

BOSCOVICH UND DAS HEUTIGE BILD DER MATERIE

1. Einleitung

Als Roger Joseph Boscovich¹ (1711–1787) um die Mitte des 18. Jh. seine Naturphilosophie ausarbeitete und veröffentlichte, konnte die neuzeitliche Naturwissenschaft bereits auf zwei Jahrhunderte erfolgreicher Entwicklung zurückblicken. Ihr Beginn wird mit dem Erscheinen der Abhandlung „De Revolutionibus Orbium Coelestium“ gleichgesetzt, die Nikolaus Kopernikus (1473–1543) in seinem Todesjahr veröffentlichte, denn mit diesem Werk erfolgte der erste folgenreiche Einbruch² in die von der kirchlichen Autorität beherrschte scholastische Naturphilosophie. Die beiden berühmtesten ersten Vertreter der danach einsetzenden neuen Art der Naturforschung, die Beobachtungen und Experimente durchführt und deren Ergebnisse dann theoretisch zu deuten sucht, waren Galileo Galilei (1564–1642) und Johannes Kepler (1571–1630). Zur Verbreitung dieser Denk- und Arbeitsweise trugen auch die Schriften von Francis Bacon (1561–1626) wesentlich bei. Das Experimentieren wurde hoffähig, was bald zu verbesserten Versuchsgeräten und –anordnungen führte. Zusammen mit wohl definierten Randbedingungen bei der Durchführung der Experimente, lieferten sie verlässlichere, genauere und überprüfbare Daten.

Ihre Interpretation und Einbindung in eine darauf aufbauende Theorie erforderte notwendigerweise ein zunehmendes Eindringen der Mathematik in die Naturwissenschaften³ – ein Prozess, der bis heute andauert und dessen Ende angesichts der Entwicklungen in der Elementarteilchenphysik noch nicht abzusehen ist. Aufbauend auf den Arbeiten von Viète, Clavius, Cavalieri, Descartes, Huygens und anderen, schufen Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646–1716) und Isaac Newton (1642–1727) mit der Infinitesimalrechnung das wichtigste mathematische Werkzeug der Naturwissenschaften. Seine Anwendung durch Newton und seine Zeitgenossen und spätere Generationen der neuzeitlichen Naturforschung auf eine rasch zunehmende Vielfalt von speziellen physikalischen Problemstellungen war so erfolgreich, dass das Denken über eine lange Zeitspanne vom mechanistisch-deterministischen Weltbild beherrscht wurde. Verglichen mit Leonhard Euler (1707–1783), Daniel Bernoulli (1700–1782), Jean-Baptiste le Rond d'Alembert (1717–1783), Pierre Simone Marquis de

¹ Diese Schreibweise seines Namens findet sich auf den meisten Veröffentlichungen außerhalb seiner Heimat. Sie entspricht der alten kroatischen Rechtschreibung und wurde auch von Boscovich selbst benutzt. In der jüngeren kroatischen und anderen südslawischen Literatur erscheint er als Ruder Josip Bošković, entsprechend der neuen Rechtschreibung, die in der ersten Hälfte des 19. Jh.s eingeführt wurde.

² Schon die Scholastiker Nikolaus von Oresme (ca. 1320–1382) und Nikolaus von Kues (1403–1464) vertraten zwar ausdrücklich die These von der täglichen Rotation der Erde, sie stellten aber das geozentrische System nie in Frage. Die Ehre der ersten überlieferten Formulierung des heliozentrischen Systems gebührt dem genialen alexandrinischen Astronomen Aristarch von Samos (ca. 310–230 v. Chr.), der die Auffassung vertrat, dass die Erde eine tägliche Drehung um ihre Achse und eine jährliche um die Sonne beschreibe, während die Sonne und die Sterne ruhten. Diese für die damalige Zeit äußerst erstaunliche Hypothese wurde jedoch schon von den antiken Philosophenschulen als gottlos verworfen.

³ Von den vielen darüber angestellten Betrachtungen hier nur zwei prominente Beispiele: Einsteins Frage *Wie kann es sein, daß sich die Mathematik, ein Produkt des menschlichen Geistes, das von keiner Erfahrung abhängt, so wunderbar dazu eignet, Objekte der realen Welt zu beschreiben?* In: Albert EINSTEIN, *Sidelights on Relativity* (New York 1983) 28; und Eugene WIGNERS Artikel „The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences“. In: T. FERRIS (Hrsg.), *The World Treasury of Physics, Astronomy and Mathematics* (Boston 1991) 526–540.

Laplace (1749–1827) und anderen herausragenden Vertretern seiner Generation gehört Boscovich eher zu den Deuteragonisten dieser Entwicklung, obzwar er wichtige Resultate zu mehreren damals aktuellen Fragen beigesteuert hat. Sein Hauptbestreben galt vielmehr einer auf Newtons Kraftkonzept basierenden allumfassenden Erklärung der elementaren Struktur der Materie und ihrer Eigenschaften, wodurch er eine Sonderstellung unter seinen Zeitgenossen einnimmt, die z.B. Carrier so charakterisiert⁴: „Boscovich kann nur schwer einer bestimmten Tradition des 18. Jahrhunderts zugeordnet werden, er ist eine eher isolierte Figur mit gleichwohl universellen Interessen. So behandelte er Probleme der Mathematik, Astronomie, Optik, Geodäsie und Mechanik, umfasste also die Gesamtheit der physikalischen Wissenschaften, und wirkte durch diesen umgreifenden Charakter seiner Bemühungen fast wie ein Renaissancedenker, den die Wirren der Zeit ins falsche Jahrhundert verschlagen haben. Sein bekanntestes Werk ist die 1758 publizierte „*Philosophiae naturalis theoria*“⁵, in der es zuvörderst um eine Theorie der Materie, ihrer elementaren Partikel und den zwischen ihnen wirkenden Kräften geht“⁶.

Welch titanische Aufgabe Boscovich in Angriff nahm, als er für seine „Theoria“ den Anspruch erhob, die Materie von ihrer elementaren Struktur bis zu ihren makroskopischen Eigenschaften zu erklären, wird allein schon an den mehr als 40 Größenordnungen deutlich, welche die verschiedenen Materieentitäten umspannen (s. Abb. 1). Angesichts des Fehlens jedweder Vorarbeiten mit ähnlichen Zielen und des sehr engen Beobachtungsbereichs, der um die Mitte des 18. Jh. zugänglich war, ist die „Theoria“ ein treffendes Beispiel für Poppers Feststellung⁷: *Was man als Kühnheit einer Theorie bezeichnen kann, ist die Größe ihres Gehalts: Je mehr wir mit einer Theorie behaupten, umso größer ist das Risiko, daß die Theorie falsch ist. So suchen wir zwar die Wahrheit, aber wir sind nur an kühnen, riskanten Wahrheiten interessiert.* So verwundert es kaum, dass spätere Erkenntnisse in der Tat viele Aussagen der „Theoria“ als unzutreffend erwiesen haben. Dennoch war sie ein unverzichtbarer Schritt auf dem Weg zum heutigen Verständnis der Mikrostruktur der Materie und diente vielen nachfolgenden Forschern als Ideengeber und Wegweiser für ihre Arbeiten.

Wie im Folgenden dargestellt, unterscheiden sich Boscovichs Elementarteilchen (die *puncta*) ganz entscheidend von den ‚klassischen‘ Atomen, weshalb er sie wohlweislich auch nie Atome nennt. Trotzdem war seine Naturphilosophie aber atomistisch in dem Sinne, dass sie eine ‚körnige‘ Struktur der Materie annimmt. Um die „Theoria“ in die Geschichte der Atomistik einordnen zu können, wird diese im folgenden Kapitel rekapituliert und danach kurz auf die Entwicklungen eingegangen, die zum derzeit gültigen „Standardmodell“ der Elementarteilchenphysik führten. Im daran anschließenden Teil des Beitrages werden die wichtigsten Ergebnisse der „Theoria“ dargestellt und ihre Gemeinsamkeiten und Unterschiede mit dem aktuellen Bild der Materie im Lichte unserer heutigen Kenntnisse diskutiert. Im abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst und eine Mutmaßung zur fernerer Zukunft der Erforschung der elementaren Struktur der Materie gewagt.

⁴ M. CARRIER, Rudjer Boscovich und die induktive Logik. In: Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie, Bd. XVI (1985) 201–212.

⁵ Im Folgenden immer kurz „Theoria“ genannt.

⁶ Diese Charakterisierung impliziert natürlich nicht, dass Boscovich besser ins 15. Jh. gepasst hätte. Im Gegenteil, sein Versuch einer umfassenden und einheitlichen Theorie der Materie war so angelegt, dass er damit seiner Zeit zu weit voraus war, um sein Ziel erreichen zu können.

⁷ Karl R. POPPER, Wissenschaftslehre in entwicklungstheoretischer und in logischer Sicht. Rundfunkvortrag im NDR am 7.3.1972, abgedruckt in: Alles Leben ist Problemlösen (München 1994) 40.

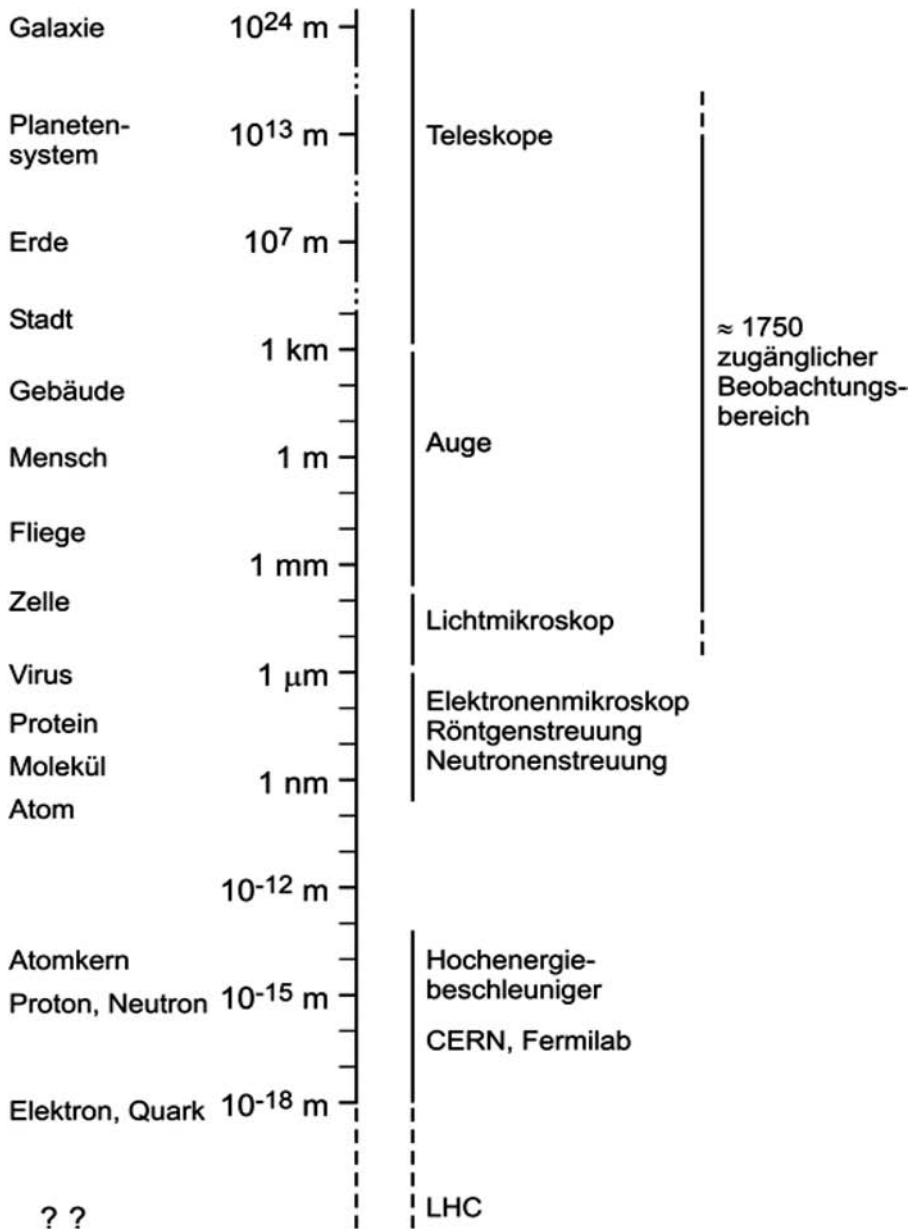


Abb. 1: Die Erscheinungsformen der Materie umfassen einen Größenbereich, der bei den „Durchmessern“ der Elektronen und Quarks, die heute als elementarste Teilchen gelten, beginnt und bis zu den Abmessungen der Galaxien reicht. Dazwischen liegen mehr als 40 Größenordnungen (das sind Potenzen von 10; 10^{13} bedeutet z.B. eine Zahl mit 13 Nullen). Zur Mitte des 18. Jh. war nur ein eng begrenzter Ausschnitt aus diesem Bereich der Beobachtung zugänglich (man beachte, dass die Größenskala logarithmisch ist, d.h. der Aufstieg zur nächsten Sprosse der aufsteigenden Leiter bedeutet jeweils eine Vergrößerung der Dimensionen um einen Faktor 10). Noch enger war der Energiebereich, der sich auf das schmale Spektrum des sichtbaren Lichts als einziger Sonde, die damals zur Untersuchung der Struktur der Materie zur Verfügung stand, beschränkte.

2. Von Leukipp zum Standardmodell: Eine kurze Geschichte der Atomistik

Fast alle Historiker stimmen heute darin überein, dass die Lehre vom Atomismus von den im 5. Jh. v. Chr. in Abdera wirkenden griechischen Philosophen Leukipp(os) und Demokrit(os) geschaffen wurde. Weit weniger Einigkeit herrscht darüber, wer von beiden dabei den größeren Anteil hatte. Wahrscheinlich stammen die Grundideen von Leukipp, während sein Schüler Demokrit die Hypothese bis ins einzelne ausarbeitete. Letzteres ist wohl kaum der Grund für die weit größere Popularität Demokrits, diese resultiert vielmehr aus der vergleichsweise guten Überlieferung seiner zahlreichen Schriften (in denen er übrigens seinen Lehrer nicht ein einziges Mal erwähnt), während von Leukipps Werk nur ganz wenige Fragmente bekannt sind. Epikur, der überzeugter Atomist war und bei der Verbreitung der Atomlehre eine wichtige, wenn auch umstrittene⁸ Rolle spielte, behauptete sogar, Leukipp hätte nie gelebt, wogegen aber u.a. spricht, dass ihn Aristoteles in seinen Schriften mehrmals erwähnt.

Hier ist nicht der Platz, um auf die Motivation, welche die beiden Vorsokratiker zum Atomismus führte und auf andere interessante Fragen einzugehen, wie z.B. die nach der Rolle von empirischer Beobachtung und logischem Schluss bei dessen Entwicklung, oder ob die Schaffung der Atomhypothese ein glücklicher Zufall oder eine geniale Intuition war, die sich noch nach zweitausend Jahren (Abb. 2) als sehr fruchtbar erwies⁹. Ich werde mich deshalb im vorliegenden Beitrag damit begnügen, an die Hauptaussagen¹⁰ der Lehre Leukipps und Demokrits zu erinnern. Dies ist notwendig, um später zeigen zu können, dass Boscovichs „Atomismus“ in einigen entscheidenden Punkten von den nun folgenden wichtigsten Inhalten der „klassischen“ Atomhypothese abweicht.

