

Atomismus und Kontinuum: Ein Streit der Vorsokratiker und seine Folgen

Litterst, Fred Jochen

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2009 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.111-120



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Atomismus und Kontinuum: Ein Streit der Vorsokratiker und seine Folgen*

F. JOCHEN LITTERST

Nordendorfsweg 4a, 38110 Braunschweig

Wie selbstverständlich akzeptieren wir heute, dass man Atome „sehen“ kann, werden uns doch z. B. in den schönen Wissenschaftssendungen des Fernsehens eindrucksvolle Bilder atomarer Strukturen von Kristallen oder Biomolekülen gezeigt. In der Tat sind mit Elektronenmikroskopie Auflösungen im Bereich von Pikometern möglich [1]. Das periodische System der Atomsorten wächst auch nach über hundert Jahren seit der Systematisierung der chemischen Elemente durch Mendelejeff [2] immer noch an [3], gleiches gilt für die Zahl der inzwischen mehr als 2000 bekannten Kernisotope [4] und die „Bewohner“ des „Teilchenzoos“ [5].

Andererseits wissen wir aus unserer Erfahrung, dass wir uns Gott sei Dank im Alltagsleben nicht um diese Sub-Mikrostrukturen zu kümmern haben. So lassen sich praktische Anwendungen und damit die überwiegende Vielzahl ingenieurwissenschaftlicher Ansätze in Kontinuumsmodellen beschreiben. Kontinua begegnen uns z.B. in Formen starrer oder deformierbarer Körper, Flüssigkeiten und Gase. Die mathematische Behandlung der dynamischen Eigenschaften von Kontinua ist seit Euler, Lagrange und Laplace im 18. und 19. Jahrhundert in der analytischen Mechanik durch kontinuierliche Aufteilung der Materie in Volumenelemente unter Berücksichtigung von Bedingungsgleichungen auch ohne detaillierte Kenntnis atomistischer Aspekte außerordentlich erfolgreich herangewachsen. Parallel dazu erfuhr das Atomkonzept in der Chemie durch die Vorarbeiten von Robert Boyle (1627-1691) und schließlich durch John Dalton (1766-1844) eine Wiederbelebung.

Wir wollen hier aber nicht der Frage nachgehen, was mit den raffinierten Methoden der modernen Elektronenmikroskopie wirklich abgebildet wird, was die Rekonstruktion von Wellenfunktionen bedeutet, auch nicht die quantentheoretischen Hintergründe der atomaren und subatomaren Systematiken beleuchten, sondern einen kleinen Spaziergang durch die Betrachtungsweisen

* Kurzfassung des am 09.10.2009 in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrages.

der Materiestruktur mit ihren konkurrierenden und sich gegenseitig befruchtenden Konzepten über etwa 2500 Jahre unternehmen.

Von Parmenides bis Zenon

Nur was ist, ist. Das Nichts kann nicht sein. Also gibt es keinen leeren Raum. Das bedeutet, dass die Welt voll ist. Wenn die Welt voll ist, gibt es keinen Raum für Bewegung. Folglich sind Bewegung und Wandel unmöglich. Diese deduktive Ableitung des Melissos ist ein indirekter Beweis eines „Kompakt“- oder „Block“-Universums, der in direktem Widerspruch zur Beobachtung der Natur steht. Melissos (Samos, um 440 v. Chr.) hatte als Vertreter der an Parmenides (Elea, ca. 520-470 v. Chr.) anschließenden eleatischen Philosophie einen guten Grund, die bloße Beobachtung der Natur geringer zu achten als seine logischen Schlüsse. Er stellte fest, dass der beobachtbare Wandel, z.B. das Zu- und Abnehmen des Mondes nur durch den Trug unserer Sinne zustande kommt. Karl Popper [6] zu folgen, wurde schon Parmenides damit zugleich der geistige Vater der Kontinuumskonzepte wie auch der atomistischen Schule, deren bekannteste Vertreter Leukipp (Milet, 5. Jhrh. v. Chr.) und Demokrit (Abdera, ca. 460-371 v. Chr.) waren. Diese falsifizierten die ohne a priori Voraussetzungen gemachten Schlüsse Melissos', indem sie auf eine empirische Prämisse bauten: *Es gibt Bewegung, d.h. die Welt ist nicht voll. Es gibt also leeren Raum, d.h.: das Leere existiert. Die Welt besteht aus Seiendem (fest und voll) und Leerem, aus Atomen und dem Leeren.* Bewegung und Veränderung wird damit den Bewegungen der nicht weiter teilbaren Atome zugeschrieben. An dieser Stelle könnte man den Beginn rational kritischer Argumentation mit empirischer Basis setzen und damit eine Vorstufe unserer neuzeitlichen theoretischen Physik.

