



universität  
wien

# DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Physikalische Konzepte in der Antike“

Die Herausbildung einer Wissenschaft von der Natur am Beispiel  
der Entwicklung des antiken Atomismus unter Berücksichtigung  
didaktischer Aspekte des Physikunterrichts

Verfasser

David Simon Erwin Schlögel

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2014

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 190 412 338

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Lehramtsstudium UF Physik UF Latein

Betreuerin:

Mag. Dr. Beatrix Hiesmayr, Privatdoz.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Die Herausbildung einer Wissenschaft von der Natur</b>	<b>7</b>
2.1	Die Anfänge . . . . .	7
2.2	Der Naturbegriff . . . . .	10
2.3	Der Weg des Wissens . . . . .	12
2.4	Die großen Leistungen und Probleme der griechischen Naturphilosophie . . .	14
2.4.1	Der Mensch als Forscher . . . . .	14
2.4.2	Mathematisierung . . . . .	15
2.4.3	Physik und Mathematik . . . . .	15
2.4.4	Bewegungslehre . . . . .	16
2.4.5	Inertialgesetz und Vakuum . . . . .	17
2.4.6	Trennung von Himmel und Erde . . . . .	18
2.4.7	Weltbilder und Geozentrismus . . . . .	18
2.4.8	Heliozentrismus . . . . .	20
2.4.9	Schwerkraft . . . . .	21
2.4.10	Experimente . . . . .	21
2.4.11	Zeit . . . . .	21
2.4.12	Sinneswahrnehmungen . . . . .	22
2.4.13	Stoffliche Veränderungen . . . . .	22
2.4.14	Zentrale Errungenschaften . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Die Wegbereiter des antiken Atomismus</b>	<b>25</b>
3.1	Die Milesier auf der Suche nach dem Urstoff . . . . .	28
3.1.1	Thales von Milet . . . . .	28
3.1.2	Anaximander . . . . .	29
3.1.3	Anaximenes . . . . .	30
3.1.4	Heraklit von Ephesos . . . . .	31
3.2	Alles ist Zahl! . . . . .	33
3.3	Konstante Veränderung oder unveränderliche Konstante? . . . . .	35
3.3.1	Die Paradoxa der Vielheit . . . . .	36
3.3.2	Die Paradoxa der Bewegung . . . . .	37
3.3.3	Das Argument des Raums . . . . .	39

3.3.4	Das Argument des Hirsekorns . . . . .	39
3.4	Empedokles . . . . .	40
3.5	Anaxagoras . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Die Atomlehre von Leukipp und Demokrit</b>	<b>43</b>
4.1	Die Ausgangssituation und die eleatischen Herausforderungen . . . . .	44
4.2	Die Grundzüge von Demokrits Atomtheorie . . . . .	45
4.2.1	Atome und leerer Raum . . . . .	46
4.2.2	Gestalt und Eigenschaften der Atome . . . . .	48
4.2.3	Sinneswahrnehmungen . . . . .	49
4.2.4	Atombewegung und Schwere . . . . .	50
4.2.5	Nachweisbarkeit der Atome . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Aufnahme und Kritik durch Akademie und Peripatos</b>	<b>53</b>
5.1	Platon – Eine mathematische Atomlehre . . . . .	53
5.1.1	Die platonischen Körper . . . . .	54
5.1.2	Wandlungsfähigkeit der Elemente . . . . .	57
5.1.3	Der Hauptgedanke . . . . .	57
5.2	Aristoteles und die Kampagne gegen die Atomisten . . . . .	58
5.2.1	Die Kritik an den Vorgängern . . . . .	58
5.2.2	Das Modell des Aristoteles . . . . .	59
5.2.3	Die Problematik der Veränderung . . . . .	60
5.2.4	Die Nachwirkungen . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Die späteren Atomisten</b>	<b>63</b>
6.1	Epikur . . . . .	63
6.1.1	Die Neuerungen . . . . .	64
6.2	Lukrez . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Die weitere Entwicklung atomistischer Theorien</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>Antike Atomtheorien im Physikunterricht der Moderne</b>	<b>71</b>
8.1	Motivation . . . . .	71
8.2	Lehrplanbezug . . . . .	72
8.2.1	Allgemeiner Teil . . . . .	73
8.2.2	Fachspezifischer Teil . . . . .	74
8.3	Unterrichtskonzept . . . . .	76
8.3.1	Der Einstieg (1 Stunde) . . . . .	78
8.3.2	Die Vorsokratiker (1-2 Stunden) . . . . .	80
8.3.3	Demokrits Atommodell (1 Stunde) . . . . .	82

---

8.3.4	Die platonischen Körper (1 Stunde) . . . . .	83
8.3.5	Abschluss (1 Stunde) . . . . .	84
8.4	Erweiternde Unterrichtsinhalte . . . . .	85
8.4.1	Grundlegende Bemerkungen . . . . .	86
8.4.2	Heraklit . . . . .	86
8.4.3	Pythagoras . . . . .	86
8.4.4	Eleaten . . . . .	87
8.4.5	Empedokles . . . . .	87
8.4.6	Demokrit . . . . .	87
8.4.7	Platon . . . . .	88
8.4.8	Aristoteles . . . . .	88
8.4.9	Duale Konzeptionen . . . . .	88
<b>9</b>	<b>Conclusio</b>	<b>89</b>
<b>A</b>	<b>Originaltexte</b>	<b>93</b>
A.1	„Sonnenstäubchen“ . . . . .	93
A.2	„Clinamen“ . . . . .	94
<b>B</b>	<b>Arbeitsblätter</b>	<b>95</b>
B.1	Arbeitsblatt 1 . . . . .	95
B.2	Arbeitsblatt 2 . . . . .	95
B.3	Arbeitsblatt 3 . . . . .	95
<b>C</b>	<b>Faltvorlagen</b>	<b>99</b>
C.1	Tetraeder . . . . .	99
C.2	Hexaeder . . . . .	100
C.3	Oktaeder . . . . .	101
C.4	Dodekaeder . . . . .	102
C.5	Ikosaeder . . . . .	103
C.6	Quellcode . . . . .	104
	<b>Literatur</b>	<b>107</b>
	<b>Bildquellen</b>	<b>111</b>
	<b>Nachwort</b>	<b>115</b>
	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>117</b>

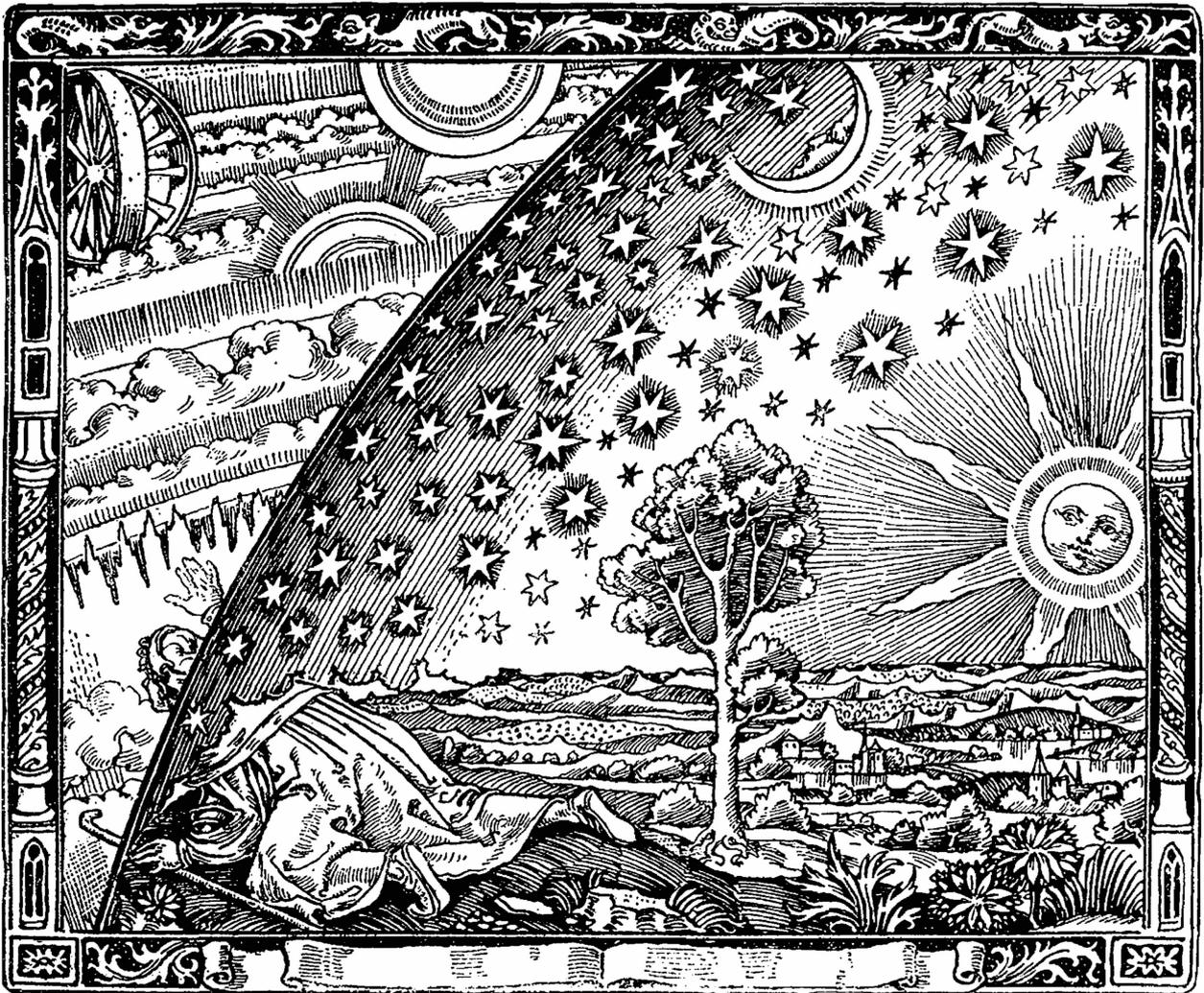


Abbildung 1: Camille Flammarions *Wanderer am Weltenrand*

## **Zusammenfassung**

Wissenschaftliche Erkenntnisse und Methoden befinden sich in ständigem Wandel. Bereits in der Antike existierten Vorstellungen und Begrifflichkeiten, welche noch heute tief in unserem Denken verwurzelt sind. Der Erfolg des modernen Weltbilds gründet sich in hohem Maße auf die jahrhundertealten geistigen Errungenschaften griechischer Philosophen. Die Beschäftigung mit den Anfängen der Naturwissenschaft kann nicht nur Forschern zukunftsweisende Ideen sowie Anregungen zu einer kritischen Auseinandersetzung mit der Wissenschaft liefern, sondern auch Lehrkräfte und Schüler durch die Bereitstellung motivierender Unterrichtsinhalte begeistern. Die vorliegende Diplomarbeit widmet sich dem zuletzt genannten Vorhaben und behandelt die Entstehung einer Naturwissenschaft im antiken Griechenland, wobei eine umfangreiche Darstellung der Herausbildung atomistischer Theorien im Mittelpunkt steht. Den Abschluss bildet der Vorschlag eines Unterrichtsmodells, welches für den Einsatz in der Schule konzipiert wurde.

## **Abstract**

Scientific knowledge and methods are constantly changing. Even in ancient times certain ideas and concepts existed which are still deeply rooted in our mind. The success of the modern worldview is mainly based on the centuries-old intellectual achievements of Greek philosophers. The study of the beginnings of natural science can not only reveal innovative ideas to researchers and suggest a more critical examination of current sciences, but is also able to inspire teachers and students by providing motivating educational content. This diploma thesis focuses on the latter aspect and discusses the origin of science in ancient Greece with an extensive view on the development of atomistic theories. Moreover a teaching model is presented which is designed for implementation in school.



# Kapitel 1

## Einleitung

„Glücklich, wer den Dingen auf den Grund sehen konnte.“

---

(Vergil, *Georgica* 2, 490)

Wir leben in einem Zeitalter, in welchem die Vernetzung verschiedener Wissensgebiete zu umfassenden Informationsstrukturen einen wesentlichen Aspekt der modernen Forschung und unserer Kultur darstellt. Durch ihre zentrale Stellung in der Gesellschaft wechselwirken die Naturwissenschaften und insbesondere die Physik mit zahlreichen anderen Disziplinen, um durch einen stetigen Informationsaustausch den Fortschritt menschlichen Wissens zu gewährleisten.

Anfang des 20. Jh. löste die Entdeckung der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik einen Prozess des fundamentalen Umdenkens und der Neuinterpretation bisheriger Erkenntnisse aus. Die seit dem 17. Jh. kontinuierlich ausgebauten und gefestigten physikalischen Theorien wurden mit einem Male in ihren Grundfesten erschüttert und um eine Vielzahl neuer Aspekte erweitert. Ihr für absolut gehaltener Platz im Gebäude der Naturwissenschaften wurde im wahrsten Sinn des Wortes relativiert. Während die neu entdeckten Möglichkeiten äußerst Erfolg versprechend hinsichtlich der Erklärung damals noch ungelöster Probleme erschienen und sich das Erschließen der neuen Gebiete zur obligatorischen Hauptaufgabe der Wissenschaftler entwickelte, wurden durch den Paradigmenwechsel in kurzer Zeit mehr Fragen aufgeworfen, als man zu beantworten imstande war. Namhafte Physiker wie Erwin Schrödinger und Werner Heisenberg richteten ihre Blicke nicht zuletzt deshalb auf die naturwissenschaftlichen Leistungen der Vergangenheit, deren Bedeutung im Zuge der vorherrschenden Aufbruchsstimmung keinesfalls geschmälert oder in Vergessenheit geraten durfte. Sie hegten „die Hoffnung, ein besseres Verständnis des modernen Weltbilds und somit *inter alia* auch der modernen Physik zu gewinnen“.<sup>1</sup> Die Gründe dafür seien in der damaligen „Geistes- und Gefühlssituation“ sowie in der durch den rasanten Fortschritt herbeigeführten „kritischen Lage der Grundwissenschaften“ zu suchen.<sup>2</sup> Das Fundament, auf welchem ein großartiges und der Vollendung nahe gewöhntes Theoriegebäude errichtet worden war, hatte Risse bekommen, deren Reparatur das kritische Infragestellen und teilweise Aufgeben

---

<sup>1</sup> SCHRÖDINGER, 1989, S. 10, Hervorhebung im Original.

<sup>2</sup> SCHRÖDINGER, 1989, S. 13.

konventioneller, wenn auch – wie sich herausstellen sollte – gefährlicher Denkgewohnheiten erforderte. Während die Relativitätstheorie das newtonsche Weltbild in seine Schranken verwies, ließ die Quantenmechanik die Atomphysik erzittern. Eine Rückbesinnung auf die Ursprünge der abendländischen Wissenschaft schien unter diesen Aspekten mehr als nur naheliegend zu sein.<sup>3</sup>

In der viele Jahrhunderte dauernden Genese europäischer Wissenschaften stellten erstarrte Gedankenstrukturen immer wieder Hindernisse dar, welche es zu identifizieren und zu überwinden galt, um eine weitere erfolgreiche Entfaltung der Lehren zu gewährleisten. Als Beispiel, obgleich als eines der bedeutsamsten, sei der beinahe zwei Jahrtausende überdauernde, enorme Einfluss von Aristoteles angeführt, welcher nur unter größten Anstrengungen und mit einem außerordentlich hohen Maß an Überzeugung und Risikobereitschaft überwunden werden konnte. Der Mann, welcher den entscheidenden Beitrag zu diesem Unterfangen geleistet hatte, war Galileo Galilei. Durch die Einführung des Experiments als wesentlichen Bestandteil einer Beschäftigung mit der Natur revolutionierte er an der Wende vom 16. zum 17. Jh. die Naturwissenschaft und legte den Grundstein für die folgenden wegweisenden Entwicklungen, welche mit Isaac Newton und der Formulierung der uns heute bekannten klassischen Physik ihren Anfang nahmen. Eingehende systematische und vor allem quantitative Untersuchungen natürlicher Phänomene anhand eigens konstruierter abstrahierter Modelle bildeten den Kern von Galileis Forschung, welcher die künftigen Generationen von Wissenschaftlern in ihrem Denken entscheidend beeinflussen sollte. Obwohl seine revolutionären Methoden maßgeblich zur Formulierung unseres heutigen Weltbildes beitrugen, wurde in gleicher Weise immer deutlicher, dass nicht nur die Art des Experimentierens, sondern – viel fundamentaler – auch die des Denkens mit den naturwissenschaftlichen und philosophischen Erkenntnissen einer früheren Epoche, nämlich des Zeitraums vom 5. Jh. v. bis zum 1. Jh. n. Chr., behaftet war. Sowohl Schrödinger als auch Heisenberg wiesen auf die Notwendigkeit einer Ausdehnung wissenschaftshistorischer Studien auf die Ära der Antike, der großen griechischen Denker und Naturphilosophen sowie ihrer römischen Nachfolger hin.

Unter Wissenschaftlern war und ist die Rezeption antiker Quellen keineswegs unüblich. Sie zeigt einerseits heute noch wirksame Einflüsse auf und liefert durch die Rekapitulation alter Fragen neue Denkanstöße. Andererseits ermöglicht eine Beschäftigung mit der Vergangenheit die adäquatere Einschätzung neuzeitlicher Leistungen<sup>4</sup>, wobei die Definition des Wissenschaftsbegriffes eine Verallgemeinerung erfährt.<sup>5</sup> Sowohl die Wichtigkeit wissenschaftlicher Methoden, als auch die Notwendigkeit ihrer kritischen Überprüfung werden durch das Studium des Altertums ebenso hervorgehoben, wie die Bedeutung des Vorhandenseins einer Vielzahl konkurrierender Lehrmeinungen für die Entwicklung neuer Theorien. Aus den von der Antike tradierten Werken, schreibt Schrödinger, „mögen die Väter der modernen

---

<sup>3</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 36f.

<sup>4</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 15ff.

<sup>5</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 3.



(a) Werner Heisenberg



(b) Erwin Schrödinger

Abbildung 1.1

Naturwissenschaft vorgefaßte Ideen und unverbürgte Annahmen geschöpft und ihnen durch ihre eigene Autorität Dauer gegeben haben“.<sup>6</sup> Heisenberg erwähnt, ihm seien nach der Lektüre von Platons Dialog *Timaios* „die Grundgedanken der Atomlehre viel klarer als früher“ geworden und „daß man kaum moderne Atomphysik treiben könne, ohne die griechische Naturphilosophie zu kennen“. Den antiken Atomismus beschreibt er als einen „großen Gedanken der griechischen Naturphilosophie [...], der die Brücke vom Altertum zur Neuzeit schlägt und der seine große Kraft erst seit der Zeit der Renaissance entfaltet hat“.<sup>7</sup> Als der Altertumswissenschaften kundiger Mann stellt er zurecht fest, dass wir, „wenn wir den Dingen auf den Grund gehen, sei es systematisch, historisch oder philosophisch, auf die geistigen Strukturen stoßen, die in der Antike und im Christentum entstanden sind“.<sup>8</sup> Zweifelsohne können und werden sowohl Natur- als auch Humanwissenschaften von einem Studium ihrer eigenen Ursprünge profitieren.<sup>9</sup>

Möchte man die Leistungen von Galilei, Newton oder Gassendi als maßgeblich an der Form des heutigen Weltbildes beteiligt bezeichnen, so muss dies a priori ebenso auf die Herausbildung einer Naturwissenschaft bzw. der Institution einer Wissenschaft per se zutreffen. Bei der Beschäftigung mit den in der Antike vorherrschenden Wissenschaftsvorstellungen ist es zwingend erforderlich, den heutigen Wissenschaftsbegriff stets vor Augen zu haben, um unangebrachten oder schlichtweg falschen Vergleichen und Schlussfolgerungen Einhalt zu gebieten. Den Menschen der Antike standen nicht die geeigneten Methoden zur Verfügung, um ihre teilweise richtigen Vorstellungen der Struktur der Materie zu überprüfen und ihre Thesen mit hieb- und stichfesten Beweisen zu untermauern. Jedoch zählt allein die Tatsache, dass die Menschen das Bedürfnis, Fragen an die Natur zu stellen, entwickelten und so eine systematische Erklärung der Welt und der in ihr ablaufenden Vorgänge ermöglicht wurde.

<sup>6</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 35f.

<sup>7</sup> HEISENBERG, 1967a, S. 165.

<sup>8</sup> HEISENBERG, 1967c, S. 167.

<sup>9</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 15ff.

Dies stellte einen am damaligen Maßstab gemessenen Fortschritt ungeahnter Größenordnung dar. Entscheidend war ebenso das Vorhandensein von zum Betreiben von Naturphilosophie geeigneten gesellschaftspolitischen Verhältnissen, welches nicht als selbstverständlich erachtet werden darf. Nicht jede Epoche der Menschheitsgeschichte kann rückblickend als wissenschaftsfreundlich oder -fördernd bezeichnet werden. Erst unter Berücksichtigung all dieser bestimmenden Faktoren lassen sich die wahren Errungenschaften der Antike in eine realistische und vernünftige Relation zu unseren heutigen Vorstellungen setzen.

Die Behandlung der antiken Naturwissenschaft gilt somit dem Bestreben, sich des unverkennbaren griechischen Einflusses auf unsere Kultur bewusst zu werden, heute noch sichtbare Spuren aufzuzeigen, die Auswirkungen möglicher Restriktionen zu verdeutlichen und die Vorstellung unseres derzeitigen Weltbildes in Hinblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen zu relativieren. Schon Galilei sah sich einem für abgeschlossen gehaltenen Weltbild gegenübergestellt, welches den uneingeschränkten Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit erhob und so das Aufblühen weiterer Wissenschaften beeinträchtigte. Das Verlassen dieses starren Rahmens und die Schaffung neuer Definitionen, Methoden und Theorien, welche die althergebrachten widerlegten, in ihrer Gültigkeit beschränkten oder erweiterten, bildete einen Schritt von solch großer Bedeutung, dass er heute jedem Schüler und Studenten der Naturwissenschaft, ebenso wie Newtons Grundsteinlegung der klassischen Mechanik, ihre Erweiterung durch die Einsteinsche Relativitätstheorie und die Konstitution der Quantenmechanik, nahegelegt werden sollte.

Károly Simonyi erwähnt in seiner „Kulturgeschichte der Physik“ als Motivation für eine Beschäftigung mit den Anfängen der Naturwissenschaft in der Antike die Möglichkeit, den Unterricht an Schulen und Universitäten spannender zu gestalten.<sup>10</sup> Die vorliegende Diplomarbeit baut auf dieser Intention auf und widmet sich der Darstellung der Herausbildung einer Wissenschaft von der Natur am Beispiel der Entwicklung des antiken Atomismus, sowie der Vorstellung eines entsprechenden Unterrichtskonzepts für den Einsatz in der Schule. Zu diesem Zwecke werden in Kapitel 2 grundlegende Informationen zur Geisteshaltung der Antike, dem damaligen Naturbegriff, wichtigen Überlieferungswegen und ausgewählten Leistungen bzw. Problemen der antiken Naturphilosophie gegeben. Im Anschluss daran befasst sich Kapitel 3 mit den vielfältigen Lehrmeinungen und Weltvorstellungen der Vorsokratiker als Grundlage nachfolgender Entwicklungen. Im Zentrum steht mit Kapitel 4 die atomistische Lehre von Leukipp und Demokrit, deren Feinheiten in ausführlicher Weise behandelt werden. Die Aufnahme dieser Theorie durch große philosophische Schulen wie die Akademie und den Peripatos bildet den Inhalt von Kapitel 5. Auf die griechisch-römische Tradierung des Wissens wird in Kapitel 6 eingegangen. Nach einem knappen Überblick des weiteren Werdegangs atomistischer Theorien in Kapitel 7, wird mit Kapitel 8 ein Unterrichtskonzept vorgeschla-

---

<sup>10</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 15.

gen, welches auf der Basis bisheriger Erörterungen und unter besonderer Berücksichtigung fachdidaktischer Aspekte des Physikunterrichts erstellt wurde.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Die zu Beginn der Kapitel angeführten Zitate wurden *Liste lateinischer Phrasen/F* 2014, EPIKUR, 2000, LUKREZ, 1924b, LUKREZ, 2000, *Staunen* 2014 sowie VITRUV, 2009 entnommen.



## Kapitel 2

# Die Herausbildung einer Wissenschaft von der Natur

„Ferner: es ist (die) Aufgabe der Naturforschung – so muß man annehmen –, den Ursachenzusammenhang für die entscheidendsten Gesetzmäßigkeiten genau zu erklären.“

---

(*Epikur, Herodotbrief, 78*)

### 2.1 Die Anfänge

Im 6. Jh. v. Chr. wurde in Ionien, einer Region an der westlichen Küste Kleinasiens (siehe Abbildung 2.1), der Grundstein der abendländischen Philosophie und unserer modernen Wissenschaft gelegt. Der Milesier Thales und eine lange Reihe von Philosophen nach ihm setzten es sich in den folgenden Jahrhunderten zum Ziel, den Naturbegriff (φύσις, *phýsis*) zu definieren und den beobachteten Phänomenen auf den Grund zu gehen. Zu den wichtigsten Themen zählte dabei die Frage nach der ἀρχή (*arché*), dem Anfang und der Herkunft aller Dinge, nach demjenigen Prinzip, welches der Welt als unerschütterliche Naturkonstante zugrunde liegt, kurzum: Die Frage nach dem Stoff, aus welchem alles besteht. Doch bevor diese Frage überhaupt gestellt werden konnte, mussten sich die Menschen erst ihrer Notwendigkeit bewusst werden. Dazu bedurfte es eines auslösenden Ereignisses, welches nachfolgend beschrieben wird.

Durch ihre epischen Werke festigten die beiden Dichter Homer und Hesiod die Vorstellung willkürlich waltender, unsterblicher Gottheiten, welche in Form von Naturphänomenen und -katastrophen Einfluss auf die Leben der wehrlosen Sterblichen nahmen, in den Köpfen der Menschen.<sup>1</sup> Bereits im 7. Jh. v. Chr., zur Zeit der großen griechischen Stadtstaaten, war dieses Gedankengut nicht mehr aus dem Bewusstsein der Staatsbürger wegzudenken. Es war folglich nur eine Frage der Zeit, bis ein mutiger Mann auf den Plan trat, welcher die Welt nicht als von übernatürlichen Wesen regiert wissen wollte, sondern als erster nach natürlichen Ursachen von unerklärbaren Erscheinungen suchte. Dieser Mann war Thales, der – will man der Überlieferung bei Aristoteles Glauben schenken – erste Philosoph und Begründer der

---

<sup>1</sup> Homer schuf mit seinen Großen *Ilias* und *Odyssee* eine beeindruckende Bearbeitung der damals weithin bekannten Heldensagen. Hesiod steuerte mit seiner *Theogonie* und den *Erga* (*Werke und Tage*) einen Stammbaum der griechischen Götter sowie eine Menschheitsgeschichte bei.



**Abbildung 2.1: Das antike Griechenland und Kleinasien**

Naturwissenschaft. Mit ihm begann die Zeit der Ionischen Aufklärung, zu welcher noch die Vorsokratiker Anaximander, Anaximenes, Xenophanes und Heraklit zählten.<sup>2</sup>

Es war keineswegs Zufall, dass gerade Ionien zur Geburtsstätte der europäischen Wissenschaften avancierte. Aufgrund ihrer geografischen Lage hatten die Bewohner der kleinasiatischen Landschaft schon früh Kontakt zu den Hochkulturen in Mesopotamien und Ägypten. Das dort entwickelte Wissen gelangte auf diesem Weg in die westliche Welt, wo es die Grundlage weiterer Untersuchungen bildete. Bemerkenswert ist, dass sich die Griechen der Herkunft ihrer Wissensquellen vollkommen bewusst waren.<sup>3</sup> Die Babylonier waren fähige Baumeister, denen es an Erfahrung mit der Konstruktion rechter Winkel nicht mangelte. Hierzu wurde ei-

<sup>2</sup> Vgl. SCHREIER, 2002, S. 17f; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 96ff.

<sup>3</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 43.

ne Schnur mit insgesamt 12 Knoten verwendet, welche in Form eines rechtwinkligen Dreiecks mit den Seitenlängen 3, 4 und 5 ausgelegt wurde. Daraus kann geschlossen werden, dass der pythagoreische Lehrsatz mehr als ein Jahrtausend vor der Geburt seines Namensgebers bereits bekannt und im praktischen Gebrauch war. Anhand von Keilschriftaufzeichnungen kann man heute erkennen, dass sogar ein Verfahren zur Auffindung pythagoreischer Zahlentripel bekannt gewesen sein musste. Das zweite Gebiet, auf welchem sich der mesopotamische Einfluss als unschätzbar wertvoll erwies, waren astronomische Beobachtungen, deren Aufzeichnungen den griechischen Forschern zur Verfügung standen. Hier sind besonders die Tabellen der Chaldäer zu erwähnen, die sich durch ihre hohe Genauigkeit auszeichneten.<sup>4</sup> Die Babylonier verwendeten für mathematische Berechnungen ein Sexagesimalsystem, dessen Basis auch heute noch ihre Spuren in unserer Kultur hinterlassen hat. Man denke beispielsweise an die Einteilung einer Stunde in 60 Minuten à 60 Sekunden oder die Einteilung eines Kreises in 360 Grad. Dem von den Ägyptern verwendeten Mondkalender wiederum verdanken wir die durchschnittliche Monatslänge von 30 Tagen.

Die Tätigkeiten eines Philosophen und eines Wissenschafters waren bis zur Zeit des Sokrates praktisch nicht voneinander unterscheid- oder trennbar.<sup>5</sup> Daher sollte man bei der Art der Auseinandersetzung mit der Natur, wie sie die Griechen pflegten, weniger von einer Naturwissenschaft, als vielmehr von einer Naturphilosophie sprechen. Dies betrifft vor allem unsere heutige Definition des Wissenschaftsbegriffes, deren umfangreiche Bedeutung das Bild der Antike verzerren würde.<sup>6,7</sup> Gerade im Bereich der Vorsokratiker ist dem allgemeineren Begriff Naturphilosophie Vorzug zu geben und jener der Naturwissenschaft nur im speziellen, vermehrt technischen Kontext zu gebrauchen.<sup>8</sup>

In der Antike war Wissenschaft überwiegend eine Privatangelegenheit, wobei es wichtig war, dass Muße – also Freizeit – die Grundlage jeder philosophischen Überlegung bildete. Nur wenn die Beschäftigung mit der Natur ohne Zwang und frei von belastenden Verpflichtungen stattfand, galt sie als natürlich und somit rational und konnte dem Forschenden ein gewisses gesellschaftliches Prestige verleihen.<sup>9,10</sup> Mitunter wurden auch verschiedenste Erfindungen

---

<sup>4</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 52f.

<sup>5</sup> Vgl. SCHREIER, 2002, S. 21.

<sup>6</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 4f.

<sup>7</sup> Der Brockhaus definiert Wissenschaft als „System menschlichen Wissens, das nach je spezifischen Kriterien erhoben, gesammelt, aufbewahrt, gelehrt und tradiert wird“ und dessen Aufgabe es ist, „im Blick auf bestimmte Fragestellungen mithilfe rational begründ- und nachvollziehbarer Methoden empirisch prüf- und handhabbares Wissen (Wahrheit) zur Verfügung zu stellen“. Gleichzeitig wird jedoch betont, dass „wissenschaftliche Aussagen standortgebunden [...], abhängig von den jeweiligen Erkenntnisinteressen, der Optik beziehungsweise Perspektive, den angewandten Verfahren und nicht zuletzt den technischen Möglichkeiten und sozialen Rahmenbedingungen des Erkennenden beziehungsweise Beobachters“ sind. Vgl. *Wissenschaft* 2014.

<sup>8</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 5.

<sup>9</sup> Vgl. SCHREIER, 2002, S. 17.

<sup>10</sup> Dieser Gedankengang, „natürliche“ Vorgänge mit Rationalität, Ordnung und Wahrheit gleichzusetzen, fand seinen Höhepunkt in der Philosophie des Aristoteles, welcher eine Unterscheidung zwischen natürlichen und erzwungenen Vorgängen einführte. Letztere wären aufgrund ihrer Künstlichkeit ungeeignet, um richtige Schlussfolgerungen aus ihnen zu ziehen.

und Automaten zum Zwecke der Unterhaltung und Begeisterung eines anspruchsvollen Publikums konstruiert. Als wichtigster Vertreter dieser hochgradig mechanisch-technischen Aspekte sei Heron von Alexandria genannt, welcher heute noch beispielsweise durch das nach ihm benannte Verfahren zur Bestimmung der Quadratwurzel einer Zahl präsent ist.<sup>11</sup>

Während das Interesse römischer Philosophen und Wissenschaftler vorwiegend dem praktischen Nutzen ihrer Forschung galt, zeichneten sich die Griechen durch ihre Vorliebe für theoretische Abhandlungen aus. Heisenberg fasst diese essenzielle Geisteshaltung mit folgenden trefflichen Worten zusammen: „Das aber, was das griechische Denken vom ersten Augenblick an unterschieden hat vom Denken anderer Völker, war die Fähigkeit, eine gestellte Frage ins Prinzipielle zu wenden und damit zu Gesichtspunkten zu kommen, die das bunte Vielerlei von Erfahrung ordnen und dem menschlichen Denken zugänglich machen können.“<sup>12</sup>

Zu den Themen, welche im Rahmen naturphilosophischer Behandlungen erörtert wurden, gehörte neben der Urstofffrage auch das Weltbild, also die Stellung des Menschen und der Erde im Kosmos. Man beschäftigte sich des Weiteren ausgiebig mit den Sinneswahrnehmungen und stellte ihre Zuverlässigkeit mithilfe ausgeklügelter Gedankenexperimente und Paradoxa infrage. Auch Bewegungstheorie, Zeitmessung und mechanische Überlegungen waren Gegenstand der Forschung. Zu diesen überwiegend physikalischen Problemstellungen kamen natürlich auch Abhandlungen über Zoologie und Botanik, Bergbau und Metallverarbeitung, Wasserversorgung und diverse Handwerkstätigkeiten sowie Ethik und Medizin.