1. Die Welt besteht aus einer unbegrenzten Zahl von Atomen und aus leerem Raum.
2. Die Atome sind unsichtbar klein, undurchdringlich und unzerstörbar. Hinsichtlich ihrer stofflichen Beschaffenheit sind sie zwar alle gleich, unterscheiden sich aber durch eine unendliche Mannigfaltigkeit verschiedener Formen und Größen (Abb. 3 links).
3. Da Demokrits Welt auch die Seelen beinhaltet, sollten diese gleichfalls aus materiellen Atomen bestehen, die jedoch kleiner, runder, glatter und beweglicher seien als diejenigen der Körper¹¹.
4. Die Atome sind in steter Bewegung durch den zwischen ihnen liegenden leeren Raum begriffen und wirken aufeinander durch direkte Stöße. Dabei kann es zur Bildung und Auflösung von Agglomeraten von Atomen gleicher oder verschiedener Art kommen

⁸ So bemerkte z.B. Schrödinger: [...] *Epikur fügte dem System noch einigen Unsinn hinzu, der gewissenhaft von allen seinen Nachfolgern, natürlich auch von Lucretius Carus, nachgebetet wurde.* E. SCHRÖDINGER, *Die Natur und die Griechen*, (Wien – Hamburg 1987) 137 (Übersetzung der englischen Originalausgabe „Nature and the Greeks“ (Cambridge 1954).

⁹ Neben der gerade zitierten Abhandlung von Schrödinger findet besonders der naturphilosophisch interessierte Leser aufschlussreiche Diskussionen dieser Themen auch bei Bertrand RUSSELL, *Philosophie des Abendlandes* (Wien – München – Zürich 1978), 86–95 (Übersetzung der englischen Originalausgabe „A History of Western Philosophy“ (Cambridge 1945). Beide Werke zeichnen sich durch eine klare Darstellung aus und wollen nicht durch Spezialistensprache beeindrucken.

¹⁰ Näheres s. z.B. Fritz KRAFFT, *Die Vorsokratiker II: Unveränderliche Elemente und Atome*, In: *Die großen Physiker*. Hrsg. K. von MEYENN, (München 1997), Bd. 1, 49–76.

¹¹ Der Grund für diese fatale Annahme war wahrscheinlich, dass alle alten Wörter für Seele ursprünglich die Bedeutung ‚Atem‘ oder ‚Luft‘ trugen. Luft besteht aus Atomen, folglich muss auch die Seele aus ihnen bestehen. Die griechischen Atomisten waren der Meinung, dass die Seelen-Atome vom Körper dauernd abgegeben und mit der Luft ständig wieder neu aufgenommen würden. Hörte also die Atmung auf, so hatte auch das Leben ein Ende. Dagegen erscheinen Demokrits weitere Hypothesen, dass auch die Sinnesempfindungen und das Denken rein physikalische Vorgänge sind, fast harmlos. Jedenfalls war er ein sehr konsequenter Materialist.

2500 Jahre Atomistik

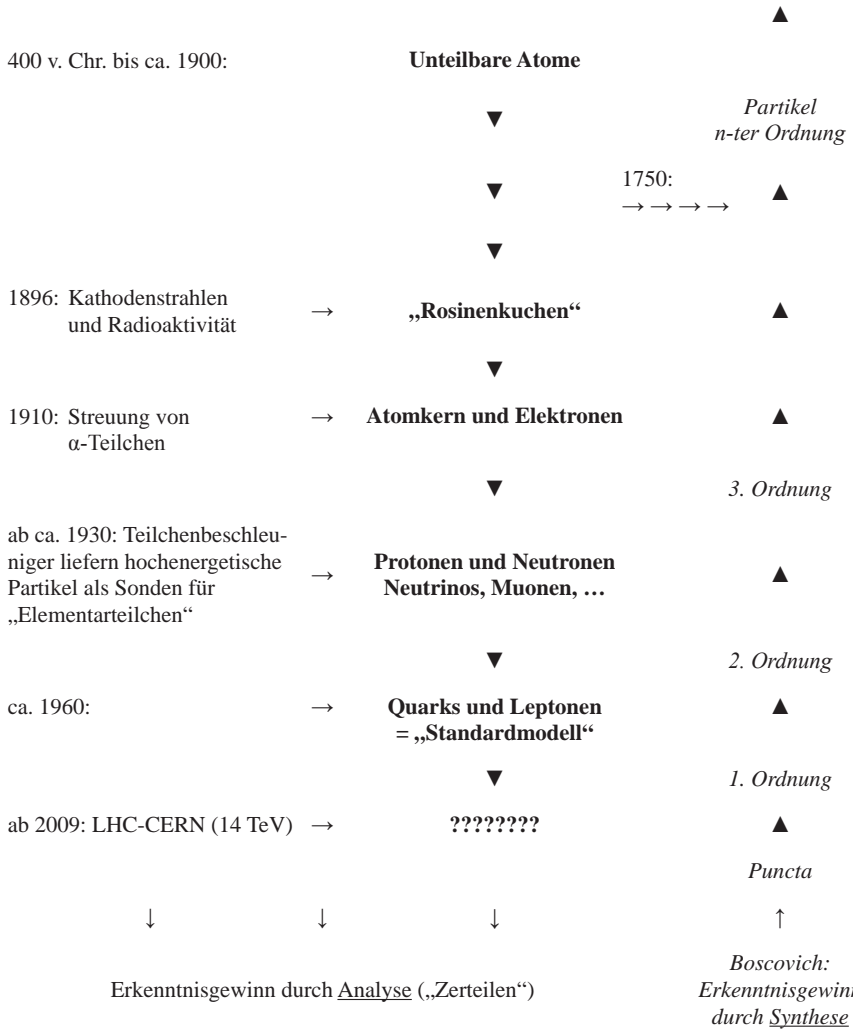


Abb. 2: Die linke und mittlere Spalte zeigen die wichtigsten Meilensteine der Geschichte des Atomismus. Dieser Begriff ist hier sehr weit gefasst, denn er beinhaltet nicht nur das lange als unteilbar geltende Atom, sondern auch seine Bestandteile. Der heutige Kenntnisstand wurde von „oben nach unten“, d.h. durch Zerteilen großer Entitäten zu immer kleineren gewonnen. Dagegen versucht Boscovich, die Materie von „unten nach oben“ aufzubauen, beginnend mit den *puncta* als Elementarteilchen größtmöglicher Einfachheit (rechte Spalte). Bemerkenswert ist, dass Boscovich seine Naturphilosophie zu einer Zeit entwickelte, in der noch kaum jemand die Unteilbarkeit der klassischen Atome in Frage stellte.

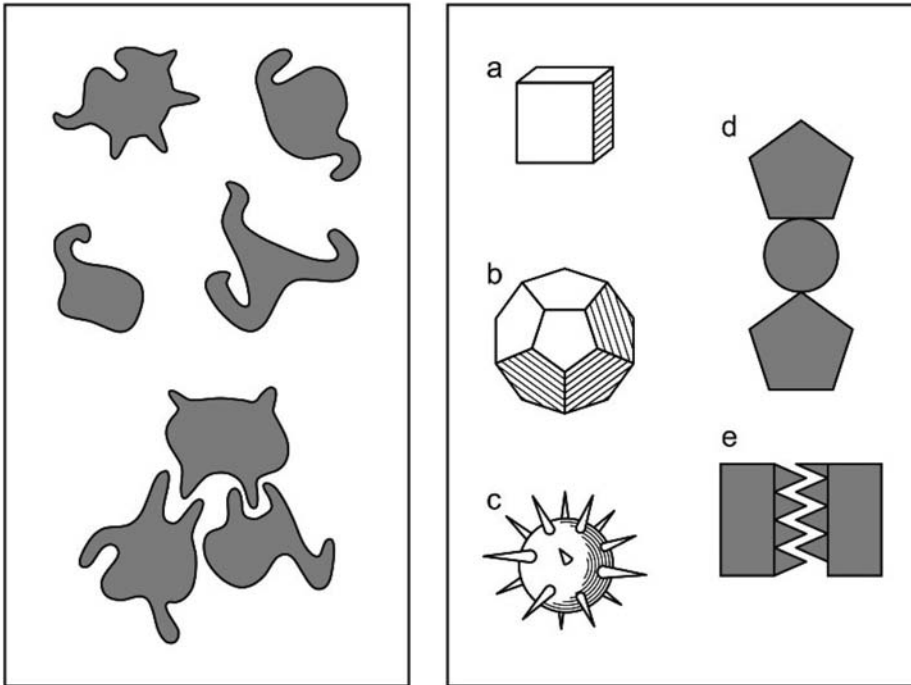


Abb. 3: Schematische Illustration der Atomvorstellung von Leukipp und Demokrit (linke Bildseite), die annahmen, dass Materie aus unsichtbar kleinen und unteilbaren Teilchen mit mannigfachen Formen besteht. Sie können sich auf vielerlei Art verschlingen und verhaken und dadurch zusätzlich zur beobachteten Vielfalt der Materieformen und -eigenschaften beitragen.

Später wurden phantasievollere Formen vorgeschlagen, wie z.B. von Nicolaas Hartsoecker (linke Bildseite) zu Beginn des 17. Jh. (nach L.A. RABONI, in: L. HOLLIDAY, Atomismus und Kräfte in der Geschichte, in: Newtons Universum, Heidelberg (1990), S. 149).

(Abb. 3 links unten). Dies trägt neben den vielen verschiedenen Atomarten zusätzlich zur schier unendlichen Vielfalt der Materie und ihrer Eigenschaften bei.

5. Die Atome bestehen von jeher, ebenso bewegen sie sich von jeher durch den leeren Raum und kommen nie zur Ruhe¹². Schrödinger weist darauf hin, dass man damit das Trägheitsgesetz erriet, was eine große Leistung war, da es ja der Erfahrung widerspricht und im Altertum ganz unannehmbar erschien. Es bereitete z.B. Aristoteles große Schwierigkeit, da er nur die kreisförmige Bewegung der Himmelskörper für eine natürliche hielt, die unverändert beharren könne¹³.

Schon diese Aufzählung zeigt, dass viele Annahmen der Atomhypothese leicht anfechtbar sind. Einige Kontroversen hat die Zeit entschärft, andere bestehen bis heute. Ein Beispiel für die erste Gruppe ist der Vorwurf, den man den Atomisten in der Antike machte, dass sie alles Geschehen in der Welt dem Zufall zuschrieben. Heute würden wir sie im Gegenteil als strenge Deterministen einstufen und sie damit zu den ersten Teilnehmern der Berg- und Talfahrt von Auffassungen machen, die mit Begriffen wie Existenz und Einfluss Gottes,

¹² Man könnte vermuten, dass diese Annahmen der Versuch waren, eine Brücke zu bauen zwischen Parmenides (Ewiges Sein, alles andere ist bloßer Schein: „Nichts verändert sich“) und Heraklit (Bewegung und ständige Veränderung: „Alles wandelt sich“).

¹³ SCHRÖDINGER, Die Natur und die Griechen (Anm. 8) 132.

Maschinenmensch, freier Wille, Moral und Schuld, etc. zu tun haben, und die gerade in jüngster Zeit durch neue Erkenntnisse und deren Ausdeutung durch einige Hirnforscher wieder an Aktualität gewonnen haben¹⁴. Ein Thema, das uns heute noch (bzw. wieder) in Verlegenheit setzt, ist die Existenz des leeren Raumes. Sie wurde schon im Altertum heftig diskutiert, aber auch die moderne Physik hat bisher kein Licht in das Dunkel (oder umgekehrt?) des leeren Raumes bringen können, besonders nachdem das Problem seit Einstein mit der Verknüpfung von Raum, Materie und Zeit noch verzwickter geworden ist¹⁵.

Bis zum Ende der griechisch-römischen Antike hielten sich die Bekämpfer und Befürworter der Atomlehre noch etwa die Waage und sie behielt ihren Platz in der Reihe der philosophischen Systeme dieser Zeitspanne. Dies änderte sich mit dem Beginn des Mittelalters, als die geistige Macht des Christentums stetig zunahm und das abendländische Denken schließlich fast vollständig von der katholischen Philosophie beherrscht wurde. Ihre Inhalte gründen auf den Erkenntnissen der Kirchenlehrer. Ihre Reihe beginnt mit Augustinus (354–430) und endet mit Thomas von Aquin (1225–1274), der noch heute in der katholischen Kirche als größte Autorität gilt. Im Kampf Plato gegen Aristoteles sicherte der *doctor angelicus* letzterem den Sieg bis zur Renaissance. Da sowohl Plato (vehement) als auch Aristoteles (etwas differenzierter) den Atomismus Leukipps und Demokrits abgelehnt hatten, war für ihn in der christlichen Philosophie kein Platz, und er musste das Mittelalter sozusagen im Verborgenem überleben¹⁶. Daran änderte auch der „Umweg“ nichts, über den das antike Wissen nach der Völkerwanderung, die erhebliche Teile davon in großen Teilen des Abendlandes vernichtete, wieder ins europäische Denken zurückkehrte. Denn Averroes (1126–1198), der prominenteste Vertreter der arabischen und jüdischen Gelehrten, über welche dieses Wissen aus der islamischen Welt wieder nach Europa kam, war so eng den logischen und metaphysischen Anschauungen des Aristoteles verhaftet, dass er andere Strömungen vollständig ignorierte.

Auch die Renaissance zu Beginn der Neuzeit änderte vorerst nichts an dieser Situation, denn hier standen die praktischen Anwendungen der Naturwissenschaften in der Architektur und im Kriegswesen an erster Stelle, geprägt durch Künstler-Ingenieure wie Leonardo da Vinci (1452–1519). Versuche, Theorien für ein besseres Verständnis der Natur zu entwickeln, wurden kaum unternommen. So erfolgte der erste ernstliche Einbruch in das scholastische Weltbild erst um die Mitte des 16. Jh. mit dem Werk „De Revolutionibus Orbium Coelestium“, das Kopernikus (1473–1543) in seinem Todesjahr veröffentlichte. Es gilt als Anfang der modernen Naturwissenschaft und ihres Kampfes gegen das Dogma. Schrittweise wurden die aristotelischen Lehren durch neue Erkenntnisse ersetzt, nach der Kosmologie in der Physik und in den mit ihr verwandten Gebieten und im 18. und 19. Jh. schließlich auch in der Biologie. Heute müssen wir – bei aller Bewunderung für die Leistung des Aristoteles – feststellen, dass in seinen Büchern ‚Physik‘ und ‚Über den Himmel‘ im Licht der modernen Wissenschaft kaum ein Satz bestehen kann.

¹⁴ so z.B. Gerhard ROTH, *Aus Sicht des Gehirns* (Frankfurt 2003) oder Christian Erich ELGER et al., *Das Manifest. Über Gegenwart und Zukunft der Hirnforschung*. In: *Gehirn und Geist. Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung*, Nr. 6, 2004, 30–37. Eine gut fundierte und die neuesten Ergebnisse berücksichtigende Diskussion dieses Themenkreises sowie zum Verhältnis Naturwissenschaft – Religion im Allgemeinen gibt Hans KÜNG, *Der Anfang aller Dinge* (München 2005).

