz frei hätte. Seine Antwort: *All things are made of atoms.*²¹

1.1.2 Elektron und Photon: *Die ersten zwei richtigen Elementarteilchen*

Atome elektrisch. Aber waren nun diese Atome überhaupt richtig benannt? Das griechische Wort *á-tomos* (für unteilbar) war ja gewählt worden, weil hypothetische *elementare* Bausteine nicht auch noch zusammengesetzt sein können. Die kinetische Gastheorie hatte sogar bestätigt, dass Atome sich wie Massenpunkte verhalten. Daher mag man, wie oben bemerkt, eine Ironie der Geschichte darin sehen, dass die Atomhypothese sich dann erst wirklich durchsetzen konnte, als die ursprüngliche Vorstellung der Unteilbarkeit und Unveränderlichkeit ihrer Objekte schon nicht mehr aufrecht zu erhalten war. Neben Masse, Größe und Gestalt musste man im 19. Jahrhundert den Atomen, wenn man ihre Existenz denn annehmen wollte, weitere Eigenschaften zuschreiben. Aus der Elektrochemie (Michael Faraday 1832) und den Gasentladungen (Julius Plücker, Johann Hittorf, ab ca. 1860) war bekannt: Atome können elektrisch geladen sein. Jedes kmol dieser „Ionen“ (griechisch „Wanderer“), egal welchen Elements, trägt je nach chemischer Valenz ein ganzzahliges negatives oder positives Vielfaches einer bestimmten Ladungsmenge, der *elektrochemischen Faraday-Konstante* $F \approx 10^8 \text{ A s/kmol}$. Heruntergerechnet mit der ab 1865 näherungsweise bekannten Avogadro-Zahl N_A ergab sich pro Ion eine Ladung $e = F/N_A \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A s}$ – das „Atom der Elektrizität“ (hiernach zunächst noch als Durchschnittswert zu verstehen!). Scheinbar war es masselos, denn die geringfügige Differenz zwischen den Massen von Atomen und ihren Ionen ($<10^{-3}$, s. u.) war natürlich unbemerkt geblieben.

Elektron. Elektrizität in ihrer „reinsten“ Form sah man in den bei Gasentladungen entdeckten *Kathoden-Strahlen* (Julius Plücker 1858; von dieser Entdeckung zeugt heute noch die Abkürzung *CRT = cathode ray tube* für ältere Fernseher oder PC-Monitore). Sie transportieren – negative – Elektrizität, die bei Anlegen einer Hochspannung sogar durch eine Metallfolie hindurch geht (Philipp Lenard 1893, Nobelpreis 1905) – also durch feste Materie, was gut zu einer masselosen Strahlung

²¹ Von Feynmans bedeutenden Entdeckungen in der Elementarteilchen-Physik wird in diesem Buch noch ausführlich die Rede sein. Sein Satz heißt vollständig: „Alle Dinge sind aus Atomen gemacht – kleinen Teilchen, die sich ewig bewegen, einander anziehen wenn sie ein wenig Abstand haben, jedoch abstoßen, wenn sie ineinander gedrückt werden.“ [78, Kap. 1-2]

passen konnte. Die Möglichkeit der Ablenkung durch magnetische und elektrische Felder zeigte jedoch eine mechanische Trägheit an. Mitgeführte Masse und Ladung mussten dabei zueinander streng proportional sein, sonst hätten die Strahlen sich aufgefächert (vgl. Entdeckung der Isotope, Abb. 4.1). Die Bestimmung der spezifischen Ladung (heute als e/m_e bezeichnet) gelang Joseph J. Thomson 1897. Der gefundene Wert $\approx 10^{11}$ A s/kg ergab im Vergleich mit der Faraday-Konstante F (setze für 1 kmol einige kg ein), dass im Kathoden-Strahl pro Elementarladung e weniger als 1/1 000 der Masse eines Ions fliegt. So erhielt das „Atom der (negativen) Elektrizität“ seine wohlbestimmte Masse und wurde ein richtiges Teilchen, *Elektron* genannt. Elektronen kommen aus allen erdenklichen Materialien heraus, wenn man sie zur Glut bringt, sind also universelle Bausteine der Materie (J. J. Thomson, Nobelpreis 1906). Damit war das erste, auch nach heutiger Sicht fundamentale Elementarteilchen gefunden, und die positiven Ionen konnten als Atome interpretiert werden, denen eins (oder mehrere) Elektron entrissen worden war, d. h. die Unteilbarkeit der Atome wurde (endgültig) aufgegeben.