## 2.2 Der Naturbegriff

Am Beginn jeder Forschung ist es erforderlich, den Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen möglichst exakt darzulegen. Die Definition des Naturbegriffs war einem stetigen Wandel unterworfen und variierte für gewöhnlich von Philosoph zu Philosoph. Im Grunde wurden alle Dinge als Natur angesehen, welche mit den Sinnen wahrgenommen werden konnten. Im Zuge der zunehmend skeptischen Haltung gegenüber der Zuverlässigkeit derselben sah man sich dazu veranlasst, diese Definition zu verfeinern.

Während die Milesier von einem stofflichen Prinzip ausgingen – weshalb sie auch Materialisten genannt werden<sup>13</sup> –, sahen die Pythagoreer in den Zahlen die Grundlage der Welt. Heraklit vertrat die Meinung, alles in der Natur wäre einem stetigen Wandel unterworfen, wohingegen die Eleaten infolge ihres extremen Antisensualismus jegliche Veränderung ablehnten und die Existenz eines einzigen unveränderlichen Seienden annahmen. Empedokles

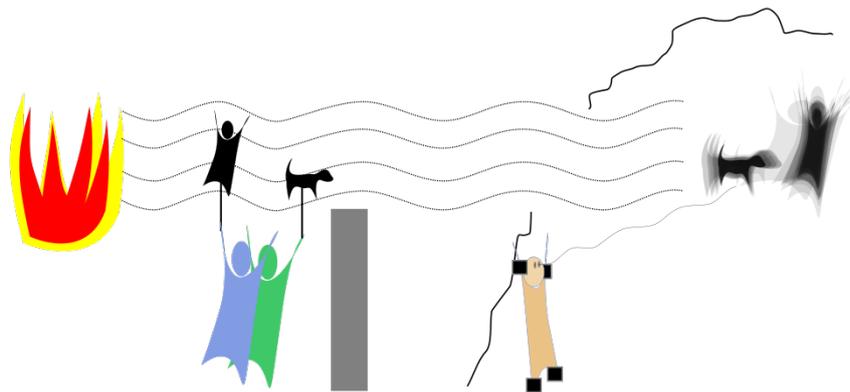
<sup>11</sup> Die Berechnungsvorschrift für die Quadratwurzel einer Zahl nach Heron lautet  $x_{n+1} = 1/2(x_n + a/x_n)$ , wobei  $a$  die Zahl ist, deren Quadratwurzel bestimmt werden soll. Für den Startwert  $x_0$  kann ein beliebiger Wert angenommen werden, wobei die Anzahl der nötigen Iterationen umso geringer ist, je näher der Startwert beim Ergebnis liegt.

<sup>12</sup> HEISENBERG, 1967c, S. 167.

<sup>13</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 30.

begründete in Anlehnung an die Milesier die berühmte Lehre von den vier Elementen und Anaxagoras vertrat die Vorstellung unendlich kleiner Teilchen. Die unterschiedliche Interpretation und Verarbeitung all dieser Theorien von der Natur und ihren Bausteinen bewirkte die Herausbildung zweier Entwicklungsrichtungen, an deren Anfängen einerseits Platon, andererseits Demokrit und sein Lehrer Leukipp standen.

Platon unterschied in seiner Lehre zwischen Materie und Form. In seinem berühmten Höhlengleichnis führte er die Vorstellung von Ideen bzw. Formen ein – vollkommenen Versionen der in der realen Welt befindlichen Objekte. Die von den Menschen wahrgenommenen Dinge – die Materie – wären das Substrat der ihnen übergeordneten Ideen und als solche die unvollkommenen Abbilder derselben.<sup>14,15</sup> Die Materie könnte sich zwar verändern, die Ideen blieben jedoch stets dieselben. Den von ihm angenommenen vier Elementen ordnete er bestimmte geometrische Körper zu, welche fortan als platonische Körper bezeichnet werden. Ferner ging Platon von der Existenz eines Demiurgen, eines göttlichen „Handwerkers“, aus, welcher die Welt „erbaut“ hätte.<sup>16</sup>



**Abbildung 2.2: Skizze von Platons Höhlengleichnis**

Die Trennung zwischen Form und Materie findet sich auch bei seinem Schüler Aristoteles, allerdings in einer etwas abgeänderten Variante. Für ihn war Materie eine eigenschaftslose Substanz, welche als Substrat für die Form diente. Darunter hatte man sich die Gesamtheit aller Eigenschaften vorzustellen, welche für sich alleine nicht existieren, aber der Materie

<sup>14</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 37ff.

<sup>15</sup> Platon beschreibt im 7. Buch seines Hauptwerks *Politeia* eine Höhle, in welcher Menschen vor einer Mauer sitzen und an eine Wand starren. Sie befinden sich dort seit ihrer Kindheit und sind gefesselt, sodass sie weder aufstehen, noch sich umdrehen können. An der Wand vor ihnen sehen sie, wie sich Schatten bewegen. Hinter der Mauer werden Gegenstände, welche die vollkommenen Ideen repräsentieren, von anderen Personen in die Strahlen des vom Höhleneingang her einfallenden Sonnenlichts gehalten, wodurch die Schatten zustande kommen. Für die Gefangenen stellen diese die Realität dar. Durch die Philosophie sei es nun möglich, die Fesseln zu lösen und einen Blick auf die Welt außerhalb der Höhle zu erhaschen. Dabei werde man im ersten Augenblick vom grellen Sonnenlicht geblendet, aber die Sinne könnten sich langsam daran gewöhnen, bis man schließlich die wahre Natur der Dinge erblickt (siehe Abbildung 2.2). Eine deutsche Übersetzung des griechischen Originals findet sich unter anderem im Gutenberg-Projekt des Spiegel Online (PLATON, 2014) oder im von Leggewie, Lenzen und Zinken herausgegebenen Sammelband von Texten zur Antike (vgl. PLATON, 1967).

<sup>16</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 34f.

als Superstrat verliehen sein konnten. Er entwarf ein auf den vier Ursachen „Form“, „Materie“, „Veränderung“ und „Zweck“ basierendes Weltbild, wobei dem τέλος (*télos*), also dem Zweck einer Sache, besondere Bedeutung zukam.<sup>17</sup> Wie sein Lehrer Platon vertrat auch er die These von vier Grundelementen, wobei sich diese durch das Zusammentreffen von je zwei bestimmten Eigenschaften bildeten. Aristoteles ging von den vier paarweise gegensätzlichen Grundeigenschaften warm/kalt und trocken/feucht aus. Das Problem der Veränderung löste er auf höchst raffinierte Weise, worauf in Kapitel 5.2 noch eingegangen werden wird. Weitreichende Folgen sollte auch seine Ablehnung von Experimenten haben, da diese aufgrund ihrer Künstlichkeit keine repräsentativen und wahrheitsgetreuen Ergebnisse liefern könnten. Das Universum des Aristoteles hätte keinen Anfang und kein Ende und existierte ewig.<sup>18</sup>

Die Naturanschauung der Atomisten beruhte im Wesentlichen auf der Annahme, dass das Universum aus einem unveränderlichen Grundstoff bestünde: Den Atomen. Diese existierten in unterschiedlicher Gestalt und Größe, wobei sich mehrere Atome zu ausgedehnten Verbänden zusammenschließen konnten und so die Ausbildung sekundärer Eigenschaften wie Farbe und Geschmack bewirkten. Dieses Weltbild war ein rein mechanisches, welches ohne jegliche Zweckmäßigkeit auskam. Die Auffassung der Natur als ein solches „Uhrwerk“ widersprach somit gänzlich der aristotelischen Teleologie, was mitunter einen Grund für die von Aristoteles mit glühendem Eifer betriebene Kampagne gegen die Atomisten und ihre Lehren bildete, deren Auswirkungen bis in die Renaissance spürbar waren.

Eine sich im ewigen Kreislauf von Werden und Vergehen befindliche Welt stand im Zentrum der Lehre der von Zenon von Kition gegründeten Stoa, welche vom Pneuma („Hauch“), einer Art göttlichen Vernunft, durchdrungen wäre. Das Universum als ganzes wäre beseelt, was mit dem Begriff Weltseele zum Ausdruck gebracht wird.<sup>19</sup> Da das All unendlich wäre, besäße es keinen Mittelpunkt.<sup>20</sup>

Schließlich beantwortete das aufstrebende Christentum die Frage nach dem Anfang der Welt damit, dass es Platons Demiurgen mit Gott identifizierte, welcher in die Rolle des Schöpfers und des ersten Bewegers schlüpfte.

## 2.3 Der Weg des Wissens

Wie bereits erwähnt hatte Kleinasien durch seine geografische Lage und die dadurch ermöglichten Kontakte mit den babylonischen und ägyptischen Hochkulturen eine Schlüsselstellung bei der Tradierung des Wissens. Die Ionier waren die ersten Griechen, die sich die jahrtausendealten Erkenntnisse dieser beiden Völker aneigneten und zunutze machten. Durch die bereits ab dem 8. Jh. v. Chr. einsetzende Kolonisierung Süditaliens gelangte der Fortschritt

<sup>17</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 50ff.

<sup>18</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 58.

<sup>19</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 86ff.

<sup>20</sup> Vgl. EHLERS, 2002a, S. 50f.

weiter nach Westen in die Magna Graecia, wo sich im 6. Jh. die Schulen der Pythagoreer und der Eleaten bildeten.<sup>21</sup>

Nach dem Aufstieg Athens unter Perikles und der Blüte der Philosophie unter den drei berühmten Persönlichkeiten Sokrates, Platon und Aristoteles führte die immer dominantere Vormachtstellung Makedoniens mit Alexander dem Großen an der Spitze, dessen Erzieher niemand Geringerer als Aristoteles war, zu einer Verlagerung der wissenschaftlichen Tätigkeiten nach Nordafrika in das neu gegründete Alexandria und dessen weltberühmte Bibliothek. Im alexandrinischen Museion wirkten während des Hellenismus unter anderem Euklid, Eratosthenes, Ptolemaios sowie der bereits erwähnte Heron.

Mit Alexanders Tod begann das von ihm geschaffene Weltreich sukzessive zu zerfallen und im Jahre 146 v. Chr. wurde Griechenland schließlich zur römischen Provinz. Im selben Jahr endete der letzte der drei Punischen Kriege, eine Auseinandersetzung zwischen Rom und der konkurrierenden Seemacht Karthago. Den Wirren dieser Kriege fiel bekanntermaßen Archimedes auf Sizilien zum Opfer. Die Vermittlerrolle zwischen griechischen und römischen Gelehrten hatte nach diesen Ereignissen neben den griechischen Kolonien in der Magna Graecia vor allem Alexandria. Einige römische Wissenschaftler nahmen sich des Studiums griechischen Wissens an und konservierten es dadurch. Hier sind insbesondere Lukrez, Cicero, Vitruv, Seneca der Jüngere und Plinius der Ältere zu nennen.



Abbildung 2.3: Zentren wissenschaftlicher Forschungen

<sup>21</sup> Siehe Abbildung 2.3.

Als das römische Weltreich 395 n. Chr. geteilt und Konstantinopel, die Hauptstadt des Oströmischen Reiches, im Jahre 626 als Folge der Islamischen Expansion von den arabischen Völkern erobert wurde, setzte die so genannte arabische Tradition ein, wodurch das Ende der Antike eingeläutet wurde. Im Jahre 642 folgte die Eroberung Alexandrias und bis zum 9. Jh. n. Chr. waren auch die Iberische Halbinsel und Sizilien unter islamischer Herrschaft. Während dieser Phase gelangte das griechische Wissen in den Orient, wo es im Laufe der nächsten Jahrhunderte von großen Wissenschaftlern wie al-Chwarizmi, Avicenna (Ibn Sīnā) und Averroës (Ibn Rušd) zurate gezogen und weiterverarbeitet wurde.

Besonders den beiden Gelehrten Boëthius und Cassiodor ist es zu verdanken, dass ein Großteil der antiken Schriften im 5. und 6. Jh. in die Obhut der Klöster übergeben und so bis zur Neuzeit erhalten werden konnte.<sup>22</sup>

## 2.4 Die großen Leistungen und Probleme der griechischen Naturphilosophie

Nach eingehender Betrachtung ist man heute in der Lage, Aspekte und Themen zu identifizieren, welche zum einen Teil als herausragende Leistungen der antiken Naturphilosophie anzusehen sind, ihr zum anderen Teil aber bewusst oder unbewusst große Schwierigkeiten bereiteten und mitunter erst Jahrhunderte später wieder aufgegriffen wurden. Die nachfolgend angeführten Punkte stellen nur eine Auswahl dar und sollen einen groben Überblick der Thematik geben.

Zum Betreiben jeglicher Wissenschaft war das Vorhandensein einer Schrift unabdingbar (siehe Abbildung 2.4). Sie ermöglichte es, Gedanken und Beobachtungen für die Nachwelt zu notieren und diese Aufzeichnungen zu vergleichen, um etwaige Übereinstimmungen oder Regelmäßigkeiten zu identifizieren.<sup>23</sup>



Abbildung 2.4: Linksläufiges griechisches Musteralphabet auf einer Schreiftafel

### 2.4.1 Der Mensch als Forscher

Als zentraler Gedanke muss der unerschütterliche Glaube der Griechen an Rationalität und Ordnung genannt werden<sup>24</sup>, welcher sich auch im Begriff Kosmos ( $\kappa\acute{o}\sigma\mu\omicron\varsigma$ , *kósmos* = „Ord-

<sup>22</sup> Abbildung 2.3 bietet eine kartografische Übersicht derjenigen Orte des Mittelmeerraums, in welchen eine rege Beschäftigung mit naturwissenschaftlichen Themen stattfand. Ferner sind die am jeweiligen Ort tätigen Philosophen angeführt.

<sup>23</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 13f.

<sup>24</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 34f.

nung“) widerspiegelt. Sie waren der Meinung, dass der Mensch nur durch Nachdenken und den Gebrauch seiner Vernunft die Naturgesetze entschlüsseln und die Wahrheit finden könnte. Die Suche nach einem der Vielfalt der Welt zugrunde liegenden Stoff ist ebenso bemerkenswert wie dessen Abstrahierung durch die Atomisten, welche als eine der ersten wissenschaftlichen Modellbildungen betrachtet werden kann. Als ganz wesentliche Schritte sind auch die Lossagung von göttlichen Einflüssen und die Emanzipation gegenüber der scheinbar unberechenbaren Natur anzuführen, die es zu definieren und zu entmystifizieren galt. Für die Welterforschung war des Weiteren die Schaffung eines begrifflichen Rahmens sowie eines entsprechenden Wortschatzes unentbehrlich.<sup>25</sup>

### 2.4.2 Mathematisierung

Die Abstrahierung wurde nicht zuletzt durch die seit den Pythagoreern stattgefundene Mathematisierung der Welt bewirkt. Platon, der Lehrer des Aristoteles, beschäftigte sich in der von ihm gegründeten und von pythagoreischen Lehren beeinflussten Akademie überwiegend mit den mathematischen Aspekten der Welt. Die drei von den Griechen benutzten Zahlensysteme waren dabei jedoch nicht sonderlich hilfreich, da ihnen allen ein Ausdruck für die Null fehlte. Dies erwies sich als entsprechend problematisch für zukünftige Entwick-

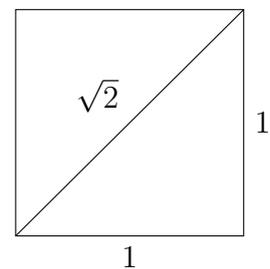


Abbildung 2.5

lungen, denn das Wissen um die Zahl ohne Eigenwert kam erst später aus dem arabischen Raum nach Europa und ermöglichte dort die Einführung eines bislang nicht vorhandenen Stellenwertsystems. Hingegen war man sich der Irrationalität von  $\sqrt{2}$  und generell der Existenz von nicht als Bruch darstellbaren Zahlen bewusst (siehe Abbildung 2.5). Um diese Entdeckung ranken sich einige Mythen, wonach unter anderem der Pythagoreer Hippasos das Wissen um irrationale Zahlen preisgegeben haben und aufgrund dessen aus der Gemeinschaft der Pythagoreer ausgeschlossen worden sein soll. Die für die Antike höchste Abstraktionsstufe erreichte der Alexandriner Euklid, dessen mathematisches Werk bis in die Neuzeit von Bedeutung ist.<sup>26</sup>

### 2.4.3 Physik und Mathematik

Aristoteles widersprach der mathematischen Weltanschauung seines Lehrers und vertrat die Trennung von Physik und Mathematik<sup>27</sup>, welche jedoch noch in der Antike durch Archimedes wieder aufgehoben werden konnte.<sup>28</sup> Ein weiterer Aspekt der aristotelischen Lehre war seine mathematische Auffassung der Astronomie, die unter dieser Voraussetzung eine Entfremdung

<sup>25</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 47f.

<sup>26</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 26.

<sup>27</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 91f.

<sup>28</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 88ff.

gegenüber der unter physikalischen Aspekten betriebenen Sternenkunde zur Folge hatte. Eine Vereinigung aristotelischer und platonischer Lehren erreichte erst Nikolaus Kopernikus im 15./16. Jahrhundert.<sup>29</sup> Das Weltbild der Antike war im Übrigen bis auf wenige Ausnahmen (Pythagoras, Aristarch von Samos, Philolaos) ein geo- bzw. anthropozentrisches mit der Erde bzw. dem Menschen auf ihr im Mittelpunkt. Erst die Errungenschaften von Kopernikus, Kepler, Galilei und Newton verhalfen dem Heliozentrismus schließlich zu seinem Durchbruch.

#### 2.4.4 Bewegungslehre

In den Bereichen der Kinematik und der Dynamik stellte die Beschreibung von Bewegungen eine große Herausforderung dar. Obwohl man ein Verständnis dafür hatte, dass Bewegung nur dann stattfand, wenn sich der Ort eines Objektes in der Welt veränderte, gab es dennoch keine formelhafte Verknüpfung von Weg und Zeit zu Geschwindigkeit. Eine für damalige Zeiten möglichst exakte Messung von Strecken und Zeitspannen konnte schon früh durch ausgeklügelte Apparate wie beispielsweise Herons Hodometer oder diverse Sand-, Wasser- und Sonnenuhren erreicht werden. Für die physikalische Größe der Geschwindigkeit hingegen existierten hauptsächlich Umschreibungen und Vergleiche über die sie zusammensetzenden Komponenten, mittels derer sich jeder Mensch ein anschauliches Bild ihres Betrags machen konnte. Es wurde unter anderem von Aristoteles und seiner Schule, den Peripatetikern, das Beispiel formuliert, dass ein von doppelt so vielen Pferden gezogener Wagen in der gleichen Zeit die zweifache Strecke zurücklegen könnte. Bei diesem einfachen Beispiel muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass in der Auffassung der Antike die beiden modernen Ausdrücke Kraft und Geschwindigkeit in einem für uns ungewohnt linearen Zusammenhang standen. Durch Ausübung einer Kraft – dabei konnte es sich um menschliche oder tierische Muskelkraft sowie Wasser- oder Windkraft handeln – wurden stets Objekte in Bewegung versetzt, wodurch gemäß des damaligen Verständnisses davon auszugehen war, dass Kraft eine Geschwindigkeit bewirkte und zwischen beiden Größen eine direkte und sogar lineare Proportionalität bestand. Hinzu kam ein gewisser Widerstand, den die Objekte der bewegendem Kraft entgegensetzten. Als Formel dargestellt würde die „Bewegungsgleichung“ der peripatetischen Dynamik wie folgt lauten:  $v \propto F/W$ . Da man den Widerstand eines Objekts in der damaligen Anschauung als hauptsächlich durch sein Gewicht bzw. seine Masse verursacht sehen kann, lässt sich die Gleichung gemäß dieser Vereinfachung auch als  $v \propto F/m$  schreiben.<sup>30</sup> Dabei muss erwähnt werden, dass der Begriff Gewicht bei Aristoteles als Gegensatzpaar schwer/leicht definiert war, jedoch von seinem Nachfolger Straton zu viel/wenig (Gewicht) verbessert wurde.<sup>31</sup> Obgleich obiger Ausdruck bereits sehr stark an das zweite newtonsche Axiom erinnert, soll an dieser Stelle nochmals nachdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die oben gewählten Darstellungsweisen als Formeln ein Ergebnis der moder-

<sup>29</sup> Vgl. KRAFFT, 2005, Sp. 791.

<sup>30</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 77f.

<sup>31</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 81f.

nen Naturwissenschaft darstellen, welches mit den überwiegend qualitativen Ansichten und Alltagserfahrungen der Antike wenig gemeinsam hat. Nach dem heutigen Wissensstand ist davon auszugehen, dass die Dynamik der Peripatetiker mehr Hemmnis als Hilfe war.<sup>32</sup> Eine Gegenüberstellung der zentralen Punkte der peripatetischen und der newtonschen Dynamik kann Tabelle 2.1 entnommen werden.<sup>33</sup>

Peripatetische Dynamik	Newtonsche Dynamik
Bewegung ist ein Prozess für dessen Aufrechterhaltung eine Kraft benötigt wird	Bewegung ist ein Zustand für dessen Veränderung eine Kraft benötigt wird
$v \propto F$	$\frac{d}{dt}v \propto F$
wenn $F = 0$	wenn $F = 0$
dann $v = 0$	dann $v = \text{const.}$

**Tabelle 2.1: Gegenüberstellung peripatetischer und newtonscher Dynamik**

### 2.4.5 Inertialgesetz und Vakuum

Gemäß der aristotelischen Bewegungstheorie existierte ein Trägheitsprinzip in jener von Newton ausgedrückten Form nicht, sondern nur in einer abgewandelten Variante. Verschwand nämlich die Einwirkung einer äußeren Kraft, so musste die Geschwindigkeit eines Körpers ebenfalls augenblicklich null werden.<sup>34</sup> Da man jedoch beobachten konnte, dass ein in die Luft geworfener Stein nach dem Verlassen der Hand des Werfers nicht sofort zu Boden fiel, sah man sich aufgrund der Widersprüchlichkeit von Theorie und praktischer Erfahrung – man könnte hier fast schon den Terminus „Experiment“ gebrauchen – dazu veranlasst, dem Medium selbst, in welchem der Vorgang stattfand, die Rolle der treibenden Kraft zu übertragen.<sup>35</sup> Diese Anschauung führte ab dem 6. Jh. zur Ausbildung der so genannten Impetustheorien, von welchen auch Newton beeinflusst wurde und deren bekannteste Vertreter Johannes Philoponus, Avicenna, Johannes Buridan, Leonardo da Vinci und Galilei waren.<sup>36</sup> Genau genommen übte auch das Medium einen Widerstand auf die Bewegung aus, welcher sich umso stärker bemerkbar machte, je höher seine Dichte war.<sup>37</sup> Diese Vorstellung hatte weitreichende Konsequenzen. Sie verbot aus aristotelischer Sicht die Existenz eines Vakuums, eines leeren

<sup>32</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 76f.

<sup>33</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 78.

<sup>34</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 39.

<sup>35</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 79f.

<sup>36</sup> Vgl. KRAFFT, 2005, Sp. 805f. und Sp. 813f.

<sup>37</sup> Ein moderner Vergleich wäre unter anderem die von der Viskosität einer Flüssigkeit abhängige Sinkgeschwindigkeit von kleinen Körpern wie beispielsweise Metallkügelchen.

Raumes ohne jegliches Medium, denn in einem solchen würde eine treibende Kraft einerseits keinerlei Beschränkung erfahren und könnte ein Objekt deshalb mit unbegrenzt hoher Geschwindigkeit über eine unendliche Zeitdauer hinweg fortbewegen. Andererseits wurde die Existenz eines Mediums als Erfordernis jeglicher Bewegung angesehen. Aufgrund seiner Absurdität und Widernatürlichkeit schien es naheliegend, das Vorhandensein eines Vakuums als unmöglich zu erachten.<sup>38</sup> Dies bildete einen zentralen Streitpunkt mit der Lehre der Atomisten, die von einer aus Atomen und leerem Raum aufgebauten Welt ausgingen. Für sie war die Leere für die Bewegung der Atome zwingend erforderlich. Bei Aristoteles hingegen fand jegliche Bewegung immer in pleno, also im vollen Raum statt. Ein experimenteller Nachweis des Vakuums gelang erst Otto von Guericke durch seinen berühmten Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln im Jahre 1657.<sup>39</sup> Bis dahin ging man von einem Horror Vacui als Eigenschaft des Raumes aus.<sup>40</sup> Die systematische Ablehnung des Atomismus durch die aristotelischen Lehren und ihre Anhänger lässt sich bis ins 17. Jh. nachverfolgen, als es Pierre Gassendi schließlich gelang, die antike Atomtheorie von ihrer Geißel zu befreien.

#### 2.4.6 Trennung von Himmel und Erde

Die Bewegungstheorie der peripatetischen Schule war aufgrund der Autorität ihres Gründers über eine lange Zeit hinweg tonangebend. Aristoteles hatte die Trennung von irdischer und himmlischer Physik postuliert, wobei die Erste als sublunar und die Zweite als supralunar bezeichnet wurde. Der Bereich außerhalb der Mondsphäre wäre vom Äther – der Quintessenz bzw. dem fünften Element – erfüllt und würde sich somit den irdischen Naturgesetzen entziehen. Dies knüpfte direkt an die Vorstellung der Planetensphären an. Dabei handelte es sich um Kugelschalen, auf denen sich die sichtbaren Wandelsterne, zu welchen auch der Mond gezählt wurde, zu bewegen schienen. Überhaupt wurden als Planetenbahnen in der Antike stets Kreisbahnen sowie ausgeklügelte Kombinationen derselben angenommen. Die getrennte Behandlung irdischen und himmlischen Raums hatte weitreichende Konsequenzen und erst Newton konnte beide Bereiche dank eines Geistesblitzes unter einer Theorie vereinen.<sup>41</sup> Die Diskussion von Äthertheorien sowie Versuche ihrer Einführung in die Physik gibt es hingegen bis ins 21. Jahrhundert.<sup>42</sup>

#### 2.4.7 Weltbilder und Geozentrismus

Auf dem Gebiet der Kosmologie wurde eine große Zahl an Weltbildern aufgestellt, wobei im Folgenden einige wichtige Erkenntnisse erwähnt sein sollen. Prinzipiell muss zwischen geozentrischen und heliozentrischen Systemen unterschieden werden. Der anfängliche und

<sup>38</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 42; vgl. LINDBERG, 1994, S. 62ff; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 37ff.

<sup>39</sup> Vgl. KRAFFT, 2005, Sp. 808.

<sup>40</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 81.

<sup>41</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 37ff; vgl. SIMONYI, 2001, S. 76ff.

<sup>42</sup> Siehe unter anderem KOSTELECKÝ, 2011.

sehr lange anhaltende Erfolg geozentrischer Lehren beruhte nicht zuletzt auf deren scheinbar fundamentaler Einfachheit: Da die Menschheit auf der Erde lebte, war es naheliegend, diese nicht nur als Zentrum des menschlichen Lebensraums, sondern als Dreh- und Angelpunkt des gesamten Universums zu betrachten. Die Kugelgestalt der Erde war der Antike entgegen heute kursierenden Anekdoten sehr wohl bekannt, wobei dieses Wissen in der Spätantike nach und nach in Vergessenheit geriet.<sup>43</sup> Natürlich existierten auch alternative Vorstellungen, wie beispielsweise die einer scheibenförmigen Erde bei Thales und Anaximenes sowie einer zylindrischen Welt bei Anaximander.<sup>44</sup> Xenophanes sah den Planeten sogar als eine große amorphe Masse an<sup>45</sup>, während Parmenides seiner Welt, dem „einen Seienden“ der eleatischen Lehre, die Gestalt einer perfekten homogenen Kugel zuschrieb.<sup>46</sup> Nachfolgende Gelehrte rückten von der Kugelgestalt der Erde nicht mehr ab, zumal diese auch anhand astronomischer Beobachtungen erwiesen war. Die Veränderungen am Sternenhimmel bei einer Reise nach Süden waren ebenso bekannt wie die eindrucksvolle und zugleich anschauliche Beweisführung über die Gestalt des Erdschattens auf der Mondoberfläche.<sup>47</sup> Empedokles erkannte, dass der Mond das von ihm ausgestrahlte Licht von der Sonne reflektierte und diese um ein Vielfaches größer sein müsste als der Erdtrabant.<sup>48</sup> Herakleides Pontikos vertrat als erster die Theorie der Erdrotation und deutete die bei anderen Planeten beobachteten Helligkeitsänderungen als Variation des Abstands der Erde zu diesen. Ferner umkreisten in seinem Modell Merkur und Venus nicht die Erde, sondern die Sonne, was als bemerkenswerter Schritt in Richtung des heliozentrischen Weltbilds anzusehen ist.<sup>49</sup> Die Genauigkeit astronomischer Beobachtungen ging so weit, dass es Hipparchos möglich war, die Präzession der Äquinoktialpunkte zu erkennen.<sup>50</sup> Dem Alexandriner Eratosthenes gelang mittels einer einfachen und gleichzeitig genialen Methode eine gute Bestimmung des Erdumfangs.<sup>51,52</sup> Während Anaximenes noch von einer flachen Gestalt aller Gestirne ausging<sup>53</sup>, korrigierte Platon diese Anschauung,

<sup>43</sup> Vgl. SCHREIER, 2002, S. 25.

<sup>44</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 26ff.

<sup>45</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 28f.

<sup>46</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 30f; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 35; vgl. SIMONYI, 2001, S. 71.

<sup>47</sup> Wäre die Erde anders geartet als eine Kugel, so müsste ihr Schatten zweifelsohne je nach Einfall des Sonnenlichts seine Form verändern. Da der auf den Mond geworfene Schatten jedoch stets kreisrund erschien, war für Pythagoras und Aristoteles der Beweis für die Kugelgestalt der Erde erbracht (vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 80; vgl. EHLERS, 2002b, S. 42).

<sup>48</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 32.

<sup>49</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 89; vgl. SIMONYI, 2001, S. 83.

<sup>50</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 105.

<sup>51</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 104f; vgl. EHLERS, 2002a, S. 49; vgl. SIMONYI, 2001, S. 100f.

<sup>52</sup> Die genaue Beschreibung seiner Vorgehensweise kann bei Simonyi nachgelesen werden. Im Prinzip bediente er sich der Tatsache, dass die Sonne zum Zeitpunkt des Sommersolstitiums in Assuan exakt im Zenit stand, während hingegen zur selben Zeit in Alexandria eine Abweichung der einfallenden Sonnenstrahlen von ein paar Grad von der Senkrechten verzeichnet werden konnte. Über einen simplen Vergleich mit der von ihm grob geschätzten Entfernung zwischen diesen beiden Orten gelangte er schließlich zu dem Ergebnis, die Erdkugel müsste einen Umfang von etwa 250.000 Stadien haben. Dieses entspricht der besten in der Antike durchgeführten Näherung an den heute bekannten Wert von ungefähr 40.000 km.

<sup>53</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 28.

indem er allen anderen Himmelskörpern ebenfalls die Gestalt von Kugeln zuschrieb.<sup>54</sup> Das Weltbild des Aristoteles sah – wie bereits erwähnt – eine Zweiteilung des Raumes in eine Welt ober- und unterhalb der Mondsphäre vor. Wie Pythagoras, Eudoxos von Knidos sowie sein Lehrer Platon vor ihm, war er ein Vertreter der Sphärenharmonie, eines rein mathematischen Modells des Kosmos.<sup>55</sup> Als Vollender der antiken griechischen Astronomie gilt Ptolemaios, wobei seine Bewegungsmodelle der Gestirne eine sehr hohe Komplexität aufwiesen.<sup>56,57</sup> Der von ihm berechnete Wert für den Erdumfang wurde noch von Christoph Kolumbus bei der Planung seiner Seereise nach Indien verwendet.<sup>58</sup> Wie Aristoteles sah auch er eine Diskrepanz zwischen dem Betreiben von Astronomie unter mathematischen und physikalischen Aspekten. In weiterer Folge griff Martianus Capella das von Herakleides entworfene Modell einer heliozentrischen Bewegung der Planeten Merkur und Venus auf und lieferte somit eine entscheidende Basis für Keplers Theorien.<sup>59</sup> Das System von Tycho Brahe ließ bereits beinahe alle Gestirne ihre Bahnen um die Sonne ziehen, sah jedoch immer noch die Erde als Zentrum der Welt an und den Mond und die Sonne auf Bahnen um diese.<sup>60</sup>

### 2.4.8 Heliozentrismus

Ein erstes heliozentrisches Weltbild ist in den Lehren der Pythagoreer anzutreffen. In diesem aus zehn Gestirnen bestehenden System rotierten die bereits bekannten Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn sowie der Mond, die Sonne und die zum Zweck des Erreichens der Zehnzahl postulierte Gegenerde um das so genannte Zentralfeuer. Pythagoras ging davon aus, dass alle Himmelsbewegungen auf kleine Verhältnisse natürlicher Zahlen zurückgeführt werden könnten. Diese wiederum sollten sich als diejenigen Teilungsverhältnisse einer gespannten Saite erweisen, bei welchen zueinander harmonische Töne entstünden.<sup>61</sup> Der Peripatetiker Aristarch von Samos verschaffte dem pythagoreischen Weltbild seinen letzten Schliff, indem er unter anderem die doppelte Bewegung der Erde – also die Eigenrotation um eine zur Hauptrotationsebene geneigte Achse sowie den Umlauf um die Sonne – erkannte.<sup>62</sup>

<sup>54</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 40.