Beide Sichtweisen, Kontinuumsbetrachtung und Atomistik, hatten weit reichende Konsequenzen. Aus dem Bild eines Kompaktuniversums folgt das „aus Nichts wird nichts“. Bei allem scheinbaren Wandel gibt es keine wirklichen Veränderungen: auch bei einem Wandel bleibt etwas mit sich selbst identisch. Die Wirklichkeit verändert sich während des Wandels nicht. Diese Unwandelbarkeit der Wirklichkeit muss nicht begründet werden, wohl aber die Veränderungen, die Gesetzen folgen. Dies ist Basis unserer Erhaltungssätze (von Energie-, Impulserhalt, etc., bis hin zu Erhaltungsgrößen der Quantenmechanik) sowie der Kausalgesetze.

Sowohl von Parmenides und Melissos wie auch Leukipp und Demokrit wissen wir nur über Fragmente und diverse Rückbezüge anderer Philosophen [7], insbesondere Kritiker der Atomisten wie Aristoteles (384-322 v. Chr.) und Theophrast (4.-3. Jhrh. v. Chr.) sowie die übliche klassische Quelle zu *Leben und Meinungen berühmter Philosophen* des Diogenes Laertios [8], die allerdings erst aus dem 3. Jhrh. n. Chr. stammt. Demokrits Atomismus wird von Lukrez

(Rom, ca. 96-55 v.Chr.) in seinem Lehrgedicht *De rerum natura* [9] beschrieben: die „Atome“ und das Vakuum sind real und unveränderlich (also im Sinn von Melissos). Die mit unseren Sinnen wahrgenommenen qualitativen Veränderungen sind in Wirklichkeit auf atomare Bewegungen im Leeren zurückzuführen, die wir wegen der Unempfindlichkeit unserer Sinne nicht wahrnehmen können. Makroskopische Qualitätsveränderungen werden also durch mikroskopische qualitätslose Bewegungsvorgänge auf deterministische Weise erklärt. Atome sind unterschiedlich, haben verschiedene Formen, Lagen, Geschwindigkeiten und lassen sich auf beliebig viele Weisen kombinieren. Damit lassen sich auch Vorgänge in Seele und Gemüt beschreiben. Sinnesempfindungen vermitteln uns etwas von der Außenwelt durch Ablösung und Übertragung von Atomen, was allerdings zu Missverständnissen führen kann. In diesem materialistischen Bild ist auch der leere Raum real, damit wird er unendlich und hat keine außerhalb liegende Ursache. Lukrez' Schrift war das ganze Mittelalter hindurch bekannt, der Atomismus darin wurde allerdings erst durch Pierre Gassendi (1592-1655) „wiederentdeckt“ und dabei auch Epikurs Werk diskutiert [10].

Epikur (341-270 v.Chr.) vertrat ein atomistisches Weltbild, das in Abweichung vom deterministischen Konzept zufällige Auslenkungen vom freien Fall der Teilchen zuließ („declinationes sine causa“). Dadurch konnten Strukturbildungen zur Ausformung vieler Welten führen, in deren „intermundien“ sich die Götter aufhielten.

In Konkurrenz zum atomistischen Weltbild standen im Altertum Bilder eines „vollen“ Universums, die sich allerdings vom „Blockuniversum“ des Melissos dadurch unterschieden, dass sie Bewegungen erlaubten. Neben Empedokles (ca. 495-435 v.Chr.) wären hier vor allem Platon (ca. 427-348 v.Chr.) [11] und Aristoteles (384-322 v.Chr.) [12] anzuführen. Platons Elementarkorpuskeln für die 4 Elemente Erde, Wasser, Luft und Feuer besaßen die Form regulärer Polyeder (die „Platonischen Körper“). Die Grundeinheiten für die Begrenzungsflächen dieser Polyeder sind Dreiecke, die sozusagen als geometrische Atome aufgefasst werden können (allerdings nicht im Demokritischen materiellen Sinne). Dieser starke geometrische Bezug beim Aufbau der Materie ist später immer wieder aufgegriffen worden und findet sich in moderner gruppentheoretischer Form in den Symmetriebetrachtungen heutiger Elementarteilchensystematiken (siehe z.B. [13]).