¹⁵ **Zum neuesten Stand der Auffassungen zu diesem Thema** s. H. GENZ, *Nichts als das Nichts – Die Physik des Vakuums* (Weinheim 2004).

¹⁶ **Dass der Atomismus nicht völlig in Vergessenheit geriet, ist größtenteils dem Römer LUKREZ** (ca. 97–55 v. Chr.) zu verdanken. Er war eher Dichter als Philosoph, denn er hat zu Epikurs Philosophie nichts Neues beigetragen, sondern sie ohne inhaltliche Veränderungen in sein Lehrgedicht „*De rerum natura*“ in poetische Form gebracht. Immerhin schloss er dadurch teilweise die Wissenslücke, die durch den Verlust der Bücher Epikurs entstanden ist, und übermittelte damit auch die Lehre Leukipps und Demokrits – wenn auch in etwas verstümmelter Form – der Nachwelt.

Hingegen behielten viele der qualitativen Aussagen Leukipps und Demokrits noch bis zum Ende des 19. Jh. ihre Gültigkeit und ihre Atomlehre trug ganz wesentlich zu den Fortschritten in der Physik und Chemie bei. Die Wiederbelebung der Atomistik in der abendländischen Wissenschaft begann mit der 1624 erschienenen Veröffentlichung „*Exercitationes paradoxicae adversus Aristoteleos*“ von Petrus Gassendi (Pierre Gassend, 1592–1655), einem französischen Priester im Minoritenorden. Als Mathematiker, Physiker und Philosoph hat er in seinen einflussreichen Schriften und in seiner Lehrtätigkeit (ab 1645 Professor am Collège royal in Paris) eine auf der von Epikur überlieferten Atomlehre beruhende Naturphilosophie vertreten. Er wird deshalb zu Recht als Vorläufer einer neuen physikalischen Grundanschauung betrachtet, in welcher die Atomistik zu einem integralen Bestandteil der mechanistischen Theorie wurde. Einer der ersten und zu seiner Zeit sicher der bedeutendste Vertreter jener neuen Wissenschaft, die Experiment und Theorie vereint, war Galileo Galilei (1564–1642). Der nicht minder geniale Isaac Newton (1643–1727), der kurz nach Galileis Tod geboren wurde, schuf 1666 durch Induktion aus den Keplerschen Gesetzen mit Hilfe der von ihm (und gleichzeitig und unabhängig von Leibniz) entwickelten Infinitesimalrechnung das Gravitationsgesetz. Zusammen mit den nach Newton benannten Axiomen der Mechanik bildete es das Fundament der klassischen theoretischen Physik, und die damit verbundenen Annahmen eines absoluten Raums, einer absoluten Zeit und Bewegung hatten bei den Physikern und Philosophen bis zum Ende des 19. Jh. geradezu kanonische Geltung.

Wie sein britischer Kollege Robert Boyle (1627–1691) und andere Zeitgenossen war Newton überzeugter Atomist. Der Materiebegriff war in seinem Atomismus sehr weit gefasst, denn er nahm an, dass auch Licht aus Korpuskeln bestehe und sogar der Äther aus sehr kleinen, sich untereinander abstoßenden Partikeln aufgebaut sei. Letzteres glaubten selbst die Vertreter der Wellentheorie des Lichts, wie Francesco Grimaldi (1618–1663), Christian Huygens (1629–1695), und später Johann Bernoulli (1710–1790) und Leonhard Euler (1707–1783). Ihr lichtfortpflanzender Äther sollte aus winzigen elastischen Teilchen bestehen, die um einen mittleren Abstand oszillieren und ihre Bewegung durch Stöße auf die Nachbarpartikeln übertragen, sodass sich eine Welle kugelförmig mit endlicher Geschwindigkeit in den Raum ausbreitet.

Mit Newton begann die Zeit des erfolgreichen „praktischen“ Einsatzes der Atomlehre. Durch Kombination des mächtigen Werkzeugs der Infinitesimalrechnung mit der mechanistischen Atomhypothese wurden, beginnend mit Euler und den Brüdern Bernoulli, von den nachfolgenden Generationen Lösungen und Erklärungen für eine Vielzahl von physikalischen Fragestellungen erarbeitet. Einen Höhepunkt bildete die kinetische Gastheorie, deren Entwicklung hauptsächlich von Rudolf Clausius (1822–1888); James Clerk Maxwell (1831–1879) und Ludwig Boltzmann (1844–1906)¹⁷ vorangetrieben wurde. In dieser Zeitspanne kümmerten Details oder philosophische Implikationen der Atomhypothese die Physiker wenig. Im Wesentlichen übernahmen sie die in den Punkten 1, 2 und 4 zu Beginn dieses Kapitels aufgezählten Hauptaussagen der „klassischen“ Atomlehre. Nur bei der in Punkt 4 erwähnten Wechselwirkung zwischen den Atomen gab es anfangs eine Kontroverse: Während die cartesianisch geprägten Gelehrten Stöße annahmen, brachte die Newtonianer Kräfte ins Spiel¹⁸. Sonst sahen die Physiker bis ins späte 19. Jh. keine Notwendigkeit von grundlegenden Veränderungen oder Erweiterungen¹⁹ des antiken Konzepts.

¹⁷ Das Thema ‚Atomismus bei Boscovich und Boltzmann‘ behandelt L. GUZZARDI in seinem Beitrag zu diesem Band.

¹⁸ Dieser Streit war übrigens der Anlass für Boscovichs Abhandlung „*De viribus vivis*“ Rom 1745, in der er die Partei Newtons ergreift. Hier erwähnt er zum ersten Mal seine Erweiterung der Newtonschen Kräfte zu entfernungsabhängigen abstoßenden und anziehenden Kraftzonen (s. Abb. 6 oben), welche die Grundlage seiner Naturphilosophie bilden.

¹⁹ Es gab einige Spekulationen über die Gestalt und Größe der verschiedenen Atomsorten, die heute eher skurril anmuten (ein Beispiel ist in Abb. 3 rechts gezeigt). Gassendi, Boyle, Newton, Dalton

Dies galt im verstärkten Maße für die Entwicklung der Chemie. Sie löste sich mit Antoine Lavoisiers (1743–1794) Veröffentlichung »*Traité élémentaire de Chimie*« die letzten Verbindungen zu ihrer alchemistischen Vergangenheit. Die Anwendung von Lavoisiers quantitativen Untersuchungsmethoden führte zur Aufstellung einer Reihe von empirischen Gesetzen, wie die Konstanz der Äquivalentgewichte (Jeremias Richter, 1762–1807) und der Proportionen (Joseph Proust, 1755–1826) und gipfelte in den Arbeiten John Daltons (1766–1844), der mit seinem 1808 veröffentlichten „*New System of Chemical Philosophy*“ von vielen als Vater der modernen Chemie angesehen wird. Alle diese und auch die nachfolgenden Fortschritte, die verknüpft sind mit den Namen Gay-Lussac, Avogadro, Ampère, Berzelius u.a. bis hin zu Wöhler und Liebig, die den Aufstieg der Chemie in Deutschland begründeten, basierten auf der klassischen Atomlehre. Daran änderte auch das periodische System nichts, das Lothar Meyer (1830–1895) und Dimitrij Mendelejeff (1834–1907) aufstellen konnten, nachdem das relative Atomgewicht und die Wertigkeit der Elemente bestimmt worden war. Es schränkte zwar die Zahl der unterschiedlichen Atomsorten ein, man ging aber weiter davon aus, dass die Materie aus verschiedenartigen Grundbausteinen aufgebaut sei. Ein Versuch einer Vereinheitlichung war die Vermutung des Londoner Arztes William Prout (1785–1850), dass die Atome aller Elemente aus diskreten Zahlen von Wasserstoffatomen zusammengesetzt seien. Nachdem aber Messungen ergeben hatten, dass die Atomgewichte der Elemente keine exakten Vielfachen des Gewichts eines Wasserstoffatoms waren, wurde diese Hypothese vorerst wieder verworfen.

Aus dieser pragmatischen Sicht auf die Atomlehre in der Physik und Chemie des 18. und 19. Jh. ragt als einzige Ausnahme die „*Theoria*“ Boscovichs hervor (s. Abb. 2 rechts) und begründete damit seine in der Einleitung angesprochene Sonderstellung unter seinen Zeitgenossen (s. Anm. 4). Obwohl Boscovich von vielen, hauptsächlich britischen, Gelehrten²⁰ als Nachfolger Newtons angesehen wurde, der dessen Kraftkonzept erweitert und auf die Erklärung von Materieeigenschaften angewandt hatte²¹, musste die „*Theoria*“ noch fast ein Jahrhundert warten, bis sie etwa zur Hälfte des 19. Jh. begann, entscheidenden Einfluss auf das Denken und die Arbeiten der Physiker zu nehmen, der dann bis ins beginnende 20. Jh. wirkte. Da die Inhalte von Boscovichs Naturphilosophie und ihre Unterschiede zur „klassischen“ Atomlehre im nächsten Kapitel besprochen werden, wollen wir es hier bei dieser kurzen Anmerkung zur „*Theoria*“ belassen und uns wieder der allgemeinen Entwicklung der Atomistik (s. Abb. 2 links und Mitte) zuwenden.

Als sich das 19. Jh. seinem Ende näherte, tauchten erste Vermutungen auf, welche die Atome als elementarste Einheiten der Materie in Frage stellten. So veranlassten z.B. die von Faraday gefundenen Gesetze der Elektrolyse Hermann von Helmholtz (1821–1894) im Jahre 1881 zu der Annahme, dass die Elektrizität Teilchenstruktur besitze. Diese Teilchen wurden von Johnstone Stoney (1826–1911) als Elektronen bezeichnet. Die beiden Entdeckungen, welche die Tautologie ‚unteilbare Atome‘ schließlich als unhaltbar erwiesen, wurden erst am Ende des 19. Jh.s gemacht: Die Radioaktivität 1896 und die Identifizierung der Kathodenstrahlen als Strom von Elektronen 1897²². Während viele die Radioaktivität

und die meisten anderen Atomisten machten keine Angaben über spezifische Dimensionen oder Formen der Atome.

²⁰ Näheres s. Stipe KUTLEŠA, Reception of Boscovich's natural philosophy in Britain. In: *Interpreting Tradition and Modernity*, Vol. 1 of the Series „Philosophical Topics“, (Zagreb 2004) 147–192.

²¹ Peter Henrici fasste dies in dem treffenden Satz zusammen: *In simple words, Boscovich repeats with Newton what Galileo did with Copernicus: he brings celestial mechanics into terrestrial physics.* Peter HENRICI, The Theory of Knowledge of Ruder Bošković in His Time. In: *Proceedings of the Symposium „The Philosophy of Science of Ruder Bošković“*, (Zagreb 1987) 28–49.

²² Für eine kurze Darstellung der Entdeckungsgeschichte der Radioaktivität und des Elektrons s. z.B. Hans ULLMAIER Vom Kraftgesetz des Ruder Boscovich zum Bohrschen Atommodell. In: *Mitteilungen der Österreichischen Gesellschaft für Wissenschaftsgeschichte*, Bd. 25, 2007, 95–100.

als Beispiel einer wissenschaftlichen Zufallsentdeckung ansehen (deren Bedeutung jedoch von Antoine Henri Becquerel (1852–1908) schnell erkannt wurde), steht die Entdeckung des Elektrons am Ende eines langen Weges von Experimenten an Strahlen, die vom negativen Pol (Kathode) einer Gasentladungsröhre ausgehen. Aus den Resultaten dieser Untersuchungen, die von Forschern in Deutschland und England, hier in systematischer Weise von Joseph John Thomson (1856–1940), durchgeführt wurden, zog letzterer den weitreichenden Schluss, dass die Kathodenstrahlen aus immer gleichen Teilchen bestehen, die von verschiedenartigen Atomen ausgesandt werden und die deshalb aus kleineren und elementareren Bestandteilen bestehen müssen. In der Tat wurden bald danach Ergebnisse erarbeitet (kleine Masse der Teilchen, Zeeman-Effekt, Photo- und Glühemission), die – zusammen mit den Strahlen aus radioaktiven Elementen – Thomsons Annahme der Existenz subatomarer Teilchen erhärteten.

Es gab also elektrisch geladene ‚leichte‘ Partikel mit einem einheitlichen Verhältnis von Ladung zu Masse, die offenbar Bestandteile von Atomen verschiedenster Art waren und ihre Existenz in mehreren voneinander unabhängigen Phänomenen manifestierten. Mit diesen subatomaren ‚corpuscles‘, wie sie ursprünglich bei Thomson hießen, die dann später Elektronen genannt wurden, hatte man die ersten Elementarteilchen gefunden. Die Zerteilung der Atome hatte begonnen, und damit verloren sie ihren Status als unteilbare und elementarste Bausteine der Materie. Die Physik hatte jetzt neue Fragen zu beantworten: Welche innere Struktur haben die Atome und aus welchen Elementarteilchen ist sie aufgebaut?

Schon bald nach der Entdeckung des Elektrons erschienen die ersten Atommodelle. Den Anfang machte Kelvin²³, der sich offenbar sehr schnell der Ansicht J.J. Thomsons angeschlossen hatte, dass Atome aus elementareren Bausteinen aufgebaut sind. Kelvins Vorschlag basiert auf einer von Thomson geäußerten Vermutung und wurde in der Literatur unter dem Namen Plumpudding- oder Rosinenkuchen-Modell populär. Danach besteht das Atom aus einer winzigen Kugel, gefüllt mit homogen verteilter positiver Ladung (‚Teig‘), in dem sich negativ geladene Elektronen bewegen (‚Rosinen‘), deren Zahl die positive Ladung gerade kompensiert, sodass das Atom insgesamt elektrisch neutral ist. Andere Vorschläge, die entweder Modifikationen von Kelvins Modell waren oder auf anderen Konzepten beruhten, folgten²⁴. Der Einfallsreichtum ihrer Verfechter bei der Entwicklung von Modellen, welche die Resultate von Experimenten an Atomen erklären können, verdient Bewunderung. Allein, sie führten zwar zu einigen bedeutsamen neuen Erkenntnissen (z.B. dass die Valenzen der Elemente durch die ‚äußeren‘ Elektronen ihrer Atome bestimmt werden), alle Anstrengungen scheiterten jedoch am Problem der diskreten Wellenlängen des von den Atomen ausgesandten bzw. absorbierten Lichtes. Die Spektrallinien wurden zu Recht als wichtigste Boten angesehen, die Information über die innere Struktur der Atome nach außen tragen. An der Situation änderte auch das neue, 1910 von Ernest Rutherford (1871–1937) aus Streuexperimenten mit α -Strahlen gefolgerte fast ‚leere‘ Atom mit einem zentralen, positiv geladenen winzigen Kern, der von den Elektronen umkreist wird, nichts. So wichtig die Entdeckung des Atomkerns auch war, die Stabilität der Elektronenbahnen und deren Linienspektren konnte auch das Rutherfordsche Modell nicht erklären.