<sup>55</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 83f; vgl. LINDBERG, 1994, S. 65 und S. 102; vgl. HEISENBERG, 1967b, S. 154; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 34.

<sup>56</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 97f; vgl. LINDBERG, 1994, S. 105ff; vgl. EHLERS, 2002a, S. 54ff; vgl. KRAFFT, 2005, Sp. 799f.

<sup>57</sup> Die Details zu Epizykel-, Exzenter- und Äquanttheorie können der angegebenen Literatur entnommen werden. Man beachte insbesondere Abbildung 1.4 – 10 in SIMONYI, 2001, S. 98. Die von Ptolemaios durchgeführte Addition gleichförmiger Bewegungen zum Erhalt einer scheinbar ungleichförmigen Bewegung erinnert stark an die heute gebräuchliche Überlagerung vieler verschiedener regelmäßiger Sinus- und Cosinusschwingungen bei der Fourier-Analyse (vgl. SIMONYI, 2001, S. 83).

<sup>58</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 146.

<sup>59</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 154f.

<sup>60</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 83.

<sup>61</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 62f; vgl. EHLERS, 2002a, S. 35ff; vgl. HEISENBERG, 1967b, S. 154; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 185; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 34.

<sup>62</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 83; vgl. LINDBERG, 1994, S. 104f; vgl. EHLERS, 2002a, S. 47ff; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 84 und S. 89.

### 2.4.9 Schwerkraft

Besonders problematisch war das Phänomen der Schwerkraft und des freien Falls, welches als Streben zum natürlichen Ort hin, der sich gemäß des Geozentrismus im Zentrum der Erde befand, interpretiert wurde. Alternativ zu dieser Erklärung wurden auch Wirbelbewegungen angenommen, durch welche schwere Gegenstände eine Kraft in Richtung des Wirbelzentrums erfuhren.<sup>63</sup> Descartes ging im 17. Jh. noch von einer solchen Theorie aus. Ganz offensichtlich spielten dabei alltägliche Beobachtungen eine entscheidende Rolle, wie zum Beispiel beim Umrühren einer Tasse Tee das sich Ansammeln von Teeblättern in der Mitte des Wasserwirbels.

### 2.4.10 Experimente

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der aristotelischen Physik war die Kritik an der Durchführung von Experimenten. Gemäß seiner Lehre musste prinzipiell zwischen natürlichen und widernatürlichen Vorgängen unterschieden werden. Natürliche Prozesse liefen stets gemäß der Natur der Dinge ab. Griff man in dieses Geschehen ein, schuf man eine künstliche Situation, in welcher sich die Objekte entgegen der Natur verhalten würden und somit jeglicher aus der Beobachtung gezogene Schluss nicht der Wahrheit entspräche.<sup>64</sup> Diese Anschauung erinnert an die „Spielregeln“ der Quantenmechanik, denen zufolge jede Messung eine Veränderung des untersuchten Zustands bewirkt. Auch das Fachgebiet der Mechanik wurde in der Antike nicht als Naturwissenschaft im eigentlichen Sinn angesehen, da die mannigfaltigen Apparate in letzter Instanz stets als etwas Künstliches galten. Erst Kepler gliederte die Mechanik wieder in den Kreis der Naturwissenschaften ein.<sup>65</sup> Es ist Galilei zu verdanken, dass die Durchführung von Experimenten dennoch Einzug in das Betätigungsfeld jedes Naturwissenschaftlers gefunden hat.

### 2.4.11 Zeit

Die Messung der Zeit erfolgte üblicherweise anhand von Bewegungs- oder Veränderungsvorgängen in der Welt. Das Verständnisproblem, welches sich hier auftat, ist vielleicht nicht auf den ersten Blick zu erkennen, kann jedoch durch eine simple Frage auf den Punkt gebracht werden: Vergeht die Zeit auch für ein in der Welt ruhendes Objekt? Da man es gewohnt war, Zeit nur über Veränderung zu messen, stellte diese philosophisch anmutende Frage einen berechtigten Einwand dar, der selbst große Gelehrte wie den Kirchenvater Aurelius Augustinus noch dazu veranlasste, ihm und der Zeit an sich im 11. Buch seiner *Confessiones* einige Gedanken zu widmen. Die folgende Aussage könnte ebenso gut aus dem Mund eines modernen Forschers stammen: „Was also ist Zeit? Wenn niemand mich danach fragt, weiß ich es; wenn

<sup>63</sup> Vgl. HOSSENFELDER, 1995, S. 141; vgl. EHLERS, 2002b, S. 34f; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 133.

<sup>64</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 55f.

<sup>65</sup> Vgl. KRAFFT, 2005, Sp. 790f.

ich es einem Fragenden erklären will, weiß ich es nicht“ (Augustinus, *Confessiones* 11, 14, 17). Platon hingegen findet eine klare Antwort: Zeit vergeht nicht ohne Bewegung.<sup>66</sup> Die hier beinahe schon forcierte Knüpfung von Zeit an Bewegung bietet einen interessanten Anklang an die Relativitätstheorie von Albert Einstein, wonach für einen ruhenden Beobachter die Zeit eines bewegten Objekts abhängig von dessen Geschwindigkeit langsamer vergeht.

#### 2.4.12 Sinneswahrnehmungen

Die Zuverlässigkeit sämtlicher Sinneswahrnehmungen wurde von vielen Gelehrten infrage gestellt. Platon demonstrierte in seinem berühmten Höhlengleichnis, dass alle Objekte der Welt nur unvollkommene Schatten der hinter ihnen stehenden Ideen wären. Die Eleaten Zenon und Parmenides vertraten die These, dass jedwede Veränderung, egal ob räumlich, zeitlich oder stofflich, unmöglich wäre. Zur Bekräftigung formulierten sie unter anderem das berühmte Paradoxon vom Wettlauf zwischen dem Helden Achilles und einer Schildkröte.<sup>67</sup> Sinnestäuschungen wie beispielsweise ein in das Wasser ragendes Ruder, welches aufgrund der optischen Refraktion als gebrochen erschien, waren bekannt und spornten die Philosophen an, Theorien über deren Entstehung zu entwickeln.<sup>68</sup> Der Atomist Epikur ging von kleinen Bildchen, so genannten εἰδωλα (*eídola*) aus, welche aufgrund äußerer Einflüsse verzerrt würden und so dem Wahrnehmenden ein falsches Bild des wirklichen Sachverhalts vermitteln könnten.

#### 2.4.13 Stoffliche Veränderungen

Ein ebenfalls von den Atomisten thematisiertes Phänomen waren stoffliche Veränderungen wie beispielsweise Abnutzungserscheinungen an metallenen Ringen oder steinernen Straßen. Da man diesen Materialien aufgrund ihrer Härte eine gewisse Unveränderlichkeit zuzuschreiben geneigt war, schien die Beobachtung der Erwartung zu widersprechen. Lukrez erklärte dies durch zunächst kleinste und unsichtbare Veränderungen auf atomarer Ebene, welche sich erst im Laufe der Zeit summieren würden und deren Folgen schließlich im makroskopischen Bereich sichtbar wären. Diese Erklärung entspricht im Prinzip dem heutigen Wissensstand.

#### 2.4.14 Zentrale Errungenschaften

Am Ende dieses Abschnitts soll noch den wichtigsten Errungenschaften der Peripatetiker sowie aller anderen Philosophenschulen Rechnung getragen werden. Der große Verdienst von Aristoteles bestand in seiner selbstständigen Schaffung neuer Wissenschaftsdisziplinen und der Identifizierung der Natur als Objekt wissenschaftlicher Untersuchungen.<sup>69</sup> Er war ferner

<sup>66</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 38ff.

<sup>67</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 110; vgl. EHLERS, 2002b, S. 31f; vgl. SIMONYI, 2001, S. 66f.

<sup>68</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 43.

<sup>69</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 72.

tonangebend auf dem Gebiet der empirischen Forschung sowie bei den Versuchen der Formulierung von Grundgesetzen. Den Pythagoreern und Akademikern ist es zu verdanken, dass die Mathematik zur Sprache der Naturwissenschaft wurde. Wenngleich ihre Lehren weltfremd anmuten, so muss man dennoch die Suche der Eleaten nach einer Konstante in der Welt hervorheben. Die Atomisten verarbeiteten diese Strömung und schufen damit die gedanklichen Grundlagen klassischer Teilchentheorien. Schließlich vertraten die Stoiker unter Zenon von Kition die Ansicht, dass die Natur als solche eine große Entität darstellte, innerhalb welcher die Grundgesetze ohne Einschränkungen anwendbar wären.<sup>70</sup> Schrödinger nennt einige „besondere Züge der griechischen Denkweise“, welche hier ebenfalls erwähnt werden sollen. Neben der Rolle von Thales als erstem Forscher und der Ansicht, das Naturgeschehen ließe sich verstehen, neigten die Naturphilosophen der Antike dazu, sich selbst als forschende Wissenschaftler aus dem Weltbild herauszunehmen und in die Rolle von Zuschauern zu schlüpfen, wodurch manche Fehler und scheinbare Paradoxa erst ermöglicht wurden. Heraklit wäre der erste Gelehrte gewesen, welcher von der Perspektive einer dritten Person sprach. Schlussendlich wird noch die Tatsache erwähnt, dass gewisse Strömungen zu der Erkenntnis gelangten, dass die Welt mechanisch wäre und auch ohne die Menschheit existierte.<sup>71</sup>

---

<sup>70</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 42.

<sup>71</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 155ff.



# Kapitel 3

## Die Wegbereiter des antiken Atomismus

„Doch jetzt höre von mir, wie die Grundelemente der Dinge  
Alle sich mannigfaltig in ihren Gestalten erweisen.“

---

(Lukrez, *De rerum natura* 2, 333ff.)

Von den Anfängen wissenschaftlicher Auseinandersetzungen im frühen 6. Jh. bis zur Entstehung der ersten atomistischen Theorien im Laufe des 5. Jh. war es ein langer Weg. Die Vorsokratiker schufen mit ihren Gedanken über die Beschaffenheit der Welt die entscheidende Basis für die Atomlehre von Leukipp und Demokrit.<sup>1</sup> Im Wesentlichen ist eine Einteilung dieser frühen Philosophen nach räumlichen oder ihre Lehren betreffenden Aspekten möglich, wobei sich vier größere Kreise herauskristallisieren: Milesier, Pythagoreer, Eleaten und Atomisten. Daneben existierten noch philosophische Strömungen kleineren Umfangs, welche ebenfalls wichtige Beiträge lieferten, obgleich es mitunter nur in Form einer durch ihr bloßes Vorhandensein für notwendig erachteten Verteidigung anerkannter Theorien ihnen gegenüber gewesen sein mag. Schrödinger bringt es auf den Punkt, wenn er schreibt, „kein Gedanke [...] wird ganz vergeblich gedacht worden sein“.<sup>2</sup> Während Heraklit im Allgemeinen noch zu den Milesiern gezählt wird, gehören Empedokles und Anaxagoras keiner konkreten philosophischen Gruppierung an und erfahren meist eine gesonderte Behandlung. Das Wirken des Sokrates während des 5. Jh. bildet aufgrund seiner ungeheuer großen Tragweite einen zentralen Punkt in der Geschichte der griechischen Philosophie. Ihm folgen die vier wichtigsten philosophischen Schulen der Antike: Die Akademie des Platon, der Peripatos dessen Schülers Aristoteles sowie die Stoa des Zenon von Kiton und der Garten des Epikur, welche in einem besonders wetteifernden Verhältnis zueinander standen.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Es ist anzumerken, dass nicht nur alle griechischen Philosophen, deren Wirkungszeiten vor Sokrates liegen, als Vorsokratiker bezeichnet werden, sondern mitunter auch seine Zeitgenossen wie die beiden genannten Atomisten, sofern ihre Lehren denen der anderen Forscher ähneln.

<sup>2</sup> SCHRÖDINGER, 1989, S. 170.

<sup>3</sup> Abbildung 3.1 auf Seite 26 enthält eine Übersicht der genannten philosophischen Strömungen, wobei die unterschiedliche farbliche Hervorhebung der Zuteilung zu bestimmten Kreisen und Schulen dient. Die im Folgenden noch näher ausgeführten Beziehungen der Philosophen untereinander sind durch Linien angedeutet. Die Grafik wurde im Hinblick auf die Entwicklung des Atomismus gestaltet, wodurch der Darstellung von dafür besonders ausschlaggebenden Beziehungen Vorrang vor den übrigen gegeben wurde. Die Lebensdaten der meisten Philosophen, welche ebenfalls in Abbildung 3.2 eingeflossen sind, wurden dem Personenverzeichnis der Physikgeschichte von Schreier entnommen (vgl. SCHREIER, 2002, S. 407ff.).

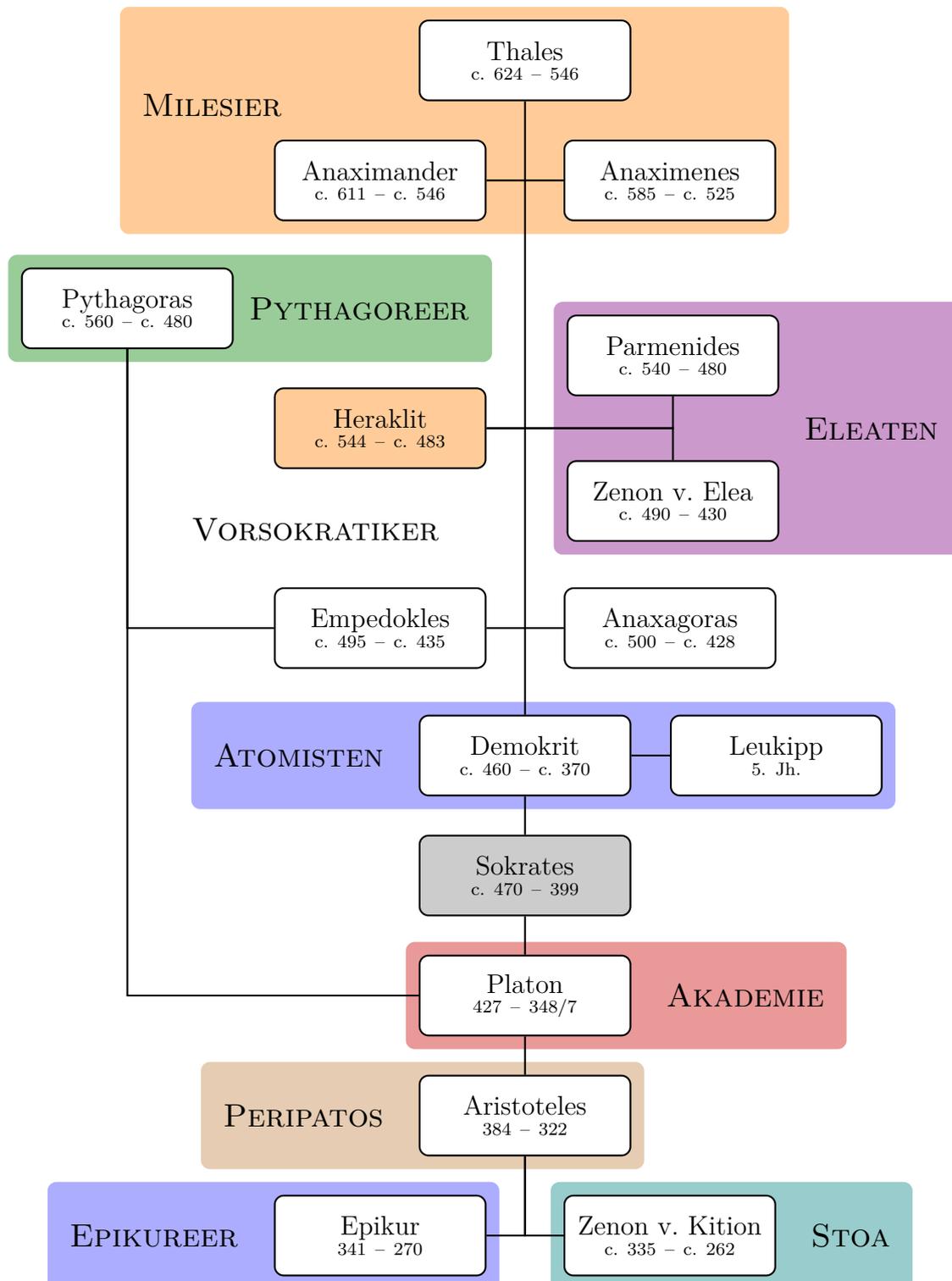
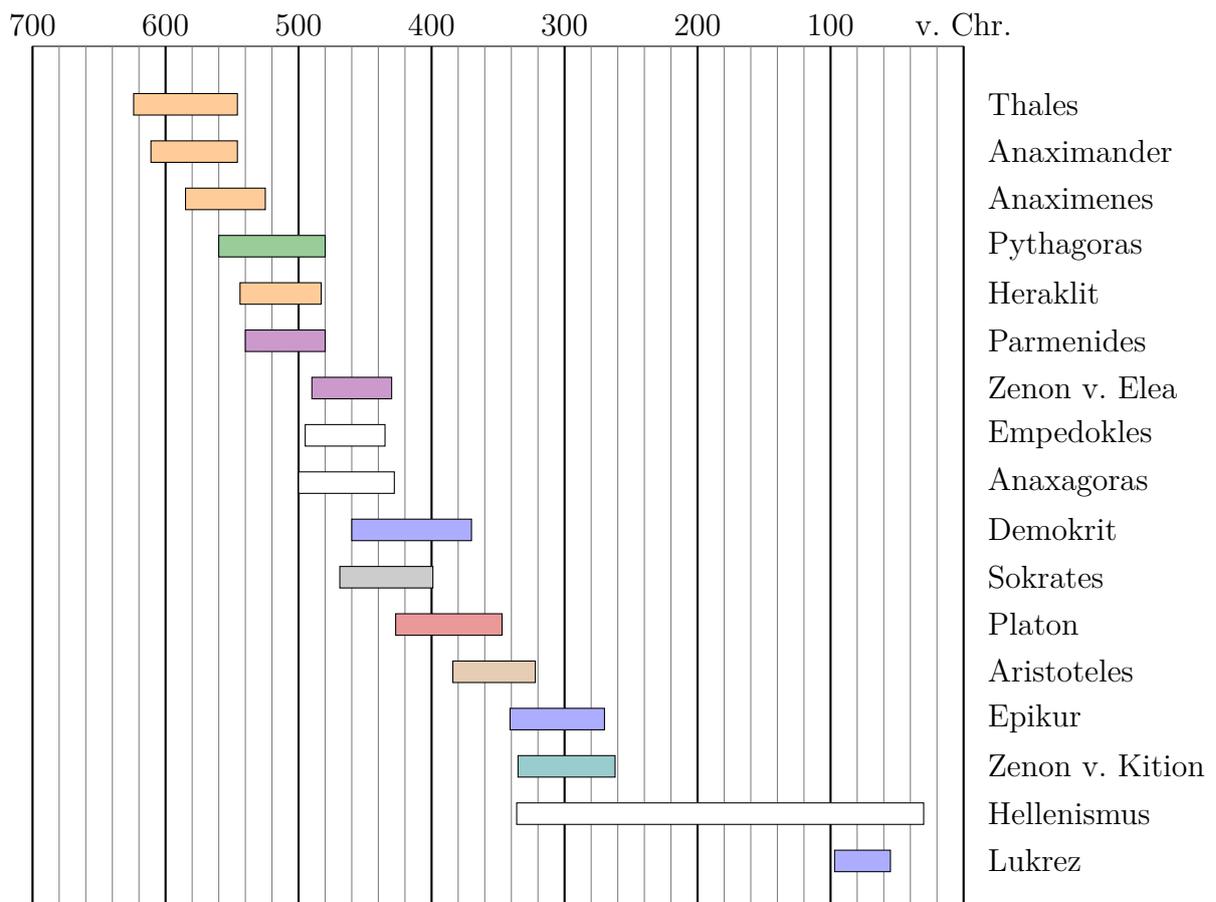


Abbildung 3.1: Philosophische Strömungen in der Antike



**Abbildung 3.2: Lebenszeiten wichtiger griechischer Philosophen in Balkendarstellung**

### 3.1 Die Milesier auf der Suche nach dem Urstoff

Bei der Entwicklung einer Naturwissenschaft spielte die Vorstellung eines Stoffes, welcher allen in der Welt existierenden Objekten zugrunde liegen sollte, eine ganz wesentliche Rolle. Durch umfangreiche Beobachtungen des Naturgeschehens gelangten einige Forscher zu dem Schluss, dass es trotz der sichtbaren Vielfalt der in der Welt befindlichen Organismen und Objekte dennoch ein bestimmtes Element geben müsste, aus welchem alles entstünde und zu welchem alles wieder verginge. Die Lehren der Milesier waren charakterisiert durch die Annahme eines solchen stofflichen Grundprinzips. Diese Gelehrten, welche auch als ältere ionische Naturphilosophen oder *φυσιολόγοι* (*physiológoi*) bezeichnet werden, verstanden sich als Monisten. Als solche führten sie die mannigfaltigen Naturscheinungen letzten Endes auf das Wirken eines einzigen (*μόνος*, *mónos*) Urstoffs zurück.<sup>4</sup>

#### 3.1.1 Thales von Milet

Als einer der Sieben Weisen, deren bekannte Sprüche am Apollontempel in Delphi verewigt waren, galt Thales schon für Aristoteles als erster Forscher, welcher seinen Geist der Erkundung des Naturgeschehens um ihn herum widmete.<sup>5,6</sup> Es wird überliefert, dass er eine am 28. Mai 585 v. Chr. in Ionien stattgefundene Sonnenfinsternis richtig vorhergesagt hatte.<sup>7</sup> Weitere Anekdoten beschreiben ihn einerseits als weltfremden Wissenschaftler, welcher beim Beobachten der Sterne in einen Brunnen gefallen sein soll, andererseits als findigen Geschäftsmann, welcher sich vor einer reichen Olivenernte ein Monopol an Ölpresen gesichert haben und dadurch zu einem beträchtlichen Vermögen gekommen sein soll.<sup>8</sup>

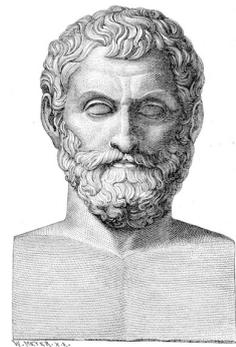


Abbildung 3.3

Den Grundstoff seiner Lehre bildete das Wasser.<sup>9</sup> Dabei handelt es sich jedoch lediglich um eine Rekonstruktion, da diesbezüglich keine eindeutigen Aussagen von ihm überliefert sind. Die Tradierung dieses Wissens erfolgte durch Aristoteles und seine Schule, wodurch es unweigerlich zu einer Bearbeitung kam. Aus heutiger Sicht ist es daher sinngemäß richtiger, im Urstoff des Thales keine *arché* im Sinne der späteren Philosophen zu sehen.<sup>10</sup> Welche genaue Erklärung er für die Wahl des Wassers angeführt haben mag, lässt sich nicht zwei-

Während Schreier bei Leukipps und Demokrits Lebensdaten die allgemeinere Angabe des 5. Jh. vorzieht, geben Simonyi und Lindberg konkretere Zahlen an.

<sup>4</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 32; vgl. LINDBERG, 1994, S. 30.

<sup>5</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 25.

<sup>6</sup> Zu den Sieben Weisen zählten neben Thales unter anderen noch Solon von Athen, Bias von Priene und Chilon von Sparta. Die bekanntesten Sprüche sind das „Erkenne dich selbst!“ (*γνώθι σεαυτόν*, *gnóthi seautón*) des Chilon und das „Nichts im Übermaß!“ (*μηδὲν ἄγαν*, *medèn ágan*) des Solon.

<sup>7</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 26.

<sup>8</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 26.

<sup>9</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 71; vgl. LINDBERG, 1994, S. 28f; vgl. EHLERS, 2002b, S. 26; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 104f; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 25ff; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 31.

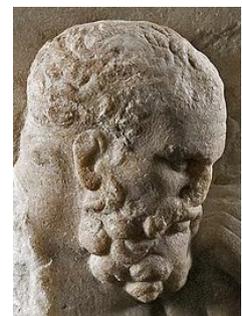
<sup>10</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 26.

felsfrei feststellen. Es liegt jedoch nahe anzunehmen, dass er dem Wasser aufgrund seiner Lebensnotwendigkeit für Menschen, Tiere und Pflanzen eine zentrale Rolle zuschrieb. Zudem war es der einzige Stoff, bei welchem die Griechen im Alltag drei Erscheinungsformen – Flüssigkeit, Eis und Dampf – beobachten konnten. Argumente für seine Wandlungsfähigkeit und Universalität waren somit unmittelbar evident. Sein Schüler Anaximander stellte sogar die Behauptung auf, das Leben selbst müsste im Wasser begonnen haben, da der Nachwuchs dort lebender Geschöpfe direkt nach der Geburt ein deutlich höheres Maß an Selbstständigkeit aufweise als die Nachkommen von Landtieren oder Menschen.<sup>11</sup> Laut Thales schwimme die Weltscheibe auf dem sich unter ihr befindlichen Wasser, wobei diese Begebenheit auch für das Auftreten von Erdbeben verantwortlich wäre. Dieser Versuch, eine Naturerscheinung auf anschauliche und nachvollziehbare Art und Weise mittels des von ihm entworfenen Weltbilds zu erklären, verdeutlicht seine Vorreiterrolle.

Einfache elektrostatische und magnetische Phänomene waren ebenfalls Gegenstand seiner Beobachtungen. Er begründete sie damit, dass die Verursacher dieser Phänomene – Bernstein (ἤλεκτρον, *élektron*) und Magnetstein<sup>12</sup> – beseelt wären.<sup>13</sup> Diese Ansicht hatte mitunter zur Folge, dass bis heute die Vorstellung überwiegt, die ein Stück Eisen anziehende Kraft gehe vom Magneten aus.<sup>14</sup>

### 3.1.2 Anaximander

Im Gegensatz zu seinem Lehrer Thales ging Anaximander, der Verfasser der ersten physikalischen Schrift namens *περὶ φύσεως* (*perì phýseos* = „Über die Natur“), von einem stärker abstrahierten Urstoff aus, den er Apeiron (ἄπειρον, *ápeiron*) nannte.<sup>15</sup> Dieses zu Deutsch „Unbegrenzte“ war von ihm entgegen aller durch seine Bezeichnung vermittelten Unbestimmtheit sehr wohl als stoffliches Prinzip mit materiellem Charakter gedacht. Durch die spontane Bildung von Gegensatzpaaren wie warm und kalt oder trocken und feucht sollte es zur Entstehung einer unbegrenzten Zahl an Welten kommen. Sehr großen Wert legte Anaximander hierbei auf den Zustand der Symmetrie, welcher einerseits für die äquidistante Anordnung dieser Welten sorgte, andererseits auch für das Schweben der zylinderförmigen Erde im All verantwortlich wäre.<sup>16</sup> Diese Vorstellung wohlgeordneter, symmetrischer Strukturen machte dem Begriff „Kosmos“ somit alle Ehre.



**Abbildung 3.4**

<sup>11</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 117.

<sup>12</sup> Benannt nach dem Fundort Magnesia.

<sup>13</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 114; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 26.

<sup>14</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 64.

<sup>15</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 71; vgl. LINDBERG, 1994, S. 30; vgl. EHLERS, 2002b, S. 27f; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 106; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 54ff; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 32.

<sup>16</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 27f.

Bei einem Blick in die Gegenwart erscheint es überaus bemerkenswert, dass Anaximander mit seiner Annahme spontan entstehender Gegensätze in gewisser Weise das heute unter dem Begriff der Vakuumfluktuationen bekannte Phänomen vorwegnahm. Darunter versteht man die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit im Vakuum auftretende Bildung von Teilchen-Antiteilchen-Paaren. Aber nicht nur im Hinblick auf diese Erscheinung mutet Anaximanders Lehre ungewohnt modern an. Auch seine Ansichten zur Symmetrie sowie zur Existenz vieler verschiedener Welten lassen sich in abgewandelter Form in der heutigen Physik wiederfinden. Manche Forscher gehen sogar so weit, in dem von ihm bei der Entstehung unserer Welt geschilderten, sich ausdehnenden Feuerball ein Analogon zum Urknall und in seinen Überresten die Ursache der kosmischen Hintergrundstrahlung zu sehen. Lässt man die Mathematik mit Thales beginnen, so muss Anaximander zweifelsohne als erster Naturwissenschaftler im engeren Sinn gelten.<sup>17</sup>

### 3.1.3 Anaximenes

Wie seine beiden Vorgänger vertrat auch der dritte milesische *physiologos* die These, die Welt bestünde aus einem einzigen Urstoff. Bei diesem handelte es sich gemäß seiner Ansicht um die Luft, welche sowohl materiell als auch – im Sinne seines Lehrers – unbegrenzt (*ápeiros*) wäre.<sup>18</sup> Die wichtigste Neuerung, welche in der Lehre des Anaximenes zu verzeichnen ist, war jedoch seine Formulierung einer Art inneren Antriebs, kraft dessen es zur Ausprägung verschiedener Erscheinungsformen dieses Urstoffs kommen sollte. Im Detail handelte es sich hierbei um von dieser intrinsischen Kraft herbeigeführte Änderungen in der Dichte, wobei diese nur bis zu einem gewissen Grad der heutigen Vorstellung des Vorgangs entsprechen.<sup>19,20</sup> Anaximenes vermutete, dass das Ausgangselement Luft, welchem die Eigenschaften warm und feucht zugeschrieben wurden, durch eine Verdichtung in das Element Wasser (kalt und feucht) und durch weitere Verdichtung schließlich in das Element Erde (kalt und trocken) übergehen würde. Erfolgte andererseits eine Verdünnung, so wäre das Resultat Feuer (warm und trocken). Die Dichteänderungen bewirkten also neben der Umwandlung in andere Stoffe auch eine Veränderung der Temperatur (siehe Abbildung 3.6). Mit der Schilderung eines solchen Prozesses und der Annahme, die zuvor von Anaximander erwähnten vier Gegensätze würden in paarweiser Kombination je ein Element bilden, war der Grundstein für die nachfolgenden bedeutsamen Vier-Elemente-Lehren von Empedokles, Platon und Aristoteles gelegt.



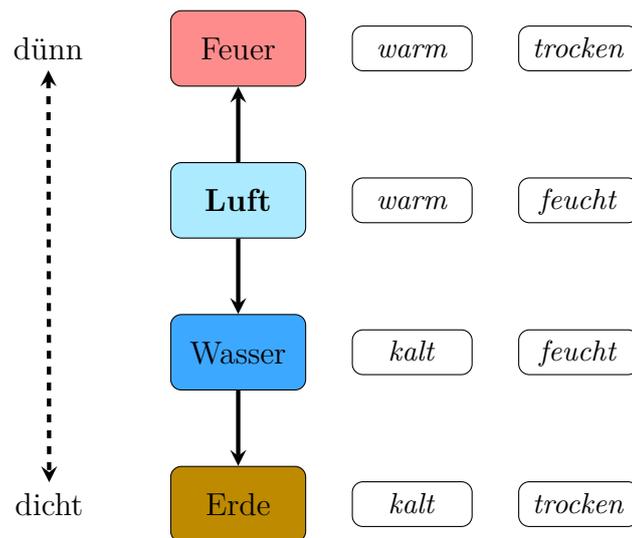
**Abbildung 3.5**

<sup>17</sup> Vgl. SCHREIER, 2002, S. 18.

<sup>18</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 71; vgl. EHLERS, 2002b, S. 28; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 106ff; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 87ff; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 32.

<sup>19</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 107f; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 87f. und S. 91.

<sup>20</sup> Über die Existenz eines leeren Raumes zwischen den Stoffpartikeln wurde über einen langen Zeitraum hinweg debattiert. Näheres dazu findet sich in den Kapiteln 4, 5.2 und 6.

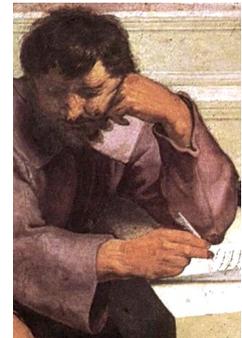


**Abbildung 3.6: Schematische Darstellung von Anaximenes' Luftlehre**

Auf dem Gebiet der Astronomie lehrte Anaximenes, dass die am Firmament sichtbaren Gestirne aufgrund ihrer großen Distanz zur Erde keine spürbare Wärme ausstrahlen.<sup>21</sup> Bemerkenswert an dieser Formulierung ist, dass er den Sternen einerseits eine feurige Natur zuschrieb, andererseits den richtigen Bezug zwischen der Intensität der Wärmestrahlung und der Distanz zur Wärmequelle herstellte.

### 3.1.4 Heraklit von Ephesos

Mit Heraklit erreichte die ionische Naturphilosophie ihren Höhepunkt.<sup>22</sup> Obwohl er aufgrund seiner überwiegend verschleierte und geheimnisvollen Aussagen, von welchen einige überliefert sind, schon in der Antike den Beinamen ὁ σκοτεινός (*ho skoteinós* = „der Dunkle“) erhielt<sup>23</sup>, war seine Lehre alles andere als finster. Sein Grundstoff war das Feuer, welches als Sinnbild immerwährender Veränderung das Vorbild für den späteren feurigen λόγος (*lógos* = „Vernunft“ bzw. „Weltvernunft“) der Stoiker darstellte.<sup>24</sup> Aber auch für Heraklit war das Feuer mehr als bloß ein Veränderungsprozess, welcher die ihm ausgesetzten Stoffe umwandelte. Es sollte ebenso die der Natur zugrunde liegende und nur bis zu einem gewissen Grad sichtbare Dynamik verkörpern, welche man sich als scheinbares Gleichgewicht von gegeneinander strebenden, aber einander letztendlich ausgleichenden Gegensätzen



**Abbildung 3.7**

<sup>21</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 109.