Die direkte makroskopische Beobachtung der Quantisierung der elektrischen Ladung gelang Robert A. Millikan 1909 in seinem Öltröpfchenversuch (Nobelpreis 1923). Er fand für die Ladung einzelner Tröpfchen tatsächlich Werte wie $e \approx (0,5-1,6) \cdot 10^{-19}$ A s – zunächst. Mit dem Ziel, die Gleichheit der Ladung aller Elektronen zu überprüfen, hatte er 1923 die Spannweite möglicher Unterschiede schon auf 1%o reduziert.²² Mit der Ladung e und der spezifischen Ladung e/m_e der Elektronen war auch ihre Masse m_e bekannt. Kasten 1.1 zeigt einige heutige Massen-Werte zum Merken (Massen werden in Kern- und Elementarteilchenphysik, auch in der Sprechweise, meist als ihr Energieäquivalent mc^2 ausgedrückt, wobei der Faktor c^2 im Text oft noch weggelassen wird).²³

Kasten 1.1 Einige Teilchenmassen
(zum Merken, für genauere Werte siehe Gl. (4.8) auf S. 96)

Elektron e :	$m_e c^2 \approx \frac{1}{2} \text{MeV}$ (genauer: 511 keV)
Wasserstoff H:	$m_H c^2 \approx 1 \text{ GeV}$ (genauer: 939 MeV oder 1 836 m_e)
Helium He:	$m_{He} c^2 \approx 4 \text{ GeV}$ (genauer: 3 728 MeV; d. h. $m_{He} < 4m_H$)

²² Allerdings wurde er später dafür kritisiert, Einzel-Messergebnisse nicht weiter beachtet zu haben, wenn sie stärkere Abweichungen zeigten [113]. Andererseits gehört es zum Alltag eines Experimentalphysikers, Messergebnisse zu verwerfen, bei denen er Verdacht auf eine unkontrollierte Störung („Dreck“-Effekt) geschöpft hat. Viele Beispiele zeigen, dass dabei die Gefahr des Irrtums nach beiden Seiten gegeben ist. Millikan behielt hier recht und unrecht: Alle Elektronen gelten als absolut gleich, allerdings lag sein Messwert von dem heute akzeptierten Wert um das 5fache weiter entfernt als der von ihm selbst angegebene Unsicherheitsbereich erlaubt hätte.

²³ Bei physikalischen Einheiten: k = 10^3 (kilo), M = 10^6 (mega), G = 10^9 (giga), m = 10^{-3} (milli), μ = 10^{-6} (mikro), n = 10^{-9} (nano), p = 10^{-12} (pico), f = 10^{-15} (femto)

Atom-Modelle. Schon ab 1897 war J. J. Thomson auch der erste, der aus den ihm damals bekannten Bausteinen mit möglichst sparsamen Zusatzhypothesen ein wirkliches Atom-Modell zu bauen versuchte. Für die Atommasse mussten demnach allein Elektronen aufkommen (bei Wasserstoff also schon knapp 2 000), für die Neutralität eine gleich große positive Ladung, die er als Eigenschaft eines masselosen(!) und außer für Elektronen undurchdringlichen Volumens von der Größe des Atoms annahm. Elektronen waren darin verteilt wie „Rosinen im Kuchen“ und elastisch an ihre Ruhelage gebunden. Dies Modell konnte nach den Maxwell'schen Gleichungen zwar kein stabiles Gebilde sein, aber immerhin den 1896 entdeckten „normalen“ Zeeman-Effekt²⁴ in allen Einzelheiten quantitativ erklären. Schon ab 1906 erwies sich aber, dass Röntgenstrahlung, damals bereits als elektromagnetische Welle vermutet, von Materie viele 1 000-mal schwächer gestreut wird als nach der angenommenen Anzahl schwingungsfähiger Elektronen zu erwarten. (Die theoretische Formel hatte Thomson selber entwickelt, sie ist heute der niedere energetische Grenzfall der Streuung von Photonen an freien Elektronen – siehe Abschn. 6.4.3 – Compton-Effekt.) Demnach konnten Atome – größenordnungsmäßig! – höchstens so viel Elektronen haben wie ihr Atomgewicht A angibt. Dazu passte, dass man vom Wasserstoff kein Ion mit höherer Ladung als $+1e$ herstellen konnte.