²³ Eigentlich William Thomson (1824–1907), der ab 1892 als Lord Kelvin of Largs zum britischen Hochadel gehörte. Da es zwischen ihm und dem (mit ihm nicht verwandten) J.J. Thomson viele wissenschaftliche Berührungspunkte gibt, nenne ich ihn hier immer Kelvin, um Verwechslungen zu vermeiden.

²⁴ Darstellungen der Geschichte der frühen Atommodelle geben Charlotte SCHMIDT-SCHÖNBECK, Atommodelle um 1900, In: Atomvorstellungen im 19. Jahrhundert, Paderborn (1982), 67–96, und ULLMAIER (Anm. 22), 100–115. Dort wird auch gezeigt, dass im Zeitabschnitt vor und während der Entwicklung der frühen Atommodelle (also etwa von 1850 bis 1900) der Einfluss Boscovichs auf das physikalische Denken am augenscheinlichsten war.

Eine Lösung dieses Problems brachte das 1913 von Niels Bohr (1885–1962) vorgestellte Atommodell²⁵, das aus den unendlich vielen Bahnen, die nach der klassischen Physik möglich sind, diejenigen auswählte, welche – in Analogie zu der von Max Planck (1848–1947) für die Energiestufen des harmonischen Oszillators verwendeten Beziehung – die Quantenbedingung $E = n \cdot h \cdot \nu$ erfüllen ($n =$ ganze Zahl, $h =$ Plancksches Wirkungsquantum, $\nu =$ Umlauffrequenz der Elektronen)²⁶. Bohr postulierte, dass diese Energieniveaus die stabilen Bahnen festlegen, auf denen das Elektron strahlungsfrei kreisen kann, und Lichtemission immer dann auftritt, wenn das Elektron von einem Zustand n_1 in einen anderen Zustand n_2 übergeht. Damit konnte er den Atomradius, die Ionisierungsenergie und die Frequenzen der Balmer- und Paschen-Serie des Wasserstoffs richtig reproduzieren, und auch die Resultate zur charakteristischen Röntgenstrahlung von Moseley (1913) und der Elektronenstoßversuche von Franck und G. Hertz (1914) standen in Einklang mit Bohrs Theorie. Ihre Erweiterung durch Sommerfeld (1868–1951) führten zur Erklärung der Feinstruktur des Wasserstoffspektrums und des Zeemann- und Stark-Effekts. Ungeachtet dieser Erfolge wurde das Fehlen einer theoretischen Begründung der Bohrschen Postulate als unbefriedigend empfunden. Die Physiker mussten erkennen, dass weitere Fortschritte nicht durch ‚Aufpfropfen‘ quantentheoretischer Bedingungen auf Prinzipien der klassischen Physik, sondern nur mit grundlegend neuen Ansätzen erzielt werden können. Den Durchbruch brachten die Arbeiten Werner Heisenbergs (1901–1967) und Erwin Schrödingers (1887–1961) in der Mitte der 20er Jahre des vergangenen Jahrhunderts. Mit ihnen war der Wechsel von der Determiniertheit, Stetigkeit und Anschaulichkeit der klassischen Physik zur Unbestimmtheit, Unstetigkeit und Abstraktheit der modernen Physik vollzogen. Letztere und ihr Mathematizismus sind wohl die Hauptgründe dafür, dass die Quantentheorie im Denken der meisten Menschen (einschließlich der meisten Philosophen) nicht einen ähnlichen „Kulturschock“ auslöste, wie dies beim Wechsel vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild und bei Darwins Evolutionstheorie der Fall war. Das ist insofern bemerkenswert²⁷, als schon seit Jahrzehnten fast alle Entwicklungen, die – von der Informationstechnik bis zur Molekularbiologie – unser alltägliches Leben in immer stärkerem Maße und in immer schnellerem Wechsel bestimmen, auf der Quantenphysik basieren.

Ihre erste Anwendung fand die Quanten- bzw. Wellenmechanik in der Atomphysik, unter der man nun die Phänomene versteht, die hauptsächlich durch die Elektronen im Atom bestimmt werden. Darauf aufbauend drang die Quantentheorie bald auch in die Physik der kondensierten (d.h. festen und flüssigen) Materie ein, die wir in den verschiedenartigsten Formen in unserer Umwelt finden, wie z.B. Wasser, biologische Stoffe wie die DNS und die Enzyme, die verschiedenen Gesteine von Granit bis Glimmer, Tausende von Metalllegierungen und Millionen Verbindungen in der organischen Chemie. Diese Vielfalt hat ihre Ursache in der unterschiedlichen Verteilung der äußeren Elektronen und der Atomrümpfe der ungefähr 100 chemischen Elemente, woraus quantenmechanische Überlegungen fünf

²⁵ Niels BOHR, On the Constitution of Atoms and Molecules, Phil. Mag., Series 6, Bd. 26 (1913), 1–25

²⁶ Es ist nur wenig bekannt, dass Bohr nicht der erste war, der den Versuch unternahm, Plancks Quantentheorie auf den Atombau anzuwenden. Auf einer Sitzung der österreichischen Akademie der Wissenschaften berichtete Arthur Erich Haas (1884–1941) im März 1910 „Über die elektrodynamische Bedeutung des Planck’schen Strahlungsgesetzes und über eine neue Bestimmung des elektrischen Elementarquantums und der Dimensionen des Wasserstoffatoms“. Bei den Wiener Physikern stieß die Arbeit damals auf Geringschätzung (E. Lecher: Ein Faschingsscherz!), während Bohr das Verdienst von Haas anerkannte (in Anm. 25, S. 6)

²⁷ **Bemerkenswert, aber nicht verwunderlich: Sind doch die Unschärferelation, der Teilchen – Welle Dualismus und andere Inhalte der Quantentheorie mit unserem ‚gesunden Menschenverstand‘ nicht erfassbar. Für mich besteht das Wunder eher im Abstraktionsvermögen des menschlichen Gehirns, das einen Umgang mit diesen Begriffen ermöglicht.**

Grundtypen von Bindungskräften identifizierten. Ich muss mich hier mit ihrer Aufzählung²⁸ und der Angabe ihrer wichtigsten Charakteristika anhand einer Tabelle begnügen (Abb. 4) und erwähne nur noch die 1928 von Paul Adrien Maurice Dirac (1902–1984) aufgestellte relativistische quantenmechanische Bewegungsgleichung. Sie enthält Ausdrücke, die dem Spin des Elektrons²⁹ entsprechen (1925 von G. Uhlenbeck und S.A. Goudsmit zur Erklärung der Feinstruktur der Atomspektren vorgeschlagen) und sagte die Existenz eines Teilchens voraus, das die gleiche Masse aber die entgegengesetzte Ladung des Elektrons haben sollte. Dieses Positron wurde 1932 von C.D. Anderson in der Höhenstrahlung entdeckt und war der erste Hinweis auf die Existenz der Antimaterie. Ich schließe jetzt diesen Themenkreis mit einer sehr vereinfachten und saloppen Feststellung ab: Alle Erscheinungsformen der Materie und elektronischen und chemischen Vorgänge, die in ihr ablaufen, können im Prinzip mit der Schrödinger-Gleichung³⁰ bzw. ihrer feldtheoretischen Weiterentwicklung zur Quantenelektrodynamik (QED) durch Richard Feynman (1918–1988) und andere, nicht nur beschrieben werden, sondern ihre intelligente Anwendung ermöglicht in Verbindung mit großen und schnellen Computern in zunehmenden Maße auch die gezielte Entwicklung neuer Materialien mit ‚maßgeschneiderten‘ Eigenschaften („Materials Design“).

Wir wollen uns nun der Untersuchung des Atomkerns und seiner Bestandteile zuwenden, für die sich vorerst der Begriff Kernphysik einbürgerte³¹. Sie begann mit systematischen Untersuchungen der Radioaktivität, aus denen der Chemiker Frederick Soddy (1877–1956), der eng mit Rutherford zusammenarbeitete, 1911 schloss, dass es Elemente gibt, die trotz unterschiedlicher Massen und radioaktiver Eigenschaften gleiches chemisches Verhalten zeigen, und daher im Periodensystem auf den gleichen Platz zu setzen sind. Diese ‚Isotope‘ wurden bald darauf von Francis William Aston (1877–1945), der die Thomsonsche Experimentieranordnung zum Massenspektrometer weiter entwickelt hatte, am Neon und anderen Elementen nachgewiesen. Seine Resultate führten zu der Hypothese, dass der Atomkern aus Protonen³² und Elektronen bestehe. So sollten die Kerne der beiden Neonisotope 22 Protonen und 12 Elektronen bzw. 20 Protonen und 10 Elektronen enthalten, sodass sie beide die Ordnungszahl 10, hingegen die relativen Atomgewichte 22 und 20 besitzen. Dieses Kernmodell stand jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen von Streuexperimenten, die Rutherfords Schüler James Chadwick (1891–1974) durchführte. Ihre Analyse führte zur Annahme eines ungeladenen Kernbestandteils, der die gleiche Masse wie die Protonen haben sollte. Das so postulierte Neutron wurde von Chadwick in der Tat 1932 nachgewiesen.

²⁸ Die Ursache aller hier angeführten Bindungskräfte ist die elektrische Wechselwirkung zwischen den negativ geladenen Elektronen und den positiv geladenen Atomkernen bzw. -rümpfen. Sie fallen also alle in die Kategorie „elektromagnetisch“ in der Liste der vier elementaren Kräfte (s. Abb. 5).

²⁹ Damit war die letzte der vier Quantenzahlen verifiziert (die drei anderen liefert die Schrödinger-Gleichung). Sie ermöglichen zusammen mit dem von Wolfgang Pauli (1900–1959) formulierten Ausschließungsprinzip eine Klassifikation der Elemente nach der Zahl und Anordnung der Elektronen in ihren Atomen, die mit dem früher empirisch aufgestellten Periodensystem übereinstimmt.

³⁰ Sie kann, wie auch die anderen fundamentalen Gleichungen der Physik, nicht hergeleitet werden (Schrödinger: „Sie ist vom Himmel gefallen“). Sie ist eine lineare Differentialgleichung für die stetige Wellenfunktion, welche die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens beschreibt (Max Born, 1882–1970). Die „Quantisierung“ erfolgt durch die Randbedingungen, welche nur Zustände mit diskreten Energien zulassen.

³¹ In der Alltagssprache ist diese Begriffsverwendung nicht angekommen. Man spricht immer noch von Atomwaffen, Atomenergie und Atomkraftwerken, meint damit aber Kernwaffen, Kernenergie und Kernkraftwerke.

³² Damit kam die Prout'sche Hypothese wieder zu Ehren, denn der Kern des Wasserstoffatoms wurde jetzt unter dem Namen ‚Proton‘ zum neuen Elementarteilchen.

Bindungskräfte in kondensierter Materie

Bindungsart	Kraftwirkung	Bindungs-Energie eV/At.	Beispiele	Eigenschaften
Ionenbindung (heteropolar)	zwischen entgegengesetzt geladenen Ionen; isotrop	6–20	Salze (NaCl), LiF, ... BaF ₂	tiefe Temp.: Isolatoren, spröde hohe Temp.: Ionenleiter, plastisch
Kovalente Bindung (homöopolar)	Elektronenpaar-Bindung; stark gerichtet	1–7	Elemente der Gruppe IV (C, Si) viele organische Stoffe	Isolatoren oder Halbleiter, spröde, hohe Schmelzpunkte
Metallische Bindung	zwischen Atom-Rümpfen und ‚freien‘ Elektronen, wenig gerichtet	1–5	Metalle und Legierungen	gute elektrische Leiter, thermische Leiter, plastisch
Van der Waals Bindung	zwischen Atomen mit permanenten oder induzierten Dipolmomenten	0,01–0,1	Edelgaskristalle, H ₂ , O ₂ , ... Molekülkristalle, Polymere	Isolatoren, leicht komprimierbar, niedriger Schmelzpunkt
Wasserstoffbrücken	zwischen Atomen stark elektronegat. Elemente, vermittelt durch dazw. liegendem Proton	ca. 0,1	Wasser, Eis, Eiweißmoleküle, DNS, Polymere	vielfältig, da oft zusammen mit anderen Bindungskräften wirkend

Abb. 4: Obwohl die prinzipielle Ursache für alle Bindungskräfte in Festkörpern und Flüssigkeiten die elektrische Wechselwirkung zwischen den äußeren Elektronen ihrer Atome ist, kann man 5 Grundtypen von Kräften identifizieren, die sich hinsichtlich ihrer Stärke, Richtungsabhängigkeit und anderer Merkmale unterscheiden. Die klassische Physik kann davon nur die Ionenbindung erklären, alle anderen beruhen auf quantenmechanischen Prinzipien. Die alleinige Wirkung eines Bindungstyps ist selten, meistens sind mehrere Bindungsarten für den Zusammenhalt kondensierter Materie verantwortlich.

Die Entdeckung des Neutrons führte nicht nur zu Fortschritten in der nuklearen Grundlagenforschung (s. unten), sondern hatte ab den 40er Jahren des 20. Jh. auch gravierende technische und vor allem politische Folgen. Nach Vorarbeiten von Enrico Fermi (1901–1954), dem Ehepaar Joliot-Curie, Otto Hahn (1879–1968) und Lise Meitner (1878–1968) entdeckten Hahn und sein Mitarbeiter Fritz Strassmann 1938 die Spaltung des schweren Urankerns in leichtere Bruchstücke. Die dabei freiwerdende Energie von etwa 200 MeV pro Atom (also mehr als das 10⁸-fache des Energieumsatzes bei chemischen Reaktionen) liegt am Verlauf der Bindungsenergie pro Nukleon: Sie ist hoch bei den schweren Elementen, durchläuft ein flaches Minimum bei mittelschweren Elementen und steigt dann zu den leichten Elementen hin wieder an. Letzteres führt zur Energiefreisetzung bei der Fusion leichter Kerne, wie sie z.B. in unserer Sonne abläuft, und damit die Grundvoraussetzung für jedwedes Leben auf der Erde schafft. Wie alle Entdeckungen und Erfindungen, die sich der Mensch – beginnend bei Feuer und Faustkeil – nutzbar macht, hat auch die Energiefreisetzung aus Kernmaterie nützliche und verheerende Auswirkungen. Leistet die kontrollierte Kernspaltung (und in Zukunft vielleicht auch die Kernfusion) heute einen wichtigen Beitrag zu einer fast CO₂-freien Energieproduktion, tötete der Einsatz von Kernwaffen am Ende des 2. Weltkriegs viele Menschen und bleibt bis heute eine weltweite Bedrohung unseres Daseins.

Aber zurück zur Kernphysik: Bald nach der Entdeckung des Neutrons versuchten Heisenberg und Dimitri Iwanenko (1904–1994), die Bindungskräfte zwischen den Protonen und Neutronen im Atomkern durch einen Austausch von Positronen zu berechnen. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass es noch eine weitere Kraft geben müsse, die bei subatomaren Abständen viel stärker als die elektromagnetische Wechselwirkung ist – die „Starke Kraft“. Zu einem ähnlichen Schluss kam Hideki Yukawa (1907–1981), der 1935 versuchte, die Bindungskräfte im Atomkern durch den Austausch von (vorerst hypothetischen) Pionen oder Pi-Mesonen, d.s. neutrale Teilchen mit der etwa zweihundertfachen Masse des Elektrons, zu erklären. Schon 1931 hatte Pauli mit dem Neutrino³³ die Existenz eines weiteren Teilchens vorausgesagt, um die Tatsache zu erklären, dass die von radioaktiven Kernen emittierten β -Strahlen (= Elektronen) ein kontinuierliches Energiespektrum besitzen. In diesem Zusammenhang schloss Fermi schließlich auf die Existenz einer vierten elementaren Kraft, die er „Schwache Kraft“ nannte (Abb. 5 unten).