Bei Aristoteles wird die pythagoräisch-platonische Betrachtungsweise der gesamten Welt stark eingeschränkt. Während sein wohlgeordnetes kugelförmiges Universum, das nach außen hin durch die Fixsternsphäre abgeschlossen ist, einen Himmel besitzt, in dem ideal, mathematisch fassbare, unendliche Bewegungen in einem homogenen, feinen Äther stattfinden, ist der sublunare, materielle von Gegensätzen gekennzeichnete Bereich mit Unregelmäßig-

keiten behaftet, deren Beschreibung sich der Mathematik entzieht. Aristoteles' Weltbild sollte für viele Jahrhunderte das bestimmende „Standardmodell“ werden.

Zeitlich etwa parallel zur atomistischen Schule entwickelten die Stoiker (siehe Zenon von Kition, ca. 336-264 v.Chr.) ein Kontinuumsbild von Materie, Raum und Zeit, das im Gegensatz zum passiven aristotelischen aktiv war. Das alles durchdringende „Pneuma“ war eine elastische Substanz, das über zeitlich und räumlich Spannungen übertragen und so wirksam wurde. Dadurch ergab sich ein kontinuierlicher Kraftübertrag im Gegensatz zum atomistischen Bild, in dem diskontinuierliche Stöße dafür verantwortlich waren.

Mittelalter und Renaissance

Überspringen wir in unserem Spaziergang den Späthellenismus mit neoplatonischen und hermetischen Weltinterpretationen (Plotin „und seine Folgen“), wengleich sie für Renaissance (siehe Giordano Bruno) und frühe Neuzeit wesentliche Impulse liefern sollten [14]. Für das Hochmittelalter war die erneute Rezeption der aristotelischen Schriften durch den arabischen Transfer und die Auseinandersetzung mit den arabischen Kommentatoren in Süditalien und Spanien von dominantem Einfluss. In der scholastischen Interpretation kam dieses Weltbild der christlichen Theologie entgegen. Es beschreibt eine in der Vollkommenheit Gottes geschaffene Welt, in der existierende Dinge nur umgestaltet werden und nichts wesentlich Neues entstehen kann. Alle Veränderung im sublunaren Bereich geschieht durch Ausgleich der unterschiedlichen Tendenzen der vier Elemente sich nach oben oder unten zu ihren „natürlichen Orten“ zu bewegen. Bewegung ist hier als Prozess zu verstehen, der aufhört, sobald die bewegende Ursache wegfällt. Sie ist eine Qualität, die sich in der Leere, wo es keine geometrischen Merkmale gibt, nicht nach Größe und Richtung beschreiben lässt. Der leere Raum ist widersinnig auch deswegen, weil sich dort eine Bewegung ins unendlich Rasche entwickeln könnte. Ein Atomismus mit einer unendlichen Welt, das auch ein reales Vakuum beinhaltet, war in der Scholastik schon wegen seiner atheistischen Tendenz verdächtig.

Dies bedeutet nicht, dass atomistische Modelle nicht diskutiert wurden, z.B. im 11. Jhrh. durch al-Ghazālī oder im 14. Jhrh. durch Nicole d' Autrecourt [15]. Bemerkenswert ist, dass sich eine Reihe christlicher Philosophen und Naturforscher der Renaissance (z.B. Nikolaus von Kues (1401-1464) [16], Giordano Bruno (1548-1600) [17]) mit der Wahrscheinlichkeit vielfacher Welten beschäftigten, was an epikureische Gedanken erinnert. Giordanos Welt besaß zudem atomare Bausteine.