Atom-Bau. Dass Atome eine *bestimmte* innere Struktur haben müssen (also nicht wirklich gedanklich „elementar“ bzw. „unteilbar“ sein können), hatte sich durch die scharfen elementspezifischen Spektrallinien schon lange vorher angedeutet. Rein empirisch entdeckt (Robert Bunsen, Gustav Kirchhoff, etwa 1860), aber ohne eine Erklärung dafür zu haben, wurden sie in der chemischen Spektral-Analyse bald standardmäßig benutzt. Anhand unbekannter Spektrallinien wurden sogar neue Elemente entdeckt, so z. B. im Sonnenlicht schon 1868 das Helium.²⁵ Erst 27 Jahre später wurde dies neue Element He auf der Erde aufgespürt und nach Bestimmung seines Atomgewichts $A = 4$ als Edelgas gleich nach dem Wasserstoff ($A = 1$) in die gerade neu eingeführte 8. Spalte des Periodensystems eingeordnet.

Wasserstoff hat nicht nur das leichteste Atomgewicht, sondern auch das bei weitem einfachste aller Element-Spektren. Für die 4 sichtbaren Linien fand Johann J. Balmer 1885 seine erstaunlich genaue und daher berühmte Formel. Deren erste brauchbare physikalische Deutung im Bohrschen Atom-Modell ließ dann noch fast drei Jahrzehnte auf sich warten, denn vorher mussten zu den Elektronen noch die Atomkerne entdeckt werden – was Ernest Rutherford 1911 gelang (siehe Kap. 3). Nun zeigten sich die Atome plötzlich größtenteils als leerer Raum. Um ihre Stabilität zu begründen, brauchte Niels Bohr für sein bahnbrechendes Modell des H-Atoms (1913, Nobelpreis 1922) bekanntlich zusätzliche *ad hoc-Postulate*, die der klassischen Physik direkt widersprachen und damit die Tür zur „Modernen Physik“ weit aufstießen. Einen wichtigen Schritt hin zu diesen revolutionären

²⁴ Aufspaltung einer Spektrallinie im Magnetfeld in mehrere Linien; bei genau drei Linien „normaler“ Zeeman-Effekt genannt, sonst „anomal“. Nobelpreis 1902 an Hendrik A. Lorentz und Pieter Zeeman.

²⁵ Helios: altgriechischer Sonnengott

Annahmen hatte Bohr gehen müssen, als er nur die Reichweite der radioaktiven Strahlung in Luft berechnen wollte. Seine Theorie der Ionisierung durch radioaktive Strahlung wird als ein in mehrfacher Hinsicht lehrreiches Beispiel für die gleichzeitige Nutzung und Überwindung der klassischen Physik deshalb in Kap. 2 vorgestellt.

Alle Elektronen gleich. Zugleich wurde nun deutlich, bis zu welchem Grad sich die Elektronen untereinander gleichen müssen: Nach dem Bohrschen Atommodell²⁶ sind die Wellenlängen der Spektrallinien proportional zu $(m_e e^4)^{-1}$, diese Größe darf also für alle Elektronen nicht weiter streuen als die im Spektrometer beobachtete Linienbreite (z. B. als Interferenzmaximum am Strichgitter), damals etwa $1:10^6$. Da auch die Größe e/m_e in den abgelenkten Kathoden-Strahlen keine bemerkbare Streuung zeigte, folgt: auch in den beiden Grundgrößen e und m_e selber stimmen alle Elektronen überein – jedenfalls mit „spektroskopischer Genauigkeit“, mindestens. (Weiteres zur Gleichheit bzw. Ununterscheidbarkeit von Elementarteilchen in Abschn. 5.7, 7.1.5 und 9.3.3.)

Soweit hier ein grobes Bild von den Kenntnissen über Elementarteilchen der *massebehafteten* Materie zu Beginn des 20. Jahrhunderts.

Strahlung gequantelt. Unter „*Strahlung*“ – ein ursprünglich von „Materie“ klar unterschiedener Begriff – verstand man noch um 1900 nichts anderes als kontinuierliche Wellen in einem ausgedehnten Medium. Max Plancks Hypothese einer quantenhaften Absorption und Emission des Lichts – von ihm 1900 eingeführt, um mit der statistischen Physik das Spektrum der Wärmestrahlung erklären zu können (Nobelpreis 1918) – wird gewöhnlich als Beginn der Quantenphysik überhaupt bezeichnet. Aber erst 1905 schrieb Albert Einstein (Nobelpreis 1921) dem Licht selber die Quantennatur zu durch eine geniale Interpretation der Planckschen Formel und weiter belegt durch seine eigene neue Formel $h\nu = E_{\text{kin}}(\text{Elektron}) + W$ (Austrittsarbeit), die er aus den noch gar nicht sehr genauen Messergebnissen von Philipp Lenard zum Photoeffekt an Metallen herausgelesen hatte.