Die mit Cockcroft und Walton, van de Graaff und Lawrence zum Beginn der 30er Jahre des vorigen Jahrhunderts einsetzende Entwicklung von immer leistungsfähigeren Teilchenbeschleunigern ermöglichte die Untersuchung der Kernstruktur durch den Beschuss mit Sondenteilchen (Elektronen, Protonen, Deuteronen, α -Teilchen) von immer höherer Energie³⁴. Die Analyse der durch sie ausgelösten Kernreaktionen führte zur Identifikation einer gleichsam epidemisch zunehmenden Zahl von neuen Teilchen. 1961 fanden Robert Hofstadter (1915–1990) und seine Mitarbeiter bei Streuversuchen von hochenergetischen Elektronen an Protonen und Neutronen, dass es in ihnen Ladungskonzentrationen gab, sie also eine innere Struktur besitzen, die ihren Status als Elementarteilchen in Frage stellte. Dieser Befund und der immer größer werdende „Teilchenzoo“ liefen dem offenbar inhärenten Bemühen der Physik zuwider, Ordnungsschemata für die elementaren Bausteine der Materie und der in ihr wirkenden Kräfte zu finden und ihre Zahl zu reduzieren („Vereinheitlichung“).

Man suchte also nach Mustern, die zu einer Gruppierung von Teilchen mit ähnlichen Merkmalen führten, sozusagen ein Periodensystem für subatomare Partikel. 1961 zeigten Murray Gell-Mann (geb. 1929) und Yuval Ne’eman (geb. 1925), dass sich die Teilchen in Gruppen von 8 (Oktetts) oder 10 (Dekupletts) einteilen lassen. Diese Klassifikation³⁵ war die Vorstufe zu den Quarks³⁶, die 1964 Gell-Mann und, unabhängig von ihm, George Zweig (geb. 1936) als Grundbausteine aller Teilchen vorschlugen, die über die starke Kraft miteinander wechselwirken (die sog. Hadronen). Das ursprüngliche Schema enthielt drei Arten von Quarks („up“, „down“, „strange“), später kamen noch das „charmed“ (S. Glashow und J. Bjorken 1964), „bottom“ (L. Lederhann 1977) und „top“ Quark (1995) hinzu (s. Abb. 5 oben). Die von den Quarks ausgehende Starke Kraft wird durch „Farben“³⁷ (oder Farb-

³³ Während die Mesonen schon 1938 als Sekundärprodukt der Höhenstrahlung und 1947 bei Beschleunigerexperimenten nachgewiesen wurden, entzogen sich die von Fermi so genannten Neutrinos wegen ihrer elektrischen Neutralität und ihrer extrem geringen Ruhemasse lange einem experimentellen Nachweis. Er gelang erst 1955.

³⁴ Die damit einher gehende Möglichkeit der Untersuchung immer feinerer Strukturen führte auch zu einer Begriffsveränderung. Als Kernphysik bezeichnet man heute meist nur noch Untersuchungen von Vorgängen, welche den Atomkern als Ganzes betreffen, während sich für das Studium seiner Einzelbestandteile der Begriff Hochenergie- oder Elementarteilchenphysik eingebürgert hat.

³⁵ Eine wichtige Rolle spielten hier Symmetrieüberlegungen („SU 3-Gruppen“). Eine fundierte Darstellung der Bedeutung von Symmetrien in Naturwissenschaft und Philosophie gibt K. MAINZER, *Symmetrien der Natur*, Berlin – New York (1988).

³⁶ Zu dieser Bezeichnung wurde Gell-Mann durch die Stelle „Three quarks for Muster Mark“ in Finnegans Wake von James Joyce inspiriert.

³⁷ Auch diesen Namen prägte Gell-Mann. Jedoch hat die „Farbe“ eines Quarks natürlich nichts mit dem üblichen Begriff der Farbe gemein.

Elementare Teilchen	Familien			elektr. Ladung	Kräfte			
					st	em	sch	grav
Quarks	u	c	t	$\frac{2}{3}$	+	+	+	+
	d	s	b	$-\frac{1}{3}$	+	+	+	+
Leptonen	e	μ	τ	-1	-	+	+	+
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	-	-	+	+

Theoretische Vorhersage zur Erklärung der Teilchenmasse: Higgs-Teilchen?

Elementare Kräfte	Reichweite	Austausch-Teilchen	relative Stärke
stark	subatomar	Gluon g	1
elektromagnetisch	unendlich	Photon γ	$\frac{1}{137}$
schwach	subatomar	W u. Z Bosonen	10^{-14}
Gravitation	unendlich	Graviton?	10^{-40}

Abb. 5: Zusammenfassung der elementaren Materieteilchen und der fundamentalen Kräfte des derzeit gültigen so genannten „Standardmodells“. Die Materie des sichtbaren Universums – Sterne, Planeten, unsere Umgebung und wir selbst – bestehen ausschließlich aus Teilchen der ersten Familie: u- und d-Quarks (aus denen die Protonen und Neutronen zusammengesetzt sind) und Elektronen e. Das Standardmodell postuliert als weiteren notwendigen Bestandteil das „Higgs“-Teilchen, welches aber bisher nicht experimentell nachgewiesen werden konnte. Es muss noch erwähnt werden, dass es zu allen Quarks und Leptonen jeweils ein Antiteilchen gibt. Teilchen und Antiteilchen haben exakt dieselben Eigenschaften, nur ihre elektrischen Ladungen sind genau entgegengesetzt.

ladungen) bestimmt (Moo-Young Han, geb. 1934, und Yoichiro Nambu, geb. 1921), äquivalent zu den elektrischen Ladungen bei der elektromagnetischen Kraft. Dementsprechend heißt die Theorie zur Beschreibung der starken Wechselwirkung Quantenchromodynamik (QCD). Danach resultiert die Starke Kraft aus der Emission und Absorption (= Austausch) von Bindeteilchen, den sog. Gluonen (das äquivalente Austauschteilchen in der Quantenelektrodynamik ist das Photon, in der Theorie der schwachen Wechselwirkung die W- und Z-Bosonen, und in der Gravitation das bisher nicht nachgewiesene Graviton).

Die Vorstellung vom Aufbau der Materie aus je sechs Quarks und Leptonen³⁸ als elementare Teilchen, zusammengehalten von vier elementaren Kräften, wird als Standardmodell bezeichnet. Abgesehen von wenigen noch offenen Fragen gilt es als experimentell gut bestätigt und markiert den gegenwärtig gesicherten Stand der Anstrengungen, zum tiefsten Ursprung der Materie vorzudringen.

3. Boscovichs Naturphilosophie: Ein erster Versuch einer „Vereinheitlichten Theorie“ der Materie

Boscovichs „Theoria“ *philosophiae naturalis* wurde in mehreren Beiträgen zu diesem Symposium unter epistemologischen (Zvonimir Čuljak), entwicklungsgeschichtlichen (Josip Talanga) und inhaltlichen (Stipe Kutleša) Aspekten ausführlich dargestellt. Für das Ziel

³⁸ **Leptonen** (nach griech. *leptos* = klein) sind Teilchen, die nicht der Starken Kraft unterliegen, mit dem Elektron als wichtigsten Vertreter.

des vorliegenden Beitrages – einen Vergleich³⁹ des heutigen Materiebildes mit den Vorstellungen Boscovichs – genügt hier deshalb eine kurze Zusammenstellung der Hauptaussagen der „Theoria“:

Basierend auf der apriorischen Forderung⁴⁰ nach

- Gültigkeit des Kontinuitätsprinzips (*nihil in natura per saltum fieri*)
- Analogie und Einfachheit der Naturgesetze (*analogie et simplicitas naturae*)

postuliert Boscovich:

(1) Alle Materie besteht aus einheitlichen, ununterscheidbaren, ausdehnungslosen, aber der Trägheit unterliegenden Elementarbausteinen. Diese „*puncta*“ sind die denkbar einfachsten Gebilde und erfüllen so die Forderung nach größtmöglicher Einfachheit.

(2) Die *puncta* wechselwirken miteinander über ein universales Gesetz abstoßender und anziehender Kräfte („*lex virium*“) (Abb. 6⁴¹). Über die Ursache seiner universalen Wechselwirkungskraft macht Boscovich keine Angaben: „Ob dieses Kraftgesetz eine intrinsische Eigenschaft der unteilbaren *puncta* ist, ob es etwas Substantiales oder Zufälliges ist, das ihnen hinzugefügt wurde [...], ob es ein willkürliches Gesetz des Urhebers der Natur ist, der die Bewegungen durch ein nach Seinem Willen gemachten Gesetz leitet; all dies suche ich nicht herauszufinden“ („Theoria“, *Pars III*, § 516). Er erkannte allerdings schon richtig, dass die im Makrokosmos dominierende Schwerkraft zu schwach ist, um die im Mikrokosmos wirkenden Kräfte zu erklären: „[...] die Anziehung, die bei der Kohäsion erscheint, ist immer stärker, als sie entsprechend des Gesetzes der universalen Gravitation sein sollte“ („Theoria“, *Pars I*, § 121).

Als Wirkungsweise der *lex virium* akzeptiert Boscovich anfangs nur die Newtonsche Fernwirkung (*acto in distans*), betrachtet sie dann zunehmend kritisch und lässt sie schließlich vollkommen fallen⁴², um allerdings mit den „Propensitäten“ (von lat. *Propensio* = Neigung) eine recht vage Alternative zu vertreten.

Die klassische Atomlehre erklärte die schier unendliche Vielfalt der materiellen Welt mehr als zwei Jahrtausende – von Leukipp bis Dalton – hauptsächlich durch die Verschiedenartigkeit ihrer Elementarbausteine (= Atome). Newton bringt dies klar in der *Regula tertiae* seiner *Philosophiae naturalis principia mathematica III* zum Ausdruck: „Die Ausdehnung, Undurchdringbarkeit, Beweglichkeit und Schwere des Ganzen stammen von denselben Eigenschaften seiner Teile; deshalb folgt daraus, dass die kleinsten Teile von Körpern dieselben Eigenschaften bezüglich ihrer Ausdehnung, Festigkeit, Undurchdringbarkeit, Beweglichkeit und Schwere haben müssen. Das ist die Grundlage der gesamten Philosophie“. Boscovich, dessen Materiemodell einheitliche, untereinander identischen Elementarteilchen annimmt, muss hier einen anderen Weg gehen:

(3) Die Vielfalt der Materieformen und -eigenschaften wird durch Agglomerate von *puncta* („*particulae*“) erklärt. Boscovich widmet ihnen zu Recht große Aufmerksamkeit

³⁹ Es ist klar, dass solch ein Vergleich ausschließlich rein qualitativer Art sein kann. Gab es doch im 18. Jh. keinerlei Möglichkeiten, die Größen der charakteristischen Dimensionen und Kräfte in der Mikrostruktur der Materie auch nur annähernd abzuschätzen (es gab ja noch nicht einmal Maßeinheiten dafür). Auch viele moderne Begriffe existierten damals noch nicht bzw. waren nicht klar definiert (wie z.B. die Energie).

⁴⁰ Das heißt, sie beruht auf rationalen Argumenten, die nicht durch Experimente bewiesen oder widerlegt werden können.

⁴¹ Wie in den Diagrammen ersichtlich, wird die abstoßende Kraft zwischen den *puncta* unendlich groß, wenn ihr Abstand gegen null geht. Es gibt also keine Stöße mit abrupten Geschwindigkeitsänderungen und die Forderung nach der Gültigkeit des Kontinuitätsprinzips wird erfüllt.

⁴² In *De continuitatis lege*, § 163 und *Theoria*, § 101 und 102.

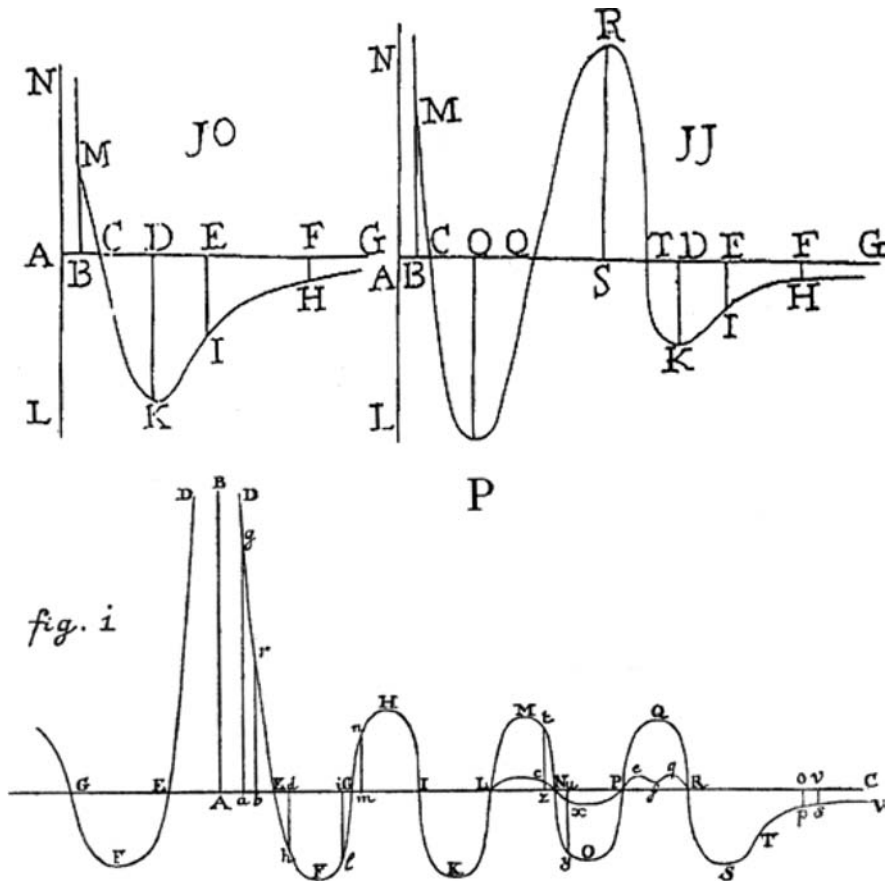


Abb. 6: Die Reproduktionen der Figuren 10 und 11 (oben) aus R. BOSCOVICH'S *De viribus vivis* (Anm. 18) zeigen die beiden ersten Schritte zur *curva Boscovichiana* (unten). Auf den senkrechten Achsen der Diagramme ist die Kraft aufgetragen, die ein im Koordinatenursprung A befindliches *punctum* auf ein anderes *punctum* ausübt. Die Entfernung der beiden *puncta* ist auf den waagrechten Achsen (Abszissen) angegeben. Die Kurvenstücke oberhalb der Abszisse zeigen (per Konvention) abstoßende, jene unterhalb der Abszisse anziehende Kräfte an.

und seine diesbezüglichen Überlegungen nehmen in seinen Abhandlungen⁴³ viel Platz ein, sind doch die Partikel in seinem Materiellmodell unverzichtbare Bindeglieder zwischen der abstrakten Welt der *puncta* und den „*phaenomena*“, die wir mit unseren Sinnen wahrnehmen. Die Charakteristika von Boscovichs universalem Kraftgesetz ermöglichen schon bei den ersten Agglomerationschritten eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Partikeln, die sich durch ihre innere Struktur (d.h. räumliche Anordnung der *puncta*), Form und Größe unterscheiden können. Mit zunehmendem Agglomerationsgrad (Partikel 1., 2., 3., ... n-ter „Ordnung“, s. Abb. 2 und 7) nimmt die Zahl der Variationsmöglichkeiten rapide zu.