Die Neuzeit: von Descartes zu Einstein

Neben der an Einfluss verlierenden Scholastik und naturalistisch, vitalistischen Naturbildern gewinnt im 17. Jahrhundert zunehmend eine mechanistische Naturphilosophie an Einfluss. Nach Galilei sind hier vor allem Descartes, Mersennes, Gassendi, Huygens, Leibniz und Newton zu nennen, die der Entwicklung der neuzeitlichen Naturwissenschaft die entscheidenden Impulse gaben.

René Descartes (1596-1650) hat mit seinem dualistischen Substanzbegriff der *res cogitans* und *res extensa* und der sich anschließenden mathematisch strikten Beschreibungsmöglichkeit der letzteren den Weg geöffnet zu einer analytischen Geometrie, die in der Folge eine revolutionäre Entwicklung für ein klares Naturverständnis ohne überkommene täuschende und die Sicht verstellende Vorstellungen ermöglichte [18]. Sein rein deterministisches Kontinuumsbild ohne Vakuum baut auf Übertrag von Bewegungsgrößen durch direkte Stöße. Der Kosmos umfasst viele Sonnensysteme, die „Vortices“ bilden, in denen dreierlei eng gepackte Materiesorten in unterschiedlicher Agglomeration umeinander wirbeln [19]. Er spricht zwar von Korpuskeln, die allerdings nicht wie Atome unteilbar sind. Pierre Gassendi (1592-1655) als Atomist stand dazu in direktem Gegensatz [10]. Anschließend aber doch abgrenzend zu Leukipp und Epikur formuliert er eine religionskonforme Atomistik. Er nimmt Atome mit verschiedenen Größen, Bewegungen und Formen, Atomgruppen mit verschiedenen Lagen und Anordnungen zueinander an, die von Gott geschaffen und in Bewegung versetzt, von ihm beeinflussbar und schließlich am Weltende wieder zerstörbar sind. Atome verursachen auch die Schwerkraft, indem sie sich mit tentakelähnlichen Ärmchen in den Poren von der Erde sich entfernender Teilchen anklammern und sie nach unten ziehen. Zwischen den Atomen gibt es ein Vakuum.

Christian Huygens (1629-1695) übernahm viele Konzepte Descartes' und verbesserte sie, z.B. die Stoßgesetze, die er zur Beschreibung wellenartiger Ausbreitungen benötigte. Descartes hatte Licht über seine feinste Materiesorte beschrieben, die sich durch die gröbere Materie wie Saft in einer Presse durch die Früchte zwängt. Huygens beschrieb Licht als eine Welle, die sich in einem kontinuierlichen Äthermedium eng gepackter feinsten Teilchen durch Stoßübertrag ausbreitet [20].

Es ist erstaunlich wie lange es dauerte bis die experimentelle Evidenz für die Existenz eines Vakuums akzeptiert wurde: die Konstruktion geeigneter Pumpen durch Otto von Guericke zu seinen berühmten Magdeburger Halbkugeldemonstrationen mit vielen Varianten, Torricellis, Mariottes und Boyles Versuche, schließlich Pascals [21] quantitative Experimente und korrekte Interpretation zum Luftdruck ergaben viele Zweifel an den Kontinuumskonzepten, wenngleich die nachgewiesene „Leere“ nicht unbedingt mit absoluter Leere gleich-

gesetzt wurde. Das Vakuum konnte eine feinste Äthermaterie beinhalten, die z.B. zur Ausbreitung des Lichts im Vakuum postuliert wurde.

Wenngleich uns heute Isaac Newton als Begründer der Punktmechanik [22] und der damit verknüpften Dynamik gilt, konnte auch er nicht auf einen Äther zum Transport seiner Lichtteilchen [23] und zur Übertragung von Wärme, die er mit raschen Teilchenbewegungen interpretierte, verzichten. Die Newtonsche Betrachtung von Materie im leeren Raum kann man auf die von punktförmigen Massen reduzieren, was zu einer überwältigend erfolgreichen mechanistischen Behandlung der Naturphänomene führte. Die Wechselwirkung zwischen den Körpern erfolgte über die Ferne, als Eingriff göttlich bewahrenden Wirkens; der Raum diente dabei als „sensorium Gottes“. Newton erkannte, dass er neben der anziehenden Wirkung von Massen auch eine abstoßende benötigte, um Stöße, chemische Adhäsion und Kohäsion zu erklären, doch wurde dieser Aspekt erst von Rudjer Bošćović (1711-1787) genauer atomistisch herausgearbeitet und im Übrigen auch vieles der Newtonschen Physik präzisiert und mathematisch sauberer dargestellt [24].