Im selben „Wunderjahr der Physik“ 1905 veröffentlichte Einstein mit der Speziellen Relativitätstheorie und der Theorie der Brownschen Bewegung zwei weitere, nicht weniger Bahn brechende Arbeiten. Doch seinen Nobelpreis bekam er für die Lichtquanten, und das erst 1921 – nach seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (1916) – als nämlich die Lichtquanten-Hypothese durch das Bohrsche Atommodell (1913) inzwischen richtig berühmt geworden war und auch der skeptische Millikan, der durch genauere Messungen am Photoeffekt eigentlich Einsteins Ansatz widerlegen wollte, sich von seinen eigenen Ergebnissen hatte überzeugen lassen.

Damit war das Photon als zweites und nach heutiger Lesart fundamentales Elementarteilchen gefunden. Seine weitere Anerkennung als wirkliches Elementarteilchen setzte sich aber erst ab 1923 durch, nach der Entdeckung, dass es mit einem Elektron zusammenstoßen kann und dabei nach den Regeln des elastischen

²⁶ vgl. Gl. (2.15)

Stoßes Impuls und Energie überträgt (Arthur H. Compton, Nobelpreis 1927, siehe Abschn. 6.4.3). Seinen heutigen Namen erhielt das Photon erst 1926 durch den Chemiker Gilbert Lewis.

Vielleicht verwundert manchen Leser hier schon die häufige Nennung von Nobelpreisen.²⁷ Dies ist eine Tradition in der Kern- und Elementarteilchenphysik. Die ab 1901 jährliche Vergabe des vom Dynamit-Erfinder Alfred Nobel gestifteten Preises für *aktuelle* bahnbrechende Forschungsergebnisse ist mit dem Durchbruch der Quantisierung in der Physik (bei der Materie: Atomistik, bei Feldern: Quanten) und daher mit den Erfolgen der entstehenden Modernen Physik aufs engste verbunden – allen auch vorgekommenen Fehleinschätzungen, Irrtümern, Diskriminierungen und Ungerechtigkeiten zum Trotz.

1.2 Überblick über den weiteren Inhalt

Die folgenden 14 Kapitel sollen verständlich machen, wie das physikalische Weltbild heute aussieht und, vor allem, warum es so und nicht anders entstanden ist: Von der Entdeckung der Radioaktivität bis zum derzeitigen Standard-Modell der Elementarteilchenphysik, im ständigen Wechselspiel zwischen etablierten theoretischen Modellen, bestätigenden oder widersprechenden experimentellen Befunden, zunächst umstrittenen neuen Begriffsbildungen, verbesserten Experimenten und so weiter.

Gerade wegen der oft befremdlichen Neuartigkeit der gewonnenen Erkenntnisse und ihrer grundlegenden Bedeutung wird eine nachvollziehende Art der Darstellung angestrebt, ohne jedoch in historischen Details zu versinken. Zum Glück lassen sich hier (besser als vielleicht anderswo in der modernen Physik) die derzeit gültigen Erkenntnisse gut im Kontext ihrer schrittweisen Erarbeitung darstellen und verstehen. Häufig werden sie durch an die Anschauung angelehnte Abschätzungen (auch sehr unscharfer, absichtlich nur größenordnungsmäßiger Natur) unterstrichen.