⁴³ In *De viribus vivis*, Rom (1745), in *De lege virium in natura existium*, Rom (1755) und natürlich in der *Theoria*, Pars II, § 189ff. (*De combinationibus punctorum ... de systemate punctorum duorum, ... trium, ... quatuor, etc.*).

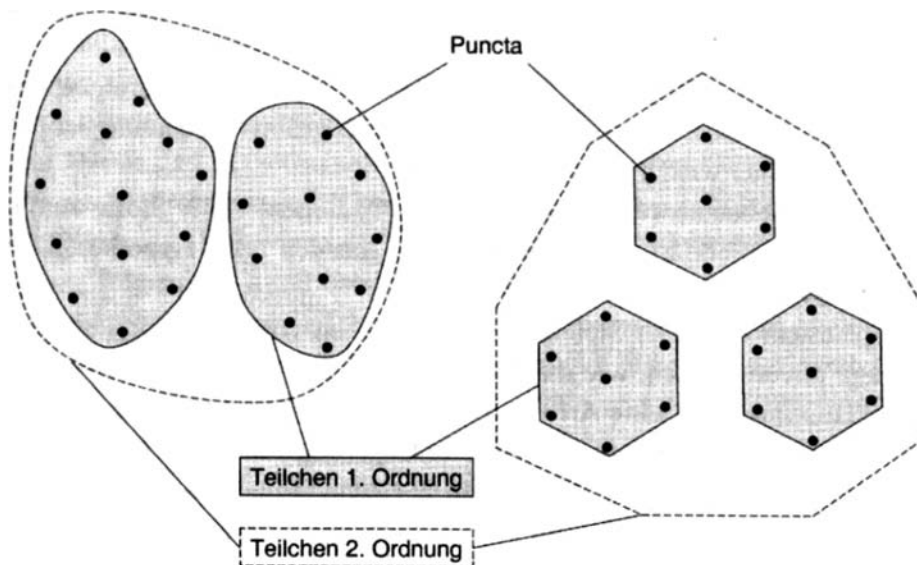


Abb. 7: Beispiele für Partikel 1., 2. ... Ordnung, die durch Agglomeration von *puncta* entstehen können und welche als Anfangsstufen für den Aufbau amorpher Stoffe (links) bzw. kristalliner Strukturen (rechts) denkbar sind (schematisch).

In der Tat zeigen schon die einfachsten, aus zwei (Abb. 8) oder drei (Abb. 9) *puncta* bestehenden Partikel einige für den Aufbau der Materie wesentliche Eigenschaften. Bevor wir sie diskutieren, sind zwei Bemerkungen angebracht: (a) Das Kraftfeld, mit dem ein aus kleineren Einheiten zusammengesetztes Teilchen nach außen wirkt, bestimmt Boscovich durch lineare Superposition der Kraftfelder seiner Bestandteile⁴⁴. So ergibt sich z.B. das Kraft- bzw. Potentialfeld (s. [b]) des 2-Punkt Partikels in Abb. 8 aus der vektoriellen Summe der *lex virium* – Kräfte seiner beiden *puncta*. Im Allgemeinen bewirkt die Superposition, dass der Kraftverlauf außerhalb eines Teilchens verschieden ist von dem seiner Komponenten⁴⁵, d.h. die Wechselwirkung zwischen Partikeln wird nicht durch die ausschließlich für die *puncta* geltende *lex virium* beschrieben – eine Tatsache⁴⁶, die bei vielen Anwendungen und Interpretationen der „Theoria“ nicht erkannt wurde und wird. (b) Die im Folgenden gebrachten Vergleiche einiger Aussagen der Theoria mit heute bekannten Eigenschaften von Bindungskräften werden illustrativer, wenn man die Wechselwirkung zwischen den *puncta* oder den Teilchen nicht durch Kräfte, sondern durch ihre Potentiale beschreibt, wie dies in der modernen Physik üblich ist. Kräfte sind Vektoren, haben also eine Größe und eine Richtung. Für sog. konservative Kräfte F (wie im vorliegenden Fall) kann man eine skalare Größe angeben, das Potential U , dessen negativer Gradient die Kraft ist: $F = -\text{grad}$

⁴⁴ *De viribus vivis*, § 59: „Ubi autem binae [vires] combinatur in quavis distantia secundum quamvis directionem, vim mutuum exprimi per summam ordinarium, quae pertinet ad particulam utramque in iis distantibus, et directionibus“.

⁴⁵ *De viribus vivis*, § 59: „Et poterunt majores particulae componi ex minoribus ita, ut dissimillimas habeant virium leges, et ex his aliae majores gradatim pariter, ut libuerit, dissimiles“.

⁴⁶ Die oft gravierenden Veränderung, welche die resultierenden Kräfte beim Aufbau der Partikelhierarchie (s. Abb. 2 rechts) erfahren, sind der Grund, dass Boscovich die Bemühungen aufgeben musste, aus makroskopischen Eigenschaften auf die Form der „curva Boscovichiana“ zu schließen (näheres dazu s. Hans ULLMAIER, *Puncta, particulae et phaenomena*, Hannover [2005], 60 und 92ff.).

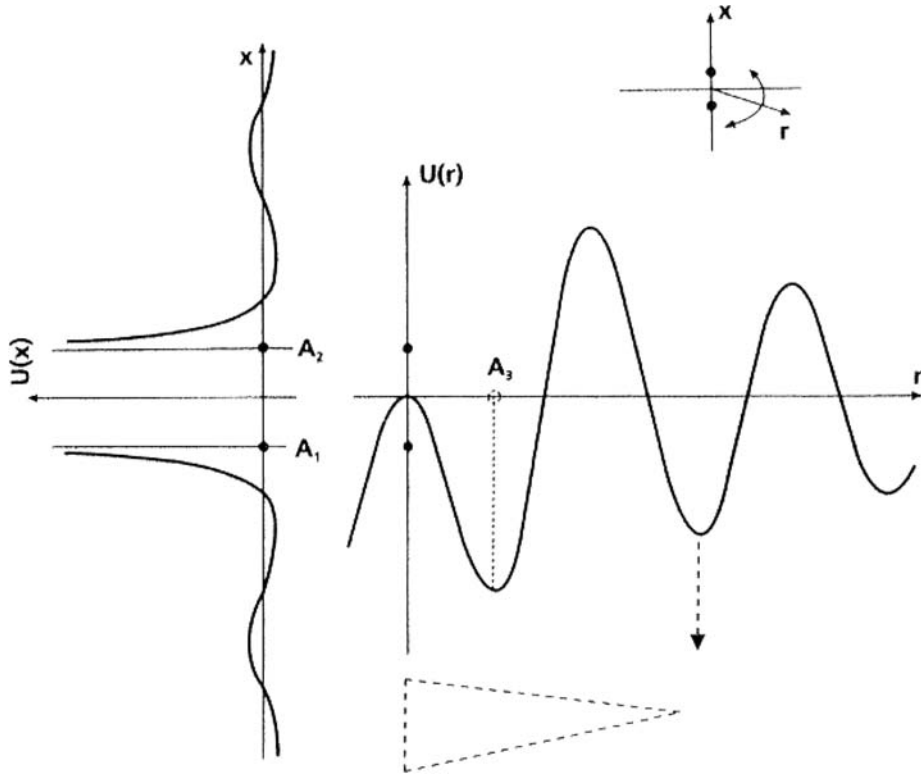


Abb. 8: Verlauf des Potentials U , das die Wechselwirkung eines aus zwei *puncta* A_1 und A_2 bestehenden Agglomerats mit einem dritten *punctum* in der Entfernung r bzw. x beschreibt. Die Strecke A_1-A_2 entspricht dem kleinsten Abstand der „Kohäsion“. Der Potentialverlauf entlang der Verbindungsline A_1-A_2 (x) und senkrecht dazu (r) ist sehr unterschiedlich, d.h. das Kraftfeld eines 2-er Partikels ist stark anisotrop. Der eingezeichnete Punkt A_3 markiert die stabilste Anordnung der *puncta* in einem 3-Punkt Partikel. Es sind aber auch metastabile Konfigurationen möglich, wo A_3 in einem der weiter vom Ursprung entfernten Potentialminima sitzt (wie z.B. an der Spitze des gestrichelt gezeichneten Dreiecks unten).

U . Boscovichs Kräfte wirken immer in Richtung der Verbindungsline (Abszissen x , r , oder z) der Teilchen, die obige Relation vereinfacht sich dann zu $F = -dU/dx$ (bzw. dr oder dz). Wenn man U als potentielle Energie auffasst, entsprechen die ‚kohäsiven‘ Nullstellen der Kraft (*limites cohaesionis*) den Energieminima im Potentialbild, markieren also (meta)stabile Gleichgewichtslagen.

Die Abb. 8 zeigt den Potentialverlauf für ein Partikel, das aus 2 *puncta* A_1 und A_2 im kleinstmöglichen stabilen Gleichgewichtsabstand besteht. Im linken Bildteil ist das Potential $U(x)$ in Richtung der Verbindungsline A_1-A_2 aufgetragen, im rechten $U(r)$ in den Richtungen senkrecht dazu (s. Inset rechts oben). Während das Kraft- bzw. Potentialfeld eines *punctums* isotrop, d.h. für alle Raumrichtungen gleich ist, sind $U(x)$ und $U(r)$ völlig verschieden – das 2-Punkt-Partikel hat also ein stark anisotropes Kraftfeld. Damit hat Boscovich zumindest qualitativ die Richtungsabhängigkeit der Bindungskräfte in kondensierter Materie (Abb. 4) zu einer Zeit vorweggenommen, als die zeitgenössische Physik und Chemie weit davon entfernt waren, solche Fragen überhaupt zu stellen, geschweige denn Antworten darauf zu suchen.

Ähnliches gilt für weitere Schlussfolgerungen, die sofort aus den Potentialverläufen in Abb. 8 gezogen werden können: (i) Die stabilste Struktur eines 3-Punkt-Partikels wird ein aus A_1 , A_2 und A_3 gebildetes gleichseitiges Dreieck sein, denn dann befinden sich alle *puncta* in den tiefsten Potentialtälern. (ii) Es sind aber auch andere, metastabile Strukturen möglich, wie z.B. das gestrichelt gezeichnete spitzwinkelige Dreieck, wo A_3 in einem immer noch relativ tiefen Potentialminimum sitzt. Heute wissen wir, dass metastabile Anordnungen von Atomen oder Molekülen so häufig auftreten, dass sie fast schon die Regel und nicht die Ausnahme sind. Beispiele sind die meisten Stoffe der lebenden Materie, amorphe Gläser, viele technische Legierungen (Stahl!), die verschiedenen Modifikationen des Kohlenstoffs usw. Die „klassische“ Atomlehre bot dafür keine Erklärungsmöglichkeit: Diamant, Graphit und die Fullerene bestehen z.B. alle aus Kohlenstoff, also aus Atomen mit identischen Eigenschaften. Warum sollten sie dann verschiedene Strukturen bilden? (iii) Welche Teilchenanordnung sich einstellt, hängt nicht nur von den bisher betrachteten energetischen Verhältnissen ab, sondern auch von den Bewegungsmöglichkeiten⁴⁷ der Teilchen in ihrem Verbund. So wird die Bildung des 3-er-Partikels in Abb. 8 nicht durch Annäherung von A_3 entlang der r-Richtung erfolgen, wo so hohe Potentialberge überwunden werden müssen, dass die „Agitation“⁴⁸ des *punctums* in der Regel nicht ausreicht. Es wird sich eher entlang der Richtung x bewegen bis es in die Nähe der starken Abstoßung durch A_1 oder A_2 gerät, dann die Richtung wechseln und schließlich in eine der tiefen Potentialmulden entlang r „fallen“. Boscovich ist in der „Theoria“ mit einiger Ausführlichkeit (*Pars II*, § 190ff.) auf die Bewegungsmöglichkeiten der Teilchen eingegangen, besonders auf die Oszillationen, die sie um Positionen in verschiedenen Abständen vom Ursprung der Kraftkurven (Abb. 6) ausführen. Die Resultate seiner Überlegungen verwendet er zur qualitativen Erklärung von „*phaenomena*“, wie z.B. Schmelzen, Feuer und chemische Reaktionen („Theoria“, *Pars III*, § 459ff.)

Schon bei den 3-Punkt-Partikeln wird die Zahl der möglichen Anordnungs- und Bewegungsmuster so groß, dass die resultierenden inneren Strukturen und Formen unüberschaubar werden. Boscovich bricht deshalb die Analyse bei den 4-Punkt-Partikeln ab („Theoria“, *Pars II*, § 238). Wir begnügen uns hier mit der Aufzählung einiger Schlussfolgerungen, die in qualitativer Übereinstimmung mit den modernen Erkenntnissen der Physik der kondensierten Materie stehen: (i) Die resultierenden Kraftfelder ermöglichen periodische bzw. aperiodische Teilchenanordnungen und machen damit die Existenz von Kristallen bzw. amorphen Festkörpern und Flüssigkeiten plausibel (Abb. 7). (ii) Mit zunehmender Teilchengröße nimmt die Stärke der Wechselwirkungskräfte ab (wie am Beispiel in Abb. 9 illustriert) und die Bindungskräfte in den Teilchen sind größer als jene zwischen ihnen. Diese Tendenzen stimmen mit unseren heutigen Erkenntnissen überein: Die Quarks in einem Proton oder Neutron sind so stark gebunden, dass sie bisher noch nicht isoliert werden konnten. Die für die Zertrümmerung von Atomkernen erforderlichen Energien sind i.A. sehr hoch, für das Aufbrechen von Atomen, Molekülen, makroskopischen Körpern werden sie zusehends kleiner, bis hin zu den schwachen Gravitationskräften⁴⁹, welche die astronomischen Gebilde und Gesetze dominieren. (iii) Qualitativ bleibt der oszillatorische Potentialverlauf der *lex virium* häufig (wie im Beispiel der Abb. 9) auch bei den Partikeln

⁴⁷ Auf Bewegungsmoden der *puncta* in kleinen Partikeln geht Boscovich u.a. in der *Theoria*, *Pars II*, § 230ff. ein. Ein Beispiel erläutert Stipe Kutleša in Kap. 5.1 seines Beitrages zu diesem Band.

⁴⁸ Als Ursache für die *agitatio* zieht Boscovich chemische Reaktionen, äußere mechanische Kräfte und vor allem Wärme/Hitze in Betracht. Er vertritt damit (wie Newton) die moderne Ansicht, dass Wärme keine Substanz, sondern der Ausdruck heftiger innerer Bewegung von Teilchen ist (*Theoria*, *Pars III*, § 507).