Man könnte meinen, die Atomistik hätte damit ihren Sieg über die Kontinuumskonzepte davongetragen. Doch mittlerweile hatten gerade die von Leibniz und Newton bereiteten Methoden der Infinitesimalrechnung ihren Erfolgsgang fortgesetzt. Leibniz vertrat zwar in jungen Jahren einen Atomismus realer unteilbarer kleinster Teilchen, diese „Atome“ werden aber später zu hypothetischen Gebilden, die nur zu phänomenologischen Erklärungen taugen. Euler, Lagrange und Laplace führten schließlich die analytische Mechanik zu Triumph, die ihre Validität in vielen praktischen Anwendungen der Ingenieurskunst bewiesen. Allerdings entwickelte sich parallel dazu auch eine auf Newton und Bošćović aufbauende Physikalische Mechanik, die insbesondere durch Poisson vertreten wurde: dabei wurden Systeme aus freien Massepunkten, mit real angreifenden und inneren „molekularen Kräften“ betrachtet, deren Natur allerdings noch unklar war (die Entwicklung der mechanistischen Modelle wird besonders eingehend von Duhem beschrieben [25]).

Während in der Thermodynamik bereits Daniel Bernoulli (1700-1782) ein Teilchenbild von Gasen konzipierte, wurde die statistische Interpretation der Thermodynamik erst Ende des 19. Jahrhunderts mit den Arbeiten von James Clerk Maxwell (1831-1879) [26] und schließlich Ludwig Boltzmann (1844-1906) [27] intensiv diskutiert, aber ganz und gar nicht allgemein akzeptiert. Praktisch alle früheren wichtigen und auch bahnbrechenden Entwicklungen zur Thermodynamik (z.B. die Arbeiten von Sadi Carnot) basierten auf nicht-atomistischen Vorstellungen. Grundsätzliche philosophische Bedenken brachten bis ins 20. Jhrh. die Neopositivisten vor: z.B. ließ Ernst Mach Atome und Moleküle nur als Mittel zum Zweck der Beschreibung von Materialeigenschaften zu, jedoch ohne Realitätsanspruch. Ein wichtiger Durchbruch gelang Albert

Einstein und Marian von Smoluchowski mit ihren Arbeiten ab 1905 zur theoretischen Beschreibung der so genannten Brownschen Bewegung von suspendierten kleinen Materieteilchen in Flüssigkeiten durch molekulare Stöße [29]

Eine parallele Entwicklung wie in der Thermodynamik erfolgte in der Elektrostatik und der Elektrodynamik, wo bis zu Beginn des 19. Jhrh. ein elektrisches Fluidum (siehe z.B. Stephen Gray, Charles-François de Cisternai Dufay, Benjamin Franklin) zur Erklärung aller Phänomene herangezogen wird. Bemerkenswerterweise wendet sich André Marie Ampère (1775 – 1836), der in jungen Jahren der positivistischen Einstellung Auguste Comtes anhing, die Fragen nach hinter den Phänomenen verborgenen Ursachen unsinnig fand, später einer mikroskopischen Betrachtungsweise zu. Er spricht im Zusammenhang mit der von Magneten ausgehenden Kraftwirkung von Atomen, die von Strömen umflossen werden, die allerdings stark den Wirbeln Descartes' ähneln.

Erst Michael Faraday (1791-1867) als der romantischen Naturphilosophie naher Autodidakt geht unkonventionelle Wege und greift auf Bošcovičs Konzept mit kraftübertragenden Teilchen im Raum zurück, was ihn zum Feldbegriff führt [29]; allerdings gelten Atome für ihn auch nur als ein Konzept, dessen Wahrheit nicht bewiesen sei.