<sup>22</sup> Korrekterweise muss Heraklit als Ionier und nicht als Milesier bezeichnet werden. Er findet in diesem Abschnitt vorrangig wegen seines Urstoffs Erwähnung. Zum für die Entwicklung der antiken Atomistik wichtigen Zwiespalt mit den Eleaten siehe Abschnitt 3.3.

<sup>23</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 124.

<sup>24</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 66 und S. 71; vgl. EHLERS, 2002b, S. 29f; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 32.

vorzustellen hatte.<sup>25</sup> Von ihm stammen der berühmte Ausspruch πάντα ῥεῖ (*pánta rheí*), zu Deutsch „Alles fließt“, sowie die Aussage, dass man nie zweimal in denselben Fluss steige. Er knüpfte an die Gegensatzlehren des Anaximander und des Anaximenes an und vervollständigte ferner den Gedankengang des zuletzt Genannten, betreffend die nicht wahrnehmbare Wärme der Sterne, indem er richtig erklärte, dass die Sonne die Erde aufgrund der verhältnismäßig geringen Distanz zwischen beiden Himmelskörpern wärme.

In Bezug auf die Wandlungsfähigkeit des Feuers vertrat Heraklit wie sein Vorgänger die These der Dichteveränderungen. Gerade dieser Aspekt seiner Lehre wurde von seinen philosophischen Gegnern mit Vorliebe als Argument für die ihr vorgeworfene Sinnlosigkeit und Unmöglichkeit verwendet. Sie begründeten ihre Einwände damit, dass Feuer, egal wie sehr man es auch verdünnte, letzten Endes doch immer nur Feuer bliebe und als solches keinesfalls den Grundstoff der Welt bilden könnte, sondern sie vielmehr versengen würde. Ganz offensichtlich hielten Heraklits Widersacher in diesem Punkt hartnäckig an der Auslegung des Feuers als einem materiellen Prinzip fest. Heisenberg verdeutlichte, dass es sich bei Heraklits Lehre durchaus um ein modernes Konzept handelte, wobei dies durch das Ersetzen des Begriffs „Feuer“ mit dem Begriff „Energie“ veranschaulicht werden könnte.<sup>26</sup>

Seine Auffassung einer allgegenwärtigen, unaufhaltsamen Veränderung und die damit einhergehende Negierung jeglicher Konstanz in der Welt führte unweigerlich zu einem Konflikt mit der Lehre der Eleaten, welche die Existenz eines einzigen unveränderlichen Seienden annahmen.<sup>27</sup> Dieser Zwiespalt bildete eine große Herausforderung, welcher sich die Atomisten bei der Formulierung ihrer Theorien über den Aufbau der Welt stellen mussten.<sup>28,29</sup>

---

<sup>25</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 338.

<sup>26</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 8.

<sup>27</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 33ff.

<sup>28</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 8ff.

<sup>29</sup> Details hierzu sind Abschnitt 3.3 zu entnehmen.

## 3.2 Alles ist Zahl!

Im Gegensatz zu den älteren ionischen Naturphilosophen, deren Lehren großteils materialistisch geprägt waren, sahen Pythagoras von Samos und seine Schule einen scheinbar vollkommen abstrakten und immateriellen Stoff als Grundlage der Welt an: Die Zahlen.<sup>30</sup> Wie die Schule der Eleaten, entstand auch die Gemeinschaft der Pythagoreer in der Magna Graecia, also in Süditalien, von wo aus ihre Lehren die antike Philosophie und Wissenschaft nachhaltig beeinflussten.<sup>31</sup> So ist es ihnen zu verdanken, dass sich die Mathematik als Teil der Naturwissenschaft etablieren und so zur „Sprache“ der Physik werden konnte.<sup>32,33</sup>

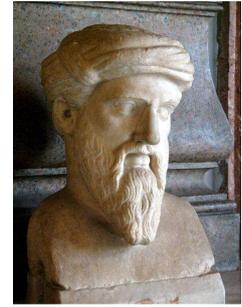


Abbildung 3.8

Um die Pythagoreer ranken sich viele Erzählungen. Zu den bekanntesten gehört die Schilderung von Pythagoras in der Schmiede. Der Legende zufolge soll der berühmte Philosoph an einer Schmiede vorübergegangen sein und beim Auftreffen der Hämmer auf den Ambossen verschiedene Töne gehört haben, welche sich gemäß der Überlieferung als von der Größe des verwendeten Hammers abhängig herausgestellt hätten. Obgleich diese Erklärung nicht exakt der physikalischen Realität entspricht, so lässt sich daraus dennoch ein ausgeprägtes Interesse der Pythagoreer an akustischen Phänomenen und deren mathematischer Theorie erkennen.<sup>34</sup> Einen weiteren eindeutigen Hinweis stellt auch die Überlieferung der Durchführung von Versuchen mit dem Monochord dar. Dabei handelte es sich um eine einzelne gespannte Saite, welche mittels eines Stegs an bestimmten Punkten geteilt werden konnte, um höhere Töne zu erzeugen (siehe Abbildung 3.9).<sup>35</sup> Dadurch war der Zusammenhang zwischen besonders harmonisch klingenden Tonintervallen und den Proportionen kleiner ganzer Zahlen auf eindrucksvolle Weise aufgezeigt. Ohne Übertreibung kann dies als Grundsteinlegung der Akustik und als eines der ersten Experimente bezeichnet werden, von welchem ausgehend der erste Versuch einer mathematischen Formulierung von physikalischen Gesetzmäßigkeiten unternommen wurde.<sup>36</sup>

Da die Zahlen als das hinter allen Dingen stehende Prinzip angesehen wurden, hatte diese Art der Beweisführung weitreichende Konsequenzen. Gemäß dieses Gedankengangs ließen sich das Verständnis und die Funktionsweise der Welt im Kleinen auch auf größere Struktu-

<sup>30</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 61ff; vgl. LINDBERG, 1994, S. 32f. und S. 93ff; vgl. EHLERS, 2002b, S. 35ff; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 61ff; vgl. HEISENBERG, 1967b, S. 154; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 170ff; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 33ff.

<sup>31</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 59f.

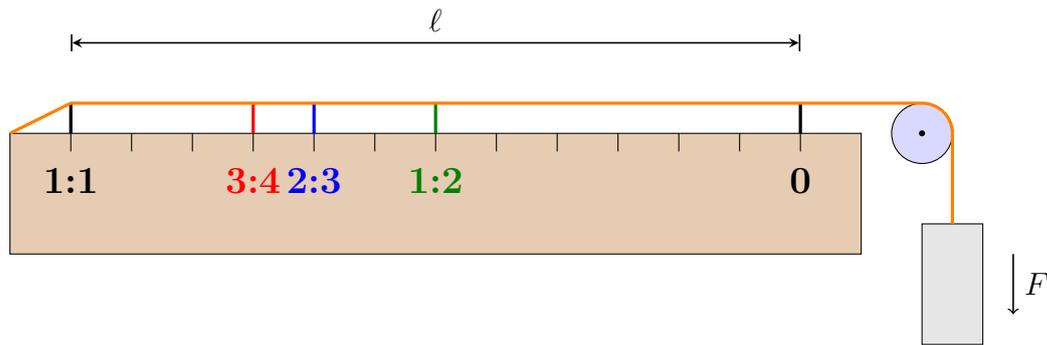
<sup>32</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 34.

<sup>33</sup> Die pythagoreische Schule unterteilte sich in die *ἀκουσματικοί* (*akousmatikoi*) und die *μαθηματικοί* (*mathematikoi*). Während sich die Akusmatiker überwiegend auf die „gehörten“ (*ἀκούω*, *akoúo* = „hören“) Lehren des Pythagoras beriefen, betrieben die Mathematiker (*μανθάνω*, *mantháno* = „lernen“) Forschung auf schriftlicher Basis.

<sup>34</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 36.

<sup>35</sup> Nachfolgend einige Beispiele für Teilungsverhältnisse: 1:2 entspricht einer Oktave, 2:3 einer Quinte und 3:4 einer Quarte (vgl. SIMONYI, 2001, S. 62).

<sup>36</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 34.



**Abbildung 3.9: Schematische Darstellung eines Monochords**

ren wie den Kosmos umlegen. So kam es zur Formulierung des Begriffs der Sphärenharmonie, welcher unter anderem besagt, dass die Anordnung und der Abstand der Planetenbahnen sowie die Umlaufzeiten der Himmelskörper auf den gleichen mathematischen Prinzipien beruhen sollten, wie die harmonischen Töne einer schwingenden Saite.<sup>37</sup> Damit hatten die Pythagoreer die Astronomie nachhaltig beeinflusst, denn Aristoteles, welcher in seinem kosmologischen Modell insgesamt 55 Planetensphären annahm<sup>38</sup>, vertrat die Ansicht, dass Astronomie primär unter mathematischen Aspekten betrieben werden sollte. Auch Platon war von der pythagoreischen Lehre stark beeinflusst worden, was sich nicht zuletzt durch die geometrischen Formen der von ihm angenommenen Elemente und deren Umwandlung nach mathematischen Prinzipien äußerte, worauf in Abschnitt 5.1 näher eingegangen wird.

Wie bereits in Abschnitt 2.4 erwähnt, bewirkte die Mathematisierung der Astronomie eine Distanzierung von der auf rein physikalischen Beobachtungen stattfindenden Himmelskunde. Die von den Pythagoreern entwickelte Zahlenmystik hatte unter anderem zur Folge, dass zum Zwecke des Erreichens der als am wichtigsten erachteten Zehnzahl neben den bereits bekannten Gestirnen Sonne, Merkur, Venus, Erde, Mond, Mars, Jupiter und Saturn noch die so genannte Gegenerde und das Zentralfeuer, um welches sich alle zuvor genannten Himmelskörper bewegen sollten, postuliert wurden. Die Gegenerde befände sich dabei immer an dem der Erde gegenüberliegenden Punkt ihrer Bahn, wodurch sie vom Zentralfeuer verdeckt und somit unsichtbar wäre.<sup>39</sup>

Zu den bedeutsamsten und bekanntesten Schülern der pythagoreischen Gemeinschaft zählten neben dem bereits erwähnten Hippias, welcher als Entdecker der irrationalen Zahlen galt, noch Archytas von Tarent, dessen zahlreiche Erfindungen ihn zum Begründer der Me-

<sup>37</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 34; vgl. SIMONYI, 2001, S. 83.

<sup>38</sup> Was anfangs noch ein überschaubares Modell darstellte, wurde mit der Zeit zu einem hochkomplexen Mechanismus ausgebaut, welcher auch vor scheinbar rückläufigen Bewegungen der Planeten nicht zurückschreckte, sondern diese auf raffinierte Art und Weise berücksichtigte.

<sup>39</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 65; vgl. LINDBERG, 1994, S. 103; vgl. EHLERS, 2002b, S. 36f; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 85; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2007, S. 197; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 34; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 26.

chanik machten, und Aristarch von Samos, welcher sich durch die Vervollständigung des antiken Weltbilds auszeichnete.

Einen nicht unerheblichen Beitrag leisteten die Pythagoreer auch zum antiken Atomismus. Aus dem Grundgedanken „Alles ist Zahl!“ lässt sich schließen, dass der Gelehrtenkreis durchaus ein materielles Verständnis des Zahlenbegriffs hatte. Gleichsam wie einzelne Zahlen existierten, so müsste auch die Materie aus etwas „Einzelnem“ bestehen und eine diskrete Struktur aufweisen. Die Frage der Teilbarkeit erlangte zunehmend an Bedeutung, denn man hatte zu unterscheiden, ob etwas nur mathematisch oder auch in der Realität beliebig oft geteilt werden könnte.<sup>40</sup>

### 3.3 Konstante Veränderung oder unveränderliche Konstante?

Schon die Grundzüge heraklitischen und eleatischen Denkens lassen unmittelbar erkennen, dass diese beiden philosophischen Strömungen nicht unterschiedlicher sein könnten. Obwohl es unklar ist, ob Heraklit und Parmenides voneinander wussten oder womöglich sogar in Kontakt standen, bildete die Spannung, welche zwischen beiden Lehrmeinungen aufgrund ihrer Widersprüchlichkeit unweigerlich herrschte, eine große Herausforderung für die Atomisten, welche es im Zuge der Formulierung einer neuen Welttheorie zu bewältigen galt.

Wie bereits in Abschnitt 3.1.4 dargelegt, zeichnete Heraklit das Bild einer sich im unaufhaltsamen Wandel befindlichen Welt, in welcher Konstanz nur das makroskopische Scheinbild eines auf mikroskopischer Ebene stattfindenden unablässigen Kampfes zwischen den Gegensätzen darstellte. Alles befände sich im Fluss stetiger Bewegung und Veränderung, ohne jemals zur Ruhe zu kommen.

Richtet man den Blick zum Vergleich auf die Anschauungen des Parmenides und des Zenon, so wirken diese beinahe wie eine Verkehrung der heraklitischen Lehre in ihr exaktes Gegenteil. Die von den Eleaten entworfene Weltvorstellung bestand aus nur einer einzigen unveränderlichen Entität: Dem Seienden.<sup>41</sup> Da sich dieses insbesondere durch seine Vollkommenheit auszeichnete, kann es zur besseren Veranschaulichung mit demjenigen geometrischen Körper verglichen werden, welcher schon in der Antike als perfekt galt: Einer homogenen, festen Kugel.<sup>42</sup> Jegliche Vielfalt und jeglicher Veränderungsprozess wurden von Parmenides und seiner Schule a priori als unmöglich erachtet, da es außer dem einen Seienden nichts gäbe.<sup>43</sup> Auch die Existenz eines leeren Raumes, welcher eines der Grundelemente der antiken

<sup>40</sup> Da die Griechen mit der Vorstellung unendlich kleiner Teile bzw. eines Kontinuums grundlegende Probleme hatten, kam es mitunter zu Trugschlüssen, welche unter anderem die berühmten Paradoxa des Zenon von Elea zur Folge hatten (siehe Abschnitt 3.3).

<sup>41</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 30; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 48; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2009, S. 49f; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 9.

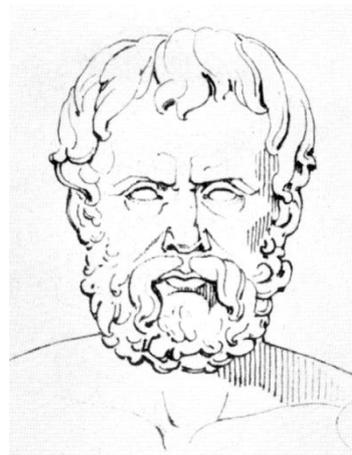
<sup>42</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 35; vgl. SIMONYI, 2001, S. 72.

<sup>43</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 66f; vgl. LINDBERG, 1994, S. 33ff. und S. 53ff; vgl. EHLERS, 2002b, S. 30f.

atomistischen Theorien darstellte, wurde negiert, wobei man diese Überzeugung später auch bei Aristoteles findet.<sup>44</sup> In weiterer Folge galten auch das Entstehen und das Vergehen von unbelebten oder belebten Objekten als unmöglich.<sup>45</sup> All diese Behauptungen standen zwar in klarem Widerspruch zu den in der Welt beobachteten Veränderungsvorgängen, jedoch wurde den Sinnen zugunsten der forcierten Gültigkeit der Theorie kurzerhand ihre Zuverlässigkeit abgesprochen. Sollte man einen Wandel in der Welt beobachten, so wäre dieser nur Schein und nicht real. Der eleatische Antisensualismus ging sogar so weit, dass Zenon die Unmöglichkeit jeglicher Bewegung, welche ebenfalls als Veränderung (der Position im Raum) angesehen wurde, vertrat.<sup>46</sup> Würde man versuchen, die Idee des einen Seienden zu verändern oder zu umgehen – beispielsweise durch den Versuch der Trennung von Objekten in Verschiedenes, also die Einführung einer Vielfalt, oder durch die Annahme einer real existierenden Bewegung –, so stieße man unweigerlich auf paradoxe oder absurde Gedankengänge, deren Falschheit unmittelbar evident wäre. Im Folgenden sollen die wichtigsten und bekanntesten Paradoxa des Zenon erwähnt sein.<sup>47</sup>



(a) Parmenides



(b) Zenon von Elea

Abbildung 3.10

### 3.3.1 Die Paradoxa der Vielheit

Hierbei handelt es sich um eine Reihe von Argumenten, mit welchen die Unmöglichkeit jeglicher Vielfalt in der Welt und die Existenz nur eines einzigen Seienden bewiesen werden sollten.

<sup>44</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 35.

<sup>45</sup> Der Gedankengang muss an dieser Stelle folgendermaßen lauten: Wenn etwas entstünde, hätte es vor seiner Entstehung noch nicht existiert. Dies wäre gleichbedeutend mit dem Vorhandensein eines „Nicht-Seienden“. Da jedoch nur das Seiende existierte, könnte es somit keine Entstehungsprozesse geben. Auf gleiche Weise würde das Vergehen den Übergang eines Objektes vom möglichen Zustand des Seins in den unmöglichen des Nichtseins bedeuten.

<sup>46</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 34f; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 35.

<sup>47</sup> Eine umfangreiche Beschreibung der zenonischen Paradoxa liefert GEMELLI MARCIANO, 2009, S. 126ff. Vgl. auch SCHRÖDINGER, 1989, S. 110.

Im *Argument der Dichte* behauptete Zenon, wenn es Vieles gäbe, wäre dieses zahlenmäßig begrenzt, da es eben gerade so viel gäbe, wie tatsächlich vorhanden wäre.<sup>48</sup> Gleichzeitig bestünde aber jedes Einzelne aus unendlich vielen Teilen, wodurch die Gesamtzahl der Dinge wiederum unbegrenzt wäre.

Das *Argument der endlichen Größe* ging davon aus, dass sich für die Existenz einer Vielheit deren einzelne Teile in ihrer Größe und ihrem Abstand zueinander unterscheiden müssten. Da jeder dieser Bestandteile wiederum unendlich oft geteilt werden könnte, wobei die Bruchteile ihrerseits alle eine bestimmte Größe aufwiesen, hätte dies zur Folge, dass sämtliche Objekte in der Welt unermesslich groß wären. Andererseits könnte man aber auch durch wiederholte Teilung zu unendlich kleinen Teilchen gelangen. Somit wäre jedes Objekt paradoxerweise unendlich groß im Vergleich zu seinen infinitesimal kleinen Bestandteilen und unendlich klein im Vergleich zur grenzenlosen Welt.

Im dritten *Argument der vollständigen Teilung* beschreibt der eleatische Gelehrte eine Linie endlicher Länge, welche „durch und durch“<sup>49</sup> in unendlich Vieles geteilt wurde. Letztendlich würde man zu dem Widerspruch gelangen, dass die Segmente im Vergleich zur Linie unendlich klein und somit nicht zur Bildung derselben in der Lage wären, gleichzeitig aber doch noch eine bestimmte endliche Größe aufweisen müssten, da die Linie definitiv existierte.

Diese Argumente wurden zur Widerlegung der Vielheit und zur Bestätigung des einen unteilbaren Seienden vorgebracht, welches sich jedem Versuch einer Charakterisierung mit Ausnahme seiner Definition („Das Seiende ist.“) entzöge.

### 3.3.2 Die Paradoxa der Bewegung

Darunter versteht man insgesamt vier paradoxe Behauptungen Zenons, welche in den folgenden Absätzen näher vorgestellt werden sollen.

Das *Argument der Dichotomie* besagt, dass man zum Zurücklegen einer bestimmten Strecke erst deren Hälfte, davon wiederum die Hälfte usw. durchlaufen müsste, wodurch das Erreichen des Ziels unmöglich würde.

Als bekanntestes eleatisches Gedankenexperiment kann zweifelsfrei das *Argument des Achilles* bezeichnet werden.<sup>50</sup> Zenon beschreibt einen Wettlauf zwischen dem griechischen Helden Achilles und einer Schildkröte. In der Ausgangsposition bekäme die Schildkröte einen Vorsprung zugesprochen. Aufgrund alltäglicher Erfahrungen und Sinneseindrücke läge es nahe, anzunehmen, dass es für Achilles ein Leichtes wäre, das langsame Tier bei einem Wettrennen zu schlagen. Durch folgenden Gedankengang vermochte Zenon es jedoch, dem menschlichen Verstand Ketten anzulegen: Achilles müsste logischerweise die Schildkröte überholen,

<sup>48</sup> Diese Argumentation scheint auf der Erfahrung aufzubauen, dass die Menschen nur in der Lage sind, eine endlich große Menge von Objekten zu zählen, womit für Zenon allein durch die Möglichkeit zur Zählung die Endlichkeit der Anzahl bewiesen wäre.

<sup>49</sup> Gemeint ist, dass die Linie halbiert wird, die so entstehenden Hälften *beide* wiederum halbiert werden und so fort bis zur Unendlichkeit (also „vollständig“).

<sup>50</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 66f.

um als Erster ans Ziel zu kommen. Um dies zu bewerkstelligen, wäre es für den Helden notwendig, den Ort, an welchem sich das Tier aufhält, zu erreichen. Das Paradoxon bestünde nun darin, dass, wenn Achilles am Aufenthaltsort der Schildkröte angekommen wäre, diese in der Zwischenzeit bereits ein weiteres Stück des Weges zurückgelegt hätte. Erreichte er ihre neue Position, hätte sie wieder einen kleinen Vorsprung gewonnen. Gemäß dieser Schlussfolgerung wäre es dem griechischen Helden unmöglich, die Schildkröte zu überholen und den Wettlauf zu gewinnen. Tatsächlich beruht dieser Trugschluss auf den fehlerhaften Annahmen, dass die Entwicklung einer unendlichen Reihe ( $\sum_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots = 1$ ) keinen endlichen Grenzwert haben könnte und dass die unendliche Teilung einer Strecke zur Folge hätte, dass diese unendlich weit bzw. für ihre Bewältigung eine unendlich lange Zeit benötigt würde. Aristoteles gelang es später, diesen Denkfehler zu identifizieren.<sup>51</sup> Anhand dieses Beispiels lässt sich die Schwierigkeit, welche der Begriff der Unendlichkeit – sei es eine unendliche Anzahl, unendliche Ausdehnung oder die Vorstellung infinitesimal kleiner Teilchen – den Griechen bereitete, mehr als deutlich erkennen.

Im *Argument des fliegenden Pfeils* beschreibt Zenon den Flug eines Pfeils und stellt fest, dass dessen Flugbahn bloß eine Aneinanderreihung bestimmter Orte im Raum wäre. An jeder dieser Positionen befände sich das Geschoss in Ruhe, denn es wäre dann an nur einem Ort, wo per Definition keine Bewegung stattfinden könnte. Da dies auf sämtliche Aufenthaltsorte entlang der Flugbahn zuträfe, wäre der Pfeil insgesamt gesehen in Ruhe. Gerade dieses Paradoxon erlangte durch die Entdeckung des nach dem eleatischen Philosophen benannten Quanten-Zeno-Effekts einen höheren Bekanntheitsgrad. Vereinfacht ausgedrückt konnte nachgewiesen werden, dass durch die wiederholte Durchführung von Messungen an einem quantenmechanischen System die Veränderungen der Zustände in diesem verhindert wurden.

Beim *Argument des Stadions* handelt es sich um eine fehlerhafte Interpretation verschiedener bewegter Bezugssysteme, wodurch ein scheinbares Paradoxon zustande kommt. In einem Stadion würden sich zwei Gruppen von Objekten (A und B) aufeinander zu bewegen. Daneben gäbe es noch eine dritte Gruppe (C), welche sich relativ zu A und B in Ruhe befände.<sup>52</sup> Die beiden bewegten Gruppen näherten sich nun der ruhenden Gruppe von beiden Seiten an (siehe Abbildung 3.11, Schritt 1), sodass zu irgendeinem Zeitpunkt das Objekt B1 auf Höhe von C1 und das Objekt A1 auf Höhe von C2 wäre (Schritt 2). Nach einer weiteren kurzen Zeitspanne würden die Objekte aller drei Gruppen schließlich auf gleicher Höhe sein (Schritt 3). Der Widerspruch läge nun darin, dass Objekt B1 in einer gewissen Zeit nur an einem Objekt der Gruppe C (C2), aber in derselben Zeit an beiden Objekten der Gruppe A vorbeigekommen wäre. Somit entspräche laut Zenon die Hälfte der Zeit ihrem doppelten Wert.

<sup>51</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 31.

<sup>52</sup> Die von Zenon geschilderte Situation ist in Abbildung 3.11 schematisch dargestellt.

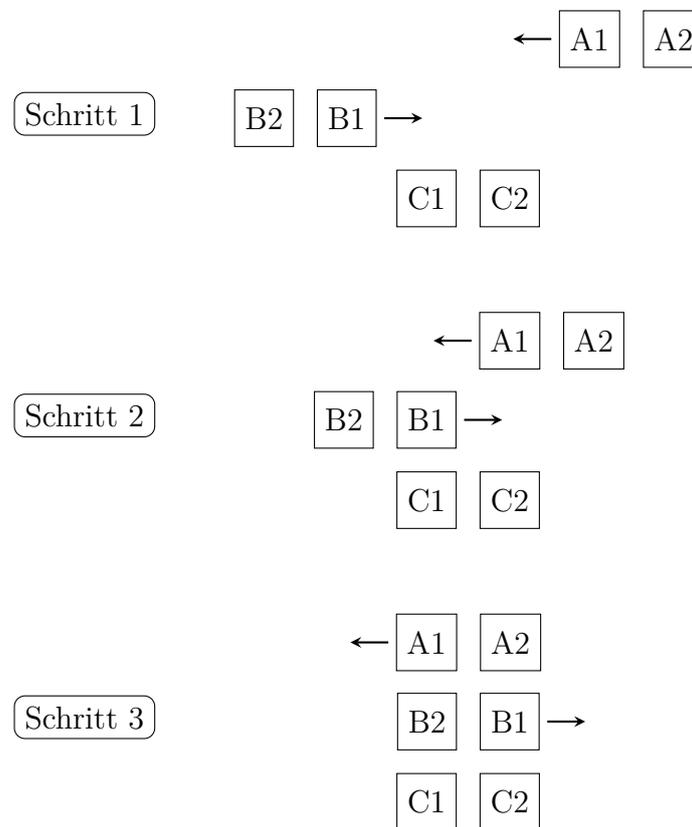


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung des Stadion-Arguments

### 3.3.3 Das Argument des Raums

Führte man eine Trennung zwischen dem Seienden und einem Raum, in welchem sich dieses befinden sollte, ein, so müsste dieser Raum selbst wiederum Teil eines ihn umschließenden Raumes sein, wobei sich dieses zwiebelschalenartige Modell absurderweise bis zur Unendlichkeit erstreckte.

### 3.3.4 Das Argument des Hirsekorns

Leerte man einen Scheffel Hirsekörner aus, so würde man beim Auftreffen dieser auf dem Boden ein entsprechendes Geräusch wahrnehmen. Dieses setzte sich demnach aus den durch die einzelnen Hirsekörner verursachten Teilgeräuschen zusammen. Ließe man jedoch nur ein einzelnes Korn fallen, wäre man nicht imstande, ein Geräusch wahrzunehmen. Da dies für jedes einzelne der Körner gelte, dürfte eigentlich der ganze Scheffel Hirse kein Geräusch beim Ausleeren erzeugen.

Ogleich die Weltanschauung der Eleaten alles andere als nachvollziehbar oder haltbar erscheint, so ist ihnen – wie Schrödinger treffend bemerkt – dennoch hoch anzurechnen, dass sie den Versuch unternahmen, die Natur und die Welt als ganzes unter einer Theorie zu vereinen.<sup>53</sup>

<sup>53</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 54.

### 3.4 Empedokles

Empedokles aus Akragas, dem heutigen Agrigent auf Sizilien, schuf die mit Abstand bekannteste vorsokratische Theorie, welche nicht nur große Philosophen wie Platon und Aristoteles entscheidend beeinflusste, sondern in den folgenden Jahrhunderten auch in andere Wissenschaften wie Alchemie und Medizin Einzug hielt und selbst in der Moderne noch eine gewisse Rezeption erfährt: Die Lehre von den vier Elementen.<sup>54</sup> Im Gegensatz zu seinen Vorgängern, welche nur einen einzigen Urstoff oder eine Mischung von Gegensätzen annahmen, ging Empedokles von vier vollkommen gleichwertigen Elementen als Grundlage der Welt aus. Als Element war dabei jene Art von Stoff definiert, welche sich nicht weiter in verschiedene Stoffe zerlegen ließ.<sup>55</sup> In seiner Theorie vereinte er ausgewählte Aspekte der milesischen, pythagoreischen, heraklitischen und eleatischen Lehren und schuf auf diese Weise ein gänzlich neues System. Von den Milesiern übernahm er die Vorstellung eines materiellen Urstoffs, wobei ihm die Lehre des Anaximenes als Vorbild für die Wahl der Grundstoffe gedient haben mochte.<sup>56</sup> Die Zahlenmystik der Pythagoreer spiegelte sich in den nach mathematischen Prinzipien ablaufenden Mischungsvorgängen und -zuständen der Elemente wider. Aus Heraklits Lehre stammte die Ansicht einer ständigen Variation der Elementmischungen. Zuletzt kann in seiner Annahme unveränderlicher und konstanter Elemente noch eleatisches Gedankengut identifiziert werden.



Abbildung 3.12

Eine weitere wesentliche Neuerung stellte die Einführung zweier einander entgegenwirkender Kräfte dar, welche als übergeordnete immaterielle Prinzipien die Ursache für Verbindung und Trennung der Elemente bilden sollten. Bei diesen beiden grundlegenden Kräften handelte es sich um die „Liebe“ (*φιλία*, *philia*) und den „Streit“ (*νεῖκος*, *neikos*). Während Erstere die Verbindung der Elemente bewirken sollten, wäre Letzterer für deren Trennung verantwortlich. Die so entstehende Dynamik kann als Verarbeitung von Heraklits Lehre aufgefasst werden. Gleichzeitig berücksichtigte Empedokles aber auch die Forderungen der Eleaten nach einem unveränderlichen Seienden, indem er den Elementen an sich Konstanz zuerkannte.<sup>57</sup> Dieses duale Konzept erwies sich für die Entwicklung einer Prozessualität im antiken Atomismus als maßgebend.<sup>58</sup>

<sup>54</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 71; vgl. LINDBERG, 1994, S. 32; vgl. EHLERS, 2002b, S. 32; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2009, S. 327ff.

<sup>55</sup> Siehe hierzu besonders LANDFESTER, 2005, Sp. 853ff. Die folgenden chemischen Elemente waren in der Antike bereits bekannt: Gold, Silber, Kupfer, Eisen, Quecksilber, Blei, Zinn, Kohlenstoff und Schwefel.

<sup>56</sup> Es ist anzumerken, dass Empedokles lediglich die vier Elemente seines Vorgängers übernahm, nicht aber dessen Vorstellung von vier paarweise gegensätzlichen Eigenschaften. Erst Aristoteles fügte beide Anschauungen wieder zu einem Gesamtbild zusammen, wobei er den Gegensatzpaaren eine grundlegendere und wichtigere Bedeutung beimaß (siehe Kapitel 5.2).

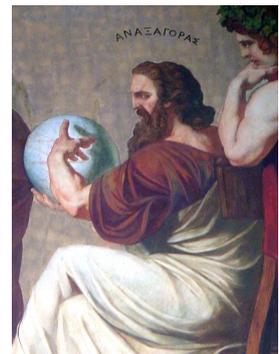
<sup>57</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 32.

<sup>58</sup> Vgl. SCHNEIDER, 1999, Sp. 1006.

An dieser Stelle seien zur Verdeutlichung des Einflusses der Vier-Elemente-Lehre in den nachfolgenden Jahrhunderten noch zwei bemerkenswerte Beispiele angeführt. In der Alchemie stellte das *Opus Magnum*, das „große Werk“, die Erschaffung des so genannten Steins der Weisen (*Lapis Philosophorum*) dar, kraft dessen unedle Metalle zu Gold umgewandelt oder Krankheiten kuriert werden sollten. Dabei handelte es sich um einen über mehrere Stufen ablaufenden Prozess, wobei deren Zahl in ihrer Grundform an die Zahl der empedokleischen Elemente angelehnt war.<sup>59</sup> Als zweites Exempel sei Galen, ein berühmter griechischer Arzt des zweiten nachchristlichen Jahrhunderts, genannt, welcher die Auffassung vertrat, dass jedem Menschen vier verschiedene Körpersäfte innewohnten, deren Mischungsverhältnis das Temperament eines Individuums bestimmte, wobei sich eine Unausgewogenheit in Form von Krankheiten äußerte.<sup>60</sup> Diese Säftelehre – auch Humoralpathologie genannt – erfuhr unter anderem im 16. Jh. durch das Werk *De anima* („Über die Seele“) des Gelehrten Philipp Melanchthon eine erneute Behandlung.