⁴⁹ Natürlich sind die im Weltraum wirkenden Kräfte riesengroß. Das liegt aber an den immensen Massen der Himmelskörper. Bezogen auf die Masseneinheit ist die Gravitation – verglichen mit den anderen drei elementaren Kräften – eine sehr schwache Kraft (s. Abb. 5).

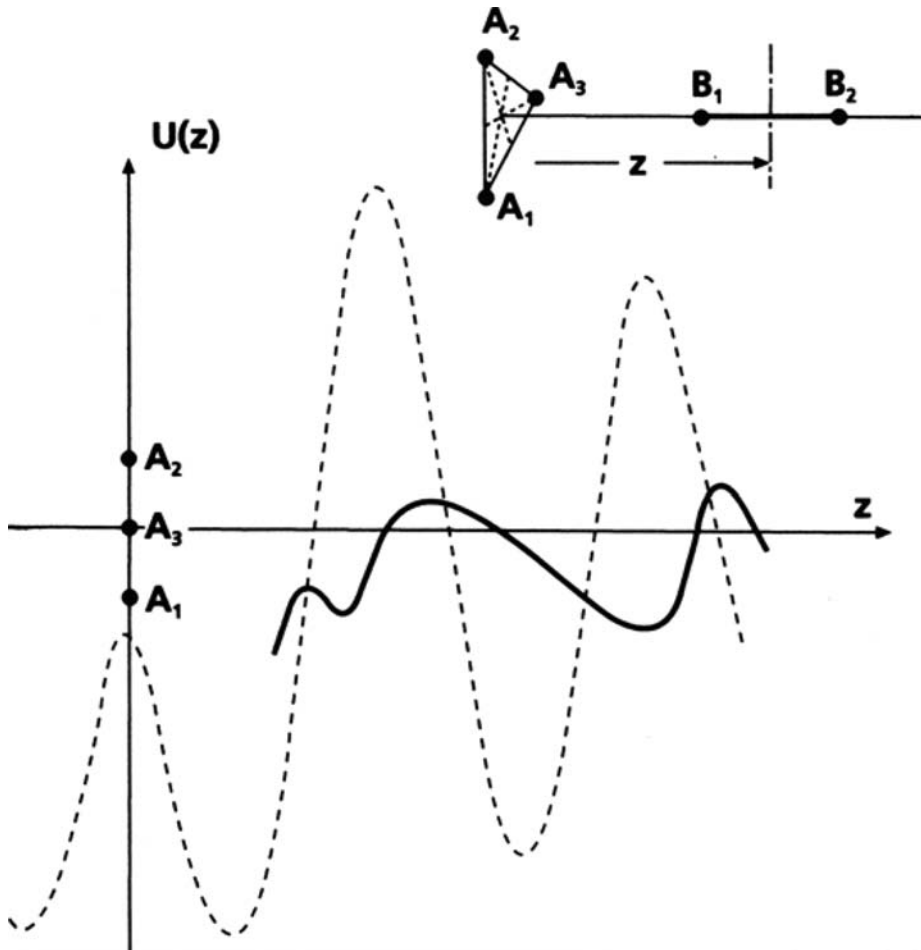


Abb. 9: Wechselwirkungspotential eines 3-Punkt Partikels mit einem 2-Punkt Partikel (durchgezogene Kurve) für die im Bild oben rechts skizzierte Konfiguration. z ist der Abstand des Mittelpunktes des 2-Punkt Partikels vom Zentrum des 3-Punkt Teilchens. Zum Vergleich ist die viel stärkere Wechselwirkung des 3-Punkt Teilchens mit einem einzelnen *punctum* als gestrichelte Kurve angegeben.

erhalten. Es gibt also nicht nur bei den *puncta*, sondern auch bei den Teilchen höherer „Ordnung“ Abstoßung, Anziehung und *limites cohaesionis*. Boscovich macht davon in *Pars III* der „Theoria“ (*Applicatio „Theoria“ e ad Physicam*) ausführlich Gebrauch, um ein breites Spektrum von Materieeigenschaften zu erklären. Es reicht von relativ einfachen *phaenomena*, wie Gewicht, Elastizität, mechanische Festigkeit, Duktilität und Viskosität über chemische Affinität und Löslichkeit, Elektrizität und Magnetismus, Licht und Feuer bis hin zu Sinneseindrücken wie Riechen, Tasten, Schmecken und Hören.

Ich möchte hier nur zwei im 18. Jh. viel diskutierte allgemeine Fragen erwähnen, wo die *Theorie* erstmals Antworten geben konnte, die bis heute gültig sind. In § 366–370 zeigt Boscovich, dass Materie von Partikeln durchdrungen werden kann, wenn diese ausreichend hohe Geschwindigkeiten (d.h. kinetische Energien) haben. Er beseitigt damit das Dogma

von der Undurchdringbarkeit der Materie und widerspricht jenen Interpretationen seiner „Theoria“, welche die Undurchdringbarkeit der *puncta* mit jener der Materie verwechseln. Die zweite Frage betrifft die damals verwunderliche Tatsache, dass die Härte und Festigkeit von Stoffen nicht mit ihrer Dichte (Schwere) korreliert. Jeder wusste, dass es harte (Diamant) und weiche (Tal) leichte Materialien, und harte (Wolframertz) und weiche (Gold, Blei) schwere Materialien gibt, oder dass weichgeglühtes Eisen durch Hämmern stark gehärtet werden kann, ohne dass sich dabei seine Dichte merklich ändert. Die „Theoria“ liefert dafür eine zumindest qualitative Erklärung durch die Erkenntnis, dass die verschiedenen Eigenschaften der Stoffe auf Unterschieden zwischen ihren Partikeln beruhen, die wiederum hauptsächlich durch die verschiedenen Konstellationen ihrer *puncta* verursacht werden.

Bei der Anwendung der „Theoria“ auf die oben angesprochene Vielfalt von *phaenomena* muss sich Boscovich aus vielerlei Gründen auf qualitative und sehr vage Aussagen beschränken. In einigen kam er den modernen Erkenntnissen sehr nahe, viele andere haben sich als unzutreffend erwiesen und muten aus heutiger Sicht eher befremdlich an. Dies gilt besonders für seine Interpretationen physiologischer Prozesse, deren komplexe Abläufe ja selbst heute erst ansatzweise geklärt sind. Wir können uns deshalb der Einschätzung anschließen, die einer der Biographen⁵⁰ Boscovichs über dessen Bemühungen äußert, Materialeigenschaften in so umfassender Weise zu erklären: „In 1758 few quantitative data were available and this part of the „Theoria“ could only be inspired guesswork. That is what his applications are: guesses, sometimes rendered valid up to a point, by his powerful conception of fundamental atomic structure as arrangements of points. In some of his applications [...] he came close to the present ideas; in others such as those concerned with light, heat, electricity, and magnetism his guesses display no great prevision – they are what could be expected in 1758“.

Man könnte Boscovich vorwerfen, nicht erkannt zu haben, dass zu seiner Zeit die Voraussetzungen für sein ambitiöses Vorhaben, eine umfassende Theorie aller Naturphänomene zu schaffen, nicht gegeben waren. Dann würden wir uns jedoch dabei ertappen, heutige Maßstäbe und Wortbedeutungen auf die Zeit vor 250 Jahren zu übertragen. Eine naturwissenschaftliche Theorie im modernen Sinne muss neue Phänomene voraussagen können und muss falsifizierbar sein⁵¹. Beide Kriterien kann die „Theoria“ aus mehreren Gründen⁵² nicht erfüllen, und wir würden sie heute deshalb eher als Hypothese oder Spekulation (im guten Sinne⁵³) bezeichnen. Ferner scheint das Wort *explicare*, das Boscovich immer wieder verwendet („Meine Theorie erklärt ...“) in der Wissenschaftsterminologie des 18. Jh. eine weniger quantitative Bedeutung gehabt zu haben als jetzt (heute würden wir statt dessen sagen: „Meine Hypothese macht plausibel ..., ist kompatibel mit ...“). Wir haben also keinen Grund, Boscovich wegen seiner heute manchmal als „Überstrapazieren“ empfundenen Anwendung der „Theoria“ auf komplexe Phänomene zu kritisieren⁵⁴. Seine Naturphilosophie war vielmehr ein mutiger und nachhaltiger Schritt auf dem Weg zum modernen Verständnis der Mikrostruktur und der Eigenschaften der Materie. Die Gründe hierfür werden im folgenden letzten Kapitel rekapituliert.

⁵⁰ Lancelot Law Whyte, Boscovich's Atomism, In: Roger Joseph Boscovich (Ed. L.L. Whyte), London (1961), 102.

⁵¹ Karl R. Popper, Logik der Forschung, Tübingen (1969).

⁵² Näheres s. z.B. Ullmaier (Anm. 45) 91–95, 113–115.

⁵³ Früher hatte dieser Begriff einen guten Klang, denn unter dem lat. *Speculatio* (= Auskundschaften) verstand man ein Denken, das die unmittelbare Erfahrung übersteigt und versucht, die fundamentalen Prinzipien der Wirklichkeit zu ergründen.

⁵⁴ Während Boscovichs Vorgehen historisch bedingt und notwendig war, sind die – sicher gut gemeinten – Überinterpretationen der Theoria durch einige moderne Autoren, welche in ihr schon Quark-Confinement, Pauli Prinzip, Quantenfeldtheorie, Existenz von Makromolekülen, etc. enthalten sehen, eher hinderlich, die wahre Bedeutung der Theoria zu erkennen und zu würdigen.

4. Abschließende Bemerkungen

Boscovich war der erste, der das Wagnis unternahm, eine allumfassende Erklärung der materiellen Welt – beginnend bei ihren elementarsten Bausteinen bis zu ihren komplexesten Phänomenen – zu liefern. Er war sich der Größe und des Risikos seiner Anstrengungen offenbar von Anfang an bewusst, denn schon 1745, in der Einleitung zu *De viribus vivis*, sagt er: „*At quid nocebit tentasse. Si res minus prospere cesserit, licebit saltem usurpare vulgatissimum illud: vel contendisse decorum est*“⁵⁵. Wir können diesen Sätzen – besonders dem letzten – nur voll zustimmen. Nach zehn Jahren intensiver Arbeit wähnt sich Boscovich offenbar am Ziel, denn selbstbewusst beginnt er sein Hauptwerk *Philosophiae naturalis* „Theoria“ in § 1 mit der Feststellung: „Die folgende Theorie [...] stellt ein System dar, das in der Mitte zwischen dem von Leibniz und dem von Newton liegt; es hat sehr viel gemein mit beiden, und unterscheidet sich sehr stark von beiden; und es ist immens viel einfacher als beide, es ist unzweifelhaft in einem wunderbarem Maße geeignet, alle allgemeinen Eigenschaften von Körpern und bestimmte spezielle Eigenschaften durch strengste Beweisführung herzu-leiten“. Der letztgenannte Anspruch⁵⁶ kann heute, nach 250 Jahren intensiver Erforschung der Materie, natürlich nicht mehr gelten, und wir haben einige Gründe hierfür kurz erwähnt.

Wurden deshalb die meisten speziellen Aussagen und Anwendungen der „Theoria“ in den Jahrzehnten nach ihrer Veröffentlichung in zunehmendem Maße obsolet, diente Boscovichs Naturphilosophie vielen seiner Nachfolger im 19. und frühen 20. Jh. – bewusst oder unbewusst⁵⁷ – als Ideengeber und Strategie für ihre bahnbrechenden Arbeiten, die zu großen Fortschritten in der Physik des Mikrokosmos geführt haben. Besonders nachhaltige Wirkung hatten die folgenden qualitativen Aspekte und Aussagen, die Boscovichs Genie erstmals formulierte:

- Zur Erforschung und Beschreibung des Mikrokosmos müssen wir uns vom Primat der Sinneseindrücke lösen und unsere Fähigkeit zur **Abstraktion** einsetzen, auch wenn wir damit von „anschaulichen“ Erklärungen Abschied nehmen müssen. Heute ist die Mathematisierung der theoretischen Physik vollkommen und unsere Versuche, „Bilder“ von ihren Aussagen zu machen, sind meist unzulänglich oder manchmal sogar irreführend.
- Die *puncta* als **einheitliche punktförmige Elementarteilchen** ohne innerer Struktur (die ja einer erneuten Erforschung und Erklärung bedürfte), die dadurch ununterscheidbar und beliebig austauschbar sind, entsprechen durchaus den Zielvorstellungen der gegenwärtigen „Grand Unification“-Versuche (ausgenommen die Stringhypothesen).
- Die lückenlose Erfüllung des Raumes mit den von den *puncta* ausgehenden Kräften ersetzte Newtons ominösen leeren Raum (*horror vacui*) als Übertragungsmedium von Fernkräften und weist auf den modernen **Feldbegriff**.

⁵⁵ „Aber was kann es schaden, wenn man es versucht? Wenn die Sache weniger gelungen zu Ende kommt, wird es zumindest erlaubt sein, von jenem bekannten Spruch Gebrauch zu machen: Es ist eine Ehre, sich bemüht zu haben“.

⁵⁶ Am Ende der *Theoria*, § 522, relativiert Boscovich selbst diesen Anspruch: „... dass die Eigenschaften untersucht werden sollen, obwohl aus ihrer Aufdeckung niemals die innerste Quelle der Eigenschaften erreicht werden kann; dass nichts als leere Worte erzeugt werden können, wenn fundamentale Eigenschaften untersucht werden. [...] Obwohl wir die intrinsische Natur der Körper nicht ausspähen können, dürfen die Bemühungen nicht aufgegeben werden, die Natur zu untersuchen“, und später (§ 523): „Ich nehme an, dass die Erlangung von Wissen über die Struktur spezifischer Körper auch in Zukunft äußerst schwierig sein wird; dass sie ganz und gar unmöglich sein wird, wage ich nicht zu behaupten“.

⁵⁷ Kelvin sagt dazu in seinen *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and Wave Theory of Light* (Lecture XVII, 300/301, London 1904): „... that the truth of nature can be explained by a proper law of force according to the Boscovichian doctrine which we now accept (many of us without knowing that we do so) as the fundamental hypothesis of physics and chemistry“.

- Die *puncta* und die Form des Kraftgesetzes beseitigten das Dogma von der Undurchdringbarkeit von Materie und, noch bedeutsamer, ermöglichten stabile Lagen der *puncta* bei Abständen, wo die Kraft von Abstoßung zu Anziehung wechselt.
- Diese *limites cohaesionis* sind die Voraussetzung für die Bildung von Punkttagglomeraten (*particulae*) mannigfaltigster innerer Anordnung, Größe und Form. Damit wurden die vielen verschiedenen Atome der „klassischen“ Atomlehre abgelöst durch einheitliche Elementarteilchen als Bestandteile von Partikeln verschiedener Struktur. Heute wissen wir, dass die Eigenschaften mikroskopischer Teilchen (Hadronen → Atomkerne → Atome → Moleküle bzw. Festkörperelemente) in der Tat entscheidend durch die Struktur bzw. räumliche Anordnung ihrer Bestandteile bestimmt werden.
- Durch die Postulierung identischer Elementarteilchen und eines universellen Kraftgesetzes stand Boscovich am Anfang des Strebens nach einer Vereinheitlichung der elementaren Bausteine der Materie und der Kräfte, die sie zusammenhalten⁵⁸. In den 250 Jahren, die seit der Formulierung der „Theoria“ vergangen sind, wurden die Anstrengungen zur Verwirklichung dieses Traumes durch viele Erfolge belohnt. Ein Ende, an dem einheitliche Elementarteilchen und eine universelle Kraft stehen, ist jedoch nicht in Sicht (s. unten).