Wir können hier nicht näher auf die raschen Entwicklungen über die Vorstufen der Atomphysik in Experimenten zu elektrischen Entladungen in stark verdünnten Gasen mit dem Nachweis von Kathoden- und Kanalstrahlen sowie die weiteren Erfolge der Atomphysik bis heute eingehen. In der Chemie bestand bereits hinreichend Evidenz für den atomaren Aufbau der Materie, jedoch fehlte ein „sichtbarer“ Nachweis. Bereits 1850 hatte Auguste Bravais (1811-1863) vorgeschlagen, dass Kristalle aus regelmäßigen Anordnungen hoher Symmetrie, dreidimensionalen Gittern von Atomen bzw. Molekülen aufgebaut sein sollten. Der Nachweis kristalliner Gitter und damit der eigentliche Durchbruch zur Akzeptanz des atomaren Konzepts für kondensierte Materie gelang mit den Röntgenstrahlungstreuversuchen von Max v. Laue (1879-1960), William H. (1862-1942) und William L. Bragg (1890-1971). Laue wurde dafür 1914 [30], Vater und Sohn Bragg 1915 [31] mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Die bei den Streuexperimenten gefundenen Interferenzbilder zeigen zwar nur das so genannte reziproke Gitter, aus dem lässt sich aber schließlich durch Fourier-Transformation das direkte Bild der atomaren Anordnung bestimmen. Damit war auch die Basis geschaffen für Neutronen- und Elektronendiffraktion und für die Entwicklung der Elektronenmikroskopiemethoden.

Abschließende Bemerkungen

Für unseren Spaziergang böte sich hier eine konsequente Fortsetzung durch die in den Folgejahren intensiv und kontrovers diskutierte Interpretationen der Quantenmechanik und deren Konsequenzen für die Materiebetrachtungen an.

Doch Spaziergänge sollten nicht in Expeditionen ausarten – deshalb wollen wir hier heute unterbrechen. Die Aspekte der Quantenphysik sind einen eigenen Spaziergang wert. Auch wenn heute kein Zweifel besteht, dass atomare Strukturen Realität besitzen, sollten wir darauf achten, dass wir mit Bildern agieren, deren Gehalt von quantenmechanischen Konzepten bestimmt ist: Wir „sehen“ Atome nicht direkt. Wir wissen aber auch, dass unbeschadet dieser materiellen Substruktur in den meisten angewandten (makroskopischen) Fällen ein Kontinuumsansatz erfolgreich sein wird, allerdings bedürfen dann die Parameter dieser Modelle einer mikroskopischen Interpretation, sobald wir nach dem „dahinter“ fragen wollen – sofern wir es wollen.

Ich hoffe gezeigt zu haben, dass Fragen der Vorsokratiker über die Jahrtausende hinweg aktuell bleiben. Paradigmen ersetzen sich nicht wie oft behauptet, sondern sie können sich auch parallel zueinander weiterentwickeln, auch wenn zuweilen eines der beiden hier betrachteten – das atomistische und das kontinuierliche Bild der Materie – für einige Zeit im Vordergrund zu stehen scheint. Weiterhin ist es durchaus anregend und nachdenklich stimmend, wenn wir bei all der Fülle heutigen naturwissenschaftlichen Wissens erkennen müssen, welche Antworten unsere geistigen Ahnen bereit hielten und wie eingeschränkt unsere Sicherheit heute immer noch ist, bessere geben können, die über reine Phänomenologie hinausgehen. Bescheidenheit bezüglich unseres Wissensstands gerade zu Fragen der Materie ist allemal angebracht angesichts unserer immer noch geringen Kenntnis zur so genannten „Dunklen Materie“ und „Dunklen Energie“, die den dominanten Energiegehalt unseres Universums ausmachen.

Literatur

Auswahl allgemein einführender Texte:

DEBUS, A.G., *Man and Nature in the Renaissance*, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK, 1978.

DUHEM, P., *Die Wandlungen der Mechanik und der mechanischen Naturerklärung*, in deutscher Übersetzung, Leipzig, 1912, VDM Verlag, Saarbrücken, 2006.

GRANT, E., *Physical Science in the Middle Ages*, Cambridge Univ. Press, Cambridge UK, 1977.

HUND, F., *Geschichte der Physikalischen Begriffe*, BI, Mannheim, 1972.

KUHN, T.S., *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Suhrkamp, Frankfurt a.M., 1973.

LITTERST, F.J., Skripte zu den Vorlesungen *Spezielle Kapitel zur Geschichte der Physik 1-4*, TU Braunschweig.