### 3.5 Anaxagoras

Anaxagoras von Klazomenai war der Begründer der Lehre von den Homoiomerien (ὁμοῖος, *homoios* = „gleich(artig)“ und μέρος, *méros* = „Teil“).<sup>61</sup> Diese Theorie der „gleichen Teile“ stützte sich auf die Annahme einer unbegrenzten Zahl von Urstoffen, welche unendlich oft teilbar und deren Teilchen somit infinitesimal klein wären. Er lehrte, dass alles in allem enthalten sei und folglich die gesamte Vielfalt der Welt aus jedem einzelnen ihrer Bestandteile hervorgehen könnte.<sup>62</sup> Damit dieser Vorgang geordnet ablief, postulierte Anaxagoras die Existenz einer übergeordneten Kraft, einer Art Weltvernunft: Des νοῦς (*nous*, „Sinn, Vernunft, Zweck“). In seiner Funktion weist er Ähnlichkeiten zu den beiden empedokleischen Prinzipien sowie zur platonischen Weltseele auf. Der *Nous* galt als die Ursache alles Seienden und als erster Bewegter.<sup>63</sup> Die Existenz eines leeren Raums wurde von Anaxagoras nicht vertreten, da jede Bewegung – wie später bei Aristoteles – im Vollen stattfände.



**Abbildung 3.13**

<sup>59</sup> Bei den vier Stufen des *Opus Magnum* handelte es sich um die Schwärzung (gr. μελάνωσις [*melánosis*], lat. *nigredo*), die Weißung (gr. λεύκωσις [*leúkosis*], lat. *albedo*), die Gelbung (gr. χάνθωσις [*xánthosis*], lat. *citrinitas*) und schließlich die Rötung (gr. ῥωσις [*íosis*], lat. *rubedo*).

<sup>60</sup> Als die vier Säfte galten das Blut (Sanguiniker), die Galle (Choleriker), die schwarze Galle (Melancholiker) und der Schleim (Phlegmatiker). Diesen wurden in weiterer Folge die vier Elemente zugeordnet.

<sup>61</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 33; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 104ff; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 12f.

<sup>62</sup> In Hinblick auf die Biologie erinnert dieser Gedanke entfernt an die Stammzellen. Auf dem Gebiet der Physik kann zum Zwecke der Erklärung die Funktionsweise eines Hologramms herangezogen werden, dessen einzelne Bildpunkte jeweils auch Informationen über das komplette Bild beinhalten.

<sup>63</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 33.

Trotz der antiatomistischen Haltung ihres Begründers, scheint die Homoimerielehre durch die von ihr postulierte Vielfalt der Urteilchen dennoch einen Beitrag zum antiken Atomismus geleistet zu haben. Es wäre falsch, in dieser Theorie einen alternativen Atomgedanken zu vermuten, da Anaxagoras selbst in den Homoimerien keine „unteilbaren“ Teilchen sah, womit der Atombegriff in Bezug auf seine Lehre bestenfalls als schlecht gewähltes Synonym zu verstehen wäre.

## Kapitel 4

# Die Atomlehre von Leukipp und Demokrit

„Höre nun weiter von Körpern, die eingestandenermaßen  
zwar in der Welt sich befinden und doch sich nicht sichtbar  
bekunden.“

---

(Lukrez, *De rerum natura* 1, 269f.)

Als Wirkungsort der ersten Vertreter einer atomistischen Lehre in der Antike, avancierte die Stadt Abdera an der Küste der nördlichen Ägäis im 5. Jh. v. Chr. zum Zentrum des antiken Atomismus. Leukipp und sein Schüler Demokrit, welche meist in einem Atemzug genannt werden, waren die zentralen Gestalten dieses frühen griechischen Atomismus.<sup>1,2</sup> Während Person und Werk des Ersteren historisch nur schwer fassbar sind, wurde Letzterem der glückliche Umstand einer indirekten Tradierung durch die peripatetische Schule, medizinische Abhandlungen und die Epikureer zuteil.<sup>3</sup> Für Aristoteles galt Leukipp als eigentlicher Urheber der Lehre von den Atomen<sup>4</sup>, wobei er in der Überlieferung auch als Hörer oder sogar Schüler der Eleaten Parmenides und Zenon aufscheint.<sup>5</sup> Da heute nicht mehr eindeutig festgestellt werden kann, welches Gedankengut von Leukipp stammte und in welchen Bereichen bzw. in welchem Ausmaß Demokrit die Theorie weiterentwickelte, sollte man sich im Rahmen einer wissenschaftlichen Behandlung stets des Zusammenwirkens beider Gelehrter bewusst sein, obwohl Demokrit aufgrund der besseren Überlieferung oftmals alleine Erwähnung findet. Leukipp und sein Schüler scheinen so untrennbar miteinander verbunden zu sein, wie die von ihnen formulierten Konzepte der Atome und des leeren Raums.

---

<sup>1</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 486.

<sup>2</sup> Zum Herkunftsort Leukipps finden sich in der Literatur mehrfache Angaben, darunter die Städte Abdera, Milet und Elea.

<sup>3</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 14.

<sup>4</sup> Vgl. BODNÁR, 1999, Sp. 106.

<sup>5</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 33ff.

## 4.1 Die Ausgangssituation und die eleatischen Herausforderungen

In den beinahe zwei Jahrhunderten vor Leukipp und Demokrit schufen die Vorsokratiker ab Thales eine Vielzahl an teils sehr unterschiedlichen Systemen, welche dennoch alle ein und demselben Zweck dienen sollten: Der Erklärung der Welt und der Dinge in ihr. Im Laufe der Zeit wurden die anfänglichen Theorien um immer neue Aspekte erweitert, die den jeweils vorherrschenden philosophischen Strömungen Rechnung trugen. Diese Entwicklung fand schließlich ihren ersten Höhepunkt in der Auseinandersetzung zwischen der Lehre von Heraklit und jener der Eleaten Parmenides und Zenon. Während Erster den Zustand stetiger Veränderung zum grundlegenden Wesenszug der Natur erklärte, leugneten Letztere jeglichen Wandel und hinterfragten die Realität von Veränderungen an sich.

Die älteren griechischen Atomisten sahen sich zum Zeitpunkt ihres Wirkens also mit einer Reihe philosophischer Spannungen konfrontiert, welche zum Zwecke des Fortschritts der Naturphilosophie verarbeitet werden mussten. Der scheinbar allumfassende und unwiderlegbare Charakter des Eleatismus stellte dabei eine besondere Herausforderung dar, welche nicht ohne Weiteres übergangen werden durfte. Im Wesentlichen bestand die Anschauung der Eleaten in der Ablehnung eines kohärenten Weltbildes, welche durch Aussagen wie beispielsweise „Es gibt nur das eine unveränderliche Seiende“ (Parmenides) verdeutlicht wurde.<sup>6</sup> Hinzu kam, dass jegliche Veränderung, egal ob ortsbezogen (Melissos<sup>7</sup>) oder stofflich (Zenon) – wie beispielsweise Teilungen –, als unmöglich galt.<sup>8</sup> Selbst bei der Zuverlässigkeit der Sinne machten die Eleaten keine Ausnahme.<sup>9</sup>

Es musste ein Weltmodell geschaffen werden, welches unter Berücksichtigung möglichst aller zum damaligen Zeitpunkt vorherrschenden Lehrmeinungen sowohl die Natur und ihre Phänomene, als auch die Wahrnehmung derselben mit den Sinnen lückenlos erklären konnte.<sup>10</sup> All diesen Forderungen begegneten die Atomisten auf eine äußerst geschickte Art und Weise. Mit ihrem schier unerschütterlichen Glauben an die Realität von Veränderungen als Ausgangspunkt, schufen sie durch die Synthese ausgewählter Aspekte heraklitischer und eleatischer Lehrmeinungen einen zur damaligen Zeit beispiellosen Versuch eines Paradigmenwechsels, welcher allen verarbeiteten Systemen in größtmöglichem Ausmaß gerecht

<sup>6</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 128; vgl. BODNÁR, 1997a, Sp. 218.

<sup>7</sup> Ein weiterer eleatischer Gelehrter, welcher die Auffassung vertrat, jegliche Bewegung wäre unmöglich.

<sup>8</sup> Gerade die Behauptung, kontinuierliche Teilung führe unweigerlich zu Paradoxa, konnte von den Atomisten als Basis einer Postulierung kleinster unteilbarer Teilchen zurate gezogen werden, wodurch eine gleichzeitige Entkräftung der paradoxen eleatischen Gedankenexperimente ermöglicht wurde.

<sup>9</sup> Man könnte meinen, die Kohärenz der Eleaten bestand letztendlich in der konsequenten Anwendung ihrer naturphilosophischen Erkenntnisse auf alle Naturbereiche. Dies trifft aber im Grunde auf jede Naturwissenschaft zu.

<sup>10</sup> Stückelberger beschreibt vor dem Hintergrund dieser Bestrebung zwei Pfade, welche sich den nachfolgenden Philosophen durch den heraklitisch-eleatischen Konflikt eröffneten: Jenen der materiellen Urstoffvorstellung der Atomisten, welcher im Folgenden behandelt wird, und jenen von Platons immaterieller Ideenlehre, auf welchen in Kapitel 5.1 eingegangen wird (vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 9f.).

werden wollte. Dabei war es – wie am Beispiel des leeren Raums ersichtlich ist – mitunter auch notwendig, eine kontradiktorische Position gegenüber den Vorgängern einzunehmen.<sup>11</sup> Ohne Zweifel lässt sich behaupten, dass der antike Atomismus eine direkte Reaktion auf die weltfremd anmutenden eleatischen Lehren darstellte.<sup>12</sup>

Ogleich für die Wahl eines Grundstoffes bereits viele Ideen entwickelt und zu größeren Gedankengebäuden zusammengefasst worden waren, entschieden sich Leukipp und Demokrit dennoch für einen neuen Weg: Die vollständige Abstrahierung des Urstoffes. Im Gegensatz zur Lehre ihres Vorgängers Anaxagoras, bestanden für die Atomisten die Dinge nicht aus beliebig kleinen, ihnen im Wesen ähnlichen bzw. gleichen Teilchen, sondern aus unteilbaren Atomen, welchen in letzter Instanz keinerlei Eigenschaften außer Form und Größe anhafteten. Dies hatte unter anderem zur Folge, dass die von den Atomisten „gerettete“ Realität sich nunmehr als „unbelebte Maschinerie“ herausstellte, welche nicht dem Willen eines übergeordneten Wesens oder einem bestimmten Zweck unterworfen war, sondern lediglich von Lage und Bewegung unsichtbarer kleinster Teilchen beeinflusst wurde.<sup>13</sup> Diese antiteleologische Geisteshaltung veranlasste Aristoteles, eine regelrechte Kampagne gegen die Atomisten und ihre in seinen Augen weltfremden Theorien in die Wege zu leiten. Obwohl man in hohem Maße dazu verleitet sein könnte, diesem berühmten Gelehrten, welcher unschätzbar wertvolle Beiträge zu fast allen Wissensgebieten seiner Zeit geliefert hatte, den Verfall des Wissens um den antiken Atomismus während der folgenden zwei Jahrtausende zur Last zu legen, muss dennoch auch berücksichtigt werden, dass die Tradierung der Lehre aufgrund ihrer hohen Abstraktionsstufe und der damit verbundenen Schwierigkeit, geeignete und fassbare Beispiele zu formulieren, nachhaltig negativ beeinflusst wurde; denn immerhin handelte die Theorie von Teilchen, deren Dimensionen als so klein galten, dass sie „zwar in der Welt sich befinden und doch sich nicht sichtbar bekunden“<sup>14</sup>. Die Möglichkeit eines experimentellen Nachweises lag noch in weiter Ferne.<sup>15</sup>

## 4.2 Die Grundzüge von Demokrits Atomtheorie

Als Einleitung sei an dieser Stelle ein paradoxes Gedankenexperiment, dessen Formulierung Demokrit zugeschrieben wird, angeführt: Man stelle sich einen Kegel vor, welcher parallel zu seiner Grundfläche in zwei Teile geschnitten wird (siehe Abbildung 4.1a). Nun betrachte man die beiden kreisförmigen Schnittflächen und vergleiche sie hinsichtlich ihrer Größe. An-

<sup>11</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 500.

<sup>12</sup> Vgl. SCHMIDT, 2007, S. 78; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 35; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 498ff.

<sup>13</sup> LINDBERG, 1994, S. 31.

<sup>14</sup> Siehe das Zitat am Beginn von Kapitel 4. Stückelberger zitiert außerdem ein Demokritfragment, demzufolge die Atome „nur ‚mit dem Verstand erkennbar‘“ wären (vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 15).

<sup>15</sup> Die Atomisten waren sich der Schwierigkeit eines Nachweises völlig bewusst und bemühten sich, nachvollziehbare Argumentationslinien zur Untermauerung ihrer Theorien zu entwickeln. Auf diese wird in Abschnitt 4.2.5 eingegangen.

genommen die Welt bestünde aus einem Stoff, welcher beliebig fein geteilt werden könnte, so gelangte man zu der Erkenntnis, dass beide Schnittflächen exakt dieselbe Größe aufwiesen. Da der trennende Schnitt bei einer solchen kontinuierlichen Struktur der Materie jedoch auch um eine unendlich kleine Distanz versetzt durchgeführt werden könnte, folgte daraus, dass auch diese neue sowie alle weiteren Schnittflächen gleich groß sein müssten. Dies stünde aber in offenkundigem Widerspruch zur makroskopischen Erscheinung des Kegels und träfe nur auf einen Zylinder zu.

Eine Lösung dieses Paradoxons bot die Annahme einer diskreten, atomaren Struktur der Materie in Form kleinster, endlich großer Teilchen. Der Kegel könnte demnach „nur zwischen den Atomschichten“<sup>16</sup> geteilt werden (siehe Abbildung 4.1b), wodurch die Schnittflächen in Wahrheit unterschiedliche Größen aufwiesen.<sup>17</sup> Für den Kegelmantel bedeutete dies, er wäre trotz seiner fühlbaren Ebenmäßigkeit tatsächlich stufig.<sup>18</sup>

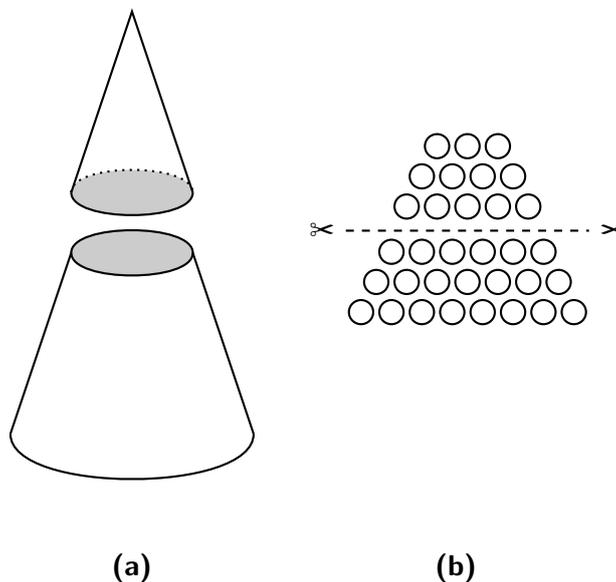


Abbildung 4.1: Das Paradoxon vom Kegel

### 4.2.1 Atome und leerer Raum

Gemäß der Vorstellung Demokrits und aller späteren antiken Atomisten bestünde die Welt aus zwei Prinzipien: Den Atomen und dem leeren Raum.<sup>19,20</sup>

<sup>16</sup> EHLERS, 2002b, S. 35.

<sup>17</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 146; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 34f.

<sup>18</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 148f.

<sup>19</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 15; vgl. BODNÁR, 1997a, Sp. 218; vgl. BODNÁR, 1997b, Sp. 456; vgl. SCHMIDT, 2007, S. 29f.

<sup>20</sup> Das paarweise Auftreten solch grundlegender Annahmen ist keineswegs eine Seltenheit. Eine ähnliche Zweiteilung kann auch bei den beiden immateriellen Kräften des Empedokles oder Heraklits dynamischen Gegensätzen gefunden werden.

Der Begriff Atom bezeichnete sowohl die kleinsten Teilchen an sich, als auch ihre wichtigste Eigenschaft: Die Unteilbarkeit.<sup>21</sup> Um diese zu beweisen, wurden verschiedene Argumente entwickelt, von welchen im Folgenden drei erwähnt werden sollen. Das *Indifferenzargument* gründete auf der Annahme, dass ein Atom – sofern es teilbar wäre – an jeder beliebigen Stelle geteilt werden könnte und somit aus unendlich vielen Teilen zusammengesetzt wäre, welche ihrerseits wiederum unendlich klein sein müssten. Die weitere Argumentation folgt den bekannten Paradoxa der Eleaten: Unendlich kleine Teile könnten aufgrund ihrer verschwindend geringen Größe keine makroskopischen Objekte aufbauen. Das *Festigkeitsargument* wiederum besagte, dass Atome keinen leeren Raum, welcher als Voraussetzung für Teilungsvorgänge gesehen wurde, beinhalten würden und somit nicht geteilt werden könnten. Ähnlich mutet das *Kleinheitsargument* an, aufgrund dessen die Unteilbarkeit durch die geringe Größe der Teilchen gewährleistet wäre.<sup>22,23</sup>

Die Leere ( $\tau\acute{o}$  κενόν, *tò kenón*) stellte das komplementäre Prinzip zu den Atomen dar und galt als das Gegenteil des körperlich Seienden.<sup>24</sup> Sie entsprach dabei jedoch keineswegs dem eleatischen Nicht-Seienden, sondern wurde als real und existierend angesehen. Gemeinsam mit den Atomen bildete sie die reale Welt, da sie diesen einerseits Raum<sup>25</sup> für Bewegungen bot, andererseits aber mit ihrer Hilfe auch Eigenschaften und Veränderungen der in der Welt vorhandenen Stoffe erklärt werden konnten.<sup>26,27</sup> Dabei fällt auf, dass sich Atome und Leere neben ihrer Komplementarität noch in einem weiteren Aspekt erheblich unterschieden: Während die Zahl der Atome als unbegrenzt angenommen wurde, traf dies auf die Leere als singuläre Erscheinung nicht zu.<sup>28</sup> Wollte man den leeren Raum der antiken Atomisten mit modernen Fachbegriffen charakterisieren, so könnte er als homogen und isotrop bezeichnet werden.<sup>29</sup>

Indem er die Atome als konstante Weltbausteine mit dem unveränderlichen Seienden der Eleaten gleichsetzte und mit der Leere die Möglichkeit dynamischer Veränderungsvorgänge, wie sie von Heraklit postuliert wurden, schuf, konnte Demokrit die Forderungen beider

<sup>21</sup> Griechisch ἄτομος, *átomos* = „unteilbar“ von τέμνω, *témno* = „teilen“.

<sup>22</sup> Vgl. BODNÁR, 1997b, Sp. 456f.

<sup>23</sup> Womöglich hatten die Griechen bereits die Vorstellung einer untersten Grenze, jenseits derer der im Zentrum ihrer Naturphilosophie stehende Naturbegriff keine (rationale) Anwendung finden könnte, entwickelt. Diese Beweisführung erinnert stark an die Planck-Länge in der modernen Physik ( $\approx 10^{-35}$  m).

<sup>24</sup> Vgl. BODNÁR, 1997a, Sp. 218.

<sup>25</sup> Der Begriff eines physikalischen Raumes im heutigen Sinne war in der Antike noch unbekannt. Gleichwohl begannen die Philosophen des Hellenismus mit Versuchen, eine Definition für den Raum zu formulieren. Epikur beispielsweise bezeichnete ihn als „nicht greifbare Substanz“, welche leer oder von Materie erfüllt sein könne. Lukrez traf sogar eine Unterscheidung für die Begriffe „Ort“ (*locus*), „Raum“ (*spatium*) und „Leere“ (*inane*). Einen guten Überblick der verschiedenen Auffassungen zu diesem Begriff bietet ALGRA, 2001, Sp. 788ff.

<sup>26</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 498ff.

<sup>27</sup> Volumenänderungen wurden beispielsweise durch Variationen des Abstands zwischen den Atomen eines Körpers und einer sich daraus ergebenden Verdünnung oder Verdichtung erklärt (siehe SCHRÖDINGER, 1989, S. 147f.).

<sup>28</sup> Vgl. BODNÁR, 1997a, Sp. 218.

<sup>29</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 132.

Vorgänger auf einzigartige Weise in einem Modell vereinen und so die gespaltenen Lehrmeinungen versöhnen.<sup>30,31</sup>

### 4.2.2 Gestalt und Eigenschaften der Atome

Hinsichtlich der Atomeigenschaften muss eine grundlegende Unterscheidung zwischen so genannten *primären Qualitäten* wie Form und Größe und *sekundären Qualitäten*, welche sich erst durch den Zusammenschluss vieler Atome zu größeren Komplexen ergeben, getroffen werden.

#### Primäre Atomeigenschaften

Als primäre Qualitäten galten laut Demokrit die Gestalt, die Lage und die Anordnung der Atome in größeren Gruppen. Der Begriff der Gestalt wurde dabei als übergeordneter Terminus für Form und Größe verstanden.<sup>32</sup> Bezüglich ihrer Form unterlagen die Atome keinerlei Einschränkungen<sup>33</sup>, weshalb zurecht angenommen werden konnte, es gäbe unendlich viele verschiedene Arten. Die Form eines Atoms hatte jedoch Einfluss darauf, wie gut sich das Teilchen mit anderen zu größeren Verbänden zusammenschließen konnte. Diese rein „mechanische Kohäsion“ baute womöglich auf der Vorstellung auf, dass Atome als Ganzes zwar unteilbar, aber dennoch aus kleineren Bestandteilen zusammengesetzt wären. Hakenförmig gedachte Fortsätze, welche nur in Verbindung mit einem Atom existieren könnten, würden durch ihr gegenseitiges Ineinandergreifen ein Verklumpen überhaupt erst ermöglichen (siehe Abbildung 4.2).<sup>34</sup>

#### Sekundäre Atomeigenschaften

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den primären und den sekundären Qualitäten bestanden darin, dass Erstere als von Natur aus gegeben angesehen wurden und auf Atome im Einzelnen zutrafen, während Letztere ihre Gültigkeit „aufgrund von Konvention“ erhielten und im Allgemeinen nur größeren Atomgebilden anhafteten.<sup>35</sup> Typischerweise handelte es

<sup>30</sup> Vgl. SCHNEIDER, 1999, Sp. 1006. Das von Schneider a. a. O. genannte „Problem der Prozessualität“, also die Frage nach dem der Verbindungen von Atomen zu größeren Gebilden und schließlich zur Welt zugrunde liegenden Prinzip, wurde erst von Epikur gelöst. Weitere Informationen dazu siehe Kapitel 6.1.

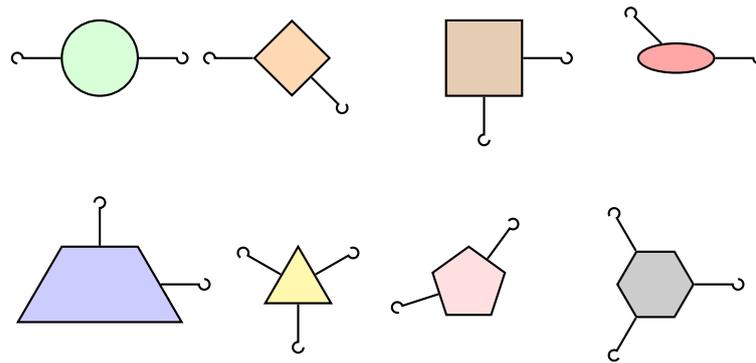
<sup>31</sup> Neben den Begriffen des Atoms und der Leere, deren moderne Entsprechung bis auf wenige Einschränkungen das Vakuum darstellt, lassen sich im heutigen wissenschaftlichen Sprachgebrauch noch weitere Fachtermini finden, welche bereits in der Antike entstanden sind. Bei diesen handelt es sich unter anderem um die Korpuskeln, die Moleküle und die Teilchen. Die Vorstellungen, welche diesen Begriffen damals anhafteten, entsprechen auch weitgehend dem heutigen Bild (vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 16).

<sup>32</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 17; vgl. BODNÁR, 1997b, Sp. 457.

<sup>33</sup> Gemelli Marciano zählt diesbezüglich einige Begriffe auf: „rund, [...] eckig, [...] konkav, konvex, hakenförmig“ (GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 503)

<sup>34</sup> Vgl. BODNÁR, 1997b, Sp. 456f.

<sup>35</sup> BODNÁR, 1997b, Sp. 457.



**Abbildung 4.2: Das Atommodell nach Demokrit**

sich bei den sekundären Qualitäten um makroskopische Eigenschaften aus dem Bereich der Sinneswahrnehmungen, wie beispielsweise Farben, Gerüche und Geschmacksrichtungen.<sup>36</sup>

### 4.2.3 Sinneswahrnehmungen

Wie bereits in Abschnitt 2.4 kurz erwähnt, vertraten die antiken Atomisten die so genannte Bildchentheorie.<sup>37</sup> Sie gingen davon aus, dass alle Körper permanent kleine Bilder ihrer selbst ausschickten, welche von speziellen Sinnesporen aufgenommen und verarbeitet würden. Die dadurch zustande kommende Wahrnehmung wäre jedoch stets subjektiv und auf Konventionen angewiesen. Zudem unterlägen die Bildchen aufgrund äußerer Einflüsse gewissen Veränderungen, welche durch rein mechanische Prozesse wie Biegungen, Stauchungen und andere Verformungen erklärt werden.<sup>38</sup> Es ist anzumerken, dass es sich bei der bildlichen Erkenntnistheorie der antiken Atomisten konsequenterweise und im Sinne ihrer Teilchentheorien um ein durchwegs materielles Modell handelte. Ähnlich wie bei Platons Erkenntnistheorie (siehe Abschnitt 2.2), wäre das sinnliche Erfassen einer objektiven Realität somit weitgehend unmöglich und nur von einer „dunklen“ Eingebung geprägt, welche mittels Vernunft interpretiert werden müsste, um zur „echten Erkenntnis“ zu gelangen.<sup>39,40</sup>

<sup>36</sup> Wiederum mutet die Denkweise der antiken Atomisten, dass sich komplexere Konstrukte mit wahrnehmbaren Qualitäten aus mehr oder weniger eigenschaftslosen Quantitäten zusammensetzen ließen, ungewohnt modern an. Man denke beispielsweise nur an die Darstellung einer mathematischen Funktion in Form eines Funktionsgraphs, welche das Ausfindigmachen bestimmter Eigenschaften im Vergleich zu einer rein quantitativen Wertetabelle erheblich vereinfacht.

<sup>37</sup> Diese wird in der Literatur mitunter auch Simulacra- (lat. *simulacrum*) oder Eídola-Theorie (griech. εἶδωλον, *eídolon*) genannt.

<sup>38</sup> Abbildung 4.3 verdeutlicht den gedachten Prozess der „Verbildlichung“ eines Gegenstandes in der Welt. Die sich vom real existierenden Tisch ablösenden Bildchen werden durch äußere Umstände verformt und schlussendlich durch die Wahrnehmungsorgane endgültig subjektiviert, wodurch sich der objektive Charakter des realen Gegenstandes der rein sinnlichen Wahrnehmung unweigerlich entzieht. Obwohl der Tisch gänzlich aus Atomen besteht, wird er in seiner Gestalt und Funktion immer nur als „Tisch“ und nicht als „tischförmiges Atomgebilde“ wahrgenommen werden. Erst durch den Gebrauch der Vernunft lässt sich die wahre Natur des Objektes erkennen.

<sup>39</sup> EHLERS, 2002b, S. 35.

<sup>40</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 72; vgl. LINDBERG, 1994, S. 112f.

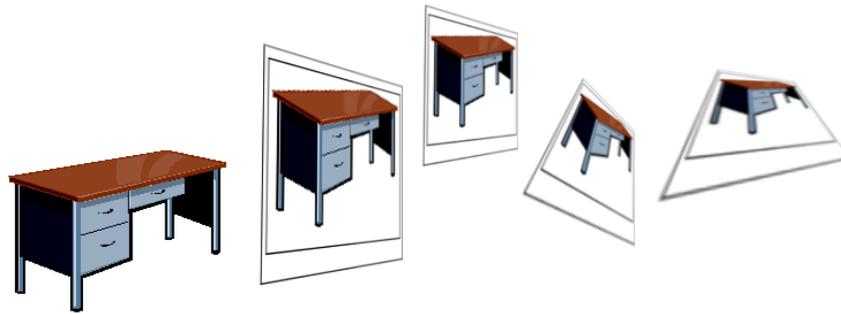


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Bildchentheorie

#### 4.2.4 Atombewegung und Schwere

Demokrit nahm an, dass sich die Atome infolge einer Notwendigkeit bzw. eines „natürlichen Zwangs“ (*ἀνάγκη*, *anánke*) in ständiger ungeordneter Bewegung befanden.<sup>41,42</sup> Da diese ohne äußere Einflüsse endlos fort dauern sollte, hatte er dadurch beinahe zwei Jahrtausende vor Galilei und Newton unwissentlich das erste newtonsche Axiom, den Trägheitssatz, erraten.<sup>43</sup> Aus der chaotischen Atombewegung resultierte letztendlich ein riesiger Wirbel, in dessen Zentrum sich die Erde befände. Von diesem Umstand wurde sogleich eine weitere Atomeigenschaft abgeleitet: Die Schwere. Da sie sich rein aus der Bewegung der Atome ergibt, ist sie innerhalb Demokrits Lehre weder als primäre noch als sekundäre Qualität im weiter oben (Abschnitt 4.2.2) beschriebenen Sinn zu sehen. Die leichteren Stoffe sollten sich im Wirbel an den Rand begeben, während die schweren Körper scheinbar von einer unsichtbaren Kraft zum Zentrum hin gezogen würden. Schrödinger erwähnt in diesem Zusammenhang einen anschaulichen Vergleich mit Teeblättern in einer Teetasse, welche sich durch das Umrühren in der Mitte sammeln.<sup>44</sup> Dieser könnte in ähnlicher Form auch Demokrit als Vorbild für seine Weltvorstellung gedient haben.

Größere Bedeutung erlangte die Schwere bzw. Masse der Atome erst mit der Weiterentwicklung der demokriteischen Theorie durch Epikur und einer damit einhergehenden Überarbeitung der Bewegungslehre (siehe Kapitel 6.1).<sup>45</sup> Bemerkenswert ist, dass Demokrit auch Atomen, welche in größeren Verbänden wie beispielsweise Festkörpern gebunden waren, eine Bewegungsmöglichkeit in Form einer „Schwingung am Ort“ zuerkannte.<sup>46</sup> Dies entspricht in gewisser Vereinfachung dem modernen Teilchenmodell eines Festkörpers.

<sup>41</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 19; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 506f.

<sup>42</sup> Man vergleiche dies mit der Aussage „Alles fließt!“ des Heraklit.

<sup>43</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 133; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 19.

<sup>44</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 134.

<sup>45</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 17.

<sup>46</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 19.

### 4.2.5 Nachweisbarkeit der Atome

In Abschnitt 4.2.1 wurden drei Argumente zum Beweis der Unteilbarkeit der Atome angeführt. Das zuletzt Genannte, betreffend die Größe der Atome, deutet auf eine grundlegende Problematik hin, welcher sich die Atomisten schon mit der ersten Formulierung einer Theorie kleinster Weltbausteine gegenübergestellt sahen: Jene der Sichtbarkeit bzw. des Nachweises derselben. Die Komplexität des Sachverhalts drückt sich nicht zuletzt dadurch aus, dass die Unsichtbarkeit der Atome von den meisten atomistischen Philosophen eigens hervorgehoben wird und ihre Existenz nur auf gedanklichem, rationalem Wege bestätigt werden könnte.<sup>47</sup> In einer von visueller Wahrnehmung dominierten Zeit war es den Gegnern der Lehre somit ein Leichtes, das Vorhandensein kleinster Teilchen infrage zu stellen. Demokrit und beinahe drei Jahrhunderte später der römische Dichter Lukrez ersannen eindrucksvolle Experimente<sup>48</sup>, welche jeglichen Zweifel an der Existenz von Atomen ausräumen sollten. Sie mussten dabei jedoch besondere Rücksicht auf die „Natürlichkeit“ ihrer Versuche nehmen, denn spätestens mit dem Aufkommen aristotelischer Lehrmeinungen galten Experimente als in das Naturgeschehen eingreifende und somit nicht den wahren Sachverhalt darstellende Methoden (siehe Abschnitt 2.4).

Die folgenden Experimente und Beobachtungen werden Demokrit in schriftlichen Zeugnissen anderer Autoren zugeschrieben. Konkret sollen hier die drei wichtigsten Versuche Erwähnung finden. Zu den entsprechenden Atomnachweisen des Lukrez siehe Kapitel 6.2.

#### Demokrits Experimente

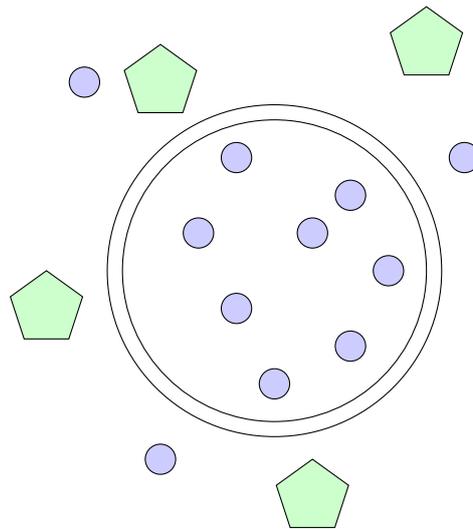
Als das wohl eindrucksvollste Experiment, dessen Durchführung Demokrit zugesprochen wird, kann die so genannte Dialyse des Salzwassers angesehen werden. Der Überlieferung nach hätte der Gelehrte ein hohles Gefäß aus Wachs geformt und dieses eine gewisse Zeit im Meer versenkt. Im Inneren sammelte sich Wasser an, welches trinkbar gewesen wäre. Der Naturphilosoph erklärte dies dadurch, dass Salzwasser aus einer Mischung von normalen Wasseratomen und größeren Salzatomen bestünde. Letztere würden beim Durchdringen der Wachsschicht aufgrund ihrer Beschaffenheit stecken bleiben und reines Trinkwasser zurücklassen (siehe Abbildung 4.4).<sup>49</sup> Damit wäre ein eindeutiger Nachweis für die Existenz von Atomen erbracht.