Der letzte Punkt verführt zu einem Vergleich der Situation der Physik zur Zeit Boscovichs und der von heute. Vor etwa 250 Jahren begannen die Wissenschaftler die Denk- und Arbeitsweise und das mathematische Rüstzeug, das von ihren Vorgängern Galilei und Kepler bzw. Newton und Leibniz und deren Zeitgenossen geschaffen worden war, so erfolgreich zur Beschreibung einer Vielfalt von speziellen physikalischen Fragestellungen anzuwenden, dass die Naturwissenschaften über eine lange Zeitspanne vom mechanistisch-deterministischen Weltbild beherrscht wurden. Hinsichtlich „Vereinheitlichung“ war die Bilanz in dieser Periode scheinbar positiv: Mit den Maxwellschen Gleichungen (1861–1864) gelang die Vereinigung der elektrischen und magnetischen Kraft und die Vielzahl der verschiedenartigen Atome konnte auf nur zwei Elementarbausteine – Elektronen und Protonen – reduziert werden.

Der nach der Wende vom 19. zum 20. Jh. einsetzende Wechsel von der „klassischen“ zu der von Quantenmechanik und Relativitätstheorie dominierten „modernen“ Physik brachte vorerst keine Änderung der Situation. Bald wurden jedoch mit der starken und schwachen Wechselwirkung zwei neue elementare Kräfte entdeckt und die Möglichkeit, Teilchenreaktionen bei immer höheren Energien zu untersuchen, führte zu einer fast inflationären Zunahme von ‚elementaren‘ Teilchen. In den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts führten Fortschritte in der Elementarteilchentheorie und dadurch angeregte gezielte Experimente an Hochenergie-Beschleunigern zu einer Trendwende: Aufbauend auf den Prinzipien der äußerst erfolgreichen Quantenelektrodynamik wurden analoge Theorien für die starke und schwache Wechselwirkung entwickelt. Bald darauf gelang mit der inzwischen experimentell bestätigten Theorie der sog. elektroschwachen Wechselwirkung die Vereinigung der elektromagnetischen und der schwachen Kraft. Mit Hilfe der Gruppentheorie, einem Teilgebiet der Mathematik, deren zugrundeliegendes Prinzip der Begriff der Symmetrie ist (s. Anm. 35), konnte der ‚Teilchenzoo‘ geordnet und auf 6 Quarks und 6 Leptonen als ‚elementare‘ Teilchen zurückgeführt werden. Die Kräfte zwischen ihnen werden durch

⁵⁸ John David BARROW schreibt dazu In: *Theories of Everything*, Oxford (1990): „One of the most remarkable and neglected figures in the history of modern European science was Roger Boscovich. [...] he was the first to envisage, seek, and propose a unified mathematical theory of all forces of Nature. His continuous force law was the first scientific Theory of Everything. Perhaps, in the eighteenth century, only a generalist like Boscovich, who successfully unified intellectual and administrative activities in every area of thought and practice would have the presumption that Nature herself was no less multicultural“.

sog. Austauschteilchen vermittelt, was dazu führt, dass jede Kräftetheorie zugleich eine Teilchentheorie ist. Zusammengenommen ergeben diese Erkenntnisse ein aktuelles Bild der Materie, das als Standardmodell bezeichnet wird (Abb. 5).

Bisher gibt es keine experimentellen Ergebnisse, die dem Standardmodell widersprechen, vielmehr liefert es eine konsistente und präzise Beschreibung aller bislang untersuchten Teilchenreaktionen. Es gilt deshalb für den derzeit zugänglichen Energiebereich als gut gesichert, obzwar noch einige Fragen offen sind, wie z.B. die nach der Existenz eines Teilchens, das von P. Higgs postuliert wurde, um die Teilchenmassen im Standardmodell erklären zu können (man hofft, dieses Higgs-Boson im LHC Beschleuniger im CERN nachweisen zu können). Ermutigt durch die erfolgreiche Beschreibung der elektromagnetischen, schwachen und starken Kraft durch die entsprechenden Quantenfeldtheorien und die Vereinigung der beiden ersten, sind die Physiker und Mathematiker anscheinend auf gutem Wege, eine ‚Große‘ einheitliche Theorie (GUT = Grand Unified Theory) zu entwickeln, welche die elektroschwache und die starke Wechselwirkung miteinander verknüpft. Einige ihrer Voraussagen, wie z.B. die extrem lange Lebensdauer der Protonen, wurden inzwischen indirekt experimentell verifiziert. Trotz dieser beeindruckenden Erfolge harren noch viele und große Probleme einer Lösung. Hier nur einige Beispiele:

- Eine direkte experimentelle Bestätigung einer GUT erscheint aus heutiger Sicht unmöglich. Während die Energie für den Nachweis elektroschwacher Teilchen bei 10^{11} eV liegt, wäre zur direkten Beobachtung der ‚Großen‘ Vereinigung eine Energie von 10^{24} eV erforderlich – ein Wert, der um viele Größenordnungen höher liegt, als mit erdgebundenen Beschleunigern erreicht werden kann (zum Vergleich: der Large Hadron Collider LHC im CERN mit 27 km Umfang und Baukosten von etwa 10 Mrd. € wird Energien von 14 TeV, also ca. 10^{13} eV erreichen).
- Das Standardmodell macht für sehr hohe Energien ($> \text{ca. } 10^{12}$ eV) unsinnige Voraussagen. Außerdem enthält es so viele „elementare“ Teilchen (Abb. 5) und freie Parameter, dass es wohl nicht die ultimative einheitliche Theorie sein kann.
- Die Gravitation hat sich bisher beharrlich einer quantenfeldtheoretischen Beschreibung entzogen. Von ihrem hypothetischen Austauschteilchen, in Anlehnung an die anderen Kräfte Graviton benannt, fehlt noch jede Spur.
- Es ist noch kein Mechanismus bekannt, welcher im sehr frühen Universum die Asymmetrie zwischen „unserer“ Materie und der Antimaterie erzeugt hat.
- Woraus bestehen die „Dunkle Materie“ und die „Dunkle Energie“, welche die Astrophysiker aus ihren neuesten Messungen folgern, und die zusammen 95 % des Materie- und Energieinhaltes unseres Universums ausmachen sollen?

Diese und andere ungelöste Fragen hielten einige Theoretiker nicht davon ab, an einer „Weltformel“ oder „Theory of Everything“ (TOE) zu arbeiten, die auch die Gravitation einschließt. Nach anfänglichem Optimismus, der von den Medien kräftig geschürt wurde, ist es um diese Bemühungen wieder ruhiger geworden und es mehren sich die Zweifel⁵⁹, ob das Ziel erreicht werden kann, das z.B. Stephen Hawking, eine tragische Ikone dieser Entwicklung, vorgab⁶⁰: „Wenn wir jedoch eine vollständige Theorie entdecken, dürfte sie nach einer gewissen Zeit in ihren Grundzügen für jedermann verständlich sein [...]. Dann werden wir uns alle – Philosophen, Naturwissenschaftler und Laien – mit der Frage auseinandersetzen können, warum es uns und das Universum gibt. Wenn wir die Antwort auf

⁵⁹ Siehe David LINDLEY, Das Ende der Physik. Vom Mythos der Großen Vereinigung, Basel (1994) oder, mit Schwerpunkt auf das Verhältnis Naturwissenschaften – Religion, Hans KÜNG, Der Anfang aller Dinge, München (2005). Hinweise zu Boscovichs Meinung zur Zukunft der Erforschung der Materie geben die in Anm. 56 zitierten Sätze.

⁶⁰ Stephen HAWKING, Eine kurze Geschichte der Zeit, Reinbek (1988) 218.

diese Frage fänden, wäre dies der endgültige Triumph der menschlichen Vernunft – denn dann würden wir Gottes Plan kennen“.

Anstatt mich auf Diskussionen dieser Art einzulassen, möchte ich zum Abschluss meines Beitrages eine Bemerkung zur Methode der Materieforschung machen. Seit Galilei basieren fast alle Erfolge und Fortschritte der Naturwissenschaften lange Zeit auf zwei Pfeilern: (1) Dem Wechselspiel Experiment \leftrightarrow Theorie, und (2) der Methode der Analyse/Reduktion, d.h. des Zerteilens komplexer Gebilde in einfachere (wie für die Teilchenphysik in der mittleren Spalte der Abb. 2 dargestellt). Auf vielen Feldern wird dieses Vorgehen auch in Zukunft zu Erfolgen führen. Auf anderen, die darauf beruhen, dass das Ganze mehr ist als die Summe seiner Bestandteile, versagt die Methode der Analyse/Reduktion und wird in zunehmendem Maße durch eine eher holistische Betrachtungsweise ersetzt oder zumindest ergänzt (Stichwort: ‚Komplexe Systeme‘, die im Allgemeinen der Selbstorganisation fähig sind, ein Begriff, der mit Konzepten wie ‚dissipative Strukturen‘, ‚Hyperzyklus‘, ‚Synergetik‘, usw. verknüpft ist). Das wichtigste Beispiel dafür sind sicherlich die Lebenswissenschaften, aber es wäre auch lächerlich, beispielsweise einen Tornado oder den Golfstrom mit Hilfe von Quarks verstehen zu wollen.

In der zukünftigen Elementarteilchenphysik ist es jedoch eher der Pfeiler (1), der wegbrechen wird. Oben wurde schon erwähnt, dass eine direkte Beobachtung der Vereinigung der elektroschwachen mit der starken Kraft bei einer Energie zu erwarten ist, die für erdgebundene Beschleuniger unvorstellbar hoch ist. Für die vollständige Vereinigung („Quantengravitation“) wäre die entsprechende Energie noch zehntausend Mal höher (mit der heute verfügbaren Technik würde ihre Erreichung einen Ringbeschleuniger mit 1000 Lichtjahren Umfang erfordern!).

Es könnte also sein, dass die Elementarteilchenphysiker in nicht allzu ferner Zukunft in eine ähnliche Lage kommen, in der Boscovich vor 250 Jahren war. Wie er (s. rechte Spalte in Abb. 2) müssten sie dann – wenn auch aufgrund des heute verfügbaren Wissens auf ganz anderer Ebene – nach einem auf rationalen Annahmen beruhenden mathematischen System suchen, welches, beginnend bei den Grundbausteinen, durch Synthese bis hinauf zu den experimentell zugänglichen Teilchen aufsteigt⁶¹. Doch so wie Boscovich vor 250 Jahren das Elektronenmikroskop und den Teilchenbeschleuniger nicht vorausahnen konnte, wissen auch wir nicht, ob eines Tages etwas Neues entdeckt wird, was das oben skizzierte Szenario verändert und damit das schon wiederholt prognostizierte „Ende der Physik“ wieder in die fernere Zukunft verschiebt.

Obwohl neue naturwissenschaftliche Entdeckungen und Ideen oft überraschend erscheinen, basieren sie immer und ausnahmslos auf vorangegangenen Erkenntnissen. Boscovichs Naturphilosophie war eine wichtige Sprosse auf der Entwicklungsleiter unseres Wissens. Wer könnte dies besser bestätigen als der große Physiker Niels Bohr: *Unsere Wertschätzung für die Zielstrebigkeit von Boscovichs großartigem wissenschaftlichen Werk und die zugrunde liegende Inspiration wächst umso mehr, je mehr wir erkennen, in welchem Ausmaß sie den Weg für spätere Entwicklungen bereiteten. [...] Im Verfolg solch neuer Entwicklungen ist es unerlässlich, dass wir nicht nur die Augen für unvorhersehbare Entdeckungen offen halten, sondern dass wir uns auch immer bewusst sind, auf den Fundamenten zu stehen, welche die Pioniere der Wissenschaft errichtet haben*⁶².

⁶¹ Wenn die Synthese vorher steckenbliebe, die experimentelle Überprüfbarkeit also ausfallen würde, welche Kriterien blieben dann für die Wahrheitsnähe solch einer allumfassenden „Theorie“? Ihre mathematische Strenge und Schönheit?

⁶² Übersetzung aus einem in Englisch gehaltenen Diskussionsbeitrag von Niels BOHR In: Actes du Symposium international „Ruder Bošković“ (1958 in Dubrovnik), Belgrad – Zagreb – Ljubljana (1959), 28 und 29.

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag ist ein Versuch, die Aussagen in Boscovichs Naturphilosophie mit dem heutigen Bild der Materie zu vergleichen. Nach einer kurzen Einleitung wird die Geschichte der Erforschung der Mikrostruktur von Leukipps Atomen, deren Unteilbarkeit an der Wende vom 19. zum 20. Jh. aufgegeben werden musste, bis zum derzeitigen ‚Standardmodell‘ der Elementarteilchenphysik rekapituliert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung bis zum Bohrschen Atommodell, während der nachfolgende Zeitraum wegen der Fülle der Ergebnisse und ihrem offenbar notwendigen vollständigen Mathematizismus nur kurz behandelt werden kann. Danach werden die Grundlagen und die wichtigsten Aussagen von Boscovichs *Philosophiae naturalis* „Theoria“ dargestellt und erörtert, warum sie keine Theorie im heutigen Sinn ist und ihre Ergebnisse nur rein qualitativer Art sein konnten. Trotzdem war die „Theoria“ ein unverzichtbarer Schritt auf dem Weg der Erforschung des Mikrokosmos, und diente vielen Physikern und Chemikern im 19. und frühen 20. Jh. als Ideengeber und Strategie für ihre bahnbrechenden Arbeiten. Beispiele für Aspekte, die Boscovich Genie erstmals formulierte, sind: die Notwendigkeit, sich vom Primat der Sinne zu lösen und unsere Fähigkeit zur Abstraktion einzusetzen, die Ablösung der Newtonschen Fernkräfte durch Kraftfelder, die Wichtigkeit der Anordnung (Struktur) der Teilchen bei der Bildung komplexerer Gebilde, usw. Schließlich stand Boscovich auch am Anfang des Strebens nach einer Vereinheitlichung der elementaren Bausteine der Materie und der Kräfte, die sie zusammenhalten. In den 250 Jahren seit der Postulierung seiner einheitlichen *puncta* und der einheitlichen *lex virium* wurden zwar viele Fortschritte gemacht, ein Ende, an dem einheitliche Elementarteilchen und eine universelle Kraft stehen, ist jedoch nicht in Sicht. Derzeit erscheint es unmöglich, das Ziel (wenn überhaupt!) mit der bisher so erfolgreichen Methode des Wechselspiels Experiment \leftrightarrow Theorie zu erreichen und es könnte sein, dass die Elementarteilchenphysiker in nicht allzu ferner Zukunft wie Boscovich – wenn auch aufgrund des heutigen Wissens auf ganz anderer Ebene – nach einem auf rationalen Annahmen basierenden mathematischen System suchen müssen, welches, beginnend bei den Grundbausteinen, durch Synthese bis hinauf zu den experimentell zugänglichen Teilchen aufsteigt.