SHIMONYI, K., *Kulturgeschichte der Physik*, Harri Deutsch, Frankfurt a.M., 2004.

Referenzen:

(bei den historischen Schriften werden moderne Übersetzungen zitiert)

- [1] JIA, C.L. et al., Phys. Rev. B79, 081405R, siehe auch dortige Zitate und weitere Arbeiten der Gruppe Urban am Forschungszentrum Jülich, 2009.
- [2] MENDELEJEFF, D., Z. Chemie Neue Folge, V. Band, 405, 1869.
- [3] <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/PerTable/index.html>
- [4] <http://ie.lbl.gov/toi.html>
- [5] http://pdg.lbl.gov/2009/tables/contents_tables.html
- [6] POPPER, K., *Die Welt des Parmenides*, Piper, München, Zürich, 2006.
- [7] PLATON, *Parmenides*, Reclam, Stuttgart
- [8] DIOGENES LAERTIUS, *Von dem Leben und den Meinungen berühmter Philosophen*, in der Übersetzung von A. Chr. Borheck, matrix-Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [9] LUKREZ, *Die Welt aus Atomen*, Reclam, Stuttgart
- [10] GASSENDI, P., *Opera omnia*, Frommann, Stuttgart-Bad Canstatt, 1964.
- [11] PLATON, *Timaios and Critias*, Penguin, London, 1977.
- [12] ARISTOTELES, *Aristoteles' Physik, Meiner*, Hamburg, 1987.
- [13] ELLIOTT, J.P. & P.G. DAWBER, *Symmetry in Physics*, MacMillan Press, Houndmills, London, 1987.
- [14] CUNHA BEZERRA, C., *Compreender Plotino e Proclo*, Vozes Ed., Petropolis, 2006.
- [15] PERLER, D., *Zweifel und Gewissheit. Skeptische Debatten im Mittelalter*. Vittorio Klostermann, Frankfurt a. M., 2006.
- [16] KUES, NIKOLAUS VON, *Die belehrte Unwissenheit I, II, III*, Meiner, Hamburg, 1994, 1999, 1999.
- [17] BRUNO, GIORDANO, *Über das Unendliche, das Universum und die Welten*, Reclam, Stuttgart, 2008.
- [18] DESCARTES, RENÉ, *Die Prinzipien der Philosophie*, Meiner, Hamburg, 2005.
- [19] DESCARTES, RENÉ, *Meditationen über die Erste Philosophie*, Reclam, Stuttgart, 1986.
- [20] HUYGENS, CH., *Abhandlung über das Licht*, Harri Deutsch Verlag, Frankfurt a.M., 2009
- [21] PASCAL, B., *Œuvres completes*, Éd. de Seuil, Paris, 1988.
- [22] NEWTON, ISAAC, *Principia*, Running Press, Philadelphia, 2002.
- [23] NEWTON, ISAAC, *Opticks*, Prometheus Books, Amherst N.Y., 2003.

- [24] BOSCOVICH, R.G., *The theory of natural philosophy*, Translated by J.M. Child, Open Court Publ., Chicago, London, 1922, <http://www.archive.org/details/theoryofnaturalp00boscrich>
- [25] DUHEM, P., *Die Wandlungen der Mechanik und der mechanischen Naturerklärung*, in deutscher Übersetzung, Leipzig, 1912, VDM Verlag, Saarbrücken, 2006.
- [26] MAXWELL, J.CL., *Theorie der Wärme*, Vieweg, Braunschweig, 1878.
- [27] BOLTZMANN, L., *Entropie und Wahrscheinlichkeit*, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Band 286, Harri Deutsch, Frankfurt a.M., 2000.
- [28] EINSTEIN, A., *Untersuchung über die Theorie der Brownschen Bewegung*, v. Smoluchowski, M., *Abhandlung über die Brownsche Bewegung und verwandte Erscheinungen*, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Band 199, Harri Deutsch, Frankfurt a.M., 2001.
- [29] FARADAY, M., *Lectures on the forces of matter*, Netlibrary, Hoboken N.J.
- [30] LAUE, M. v., Nobelpreisvortrag unter http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1914/laue-lecture.html
- [31] BRAGG, W.H. & W.L., Nobelpreislaudatio unter http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1915/present.html