Demokrit wollte aber nicht nur das Vorhandensein von Atomen beweisen, sondern auch deren Pendant: Die Leere. Um dies zu bewerkstelligen, hätte er der Überlieferung nach ein

<sup>47</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 502ff; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 15.

<sup>48</sup> Die heutige Vorstellung eines Experiments ist sehr vom Bild der modernen Naturwissenschaft geprägt und darf in dieser Form nicht auf die Antike übertragen werden. Demokrit und seine Nachfolger bedienten sich oft natürlicher Phänomene, welche sie im Sinne ihrer Lehren erklärten und interpretierten. Professionelle Versuchsanordnungen oder Labore waren freilich nicht vorhanden. Vor diesem Hintergrund sollte der Begriff des Experiments demnach mit Bedacht verwendet und gegebenenfalls durch jenen der Methode ersetzt werden.

<sup>49</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 23f.



**Abbildung 4.4: Prinzip der Dialyse des Salzwassers**

Behältnis voller Asche, welche aufgrund ihrer Leichtigkeit einen großen Anteil am leeren Raum haben sollte, mit Wasser aufgefüllt, woraufhin sich herausgestellt hätte, dass die benötigte Wassermenge beinahe jener eines zuvor leeren Gefäßes entsprach. Die Wasseratome hätten demnach den leeren Raum zwischen den Atomen der Asche eingenommen.<sup>50</sup>

Die Wirkung leeren Raums auf Atome spielte auch bei der Erklärung des Magnetismus eine entscheidende Rolle. Während Thales dem Magneteisenstein noch eine Seele zuschrieb (siehe Kapitel 3.1.1), erklärte Demokrit das Phänomen viel wissenschaftlicher: Durch gewisse Atomströmungen, welche von jedem Körper ausgingen, würden die Eisenatome vom Magnetstein angezogen.<sup>51</sup>

Ein weiteres überliefertes Experiment, welches sich zwar nicht primär mit der Bestätigung seiner Atomtheorien befasste, aber dennoch Demokrits tiefes Interesse an der Durchführung von Versuchen verdeutlichte und erste Ansätze einer wissenschaftlichen Methode im Sinne eines Galileo Galilei erahnen ließ, handelte von feinen Metallplättchen, welche im Gegensatz zu Metallkugeln in der Lage waren, auf dem Wasser zu schwimmen. So wenig dieses Phänomen auf den ersten Blick in den Bereich atomistischer Theorien fällt, umso bemerkenswerter erscheint seine Ähnlichkeit mit dem im dritten vorchristlichen Jahrhundert gefundenen Prinzip des Archimedes.<sup>52</sup>

<sup>50</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 22; vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 500.

<sup>51</sup> Eine ausführlichere Erklärung kann bei GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 511 nachgelesen werden. Die Erklärung sowohl magnetischer Phänomene als auch der Bildchentheorie mittels ausströmender Atome könnte einem heutigen Wissenschaftler gerade deshalb seltsam vertraut anmuten, da beide Vorgänge in der modernen Physik bzw. im Teilbereich der Elektrodynamik ein und dieselbe Ursache haben: Photonen.

<sup>52</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 22.

# Kapitel 5

## Aufnahme und Kritik durch Akademie und Peripatos

„Das Staunen ist die Einstellung eines Mannes, der die Weisheit wahrhaft liebt, ja es gibt keinen anderen Anfang der Philosophie als diesen.“

---

(Platon, *Theaitetos*, 155d)

Im Laufe des vierten vorchristlichen Jahrhunderts setzten sich nacheinander die beiden großen Philosophenschulen der Akademiker und der Peripatetiker eingehend mit den atomistischen Lehren von Leukipp und Demokrit auseinander. Deren Gründer Platon und Aristoteles vertraten hinsichtlich des Aufbaues der Welt jedoch völlig verschiedene Standpunkte. Während Platon seine Lehren ganz in der Tradition der Pythagoreer auf mathematischen Prinzipien aufbaute, lehnte Aristoteles die in seinen Augen allzu theoretische Weltanschauung seines Lehrers ab und wandte sich vermehrt biologischen Studien zu. Beide Entwicklungen sollen in den nachfolgenden Abschnitten hinsichtlich ihres Einflusses auf den antiken Atomismus behandelt werden.

### 5.1 Platon – Eine mathematische Atomlehre

Mit Platons philosophischem Schaffen nahm der zweite Pfad in der Entwicklung einer Urstofflehre nach den Jahrhunderten der Vorsokratiker seinen Anfang<sup>1</sup>. Dieser folgte der Vorstellung immaterieller Weltbausteine im Rahmen der Ideenlehre<sup>2</sup> und ging mit einer in der Tradition pythagoreischer und empedokleischer Lehren stehenden Formulierung eines mathematisierten Atomismus einher.<sup>3</sup>

Das platonische Modell einer auf Ideen basierenden Welt fand nicht nur Anwendung auf die im Höhlengleichnis erwähnten makroskopischen Gegenstände, deren Schatten die real existierenden und von den Menschen wahrgenommenen Objekte darstellten, sondern umfasste ebenso die Bausteine der Welt. Platon verband in seiner Theorie die anerkannte Lehre

---

<sup>1</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 9f. bzw. Kapitel 4.1.

<sup>2</sup> Diese wurde bereits in Kapitel 2.2 eingehender beschrieben.

<sup>3</sup> Forbes und Dijksterhuis bezeichnen diese naturphilosophische Strömung auch als „pythagoreischen Platonismus“ („*Pythagorean Platonism*“). Siehe FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 42.

von den vier Elementen eines Empedokles mit der Vorstellung kleinster Urteilchen eines Demokrit und den strengen mathematischen und geometrischen Gesetzmäßigkeiten der Pythagoreer. Die vollkommenen Ideen der Grundelemente sollten dabei die Form regelmäßiger geometrischer Körper annehmen.<sup>4,5</sup> Dies legt die Vermutung nahe, dass Platon womöglich die Zahlen selbst als Ideen angesehen haben könnte.

Da er den von Demokrit postulierten inneren Zwang der Atome zur Bewegung als zwecklos erachtete, versuchte er, die Welt unter einem anderen großen dynamischen Prinzip zu vereinen, welches er Demiurg oder Weltschöpfer nannte.<sup>6</sup> Zur Vorstellung eines solchen göttlichen Handwerkers wurde er unter Umständen durch die Lehren des Pythagoreers Ekphantos inspiriert, welcher von einer Art „göttlicher Kraft“ ausging.<sup>7</sup> Platons Demiurg fungierte außerdem als Schöpfer der Weltseele, eines übergeordneten und allumfassenden Organismus. Gerade in diesem Punkt distanzierte sich sein Schüler Aristoteles später entschieden von ihm, da er in seinen Lehren nicht von der Gesamtheit alles Seins, sondern vom Individuum ausging.<sup>8</sup> Gemeinsam ist beiden Philosophen jedoch ihre teleologische, also auf Zwecke ausgerichtete Weltanschauung, welche von Aristoteles zu einer Aitiologie und den berühmten vier Ursachen erweitert wurde.<sup>9</sup>

### 5.1.1 Die platonischen Körper

Wie die Atomisten war auch Platon der Auffassung, die Urkörperchen würden sich aufgrund ihrer Dimensionen jedweder sinnlicher Wahrnehmung entziehen.<sup>10</sup> Da er den Sinnen ohnehin nur eine sehr eingeschränkte Authentizität zugestand, mutet diese Einstellung kaum überraschend an.<sup>11</sup> Er ordnete jedem der vier empedokleischen Elemente einen regelmäßigen geometrischen Körper zu (siehe Abbildung 5.1)<sup>12</sup>: Dem Feuer entsprach das Tetraeder, der Luft das Oktaeder, der Erde das Hexaeder (Würfel) und dem Wasser das Ikosaeder. Zusätzlich sollte das Pentagondodekaeder als fünfter Körper die Kugelform der Welt repräsentieren.<sup>13</sup>

Indem er den Elementen ihre Qualitäten aberkannte und sie auf reine Quantitäten reduzierte, erreichte Platon ebenso wie Leukipp und Demokrit vor ihm ein bedeutendes Maß an Abstrahierung.<sup>14</sup> Jedoch ging er, im Unterschied zu den beiden Atomisten, in seinem Modell noch einen Schritt weiter. Die bereits erwähnten Elementarkörperchen wären demnach

<sup>4</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 39.

<sup>5</sup> Schrödinger ist der Meinung, demokriteisches Gedankengut hätte als Vorbild für Platons Ideenlehre gedient (vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 146f.).

<sup>6</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 37ff; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 28.

<sup>7</sup> Interessanterweise hatte sich ebendieser Ekphantos ebenfalls mit dem demokriteischen Atomismus auseinandergesetzt und ein ähnliches Urteilchenmodell formuliert (vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 27f.).

<sup>8</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 40ff.

<sup>9</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 87f; vgl. LINDBERG, 1994, S. 56f.

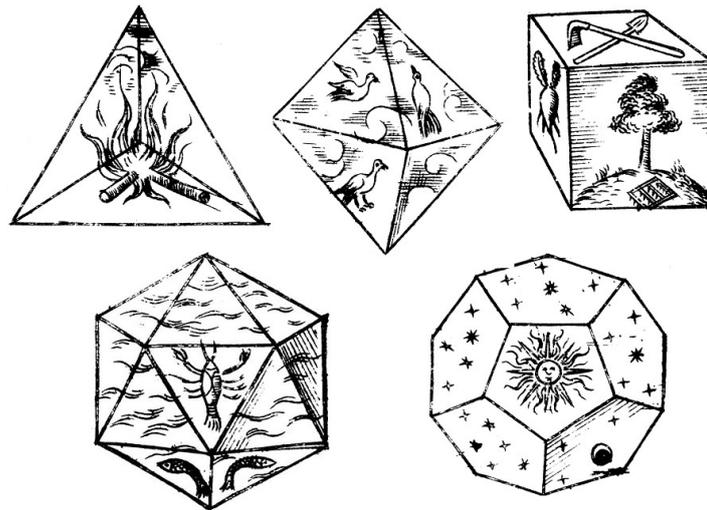
<sup>10</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 30.

<sup>11</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 38f.

<sup>12</sup> Eine derartige Verbindung begegnet bereits bei den Pythagoreern (vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 68).

<sup>13</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 39; vgl. LINDBERG, 1994, S. 43; vgl. SIMONYI, 2001, S. 72ff.

<sup>14</sup> Vgl. LANDFESTER, 2005, S. 854.



**Abbildung 5.1: Die platonischen Körper bei Johannes Kepler**

keine „echten“ Atome, da sie aus mehreren einfacheren Flächen bestünden, welche wiederum in zwei verschiedene Arten von Dreiecken geteilt werden könnten. Diese sollten gemäß dem Gelehrten die fundamentalste und unveränderliche Stufe alles Seins bilden. Bei diesen so genannten Elementardreiecken, welche in Analogie zu unserer heutigen Vorstellung zu recht als Elementarteilchen bezeichnet werden dürfen, handelte es sich um das rechtwinklige Dreieck mit den Winkeln  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $90^\circ$  (nachfolgend der Einfachheit halber „Typ A“ genannt) und um das gleichschenkelig rechtwinklige Dreieck („Typ B“).<sup>15</sup> Somit bestünden die gleichseitigen Dreiecksflächen von Tetraeder, Oktaeder und Ikosaeder aus jeweils sechs Elementardreiecken des Typs A, während die Quadrate des Hexaeders aus jeweils vier Dreiecken des Typs B aufgebaut wären.

Eine besondere Rolle nahmen die Flächen des Dodekaeders ein, welche aus regelmäßigen Fünfecken bestanden. Da diese nicht aus Dreiecken der bereits erwähnten Typen zusammengesetzt werden konnten, sondern ebenso wie die Diagonale des Einheitsquadrats mit einer gewissen, bereits in der Antike bekannten Inkommensurabilität behaftet waren<sup>16</sup>, maß Platon dieser Figur und dem aus ihr gebildeten Körper eine besondere Bedeutung bei, welche womöglich später von Aristoteles als Grundlage seiner Annahme, der von diesem „fünften Element“, der Quintessenz, erfüllte supralunare Weltbereich entzöge sich allen irdischen, d.h. sublunaren physikalischen Vorstellungen, zurate gezogen wurde.

Abbildung 5.2 sowie Tabelle 5.1 sollen der Verdeutlichung der Elementardreiecke dienen.

<sup>15</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 73ff; vgl. EHLERS, 2002b, S. 39f; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 30f; vgl. SCHNEIDER, 1999, Sp. 1007.

<sup>16</sup> Im regelmäßigen Pentagon tritt wiederholt ein bestimmtes irrationales Zahlenverhältnis auf, welches wir heute als Goldenen Schnitt bezeichnen. Genauer gesagt handelt es sich dabei um eine Proportionalität zur Goldenen Zahl  $\Phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ .

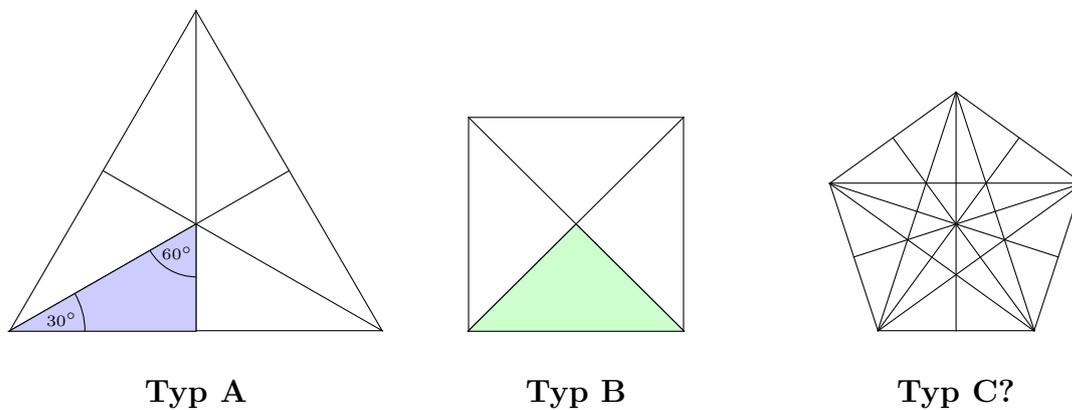


Abbildung 5.2: Platons Elementardreiecke

Körper	Anzahl Flächen	Gesamtzahl Elementardreiecke
Tetraeder	4	24
Oktaeder	8	48
Ikosaeder	20	120
Hexaeder	6	24
Dodekaeder	12	–

Tabelle 5.1: Details zu den platonischen Körpern

### 5.1.2 Wandlungsfähigkeit der Elemente

Platon entwickelte die Vorstellung, dass die Elementarkörperchen gemäß strenger mathematischer Prinzipien untereinander umgewandelt werden könnten. Sowohl Art als auch Anzahl der Flächen spielten hierbei die alleinige Hauptrolle. Betrachtet man die platonischen Körper hinsichtlich ihrer Flächen und deren Elementardreiecke, so wird deutlich, dass Feuer, Wasser und Luft problemlos ineinander übergehen können, während die Erde aufgrund ihrer auf elementarem Niveau andersartigen Beschaffenheit davon ausgenommen ist. In der Literatur findet sich dazu wiederholt folgende einfache Rechnung: 2 Luft- und 1 Feuerteilchen ergeben 1 Wasserteilchen und umgekehrt.<sup>17</sup>

$$\begin{aligned} 2 \cdot \text{Luft} + 1 \cdot \text{Feuer} &\Leftrightarrow 1 \cdot \text{Wasser} \\ 2 \cdot \text{Oktaeder} + 1 \cdot \text{Tetraeder} &\Leftrightarrow 1 \cdot \text{Ikosaeder} \\ 2 \cdot (8 \cdot \triangle) + 1 \cdot (4 \cdot \triangle) &\Leftrightarrow 1 \cdot (20 \cdot \triangle) \end{aligned}$$

Diese Denkweise erinnert ein wenig an die Reaktionsgleichungen und Strukturformeln der modernen Chemie.<sup>18</sup> Landfester erwähnt in diesem Zusammenhang, dass heute bestimmte Substanzen aufgrund ihres Aufbaus in Anlehnung an Platons Lehre als „platonische Moleküle“ bezeichnet werden.<sup>19</sup>

### 5.1.3 Der Hauptgedanke

Versuchte man, die atomistische Lehre Platons auf einen zentralen Gedanken zu bringen, so müsste dieser wohl lauten, „daß der Materie klare, mathematisch erfaßbare Strukturen zugrunde liegen“.<sup>20</sup> Dieser Meinung schließt sich Heisenberg an, wenn er von „zwei Gedanken“ schreibt, „die noch heute den Weg der exakten Naturwissenschaft bestimmen“. Es wäre dies einerseits die Vorstellung von Atomen als kleinsten Bausteinen der Welt und andererseits „der Glaube an die sinngebende Kraft mathematischer Strukturen“.<sup>21</sup> So vertraut der Gedanke, Materie mittels mathematischer Ausdrücke und Formeln zu beschreiben, in der Moderne auch erscheinen mag, so fremdartig dürfte er auf die Menschen der Antike gewirkt haben. Platon gelang es, beide Annahmen – jene kleinster Teilchen und die Fundamentalität der Mathematik – in einer Theorie zu verbinden.

<sup>17</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 39f; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 30f.

<sup>18</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 73.

<sup>19</sup> Vgl. LANDFESTER, 2005, Sp. 855f. Bei diesen Molekülen handelt es sich um weißen Phosphor (Tetraeder), Trimethylplatinchlorid (Hexaeder), Rhodiumcarbonyl (Oktaeder), Bor (Ikosaeder) und Dodekahedran (Dodekaeder). Bildliche Darstellungen derselben mögen a. a. O. nachgeschlagen werden.

<sup>20</sup> STÜCKELBERGER, 1979, S. 32.

<sup>21</sup> HEISENBERG, 1967b, S. 151.

## 5.2 Aristoteles und die Kampagne gegen die Atomisten

### 5.2.1 Die Kritik an den Vorgängern

Das philosophische und naturwissenschaftliche Werk des Aristoteles markiert einen entscheidenden Wendepunkt in der Entwicklung der antiken Naturphilosophie. Durch seine kritische Auseinandersetzung mit den Theorien der Vorsokratiker und seines Lehrers Platon erreichte er eine Neuschaffung des Naturbegriffs und beeinflusste dadurch nachhaltig die Art und Weise, wie Naturphilosophie und vor allem Naturwissenschaft in den folgenden Jahrhunderten betrieben wurden.<sup>22</sup>

Besonderes Interesse widmete Aristoteles hierbei seinem Mentor Platon und dem Atomisten Demokrit, deren Lehren er einer eingehenden Gegenüberstellung unterzog. Im Rahmen dieser gelangte er zu der Erkenntnis, dass Platons geometrisches Teilchenmodell zu sehr auf rein gedanklichen Aspekten beruhte, während Demokrits Vorgehensweise von ihm – nicht zuletzt wegen seiner angeblichen Experimente und des praxisnahen Ansatzes – als naturwissenschaftlicher beurteilt wird. Jedoch würden beide Gelehrte durch ihre Annahme einer begrenzten Teilbarkeit grundlegendste mathematische Prinzipien verletzen.<sup>23</sup> Aristoteles selbst unterschied folgerichtig zwischen Teilbarkeit auf physischer und auf mathematischer Ebene, wobei Letztere im Gegensatz zu Ersterer unendlich oft möglich wäre.<sup>24</sup>

Obwohl der Begründer der peripatetischen Schule den Methoden Demokrits durchaus Positives abgewinnen konnte, traf dies auf seine und Leukipps atomistische Lehre nicht zu. Er brachte eine Reihe von Argumenten vor, welche den Atomismus widerlegen und als Bekräftigung seiner eigenen Theorie fungieren sollten. Wäre die Welt aus Atomen aufgebaut, so müsste dieses strukturelle Prinzip ebenso auf die beiden großen physikalischen Begriffe des Raums und der Zeit, wie auch auf sämtliche Bewegungen zutreffen, was absurd wäre.<sup>25</sup> Weiters könnte die von den Atomisten ausdrücklich postulierte Leere in Wahrheit nicht existieren, da gemäß den Gesetzen der peripatetischen Dynamik (siehe Kapitel 2.4) durch das Fehlen jeglichen Widerstandes Bewegungen mit unbegrenzt hoher Geschwindigkeit ermöglicht würden.<sup>26</sup> Ferner kritisierte Aristoteles vor dem Hintergrund seiner eigenen teleologischen Naturauffassung die Zwecklosigkeit von Demokrits Weltmodell, wodurch es von Grund auf zum Scheitern verurteilt wäre.

Die offenkundige Unvereinbarkeit der atomistischen Lehren mit der Weltanschauung der Peripatetiker bewirkte, „daß die verheißungsvollen Ansätze Demokrits in der Antike kaum

<sup>22</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 49f; vgl. LAMMEL, 2005, Sp. 780f. Zur Definition des Naturbegriffs durch Aristoteles siehe Kapitel 2.2.

<sup>23</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 491; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 21f.

<sup>24</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 20f. Zur generellen Einstellung des Aristoteles gegenüber der Mathematik siehe Kapitel 2.4.

<sup>25</sup> Vgl. BODNÁR, 1997a, Sp. 219.

<sup>26</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 60; vgl. EHLERS, 2002b, S. 42; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 39.

weiterentwickelt, sondern bald in den Hintergrund gedrängt wurden“ und führte letztendlich zur Trennung von Naturphilosophie und Naturwissenschaft.<sup>27</sup>

### 5.2.2 Das Modell des Aristoteles

In Anlehnung an Platon ging Aristoteles ebenfalls von den vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde aus, welche sich im sublunaren Bereich der Welt befänden. Der supralunare Bereich hingegen wäre von einem fünften Element, der so genannten Quintessenz, erfüllt, bei welcher die irdischen physikalischen Theorien keine Anwendung finden könnten.<sup>28</sup> Die vier sublunaren Grundsubstanzen sollten durch das Zusammentreffen je zweier Grundeigenschaften, von welchen es insgesamt vier gäbe, aus dem materiellen Substrat gebildet werden, wodurch er eine Erweiterung der platonischen Lehren um neue Qualitäten bewirkte, deren Ansätze sich bereits bei Anaximander, Anaximenes und Heraklit finden.<sup>29</sup> Wie bereits in Kapitel 3.4 erwähnt, gelang ihm dadurch als Erstem eine Verbindung heraklitischen und empedokleischen Gedankenguts.

Da Aristoteles die Trennung von Form und Materie postulierte<sup>30</sup>, waren die vier Elemente nur ideal gedachte Erscheinungsformen der ursprünglich eigenschaftslosen Materie, welche in der Realität stets im Zustand der Mischung vorhanden wären.<sup>31</sup> Obwohl er die Existenz unteilbarer kleinster Teilchen ablehnte, war er der Überzeugung, in den Dingen der Welt müssten zumindest bestimmte kleinste Mengen dieser Grundstoffe existieren. Den Substanzen selbst schrieb er jedoch eine unbegrenzte Teilbarkeit zu, weshalb man sie als Kontinuum bezeichnen kann.<sup>32</sup>

Der antiteleologischen Geisteshaltung der Atomisten setzte Aristoteles seine umfassende Aitiologie entgegen, welche von den vier Ursachen „Form“, „Materie“, „Veränderung“ und „Zweck“ gebildet wurde. Ohne diese könnte nichts existieren oder geschehen. Am Beispiel eines Tisches soll dieses Schema verdeutlicht werden: Die Formursache bezieht sich auf die Ausführung des Tisches (Anzahl der Tischbeine, Größe etc.), die Materialursache betrifft den Werkstoff (Holz, Metall, Glas etc.), die Veränderungs- oder Wirkursache bezeichnet den Hersteller des Gegenstandes, also den Tischler, und die Zweckursache schließlich das Ziel, welches mit der Erschaffung des Tisches erreicht werden soll (beispielsweise Esstisch).<sup>33</sup>

<sup>27</sup> STÜCKELBERGER, 1979, S. 33f.

<sup>28</sup> Vgl. SCHNEIDER, 1999, Sp. 1007.

<sup>29</sup> Vgl. LANDFESTER, 2005, Sp. 854. Bei den vier grundlegenden Eigenschaften handelte es sich um die bereits erwähnten Gegensatzpaare warm/kalt und trocken/feucht. Siehe dazu die Kapitel 3.1.2, 3.1.3 und 3.1.4.

<sup>30</sup> Siehe Kapitel 2.2.

<sup>31</sup> Diese Anschauung hängt stark mit seiner Theorie von Aktualität und Potentialität zusammen, auf welche im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

<sup>32</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 37f. Spätere Kommentatoren sahen darin die Theorie der *minima* – wörtlich „kleinste Dinge“ –, welche keine demokriteischen Atome im eigentlichen Sinn darstellten, sondern aus ebendiesen kleinstmöglichen Anteilen der Elemente bestünden.

<sup>33</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 56f.

Die Grundzüge der peripatetischen Bewegungslehre wurden bereits in Kapitel 2.4 genannt. Aristoteles nahm an, dass jegliche räumliche Bewegung immer im Vollen stattfände, sodass zu keiner Zeit eine leere Stelle entstünde, welche die von ihm aufgestellten physikalischen Prinzipien verletzen würde.

### 5.2.3 Die Problematik der Veränderung

Wie seine Vorgänger musste auch Aristoteles sich dem Problem der Veränderung – also der Erklärung der in der Welt beobachtbaren Veränderungsvorgänge – stellen. Während Anaximenes die Ursache dafür in Dichteschwankungen der Luft und Heraklit sogar die gesamte Welt einem ständigen Wandel unterworfen sah, negierten die Eleaten kategorisch jegliche Prozessualität. Empedokles wiederum führte zwei einander entgegenwirkende immaterielle Prinzipien ein und die Atomisten machten schließlich einen den Atomen innewohnenden Zwang verantwortlich. Platon ging sogar so weit, die Ursache in seinen übergeordneten Prinzipien des Demiurgen und der Weltseele zu suchen, welche trotz ihres allumfassenden Einflusses dennoch nach strengen mathematischen Richtlinien handelten.

Die zugrunde liegende Problematik betraf jedoch einen ganz anderen Bereich. Bis zu diesem Zeitpunkt hatten die meisten Philosophen insgesamt zwei Stufen der Existenz angenommen: Das Sein und das Nichtsein. Es herrschte weitgehende Einigkeit darüber, dass nichts aus dem Nichtsein entstehen könnte. Umgelegt auf die vier Grundeigenschaften bei Aristoteles bedeutete dies, dass ein Objekt mit der Eigenschaft „warm“ zwar „kalt“, jedoch nicht erneut „warm“ werden könnte. Da „kalt“ mit „nicht warm“ gleichzusetzen wäre, entspräche eine Veränderung in Form eines „warm“ Werdens einer Entstehung von etwas aus dem Nichts.<sup>34</sup>

Aristoteles löste dieses scheinbare Dilemma auf äußerst geschickte Art und Weise, indem er zwischen die Zustände des Seins (Aktualität) und des Nichtseins eine weitere Ebene einfügte: Die Potentialität. Veränderung fände demnach immer zwischen aktuellem und potentielltem Sein statt. In Bezug auf das Beispiel eines Tisches im vorherigen Abschnitt bedeutet dies, dass der Tischler aus dem Werkstoff möglicherweise auch andere Möbelstücke fertigen könnte. Dem Stoff selbst würde mannigfaches Potential innewohnen, welches sich schlussendlich in Form eines konkreten, aktuellen Gegenstandes manifestierte. Aristoteles umging mit dieser Annahme geschickt die unmögliche Entstehung aus dem Nichts und wandte sie auf jeden erdenklichen Veränderungsprozess an. Dazu gehörten freilich auch Bewegungen, welche als Änderungen des aktuellen zu einem potentiellen Ort im Raum verstanden wurden.<sup>35</sup>

### 5.2.4 Die Nachwirkungen

Ogleich seine naturwissenschaftliche Leistung als die herausragendste der Antike zu bezeichnen ist, muss dennoch auch erwähnt werden, dass Aristoteles kraft seiner Autorität den

<sup>34</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 54.

<sup>35</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 54f; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 37.

---

Atomgedanken in seiner Entwicklung nachhaltig hemmte und eine Wiederaufnahme atomistischer Theorien erst zweitausend Jahre später nach einem erneuten Wandel des Naturbegriffs möglich war. Kritik an der aristotelischen Lehre, welche nach dessen Tod durch die Schüler des Peripatos in seinem Sinne erweitert wurde, galt lange Zeit als schwerer Frevel und konnte mitunter ernste Konsequenzen nach sich ziehen, wie am Beispiel Galileo Galileis ersichtlich ist. Die Überwindung dieses starren Gedankenguts verhalf der Physik als Naturwissenschaft im heutigen Sinn zu ihrem großen Erfolg.



# Kapitel 6

## Die späteren Atomisten

„Denn über letzten Grund will dir von Himmel und Göttern  
ich zu sprechen beginnen, will zeigen der Dinge Atome,  
aus denen alles Natur erschafft, vermehret und nähret,  
in die zugleich sie Natur dann wieder vernichtet und auflöst.“

---

(Lukrez, *De rerum natura* 1, 54ff.)

### 6.1 Epikur

Ein halbes Jahrhundert nach Demokrits Tod setzte mit Epikur die zweite Blütezeit des Atomismus in der Antike ein. Unter dem Gründer der epikureischen Philosophenschule rückten in der zweiten Hälfte des 4. Jh. v. Chr., am Beginn des Hellenismus, zunehmend ethische Fragen in den Mittelpunkt naturphilosophischer Betrachtungen.<sup>1</sup> Dies beeinflusste nicht nur die Übernahme demokriteischer Lehren durch Epikur, sondern auch deren Weiterentwicklung und Vervollständigung. Der Atomismus diente nicht mehr nur der Erklärung des Aufbaus der Welt, sondern sollte in der Form eines programmatischen Lehrgedichts „Über die Natur“ (*περὶ φύσεως, perì phýseos*) die Menschen von Furcht, Aberglaube und Religion befreien und zur Ataraxie, dem unerschütterlichen Seelenfrieden, führen.<sup>2</sup> Demokrits mechanische und jedweder göttlicher Einmischung entbehrende Weltanschauung bildete für Epikurs Bestrebungen somit eine ideale Basis.<sup>3</sup> Spezielles Augenmerk legte er auf die von Demokrit vertretene Seelenlehre, welche im epikureischen Atomismus in besonderem Maße herausgearbeitet wurde. Schrödinger merkt hierzu an, dass es sich um „einen sehr absurden Bestandteil“ demokriteischen Gedankenguts handelte und bedauert, dass spätere Atomisten nicht an den eigentlichen Grundprinzipien der Atomtheorie festhielten, sondern sich der Beschäftigung mit einer derartigen „Kinderei“ hingaben.<sup>4</sup>

Ogleich Epikurs umfangreiches Werk heute nur noch in kleineren und größeren Fragmenten auf uns kommt, gestattet die lateinische Bearbeitung der epikureischen Philosophie durch den römischen Autor Lukrez, welcher sein Werk „Über die Natur der Dinge“ (*De rerum*

---

<sup>1</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 83.

<sup>2</sup> Vgl. EHLERS, 2002b, S. 35; vgl. SIMONYI, 2001, S. 108; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 40.

<sup>3</sup> Vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 36; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 40.

<sup>4</sup> Vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 137f.

*natura*) ebenfalls in Form eines Lehrgedichts verfasste, weitreichende Einblicke in die Gedankenwelt Epikurs und seiner Schule. Er nimmt damit eine Sonderstellung unter den anderen römischen Schriftstellern und Enzyklopädisten ein, welche sich der Übersetzung griechischer Werke widmeten.<sup>5</sup>

### 6.1.1 Die Neuerungen

Durch die Neubearbeitung des älteren demokriteischen Gedankenguts drängte Epikur die Lehren seines Vorgängers zusehends in den Hintergrund.<sup>6</sup> Vorangetrieben wurde dies nicht zuletzt durch einige wesentliche Erweiterungen und Verbesserungen, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

Die Grundlage seiner Philosophie bildeten die drei Aussagen „Nichts entsteht aus nichts“, „Nichts vergeht zu nichts“ und „Das All war immer so, wie es jetzt ist“.<sup>7</sup> Er übernahm Demokrits Beweisführung der Existenz von Atomen, ohne diese näher zu hinterfragen.<sup>8</sup> Sein Modell sah eine unendliche Zahl an Atomen in einem unendlich großen Universum vor, in welchem an jedem Ort und zu jeder Zeit die immer gleichen physikalischen Bedingungen herrschen sollten. Diesen Zustand bezeichnete Epikur als Isonomie (ἴσος, *isos* = „gleich“, νόμος, *nómos* = „Gesetz“).<sup>9</sup>

Die beiden ursprünglich einzigen Atomeigenschaften „Form“ und „Größe“ wurden von ihm um eine dritte – in demokriteischem Sinn primäre – Qualität erweitert: Die Schwere bzw. das Gewicht.<sup>10</sup> Dieser Schritt kann möglicherweise als Reaktion auf eine kritische Aussage des Aristoteles aufgefasst werden, wonach der leere Raum gemäß atomistischer Anschauungen keine ausgezeichnete Richtung, nach welcher die Atome streben könnten, aufweise und hierdurch sämtliche Bewegungen verhindert würden.<sup>11</sup>

Das Atomgewicht bewirkte, dass sich alle Teilchen im konstanten und ewigen freien Fall durch den leeren Raum befänden. Die hierbei erreichte Geschwindigkeit wäre jedoch nicht – wie von Aristoteles aufgrund des fehlenden Widerstandes abgeleitet – unendlich groß, sondern hätte einen Maximalwert, welcher nicht überschritten werden könnte. Um diesen zu erklären, muss kurz auf die so genannte *minima*-Theorie Epikurs eingegangen werden.<sup>12</sup> Der Gelehrte nahm an, dass sich die Atome während einer minimalen Zeitspanne ein kleinstes Stück im Raum bewegten. Obwohl der Ortswechsel selbst instantan vonstattengehe, würde das nicht wahrnehmbare Verweilen der Teilchen an einem Ort für die Dauer ebendieser unteilbar kleinen Zeiteinheit – über den gesamten Bewegungsprozess aufsummiert – eine

<sup>5</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 18; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 36; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 90f.