Der Stoff wurde weniger nach Vollständigkeit als nach dem jeweiligen Gewicht in der Entwicklung der Modernen Physik ausgewählt. Details der aktuellen Fragen und Methoden der Forschung kommen dabei sicher zu kurz, sowohl in experimenteller als auch theoretischer Hinsicht. Auch können die hier eingeflochtenen Erklärungen theoretischer Art keinesfalls eine strikte Herleitung ersetzen. Viele wichtige Formeln werden nicht lückenlos entwickelt; vielmehr ist die Absicht, Verständnis für ihr Zustandekommen, ihre Bestandteile und ihre Auswirkungen zu wecken. So sollen sie als Anleitung zum besseren Verständnis der zunächst oft unanschaulichen Konzepte und Verfahren dienen, und damit auch der bedauerlichen Spaltung zwischen experimenteller und theoretischer Physik ein wenig entgegen wirken. Es

²⁷ Wenn nicht anders vermerkt, ist es immer der Preis für Physik. Die Nennung erfolgt stets in möglichst direktem Zusammenhang mit der preiswürdigen Entdeckung. Lesenswert sind oft die im www-Archiv der Nobel-Stiftung in Stockholm abrufbaren Reden der Preisträger (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates).

kann nicht wundern, dass diese Spaltung selbst sich auch mit Beginn der Modernen Physik erst richtig herausgebildet hat.

Betont wird der Prozess einer fortschreitenden (und wohl nie abzuschließenden) Entwicklung der Erkenntnisse und Konzepte zu den immer kleineren Teilchen von Materie und Strahlung seit Ende des 19. Jahrhunderts. Zur Vermeidung von Ballast nutzt die Darstellung zuweilen Argumente, die historisch erst später entwickelt wurden, enthält aber häufig Bezüge zum jeweils aktuellen Stand von Kenntnissen und Hypothesen. Vorrang hat immer eine möglichst nachvollziehbare Argumentation. Wo Anwendungsbeispiele auf die Bedeutung einer Methode hinweisen sollen, werden sie ohne Rücksicht auf die historische Einordnung aufgrund ihrer aktuellen Wichtigkeit ausgewählt.

Verdeutlicht wird dabei auch der vielfältige innere Zusammenhang der ganzen Entwicklung, wie er sich ausdrückt hinsichtlich:

- der Fragestellungen (letzte Bausteine der materiellen Welt und was sie zusammenhält)
- der Methodik (neue Phänomene entdecken und studieren, Effekte zunächst Größenordnungsmäßig abschätzen, Modelle aufstellen – notfalls mit revolutionären Begriffsbildungen, Modelle testen, ...)
- der Anwendbarkeit auch außerhalb des eigentlichen Forschungsgebiets (Radioaktivität, Massenspektrometrie, Tracer-Methoden, Kernenergie, Kernspintomografie, Kosmologie, ...).

Im letzten Kapitel wird in 12 Sätzen eine einfache Zusammenfassung von wesentlich neuen Entdeckungen und Begriffsbildungen der Elementarteilchenphysik gegeben, die z. T. der Anschauung große Probleme bereiten, für das heutige physikalische Bild von der Welt aber von grundlegender Bedeutung sind.

1.3 Stichworte zur Geschichte und Bedeutung der Kern- und Elementarteilchenphysik

Gesucht werden – seit Demokrit und Platon – : kleinste Bausteine der Materie, wenn es sie denn überhaupt gibt. Die *klassische* Physik (d. h. wo die Plancksche Konstante $h(\equiv 2\pi\hbar)$ noch unbekannt war) konnte darüber nur rätseln und spekulieren.²⁸ Hier einige der Ergebnisse, die diese Suche etwa seit Ende des 19. Jahrhunderts zu Tage gefördert hat, versehen mit ungefähren Jahreszahlen. Teils waren sie so spektakulär, dass man die ganze Epoche als „Atomzeitalter“ bezeichnete. (Nicht alle aufgeführten Aspekte werden in diesem Buch behandelt.)

²⁸ Genau genommen war sie mit dem Begriff von unteilbaren Teilchen sogar inkompatibel (siehe Abschn. 15.1).