<sup>6</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 489f.

<sup>7</sup> HOSSENFELDER, 1995, S. 135.

<sup>8</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 40f.

<sup>9</sup> Vgl. HOSSENFELDER, 1995, S. 138.

<sup>10</sup> Vgl. SCHMIDT, 2007, S. 94; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 42; vgl. SCHNEIDER, 1999, Sp. 1007.

<sup>11</sup> Vgl. HOSSENFELDER, 1995, S. 141.

<sup>12</sup> Vgl. SCHMIDT, 2007, S. 36ff.

Art unüberwindbaren Widerstand bewirken. Interessanterweise steht die Vorstellung eines solchen Hemmnisses im Einklang mit der peripatetischen Dynamik. Ihre Basis bildete jedoch die von Aristoteles als absurd abgetane Annahme einer granularen Beschaffenheit von Raum und Zeit.<sup>13,14</sup>

Da das Universum bereits ewig existierte, hätten alle Atome längst die maximale Fallgeschwindigkeit erreicht und würden sich im Zustand der Isotachie, also der gleichen Geschwindigkeit befinden.<sup>15</sup> Ein solcher paralleler Atomregen allein wäre jedoch nicht imstande, Teilchenstöße zu erklären, welche die Grundlage aller makroskopischen Objekte und der Welt bildeten, weshalb es wiederum galt, das berühmte Problem der Prozessualität zu bewältigen. Während Demokrit die Herausforderung nur ansatzweise und unzureichend gelöst hatte, indem er die Atome einem nicht näher definierten Zwang zur Bewegung unterwarf, kann der Lösungsansatz von Epikur als eine der bemerkenswertesten Annahmen in der Geschichte der frühen Naturwissenschaften bezeichnet werden. Der Philosoph ging von einer kleinen Abweichung aus, welche zufällig und ohne jede Ursache auftreten und zu Stößen zwischen den Atomen führen sollte. Diese wird *παρέγκλισις* (*parénklisis*), *declinatio* oder *clinamen* genannt. Auf diese Weise war es ihm möglich, die Existenz der Welt durch rein physikalische Überlegungen zu erklären. Die Theorie der Abweichung diente jedoch noch einem weiteren Zweck. Sie sollte den strengen Determinismus eines rein mechanischen Weltbilds durchbrechen und im Sinne der Ethik eine Erklärung für die Willensfreiheit des Menschen liefern, welche in der scheinbaren Bewegungsfreiheit der Atome verwurzelt wäre.<sup>16</sup> Gleichzeitig wirkte sie der teleologischen Naturauffassung eines Platon und eines Aristoteles entgegen, da der „freie Wille“ der Atome die Festlegung endgültiger Ursachen unmöglich machte.

## 6.2 Lukrez

Während Epikurs Schaffenszeit am Beginn des Hellenismus (336 – 30 v. Chr.) angesiedelt war, erblickte der in der Tradition seiner Lehren stehende römische Schriftsteller und Dichter Lukrez erst im letzten Jahrhundert dieser geschichtlichen Epoche, mehr als 170 Jahre nach Epikurs Tod, das Licht der Welt (siehe Abbildung 3.2, S. 27). Obwohl über seine Lebensdaten und sein Leben weitgehend nur Vermutungen angestellt werden können, erlangte er dennoch durch die Wiederentdeckung des frühen griechischen Atomismus und sein Lehrgedicht *De rerum natura* größere Bedeutung.<sup>17</sup> Seine detailgetreue und unverfälschte Überlieferung epi-

<sup>13</sup> Vgl. HOSSENFELDER, 1995, S. 138f.

<sup>14</sup> Es ist erstaunlich, wie ungewohnt modern die epikureische Lehre anmutet, indem sie die maximal mögliche Geschwindigkeit, die wir heute als Lichtgeschwindigkeit bezeichnen, auf grundlegende Eigenschaften der Raumzeit zurückführt.

<sup>15</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 43; vgl. HOSSENFELDER, 1995, S. 138f.

<sup>16</sup> Vgl. BODNÁR, 1997a, Sp. 218f; vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 43ff; vgl. HOSSENFELDER, 1995, 140ff; vgl. SCHMIDT, 2007, S. 69ff.

<sup>17</sup> Vgl. LAMMEL, 2005, Sp. 782; vgl. FORBES und DIJKSTERHUIS, 1963, S. 36; vgl. SCHRÖDINGER, 1989, S. 90.

kureischen Gedankenguts fungierte als ein wichtiges Bindeglied zur griechischen Welt und ihrer Philosophie. Es handelt sich hierbei um die umfangreichste überlieferte Darstellung des antiken Atomismus.<sup>18</sup> Auf römischer Seite gilt er deshalb bis heute als Ausnahmeerscheinung. In seinen sechs Büchern „Über die Natur der Dinge“ beschäftigt er sich eingehend und systematisch mit dem Atomgedanken. Die Bücher 1 und 2 beinhalten dabei die Grundzüge des epikureischen Atomismus, die Bücher 3 und 4 handeln von der Seele und den Sinneswahrnehmungen und die Bücher 5 und 6, von welchen das Letztere wahrscheinlich unvollendet blieb, widmen sich der Erklärung von Naturerscheinungen und umfassen auch eine Kulturgeschichte. Nach heutigen Maßstäben kann Lukrez' Werk als populärwissenschaftliche epikureische Enzyklopädie bezeichnet werden.<sup>19</sup> Seiner Wiederentdeckung durch Pierre Gassendi im 17. Jh. ist es zu verdanken<sup>20</sup>, dass Epikurs Lehren und auch jene seines Vorgängers Demokrit, welcher im Übrigen von Lukrez positiv beurteilt wird<sup>21</sup>, noch heute als Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Im Unterschied zu seinem Vorbild widmete Lukrez dem Nachweis der Atome, ihren mannigfaltigen Erscheinungsformen und ihren Bewegungen besondere Aufmerksamkeit. Seine Absicht, klare und nachvollziehbare Beweise zu entwerfen, welche oft von alltäglichen Beobachtungen ausgingen, die jeder römische Bürger machen konnte, äußerte sich auf eindrucksvolle Weise in seiner Beschreibung der „Sonnenstäubchen“, auf welche im Folgenden kurz eingegangen wird. Sein Ziel war es, alle Vorgänge in der Natur und der Welt auf rationale Art und Weise zu erklären, um – ganz im Sinne epikureischer Philosophie – von grundloser Furcht und Aberglaube zu befreien.<sup>22</sup>

### Lukrez' Experimente

Ebenso wie Demokrit zählte auch Lukrez zu den wenigen antiken Wissenschaftlern, für welche die Durchführung von Experimenten belegt ist. Im Folgenden sollen zwei Beispiele genannt werden.

Die Dialyse von Salzwasser war ebenfalls Gegenstand von Lukrez' Untersuchungen.<sup>23</sup> Er schlussfolgerte, dass die „sauren“ Bestandteile des Wassers beim wiederholten Filtern durch Erde vom Süßwasser getrennt werden könnten und erklärte dies – wie Demokrit vor ihm – mit Hilfe des Atommodells und der Existenz kleinster Teilchen (siehe Abbildung 4.4, S. 52).<sup>24</sup>

Als zweite, weit eindrucksvollere Beobachtung von Lukrez seien die so genannten Sonnenstäubchen erwähnt, deren Erklärung durch den Dichter einen höchst modernen Charakter aufweist. Man stelle sich einen dunklen Raum vor, in welchen einzelne Sonnenstrahlen

<sup>18</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 45f.

<sup>19</sup> Vgl. LINDBERG, 1994, S. 145ff.

<sup>20</sup> Vgl. SIMONYI, 2001, S. 72.

<sup>21</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 492.

<sup>22</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 47.

<sup>23</sup> Siehe Kapitel 4.2.5.

<sup>24</sup> Vgl. STÜCKELBERGER, 1979, S. 23f. und S. 48.

dringen. Im Lichte dieser würde man nun winzige Partikel beobachten können, welche teils ruhig durch die Luft schwebten, teils abrupt ihre Bewegungsrichtung änderten. Lukrez erklärt diesen Befund mit der mikroskopischen Bewegung der unsichtbaren Atome, welche durch Zusammenstöße und Verklumpungen sukzessiv größere Dimensionen annähme, bis sie schließlich mit freiem Auge sichtbar wäre.<sup>25</sup> Er liefert somit die erste Schilderung jenes physikalischen Phänomens, welches in der modernen Physik als Brown'sche Molekularbewegung bezeichnet wird, und begründet es auf höchst beeindruckende Art und Weise.<sup>26</sup>

---

<sup>25</sup> Vgl. GEMELLI MARCIANO, 2010, S. 502f; vgl. SCHMIDT, 2007, S. 173ff. Im Originaltext: *Lucr.* 2, 112ff.

<sup>26</sup> Schmidt fügt dem Anhang seiner Studie einen Vortrag von Hans Günter Dosch bei, in welchem u. a. auf ebendiese im Kontext des antiken Atomismus eingegangen wird (SCHMIDT, 2007, S. 191ff.).



# Kapitel 7

## Die weitere Entwicklung atomistischer Theorien

“Nicht Prunkredner, nicht Sprachkünstler, nicht Menschen, welche die in den Augen der Masse aufsehenerregende »Bildung« zur Schau stellen, formt die Naturforschung, sondern selbstbewußte und selbstgenügsame Menschen, die nur auf ihre persönlichen Werte, nicht auf Sachwerte stolz sind.“

---

(*Epikur, Weisungen, 45*)

Dieses Kapitel soll abschließend einen kurzen Überblick der für den antiken Atomismus wichtigsten Entwicklungen ab der Spätantike (284 – 7. Jh.) bis in die frühe Neuzeit geben.<sup>1</sup>

Trotz Lukrez' vielversprechender Tradierung des griechischen Atomgedankens, war unter den Gelehrten der Spätantike weitgehend eine teleologische Naturauffassung im Sinne von Platon und Aristoteles verbreitet, welche die Vorstellung zufällig abweichender Atome strikt ablehnte. Zudem zeigten die Römer im Allgemeinen wenig Interesse an theoretischen naturwissenschaftlichen Abhandlungen, da sie die praktische Anwendbarkeit bevorzugten. Die Atomtheorie scheint aus diesen Gründen nur bei vereinzelt Fachautoren wie Vitruv („Über die Architektur“) und Seneca dem Jüngeren am Rande auf. Letzterer erwähnt jedoch interessanterweise gerade das Bild der Sonnenstäubchen.<sup>2</sup> Einen weiteren Überlieferungsstrang der atomistischen Lehren in dieser geschichtlichen Epoche bilden die Kommentatoren des Aristoteles wie beispielsweise Galen.

Spätestens mit dem Aufkommen des Christentums erfuhr die Philosophie Platons einen ungeahnten Aufschwung, indem sein Demiurg mit dem christlichen Schöpfergott gleichgesetzt wurde. Herausragende Gestalten wie Laktanz, Augustinus und Isidor von Sevilla nahmen in ihren Schriften zum Atomismus der Antike Stellung und bewirkten hierdurch dessen weitere Überlieferung.

Während das Hochmittelalter noch von einem allumfassenden Aristotelismus geprägt war, kamen in der Spätzeit neue Naturvorstellungen auf. Ausgelöst wurde diese Entwicklung unter anderem durch Poggio Bracciolinis Wiederentdeckung von Lukrez' *De rerum natura* im Jahre 1417, welche nach und nach zu einer Lossagung vom aristotelischen Weltbild und

---

<sup>1</sup> Die hier angeführten Fakten entstammen STÜCKELBERGER, 1979, S. 48ff, LAMMEL, 2005, Sp. 780ff. sowie *Atomism* 2014.

<sup>2</sup> Siehe Abschnitt 6.2.

einer Wendung gegen seine Lehrmeinungen führte. Weitere Hinweise auf eine Beschäftigung mit atomistischem Gedankengut lassen sich im 15. Jh. außerdem noch bei Leonardo da Vinci finden. Eine umfangreiche Darstellung ist zudem bei Girolamo Fracastoro überliefert.

Den Höhepunkt der Auseinandersetzung mit den aristotelischen Lehren bildeten die Abhandlungen von Giordano Bruno und Galileo Galilei im 16. und 17. Jahrhundert. Da sie den Naturbegriff neu zu definieren versuchten und sich explizit für die Existenz von Atomen, die Legitimität technischer Instrumente zur Untersuchung der Natur und die Durchführung von Experimenten aussprachen, gerieten sie schnell ins Kreuzfeuer der Inquisition.

Mit Galilei begann letztendlich der Siegeszug der modernen Wissenschaft. Er beschäftigte sich unter anderem mit der Korpuskulartheorie, wonach die Welt aus so genannten Korpuskeln bestünde, welchen die Funktion der Atome zukäme, jedoch mit dem Unterschied, dass sie prinzipiell teilbar wären. Durch seine Experimente zur Bewegungslehre schlussfolgerte er, dass die Impetustheorie des Aristotelismus nur eine unzureichende, wenn nicht sogar falsche Basis für die Erklärung physikalischer Vorgänge lieferte.

Das 17. Jahrhundert war infolge Galileis Vorreiterrolle von umfassenden Umwälzungen geprägt, in deren Mittelpunkt namhafte Physiker wie René Descartes, Robert Boyle und Pierre Gassendi standen. Letzterer trug Wesentliches zur Wiederauffindung der antiken Atomistik in der Renaissance bei. Von Boyle wird der Atomgedanke erstmals auch auf chemische Prozesse übertragen.

Nachdem Isaac Newton an die bereits von Galilei vertretene Korpuskulartheorie angeknüpft und sie auf sein Modell der Lichtausbreitung – welches jedoch nach Aufkommen der Huygens'schen Wellentheorie wieder an Bedeutung verlor – angewandt hatte, dauerte es nicht mehr lange, bis John Dalton im 18. und 19. Jahrhundert den Grundstein der neuzeitlichen Atomphysik legte.

Durch die Entdeckungen auf den Gebieten der Elektrodynamik und der Radioaktivität sowie durch die Begründung der Quantentheorie zu Beginn des 20. Jh. sah sich die klassische Physik gezwungen, ihre Vorstellungen bezüglich der Struktur der Materie zu revidieren. Hatten sich die Wissenschaftler seit jeher in der Rolle von reinen Beobachtern gewähnt, erkannten sie sich nun plötzlich selbst als Mitspieler im Weltgeschehen wieder, deren Handlungen ihren Teil zu jener scheinbaren Unberechenbarkeit der Natur beitrugen, welche bereits der Ionier Heraklit mehr als zwei Jahrtausende zuvor beschrieben hatte.

# Kapitel 8

## Antike Atomtheorien im Physikunterricht der Moderne

“Die in den Geist aufgenommenen Kenntnisse aber gehen niemals zur Neige, sondern verbleiben ständig bis zum höchsten Lebensziel.“

---

(Vitruv, *De architectura* 6, praef. 3)

### 8.1 Motivation

*Weshalb sollte die Entwicklung des antiken Atomgedankens im Physikunterricht des 21. Jh. näher behandelt werden?* Zur Beantwortung dieser zentralen Frage wird im Folgenden der Versuch unternommen, auf mehreren Ebenen motivierende Zugänge aufzuzeigen, welche die Gestaltung eines entsprechenden Unterrichtskonzepts ermöglichen und fördern sollen. Im Zuge dessen werden sowohl konstruktive als auch weniger dienliche Erwartungshaltungen dargelegt und besprochen.

Ausschlaggebend für die Erörterung dieses sehr spezifischen Themenkomplexes im schulischen Rahmen dürfte in erster Linie die persönliche Interessenlage der Lehrperson sein, wobei etwaige Bestrebungen der Schüler für die Durchführung einer derartigen Schwerpunktsetzung ebenfalls eine entscheidende Rolle spielen können. Neben diesem rein subjektiven Zugang lassen sich in den Rahmenbedingungen des Lehrplans gleichermaßen wichtige Berührungspunkte feststellen, welche als Motivation dienen können. Eine eingehende Analyse der gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich der Rechtfertigung und der Eignung des Themas für den Unterricht scheint vor diesem Hintergrund unabdingbar. Detaillierte Ausführungen hierzu finden sich im nächsten Abschnitt.

*Was darf man als Lehrperson von einer ausführlichen Behandlung des antiken Atomismus erwarten?* Es ist davon auszugehen, dass die Einführung einer wissenschaftshistorischen Dimension im Allgemeinen zur Bereicherung des Unterrichtsfaches beitragen und eine Auflockerung des Lehrstoffes bewirken kann. Durch das Aufzeigen großer, über Jahrtausende reichender Entwicklungsprozesse – insbesondere auch in Absprache mit geschichtlichen Unterrichtsfächern – wird die dynamische Vergangenheit der Naturwissenschaft in besonderem Maße beleuchtet und das womöglich von vielen Schülern als abgeschlossen empfundene phy-

sikalische Weltbild der Gegenwart relativiert. Eine Wahrnehmung der Physik als lebendigen, sich weiterentwickelnden Organismus, in dessen Anfängen noch heute lehrreiche Vorstellungen gefunden werden können, wird hierdurch ebenso ermöglicht, wie eine Hervorhebung zentraler historischer Paradigmenwechsel, welche die Vorläufigkeit und Vergänglichkeit des momentanen Wissens verdeutlichen. Im Zentrum dieser Bestrebungen steht dabei die zu vermittelnde Vorstellung, dass man in 20, 200 oder sogar 2000 Jahren unter Umständen in gleicher Weise auf die heutige Zeit zurückblicken könnte, wie dies gegenwärtig in Bezug auf die Ära der Antike geschieht. Die Behandlung der Thematik in Form eines mehrstufigen und eventuell fächerübergreifenden Projekts kann ferner die praktische Realisierung einer weitreichenden Methodenvielfalt und -freiheit begünstigen, wodurch jedem Schüler die Möglichkeit eines individuellen Zugangs geschaffen wird. Weiterhin lässt der Stoffumfang sowohl eine vermehrt phänomenologische Herangehensweise in der Unterstufe, als auch einen verstärkt philosophischen Ansatz in der Oberstufe zu.

*Welche Erwartungshaltungen könnten dem Vorhaben weniger dienlich sein?* Da es sich um eine durchwegs subjektive Schwerpunktsetzung handelt, wäre es vorteilhaft, den Grad des Interesses aufseiten der Schüler im Vorfeld so adäquat als möglich einzuschätzen, um gegebenenfalls eine entsprechende Anpassung von Umfang und Detailliertheit des Unterrichtskonzepts vorzunehmen. Dies trifft insbesondere auf die thematisch variierende Behandlung in Unter- und Oberstufe zu. Der zur Vorbereitung benötigte zeitliche Aufwand sollte keinesfalls unterschätzt werden, da die Qualität der Durchführung sowie der Unterrichtsertrag in wesentlichem Maße davon abhängen. Bezüglich der Formen der Leistungsfeststellung und -beurteilung sowie der Anforderungen an die Schüler muss bereits im Vorfeld Klarheit geschaffen und ein entsprechendes Konzept ausgearbeitet werden. Die große Breite des Themas erfordert weiters ein wohldurchdachtes Zeitmanagement. Da eine tiefgreifende Behandlung aller Teilbereiche im zeitlichen Rahmen des Schulunterrichts vermutlich nur schwer zu realisieren ist, sollten je nach Situation weitere spezifische Schwerpunkte gesetzt werden. Die tatsächliche Durchführung der Unterrichtssequenz wäre für jede infrage kommende Schulstufe und jede Klasse individuell zu entscheiden.

## 8.2 Lehrplanbezug

Die Grundlage der nachfolgenden Ausführungen bildet die Verordnung über die Lehrpläne der allgemeinbildenden höheren Schulen in der derzeit gültigen Fassung.<sup>1</sup>

Sowohl der allgemeine Teil des Lehrplans als auch die fachspezifischen Abschnitte lassen eine Reihe von Aussagen und Vorgaben erkennen, welche mit der Behandlung des antiken Atomgedankens im Physikunterricht in Einklang stehen und erfüllt werden. Nachfolgend

---

<sup>1</sup> Vgl. *Lehrpläne AHS 2014*.

seien die wichtigsten Punkte als Begründung und Rechtfertigung des Unterrichtsthemas angeführt.

### 8.2.1 Allgemeiner Teil

Das allgemeine Bildungsziel (Teil 1) umfasst die Forderung nach einer „vertiefte[n] Allgemeinbildung“, wobei „fächerverbindende und fächerübergreifende“ Aspekte eine wesentliche Rolle spielen. Weiters wird mit der „kritisch-prüfenden Auseinandersetzung mit dem verfügbaren Wissen“ eine grundlegende Aufgabe der Schule definiert, welche durch die Aneignung von „Sachkompetenz, Selbstkompetenz und Sozialkompetenz“ ergänzt wird. Im Bildungsbereich von Sprache und Kommunikation wird explizit verlangt, dass die Schüler zu der „Einsicht [geleitet werden sollen], dass Weltsicht und Denkstrukturen [...] sprachlich und kulturell geprägt sind“. Dies beinhaltet auch „philosophische [...] Erklärungs- und Begründungsversuche [...] der Welt“ sowie die Tatsache, dass „gesellschaftliche Phänomene historisch bedingt“ sind. Aus dem Bereich Natur und Technik sind insbesondere die Forderungen nach Vermittlung von Modellbildung und Abstraktionsvermögen sowie einer grundlegenden Formalisierung zu nennen. Zudem ermöglicht die Thematik den Schülern den Erwerb von Gestaltungserfahrungen.

Aus den allgemeinen didaktischen Grundsätzen (Teil 2) muss die Schaffung „vielfältige[r] Zugänge zum Wissen“ ebenso erwähnt werden, wie die Möglichkeit zur Differenzierung. Durch die Bereitstellung individueller Ansätze mittels „neue[r] Einstiege und Anreize“ kann „auf unterschiedliche Lerntypen“ eingegangen und eine große Auswahl an Methoden – von der Einzelarbeit bis zum offenen Lernen – zur Verfügung gestellt werden. Das Thema kann weiterhin die Selbsttätigkeit der Schüler fördern, indem sie in „kritischem und eigenverantwortlichem Denken“ unterstützt werden. Das Setzen geeigneter Impulse, besonders im Rahmen „projektartige[r] und offene[r] Lernformen“, zielt auf die Entwicklung „adäquate[r] Recherchestrategien“ zur Beschaffung geeigneter Informationen ab, wobei sowohl der „Einsatz des Computers“ als auch die „Anwendung des Internet“ wichtige Methoden darstellen. Die beispielsweise in Form von Hausübungen gesammelten „Materialien und Informationen [sowie] Erkundungen [ergänzen] die Unterrichtsarbeit“ in wesentlichem Maße. Ferner bilden die bereits im vorherigen Abschnitt erwähnten „[k]lar definierte[n] und bekannt gemachte[n] Bewertungskriterien“ für die Schüler eine Grundlage „zur Selbsteinschätzung [...] und [positiven] Motivation“.

Der Abschnitt zu Schul- und Unterrichtsplanung (Teil 3) beschreibt in konkreter Weise die Umsetzung der in den ersten beiden Teilen angeführten Forderungen im Schulalltag. Dabei wird ausdrücklich erwähnt, dass „fächerverbindende und fächerübergreifende Maßnahmen“ in die Planungsvorgänge miteinbezogen werden sollen. Während der Stoff für den Kernbereich der 5. bis 8. Schulstufe in den fachspezifischen Abschnitten des Lehrplans näher ausgeführt ist und die „zeitliche Gewichtung sowie die konkrete Umsetzung [...] den jeweiligen

Lehrerinnen und Lehrern [obliegt]“, sollen die Inhalte des Erweiterungsbereichs „allein oder fachübergreifend im Team“ festgelegt werden, wobei „Bedürfnisse, Interessen und Begabungen der Schülerinnen und Schüler“ sowie „individuelle Schwerpunkte der Lehrerinnen und Lehrer“ ausschlaggebend sind. Dies kann in gleicher Weise auf den „gestaltbaren autonomen Bereich“ ab der 9. Schulstufe umgelegt werden. Sofern schulautonome Bestimmungen hinsichtlich des Lehrplans angestrebt werden, haben diese in der Unterstufe bestimmte Schwerpunkte vorzusehen, wobei auch ein „naturkundlich-technischer Schwerpunkt“ angeführt ist. In der Oberstufe hingegen wird eine derartige Spezialisierung durch Wahlpflichtgegenstände und „ergänzende Schwerpunkte“, unter anderem in den Bereichen „Mathematik [und] Naturwissenschaften“, erreicht. Durch das „integrativ[e] Zusammenwirken“ mehrerer Unterrichtsgegenstände und das Herstellen von „Fächergrenzen überschreitende[n] Sinnzusammenhänge[n]“ kann das zu vermittelnde „Wissen in größeren Zusammenhängen“ dargestellt werden.

## 8.2.2 Fachspezifischer Teil

### Unterstufe

Gemäß dem Lehrplan für die Unterstufe soll den Schülern „[a]usgehend von fachspezifischen Aspekten“ das „Modelldenken der Physik“ nähergebracht und „physikalisches Wissen in größere Zusammenhänge“ gestellt werden. Die zum Erreichen dieser Ziele anzuwendenden Methoden umfassen sowohl das „bewusst[e] Beobachten physikalischer Vorgänge“ als auch das „Entwickeln von Erklärungsversuchen beziehungsweise Modellvorstellungen“. Eine interdisziplinäre Ebene wird durch das „Erkennen der kulturellen [...] Bedeutung der Physik“ geschaffen. Die eingehende Behandlung des antiken Atomismus kann ferner die „Darlegung eines Zusammenhanges zwischen Modellbildung und Weltanschauung“ auf grundlegendste Art und Weise unterstützen und stellt eine „Interpretation philosophischer [...] Erklärungsversuche über den Ursprung und die Entwicklung des Universums“ dar.<sup>2</sup> Ebenso wird sie der „Anwendung einer altersadäquaten Fachsprache“ sowie einem generell zu vermittelnden „präzise[n] Sprachgebrauch“ gerecht. Die Durchführung der Unterrichtssequenz ist durch die Modularisierung des Lehrplans und die individuelle „Abfolge bzw. Gewichtung [der Module] durch diverse Schwerpunktsetzungen“ gewährleistet. Weiters wird ausdrücklich gefordert, dass „Modellvorstellungen [...] an allen geeigneten Stellen [...] heranzuziehen“ sind und den Schülern „[a]n geeigneten Inhalten [...] möglichst selbstständige[s] Untersuchen, Entdecken bzw. Forschen“ zu ermöglichen ist.

Einen idealen Einstiegspunkt stellt das Modul „Alle Körper bestehen aus Teilchen“ im Kernbereich der 2. Klasse dar, im Rahmen dessen die Schüler „immer intensiver mit dem Teilchenmodell [...] vertraut gemacht werden“ sollen. Abhängig von der persönlichen Inten-

<sup>2</sup> Siehe Teil 1 des allgemeinen Lehrplans.

tion der Lehrkraft wäre auch eine Durchführung innerhalb des ersten Moduls („Die Physik bestimmt unser Leben“) denkbar. Da dieser Themenkomplex jedoch primär der Begeisterung der Schüler für das neue Unterrichtsfach Physik in Form eines „motivierende[n] Streifzug[s]“ dient, könnte die frühzeitige Einführung des Teilchenmodells und die damit einhergehende Konzentration auf einen einzelnen physikalischen Aspekt aufseiten der Schüler unter Umständen zu einer Überforderung führen.

In der 3. Klasse könnte der antike Atomismus als Wiederholung und historische Vertiefung des im Vorjahr eingeführten Teilchenmodells im Modul „Unser Leben im ‚Wärmebad‘“ behandelt werden. Weitere vorteilhafte Einstiegspunkte lassen sich in den übrigen Themengebieten des Kernbereichs der Unterstufe nicht finden.

## **Oberstufe**

Die Vorgaben für den Physikunterricht in der Oberstufe unterscheiden sich naturgemäß sowohl in Umfang als auch Tiefe von jenen der Unterstufe. Besonderer Wert wird der „Bedeutung [der Physik] als Grundlagenwissenschaft“ beigemessen, wobei die Wichtigkeit „neuer Sichtweisen bei anstehenden Problemen (Paradigmenwechsel)“ zu vermitteln ist. An die Selbsttätigkeit der Schüler werden deutlich höhere Anforderungen gestellt, welche vor allem die Fähigkeiten betreffen, „Informationen [zu] sammeln, [zu] hinterfragen und [zu] argumentieren“, „eigenständig [zu] arbeiten“ sowie „physikalische Zusammenhänge dar[zustellen“. Im Wechselspiel von „Welterkenntnis“ und „Weltgestaltung“ rücken „Hypothesenbildung und Problemlösen als kreative Prozesse“ zusehends in den Mittelpunkt. Die hierbei anzuwendenden Methoden umfassen ebenso „[d]as Zusammenspiel von Beobachtung, Hypothesenbildung und überprüfendem Experimentieren“, wie das kritische Infragestellen „divergierende[r] Expertenansichten“. Hervorzuheben ist weiters, dass „an mindestens einer Thematik pro Schulstufe eine größere Erklärungstiefe anzustreben“ ist, welche „nach Möglichkeit auch fächerübergreifend[en]“ Charakter haben sollte. Die Anfänge des antiken Atomismus ermöglichen zudem „das wiederholte Aufgreifen und Vernetzen von Konzepten und Grundbegriffen in verschiedenen Zusammenhängen“.

Sowohl das „Denken in Modellen“ als auch das „Teilchenkonzept“ sind „schulstufenübergreifend zu behandeln“. Während Letzteres in der 5. und 6. Klasse besonders im Rahmen der Thermodynamik auf moderner Ebene zur Anwendung kommt, sieht der Lehrstoff der 7. und 8. Klasse eine „verstärkt[e] [Herstellung von] Querverbindungen mit anderen Bereichen“ sowie die Bereitstellung von „Einblicke[n] in die Theorieentwicklung und das Weltbild der modernen Physik“ vor. Dazu werden unter anderem auch die „Grundzüge der modernen Atomphysik“, die „Einsichten in kernphysikalische Grundlagen“ und das „Verständnis für Paradigmenwechsel“ gezählt.

Die einzige explizite Nennung der „antiken Vorstellungen“ und somit einer Behandlung historischer Entwicklungen findet sich im letzten Absatz des Oberstufenlehrstoffs der 7. und 8. Klasse, welcher im Folgenden in seiner Gesamtheit angeführt sein soll:

„[Die Schülerinnen und Schüler sollen] Verständnis für die schrittweise Verfeinerung des Teilchenkonzepts, ausgehend von antiken Vorstellungen bis zur Physik der Quarks und Leptonen, gewinnen und damit die Vorläufigkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse verstehen.“

Diese Forderung könnte die Basis einer Beschäftigung mit den Anfängen des Teilchengedankens in der Oberstufe darstellen. Da die Behandlung des Themas in der 8. Klasse jedoch aufgrund seines Umfangs und der zeitlichen Nähe zur Matura nur sehr oberflächlich möglich wäre, sollte zugunsten eines größeren Detailreichtums eine Durchführung im Rahmen der 7. Klasse – möglicherweise in Form eines Projekts – überlegt werden.

### 8.3 Unterrichtskonzept

Obwohl die wissenschaftshistorische Dimension in viele physikalische Lehrbücher Einzug gehalten hat, scheinen die in knapp bemessenem Umfang angeführten Fakten dennoch meist nur einer optionalen, ausschmückenden Ergänzung des Regelunterrichts zu dienen, welcher im Schulalltag womöglich aus Zeitgründen nur wenig Beachtung geschenkt werden kann. Im Folgenden soll daher ein alternativer Ansatz vorgestellt werden, wie der Werdegang des Atomismus im Physikunterricht in abgeschlossener Form präsentiert und behandelt werden könnte. Da sich historische Bezüge jedoch nicht nur zum Teilchenmodell, sondern auch zu vielen anderen physikalischen Konzepten finden lassen, sollen in Abschnitt 8.4 ausgewählte Erweiterungen und Vertiefungen aufgezeigt werden, welche zur Bereicherung einer großen Zahl an Themengebieten in fast allen Schulstufen herangezogen werden können.

Wie bereits in Abschnitt 8.2 erläutert, eignet sich das Modul „Alle Körper bestehen aus Teilchen“ in der 2. Klasse Unterstufe in besonderem Maße für eine geschichtliche Betrachtung des Sachverhalts, weshalb sich in den nachfolgenden Abschnitten sämtliche Unterrichtssequenzen auf eine Durchführung in ebendieser Schulstufe beziehen. Tabelle 8.1 stellt einen Vorschlag dar, wie der Themenkomplex in der Jahresplanung für die 2. Klasse verankert und formuliert werden könnte.