1.3.1 Physikalische Entdeckungen

- Aufbau der („normalen“) Materie:
 - alle Materie besteht aus Atomen (~ 1900),
 - alle Atome bestehen aus Elektronen e (~ 1902) und Kernen (~ 1911),
 - alle Kerne bestehen aus Protonen p (~ 1919) und Neutronen n (~ 1932):
also
 - alle Materie besteht aus 3 Teilchen p, n, e (~ 1932),
- Quantisierung der elektrischen Ladung (~ 1897), der Energie (~ 1900) und des Drehimpulses (~ 1913),
- Ununterscheidbarkeit der Teilchen gleicher Sorte (~ 1925),
- Wellenmechanik und Quantentheorie (~ 1925),
- physikalische Erklärung des Periodensystems der Elemente (~ 1926),
- physikalische Erklärung der chemischen Prozesse (~ 1928),
- Umwandlung, Erzeugung und Vernichtung bei Teilchen aller Sorten (~ 1934),
- Antiteilchen/Antimaterie ($\sim 1928/32$),
- große Zahl (einige 10^2) meist instabiler Teilchenarten, die sich mit verwirrenden Verwandtschaftsbeziehungen ineinander umwandeln (~ 1950 – 1970) („Teilchenzoo“: Artenreichtum viel größer als für wirkliche „*Elementar*-Teilchen“ erhofft),
- große Vereinfachung im Teilchenzoo nach Auffinden der fundamentalen schweren Bausteine der Materie: Quarks (~ 1964 – 1974), mit ihren befremdlichen Eigenschaften:
 - Quarks können nicht zur weiteren Beobachtung isoliert werden.
 - Quarks tragen $1/3$ -zahlige elektrische Ladungen.
- Zwei neue Naturkräfte namens „Schwache“ (~ 1934) und „Starke“ (~ 1935) Wechselwirkung. Zusammen mit den beiden schon bekannt gewesenen (Gravitation und Elektromagnetismus) erklären sie sämtliche physikalischen Prozesse.
- Erklärung der Entstehung dieser Kräfte (ausgenommen noch Gravitation) durch „Austausch virtueller Teilchen“ (~ 1930 Elektrodynamik, ~ 1970 Starke und Schwache Wechselwirkung).
- Fundamentale Rolle der Symmetrie-Prinzipien der Naturvorgänge (~ 1950 er Jahre),
- ... aber auch Verletzung sicher geglaubter Symmetrien (Spiegelsymmetrie von Ort (~ 1956), Ladung (~ 1956) und Zeit (~ 1964)) durch die Schwache Wechselwirkung,
- Erklärung der Entwicklung der Sterne und ihrer Strahlung (ab ~ 1938), sowie der Herkunft und Häufigkeit der chemischen Elemente (~ 1958), Astroteilchenphysik (ab ~ 1960 er Jahre),
- u. v. a.

Vorläufiger Endpunkt: das heutige „Standard-Modell“ der Elementarteilchen (ab ~ 1975).

Weiterhin offene Fragen (mit dem Jahr, in dem sie erstmals richtig gestellt wurden):

- Existiert das Higgs-Teilchen, das zu einem zentralen Baustein des Standard-Modells geworden ist? (seit ~1964),
- Ist das Proton wirklich stabil (Erhaltung der Baryonenzahl)? (seit ~1980),
- Woraus besteht die „dunkle Materie“ der Astrophysik? (seit ~1933 [222])
- Wie könnte eine Quantentheorie der Gravitation aussehen? (seit ~1930 [173])
- ...

1.3.2 Technische Entwicklungen

- Anwendungen der Radioaktivität in Medizin, Biologie, Geowissenschaften, Industrie (seit ~1905),²⁹
- Nutzung der Kernenergie in Reaktor, Kraftwerk (seit ~1942),
- Strahlenschutz, gesetzliche Dosis-Grenzwerte, Radioökologie (seit ~1928),
- als „Spin off“: das WorldWideWeb www und seine html-Sprache (seit ~1995).

1.3.3 Militärische Entwicklungen

- Atom-Bombe, Vernichtung von Hiroshima und Nagasaki (1945),
- Kalter Krieg (seit ~1950er Jahren), „Overkill“ (seit ~1950), atomares Wettrüsten (seit ~1946), Atomwaffen-Sperrvertrag (seit 1968).

1.3.4 Politisch wirksame Anstöße

- Manhattan-Projekt zum Bau der ersten A-Bomben in den USA: erste Erfahrung zu Planbarkeit, Kosten und Erfolg von „Big Science“ (1940–1945),
- Internationale Kontrolle der Kernenergie (Gründung der IAEO – Internationale Atom-Energie-Organisation durch die UNO) (1957),
- Staatliche Wissenschafts- und Forschungspolitik, Wissenschaftsministerien, „Atomstaat“ (seit ~1950er Jahren),
- „Friedliche Nutzung der Atomenergie“ und Atomare Kontroverse (seit ~1960er Jahren), Grüne Parteien (seit ~1980er Jahren),
- Heimliche Kernwaffenprogramme (Indien, Pakistan, Israel, Südafrika, Brasilien, Iran, Irak, Nord-Korea, ... ??).

²⁹ Die Röntgenstrahlen wurden schon ab 1895 medizinisch eingesetzt, kaum dass sie entdeckt waren.