Für die Gesamtdauer der Unterrichtssequenz wird ein Zeitraum von vier bis sechs Stunden vorgeschlagen, welchem in der 2. Klasse im Idealfall eine Zeitspanne von zwei bis drei Wochen entspricht. Sofern möglich wäre auch die dreimalige Abhaltung einer Physikdoppelstunde denkbar. Dies dürfte sich jedoch an den meisten Standorten nur schwer realisieren lassen. Auch eine ausführlichere Behandlung der Thematik könnte ins Auge gefasst werden, sofern entsprechendes Interesse seitens der Schüler erkennbar ist.

## JAHRESPLANUNG 2. KLASSE

<b>Modul „Alle Körper bestehen aus Teilchen“</b>		
<b>Std.</b>	<b>Lehrinhalte</b>	<b>Lernziele</b>
4-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Antike Vorbilder des Teilchenmodells</li> <li>- Vorsokratische Grundlagen</li> <li>- Entwicklung des Atomgedankens bei Demokrit</li> <li>- Platonische Körper</li> </ul>	<p>Die Schülerinnen und Schüler sollen. . .</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- den Begriff „Teilchenmodell“ verstehen,</li> <li>- erste Ansätze philosophischer Erklärungsversuche erkennen,</li> <li>- die Grundlagen antiker Atomtheorien kennen,</li> <li>- das demokriteische Atommodell beschreiben können,</li> <li>- kreative Gestaltungserfahrungen machen,</li> <li>- sich der Bedeutung historischer Entwicklungen bewusst werden,</li> <li>- selbsttätig Überlegungen und Modellbildungsversuche anstellen.</li> </ul>
⋮	⋮	⋮

**Tabelle 8.1: Eintrag in der Jahresplanung**

### Leistungsfeststellung

Die Schüler sind gemäß den Bestimmungen des Lehrplans bereits im Vorfeld über die exakten Grundlagen der Leistungsfeststellung in Kenntnis zu setzen. Da die Unterrichtssequenz als in sich abgeschlossenes Themengebiet interpretiert werden kann, empfiehlt es sich unter Umständen, die von den Schülern in den vorgesehenen Stunden erbrachten Einzelleistungen zu einem größeren Leistungsvermerk zusammenzufassen. Die Grundlage einer positiven Beurteilung müsste dabei sowohl die aktive Partizipation am Unterrichtsgeschehen und an den sich entwickelnden Diskussionsrunden, als auch die eigenständige Erledigung praktischer Aufgaben bilden. Als zusätzliche Möglichkeiten einer umfassenden Leistungsfeststellung können von den Schülern erarbeitete Unterlagen wie beispielsweise Mappen, Handouts oder Plakate herangezogen werden. Das beobachtete und durch den persönlichen Eindruck ergänzte Engagement sollte schlussendlich in die Beurteilung mit einfließen und diese abrunden.

### 8.3.1 Der Einstieg (1 Stunde)

#### Zielsetzung

Die erste Unterrichtseinheit soll anhand eines eindrucksvollen Experiments das Interesse der Schüler am neuen Themengebiet wecken. Durch die Diskussion eines ihnen unbekanntem physikalischen Phänomens sollen sie schrittweise in die typischen Arbeitsweisen der Physik eingeführt werden.

#### Stundenbild

Tabelle 8.2 zeigt den schematischen Aufbau der Unterrichtsstunde.

STUNDENBILD 1

Min.	Inhalt	Sozialform
5	Organisatorisches	LSG
10	Experiment	LV, LSG
15	Diskussionsrunde	LSG
5	Originalzitat	LV
10	Sicherung des Unterrichtsertrags	EA
5	Abschluss	LSG

Tabelle 8.2

**LV** Lehrvortrag

**LSG** Lehrer-Schüler-Gespräch

**EA** Einzelarbeit

### **Experiment**

Der Einstieg erfolgt in Form eines Impulsexperiments. Zu Beginn der Stunde wird der Klassenraum vollständig verdunkelt. Dazu empfiehlt es sich, den Unterricht gegebenenfalls in eine Räumlichkeit zu verlegen, welche die notwendige Ausstattung (Rollläden o. Ä.) bereitstellt. Eine Lichtquelle mit einer entsprechend kleinen Blende wird im Vorfeld so im Raum platziert, dass ein schmaler Lichtstrahl parallel zu den Reihen der Schüler gut sichtbar von einer Wand zur anderen fällt. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Person geblendet wird. Nachdem die Lichtquelle eingeschaltet wurde, sollten allmählich kleine Staubpartikel im Strahl sichtbar werden. Ist dies nicht der Fall, können Kreidestaub aus dem Tafeltuch oder Mehl Abhilfe schaffen. Möglicherweise muss auch eine stärkere Lichtquelle verwendet werden, um die Intensität des von den Staubkörnern gestreuten Lichts zu erhöhen.

### **Diskussionsrunde**

Ausgehend von der Impulsfrage „Was könnt ihr beobachten?“ wird im wieder beleuchteten Raum eine Diskussion eröffnet, welche sowohl zwischen Lehrkraft und Schülern, als auch im Klassenverband stattfinden soll. Ziel des Gesprächs ist die Hinführung der Schüler zum Teilchenbegriff sowie das Aufzeigen typischer Arbeitsweisen der Physik. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei der Bewegung der Staubkörner im Lichtstrahl und den Vermutungen der Schüler hinsichtlich ihrer Ursache zu widmen.

### **Originalzitat**

Nach Abschluss der Diskussionsrunde wird den Schülern eine deutsche Übersetzung der Schilderung der Sonnenstäubchen bei Lukrez vorgetragen.<sup>3</sup> Der Autor und die Herkunft des Textes sollen erst im Nachhinein bekanntgegeben werden. Das Aufzeigen dieser beinahe zweitausend Jahre alten Schilderung eines Naturphänomens dient dazu, den Schülern die Allgegenwart historischer Bezüge und das tief verwurzelte Interesse der Menschen an einer Erklärung der Natur näherzubringen.

### **Sicherung des Unterrichtsertrags**

Nachdem auf etwaige Fragen der Schüler eingegangen wurde, folgt die Rekapitulation des neu Gelernten und Beobachteten in Form persönlicher Notizen, welche jeder Schüler entweder auf einem leeren Blatt Papier oder idealerweise auf einem vorgefertigten Arbeitsblatt in knappem Umfang mit eigenen Worten zu verfassen hat.<sup>4</sup> Sollte die restliche Zeit hierfür nicht mehr ausreichen, dürfen die Schüler ihre Aufzeichnungen bis zur nächsten Stunde fertigstellen. Jedoch müssen sie dazu angehalten werden, nicht zu viel Zeit verstreichen zu lassen, um sich noch an möglichst viele Details und Unterrichtsinhalte erinnern zu können. In jedem Fall ist das Vorhandensein einer vollständigen Mitschrift in der Folgestunde zu kontrollieren und zu vermerken.

<sup>3</sup> Siehe Anhang A, S. 93f. Mögliche Quellen bieten LUKREZ, 2000, S. 92ff und LUKREZ, 1924a.

<sup>4</sup> Eine diesbezügliche Vorlage kann dem Anhang entnommen werden (siehe S. 95).

Der Einfachheit halber sollten sämtliche im Rahmen des Themenkomplexes erarbeiteten Materialien in einem separaten Teil der Schülermappen oder einem eigenen Schnellhefter gesammelt werden.

### Abschluss

Zum Abschluss dieser Unterrichtseinheit werden die beobachteten Experimente und erarbeiteten Inhalte durch ausgewählte Schüler wiederholt.

## 8.3.2 Die Vorsokratiker (1-2 Stunden)

### Zielsetzung

In dieser Stunde sollen die Schüler mittels Anwendung neuer Medien eigene Nachforschungen zu den Lehren der vorsokratischen Philosophen anstellen und ihre Ergebnisse präsentieren.

### Stundenbild

Tabelle 8.3 zeigt den schematischen Aufbau der Unterrichtsstunde.

STUNDENBILD 2

Min.	Inhalt	Sozialform
5	Organisatorisches	LSG
5	Impulsfrage	LSG
20	Internetrecherche, Steckbriefe	PA/GA
15	Präsentation	SV, LSG
5	Abschluss	LSG

Tabelle 8.3

**PA** Partnerarbeit

**GA** Gruppenarbeit

**SV** Schülervortrag

### Vorbereitung

Die nachfolgend beschriebene Unterrichtsstunde sollte zwecks Internetrecherche und Textverarbeitung nach Möglichkeit in einem Computerraum abgehalten werden. Ist ein solcher am Schulstandort nicht vorhanden oder zum Zeitpunkt der Stunde nicht zugänglich, können die Schüler sämtliche Ausarbeitungen handschriftlich, eventuell auf vorgefertigten Blättern erstellen. Als Informationsgrundlage müssten ihnen in diesem Fall ausgewählte Internetartikel oder entsprechend vereinfachte Zusammenfassungen einzelner Abschnitte aus Kapitel 3 dieser Arbeit in gedruckter Form zur Verfügung gestellt werden.

### **Impulsfrage**

Zu Beginn der Stunde wird erneut eine Impulsfrage gestellt: „Wie könnten wir herausfinden, woraus die Welt besteht, wenn wir keine Ahnung von der Existenz von Atomen hätten?“ Die Komplexität der Fragestellung soll die Schüler bewusst an die Grenzen ihres Denkens bringen und ihnen so die Wichtigkeit naturwissenschaftlicher Erkenntnisse verdeutlichen.

### **Internetrecherche und Steckbriefe**

Es wird vorausgesetzt, dass der Name Demokrits bereits im regulären Unterricht in Zusammenhang mit dem Aufbau der Materie aus Atomen kurz genannt wurde. Die Schüler werden im weiteren Verlauf darüber informiert, dass andere Philosophen vor Demokrit ebenfalls eigene Theorien zum Aufbau der Welt entwickelt haben. Im Zuge dieses Stundenabschnitts wird die Klasse in maximal 8 Kleingruppen geteilt, von welchen jede einen Steckbrief eines ihr durch das Los zugeteilten vorsokratischen Philosophen zu verfassen hat.<sup>5</sup> Dieser soll zumindest die ungefähren Lebensdaten, den Herkunftsort, nach Möglichkeit eine künstlerische Darstellung und den angenommenen Urstoff umfassen. Layout und Formulierung dürfen dabei ohne Weiteres den Schülern überlassen werden. In Ausnahmefällen könnte aber auch ein entsprechender Mustersteckbrief als Vorlage dienen.<sup>6</sup> Die fertigen Dokumente sind entweder vor Ort auszudrucken oder auf einem gemeinsamen Laufwerk im Schulnetzwerk abzulegen. Die Schüler sind ferner dazu anzuhalten, die Namen aller Gruppenmitglieder im Dokument zu vermerken sowie einen aussagekräftigen Dateinamen zu wählen.

### **Präsentation**

Jede Gruppe hat einen Sprecher zu ernennen, welcher den Steckbrief in Form eines minimalen Referats dem Klassenplenum präsentiert. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Schüler bei ihrem Vortrag nicht in Details verrennen, sondern die zu Beginn geforderten Fakten klar und prägnant darlegen. Sollten grobe Fehler sichtbar werden, sind diese in den Dokumenten unmittelbar auszubessern. Die Reihenfolge der Präsentationen könnte chronologisch erfolgen.

### **Nachbereitung**

Nachdem sichergestellt wurde, dass die Steckbriefe aller Gruppen ausgedruckt oder gespeichert wurden, vervielfältigt die Lehrkraft die Ausarbeitungen der Schüler bis zur folgenden Unterrichtseinheit in Klassenstärke, sodass jeder Schüler sowohl den eigenen Steckbrief als auch die Werke der anderen Gruppen in seiner Mappe ablegen kann.

### **Erweiterungsvorschläge**

Die Erarbeitung der vorsokratischen Urstofftheorien kann gegebenenfalls auf eine zweite Unterrichtseinheit ausgedehnt werden. Eine hierzu nötige Schwerpunktsetzung könnte sich beispielsweise auf die Vier-Elemente-Lehre des Empedokles beziehen. Ferner wäre es in Zei-

<sup>5</sup> Die Liste der Philosophen umfasst in ihrer Gänze Thales, Anaximander, Anaximenes, Heraklit, Pythagoras, Parmenides, Empedokles und Anaxagoras. Bei Klassen mit geringer Schülerzahl empfiehlt es sich, die Anzahl der zu behandelnden Philosophen zu verringern, damit kein Schüler alleine arbeiten muss.

<sup>6</sup> Ein solcher findet sich im Anhang auf S. 95.

ten sozialer Netzwerke denkbar, die Schüler „Statusmeldungen“ oder „Tweets“ formulieren zu lassen, welche von den griechischen Philosophen stammen und unter Umständen einen fiktiven Dialog bilden sollen, im Zuge dessen jeder Gelehrte versuchen könnte, seinen Standpunkt als einzig richtigen darzustellen.

### 8.3.3 Demokrits Atommodell (1 Stunde)

#### Zielsetzung

Im Zentrum dieser Unterrichtseinheit steht das demokriteische Atommodell, dessen Details den Schülern die Leistungen der antiken Naturphilosophie vor Augen führen sollen.

#### Stundenbild

Tabelle 8.4 zeigt den schematischen Aufbau der Unterrichtsstunde.

STUNDENBILD 3

Min.	Inhalt	Sozialform
5	Organisatorisches	LSG
15	Demokrits Atommodell	LV, LSG
15	Vergleich	LV, LSG
10	Arbeitsblatt	EA/LSG
5	Abschluss	LSG

Tabelle 8.4

#### Vorbereitung

Zur Erläuterung und Demonstration des demokriteischen Atommodells eignen sich LEGO-Bausteine aufgrund ihrer Beschaffenheit und der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten in besonderem Maße. Sollte die Lehrperson nicht über solche verfügen, könnten die Schüler im Vorfeld dazu befragt und ersucht werden, einige Bausteine in die Stunde mitzubringen.

#### Demokrits Atommodell

Mittels anschaulicher Vergleiche werden den Schülern die Grundzüge des Atommodells nach Demokrit erklärt. Beginnend mit dem Vorhandensein verschiedenster Atomarten sollen sowohl die Mechanismen der Verbindung als auch die Bewegung der Teilchen untersucht werden. Hierbei können an allen möglichen Stellen LEGO-Bausteine als Analogie herangezogen werden. Denkbar wäre auch eine Variante, bei welcher der Klasse zuerst das demokriteische Modell erläutert wird und anschließend die Bausteine mit der Frage präsentiert werden, welchen Sinn sie in diesem Zusammenhang haben könnten.

### Vergleich

Im nächsten Abschnitt der Stunde wird zur Ergänzung und Kontrastierung – ausgehend von den Vorkenntnissen der Schüler – kurz auf die Unterschiede zwischen Demokrits Modell und dem heutigen Wissensstand (Bohrsches Atommodell) eingegangen. Ziel der Sequenz ist es nicht, die Feinheiten des klassischen Atommodells zu lehren, sondern die begrenzten Möglichkeiten der Antike sowie die Fortschritte der Neuzeit aufzuzeigen.

### Arbeitsblatt

Die Sicherung des Unterrichtsertrags erfolgt in Form eines Arbeitsblatts, welches die wichtigsten Fakten der Stunde rekapituliert. Dieses könnte beispielsweise die Fragen „Welches Aussehen haben die Atome laut Demokrit?“, „Wie können sich Atome zu größeren Gebilden verbinden?“ und „Welche Unterschiede zum späteren Modell kannst du erkennen?“ umfassen. Eine mögliche Vorlage findet sich im Anhang (S. 95). Unter Umständen kann es sich als zielführend erweisen, das Arbeitsblatt anstelle einer Einzelarbeit gemeinsam mit den Schülern auszufüllen. In jedem Fall sollten die Schüler dazu motiviert werden, das Geschriebene um Skizzen ihrer eigenen Vorstellungen der demokriteischen Atome zu ergänzen.

## 8.3.4 Die platonischen Körper (1 Stunde)

### Zielsetzung

Diese Stunde beschäftigt sich mit den Urstoffvorstellungen des Platon und den platonischen Körpern. Die Schüler sollen durch das Basteln der geometrischen Figuren aus Papier die im Lehrplan erwähnten Gestaltungserfahrungen machen und gleichzeitig in ihrem räumlichen Vorstellungsvermögen gefördert werden.

### Stundenbild

Tabelle 8.5 zeigt den schematischen Aufbau der Unterrichtsstunde.

STUNDENBILD 4

Min.	Inhalt	Sozialform
5	Organisatorisches	LSG
5	Einstieg	LV
20	Bastelphase	EA
15	Diskussion	LV, LSG
5	Abschluss	LSG

Tabelle 8.5

**Vorbereitung**

Die Lehrkraft hat im Vorfeld die Faltvorlagen der platonischen Körper aus dem Anhang (S. 99ff) zu vervielfältigen. Für die Zwecke des Unterrichts dürfte eine Kopie im A4-Format pro Figur und Schüler ausreichen. Im Falle eines Wunsches nach spezifischeren Anpassungen der Vorlagen wurde ein entsprechender minimaler L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Quellcode beigefügt, welcher beliebig verändert und erweitert werden kann (siehe S. 104). Die Schüler sind ebenfalls rechtzeitig zu informieren, geeignete Bastelutensilien mitzubringen.

**Einstieg**

Zu Beginn der Unterrichtsstunde wird den Schülern kurz das platonische Teilchenmodell vorgestellt. Dabei sind Bezüge zu den Inhalten der zweiten Stunde über die Vorsokratiker und deren Vorbildwirkung hervorzuheben.

**Bastelphase**

In der Hauptphase dieser Stunde basteln die Schüler in Einzelarbeit je einen platonischen Körper aus den ihnen ausgeteilten Vorlagen. Die übrigen vier Figuren dürfen natürlich zu Hause fertiggestellt und in die abschließende Stunde mitgebracht werden. Es ist darauf zu achten, dass jede der fünf Figuren am Ende dieses Abschnitts zumindest in einer Ausführung vorhanden ist. Die Schüler dürfen darüber hinaus nicht vergessen, ihren Namen deutlich auf eine Fläche des gefalteten Körpers zu schreiben.

**Diskussion**

Ausgehend von der Theorie der Elementardreiecke zeichnen die Schüler diese an je einer Fläche ihrer gefalteten Figur ein und bestimmen die Gesamtzahl der Dreiecke. Weiters können einfache Überlegungen angestellt werden, wie sich die platonischen Körper mittels der Elementardreiecke rein rechnerisch ineinander umwandeln ließen. Dabei sollte sich der Schwierigkeitsgrad der Berechnungen an der in Abschnitt 5.1.2 genannten Formel orientieren. Möglich wäre auch eine Auswertung vorgegebener Rechnungen hinsichtlich ihrer Richtigkeit durch die Schüler.

**Abschluss**

Zum Abschluss der Unterrichtseinheit werden die erarbeiteten Inhalte durch ausgewählte Schüler wiederholt.

**8.3.5 Abschluss (1 Stunde)****Zielsetzung**

Die letzte Unterrichtseinheit dient sowohl der Darstellung des geschichtlichen Ausblicks auf die Entwicklungen nach Demokrit, welche unter anderem zum Bohrschen Atommodell der klassischen Physik führten, als auch der Wiederholung aller bereits besprochenen Unterrichtsinhalte und der Herstellung größerer Zusammenhänge.

## Stundenbild

Tabelle 8.6 zeigt den schematischen Aufbau der Unterrichtsstunde.

STUNDENBILD 5

Min.	Inhalt	Sozialform
5	Organisatorisches	LSG
10	Geschichtlicher Ausblick	LV, LSG
30	Plakat	LV, LSG
5	Abschluss	LSG

Tabelle 8.6

### Geschichtlicher Ausblick

Am Anfang der Stunde wird kurz auf die Entwicklungen im Bereich des Atomismus nach Demokrit eingegangen. Dabei sollte die Schaffung eines Überblicks angestrebt und unnötige Detailliertheit vermieden werden. Der Einfachheit halber kann Abbildung 3.1 in gedruckter und vervielfältigter Form als Leitfaden dienen.

### Plakat

Den Hauptteil der Stunde bildet die gemeinsame Erstellung von Plakaten, welche später in den Gängen des Schulgebäudes angebracht werden können. Die Schüler sollen sich dazu in Gruppen zusammenfinden und Inhalt sowie Layout der Aushänge auf Basis des Gelernten möglichst eigenständig erarbeiten. Die Ideen hierzu können beispielsweise einen Comic über die antiken Philosophen, eine bildliche Darstellung der Atome und ihrer Interaktionen nach Demokrit sowie eine Präsentation der platonischen Körper umfassen. Auch das in der ersten Stunde des Themenkomplexes vorgeführte Experiment kann skizziert und beschrieben werden. Am Ende der Stunde soll jede Gruppe ihr Plakat fertiggestellt haben.

## 8.4 Erweiternde Unterrichtsinhalte

Wie bereits erwähnt, lassen sich auch in vielen anderen Themen- und Teilbereichen der Physik historische Bezüge aufzeigen. Dieser Abschnitt umfasst einige Gedanken zu ergänzenden Unterrichtsinhalten, welche im Gegensatz zum antiken Atomismus nicht in Form eines zusammenhängenden und abgeschlossenen Themenkomplexes präsentiert, sondern zur Auflockerung und Vertiefung an geeigneten Stellen eingebracht werden können. Die generelle Sensibilisierung der Schüler für die historische Dimension des Faches Physik stellt einen bedeutenden Mehrwert des Unterrichts dar. Um diesen zu erreichen, sollte zudem wiederholt über Sinnhaftigkeit, Vorstellungen und Zweck des Lehrstoffs diskutiert werden. Die folgen-

den Ideen und Vorschläge sind nach denjenigen antiken Philosophen gegliedert, mit deren Lehren sie in Verbindung gebracht werden können.

### 8.4.1 Grundlegende Bemerkungen

In Zusammenhang mit der Einführung des SI-Systems kann zum Vergleich auf die in der Antike gebräuchlichen Maßsysteme eingegangen und so die Abhängigkeit der Einheiten von allgemeinen Konventionen aufgezeigt werden.<sup>7</sup> Die Wichtigkeit eines internationalen Einheitensystems kann ferner durch den Fehlschlag der NASA-Mission „Mars Climate Orbiter“ (MCO) im Jahre 1999 verdeutlicht werden, welcher durch die Verwechslung des SI-Systems mit dem angloamerikanischen Maßsystem verursacht wurde.<sup>8</sup>

Im Rahmen astronomischer Themen, deren Behandlung im Kernbereich des Faches nicht explizit vorgesehen ist, sollte erwähnt werden, dass die Menschen der Antike aufgrund der Präzession der Erdachse einen „anderen“ Nachthimmel beobachteten, weshalb überlieferte Schilderungen von Sternbildern und Himmelsphänomenen nicht direkt auf die heutigen Gegebenheiten übertragen werden dürfen.

### 8.4.2 Heraklit

Heraklits Grundsatz „Alles fließt!“ kann als antike Idee der modernen Thermodynamik interpretiert werden, wobei die Formulierung „Alles schwingt!“ in diesem Kontext zutreffender wäre. Auch auf die von Heisenberg erwähnte Gleichsetzung des heraklitischen Feuers mit dem Begriff der Energie könnte eingegangen werden.

### 8.4.3 Pythagoras

Die akustischen Experimente des Pythagoras eignen sich besonders als Schülerexperimente im Regelunterricht. Die Schüler könnten beispielsweise eigenständig die zur Entstehung harmonischer Tonintervalle nötigen Teilungsverhältnisse einer schwingenden Saite bestimmen, wobei mehrere Messungen und eine Mittelwertberechnung durchzuführen wären. Durch das Gruppieren musikalischer Schüler könnte außerdem herausgefunden werden, ob deren Messergebnisse sich von jenen der anderen Gruppen unterscheiden.

Als zweiter Vorschlag sei die babylonische Konstruktionsmethode eines rechten Winkels mittels einer Zwölfknotenschnur genannt, welche mit den Schülern nachgestellt und überprüft werden könnte.

<sup>7</sup> Weiterführende Informationen hierzu bietet unter anderen DILKE, 2012.

<sup>8</sup> Vgl. *Mars Climate Orbiter* 2014.

### 8.4.4 Eleaten

Das heute unter dem Begriff des Quanten-Zeno-Effekts bekannte physikalische Phänomen besagt, dass ein quantenmechanisches System durch wiederholte Messung in einer Änderung seines Zustandes gehemmt werden kann. Es erinnert in dieser Form stark an das paradoxe Argument des fliegenden Pfeils, welches auf den Eleaten Zenon zurückgeht. Im Rahmen der Quantenmechanik wäre die Parallele mit Zenons Paradoxon sicher einer Erwähnung wert. Weitere Informationen finden sich unter anderem bei *Quanten-Zeno-Effekt* 2014.

### 8.4.5 Empedokles

Die Lehre des Empedokles bietet mehrere Vergleichsmöglichkeiten mit heutigen Begriffen. Die vier Elemente können beispielsweise als Analogie zu vier verschiedenen Aggregatzuständen gesehen werden. Feuer entspräche dabei Plasma, Luft einem Gas, Wasser einer Flüssigkeit und Erde einem Festkörper. Im Rahmen einer Diskussion könnte mit den Schülern eine Art Zuordnungsspiel gespielt werden.

Einen weiteren Ansatz bietet die Bedeutung der empedokleischen Lehre für die spätere Alchemie, welche von einer Transmutation der Elemente ausgeht. Es sollte erwähnt werden, dass solche Umwandlungsprozesse in Form von Experimenten mit Neutronenstrahlen heute durchaus möglich sind, jedoch aufgrund des hohen Energieaufwands und der geringen Menge des dabei anfallenden transmutierten Materials kein praktischer Nutzen daraus erwächst.

Als dritte Erweiterungsmöglichkeit sei die Erstellung eines Plakats angeführt, welches die beiden immateriellen Prinzipien des Empedokles dem heutigen Modell der vier fundamentalen Wechselwirkungen gegenüberstellen könnte.

### 8.4.6 Demokrit

Zum demokriteischen Atommodell lassen sich weitere vertiefende Diskussionen führen. Diese könnten unter anderem die Frage „Wie sieht ein Atom aus?“ behandeln, wobei auf die Anwendung physikalischer und chemischer Nachweisverfahren gesondert einzugehen ist. Auch die Verbindung der Atome, welche heute durch die Überlappung der als Orbitale bezeichneten Wahrscheinlichkeitswolken erklärt wird, kann näher betrachtet werden.

Das von Blaise Pascal durchgeführte Experiment mit Namen „Leere in der Leere“ kann als eindrucksvoller Versuch einer Widerlegung des aristotelischen Horror Vacui erwähnt werden (siehe *Leere in der Leere* 2014).

Die spontane Abweichung der Atome bei Demokrit und seinen Nachfolgern kann heute mit dem zufällig auftretenden Zerfall eines radioaktiven Atomkerns verglichen werden.

### **8.4.7 Platon**

Auf philosophischer Ebene kann Platons Ideenlehre als Vorbild für die Stringtheorie angesehen werden, während seine mathematische Auffassung von Materie wiederum heute in der De-Broglie-Wellenlänge entdeckt werden kann. Vor allem im Chemieunterricht könnte zudem kurz auf die platonischen Moleküle eingegangen und eventuell ein entsprechendes Modell gebaut werden.

### **8.4.8 Aristoteles**

Die aristotelische Lehre von Potentialität und Aktualität kann mit den modernen Begriffen der potentiellen und der kinetischen Energie verglichen werden. Ferner lassen sich sinngemäß auch Verbindungen zu Energieniveaus und angeregten Zuständen herstellen. Das potentielle Sein könnte in der Quantenmechanik ferner ein System bezeichnen, welches vor der Messung alle möglichen Zustände aufweist.

### **8.4.9 Duale Konzeptionen**

Die in der antiken Naturphilosophie oftmals anzutreffenden Vorstellungen dualer Konzeptionen spiegeln sich in vielen modernen Theorien wider, unter anderem im Prinzip von Raum und Zeit, im dritten newtonschen Axiom sowie in den Begriffen der potentiellen und kinetischen Energie.

# Kapitel 9

## Conclusio

Die Entwicklung der Naturwissenschaft nahm ihren Anfang in der griechisch-römischen Antike, als die Menschen infolge eines wachsenden Bedürfnisses nach Selbstbestimmung begannen, althergebrachte Weltanschauungen zu hinterfragen und Naturphilosophie zu betreiben. Die Vielfalt an Theorien über Anfang, Aufbau und Zweck des Kosmos sowie die Frage nach der Stellung des Menschen in der Welt bewirkte die Herausbildung immer detaillierterer Systeme, welche nicht nur um gegenseitige Widerlegung, sondern auch um Abstraktion und Vereinheitlichung bemüht waren. Aufgrund des Fehlens geeigneter wissenschaftlicher Methoden war die Überprüfung naturphilosophischer Aussagen in vielen Fällen unmöglich, wodurch es zur Herausbildung gewisser Gedankenstrukturen kam, welche kraft der Autorität ihrer Schöpfer lange Zeit hindurch nicht infrage gestellt werden durften. Die Lehren des antiken Atomismus verdeutlichen in besonderem Maße den inneren Drang des Menschen, den Ursachen der Welt auf den Grund zu gehen. Vom Studium seiner Anfänge sowie jener der Naturwissenschaft darf die Bereitstellung interessanter und nützlicher Fakten erwartet werden, welche wichtige Anregungen und Beiträge zu heutigen Anschauungen liefern können. Eine zentrale Rolle nimmt dabei das selbstreflektierte Denken ein, zu welchem die moderne Naturwissenschaft durch eine Beschäftigung mit der antiken Naturphilosophie ermahnt wird. Die Vorläufigkeit und Vergänglichkeit des heutigen Weltbildes wird ebenso hervorgehoben, wie die Notwendigkeit eines kritischen Hinterfragens und Überprüfens wissenschaftlicher Methoden. Die Untersuchung des Entwicklungsprozesses der Naturwissenschaft lehrt die Bewahrung einer grundlegenden Offenheit gegenüber Veränderungen zugunsten des Fortschritts. Vor diesem Hintergrund erscheint die Behandlung wissenschaftshistorischer Themen wie beispielsweise des antiken Atomismus an höheren Schulen äußerst Erfolg versprechend, da hierdurch einerseits der Physikunterricht spannender und abwechslungsreicher gestaltet werden kann, andererseits die Schüler durch das Aufzeigen neuer Perspektiven und Dimensionen, das kritische Lesen populärwissenschaftlicher Literatur sowie durch die Analyse von in Zeitungsartikeln präsentierten Resultaten aktueller physikalischer Experimente hinsichtlich der Bedeutung der Methodenwahl und der Notwendigkeit einer Methodenvielfalt zum Überdenken ihrer Erwartungshaltungen gegenüber dem Unterrichtsfach ermutigt werden; denn wie bereits Platon und Aristoteles schrieben: Am Anfang steht das Staunen.



# Anhänge



# Anhang A

## Originaltexte

### A.1 „Sonnenstäubchen“

Textstelle: Lukrez, De rerum natura 2, 112ff.; Quelle: LUKREZ, 2000, S. 93ff.

Hierfür, wie ich sage, bewegt sich Abbild und Gleichnis  
immer uns vor Augen und kann stets dringlich uns mahnen.  
Schau dir doch an: Wann immer das Licht der Sonne die  
Strahlen  
einfallend breiten aus im dämmrigen Dunkel der Häuser,  
wirst du winzige viele in vielfacher Art sich vermischen  
sehen Körper im Leeren im Lichte eben der Strahlen  
und wie im ewigen Streit erregen Schlachten und Kämpfe  
um die Wette geschwaderweis und Ruhe nicht geben,  
ständig mit Trennung gequält und wieder mit neuer  
Vereinung;  
daß du zu schließen vermagst hieraus, was es heißt, daß die  
Körper  
immer der Dinge den Wurf im großen Leeren erleiden.  
Freilich nur, soweit geringe Dinge für große  
Beispiel zu geben vermögen und Spuren für unsre  
Erkenntnis.  
Aber auch darum ist's gut, noch mehr auf die Körper zu  
achten,  
die man sich tummeln sieht zuhauf im Strahle der Sonne,  
weil ein solches Getümmel zugleich als Zeichen sich ausweist,  
daß Bewegung des Stoffes verborgen und heimlich zugrund  
liegt.  
Viele wirst nämlich du dort von versteckten Schlägen  
getrieben  
ändern sehen den Weg und zurück geworfen sich kehren,  
hier bald hin, bald dorthin nach allen Seiten, wo's sei auch.  
Dieses Irren rührt von den Ursprungskörpern für alle.  
Erst bewegen sich nämlich die Ursprungskörper von sich  
aus;  
dann werden die von den Körpern, die kleinen Vereinen  
gehören  
und gleichsam den Kräften der Ursprungskörper verwandt  
sind,  
aufgeregt, geprellt von deren verborgenen Stößen,  
selber reizen sie dann ein wenig größere weiter.  
So steigt mählich empor die Bewegung von den Atomen,  
tritt hervor zu den Sinnen allmählich, daß sich bewegen  
jene auch, die wir im Lichte der Sonne zu sehen vermögen  
und von welchen nicht klar, unter was für Schlägen sie's  
tuen.



# **Anhang B**

## **Arbeitsblätter**

### **B.1 Arbeitsblatt 1**

Arbeitsblatt 1 dient dem optionalen Einsatz in der ersten Stunde des vorgestellten Unterrichtskonzepts und umfasst Fragen zum besprochenen Stoff (siehe S. 78).

### **B.2 Arbeitsblatt 2**

Arbeitsblatt 2 stellt einen Mustersteckbrief dar, welcher in der zweiten Unterrichtseinheit erstellt werden soll (siehe S. 80).

### **B.3 Arbeitsblatt 3**

Arbeitsblatt 3 wird in der dritten Stunde ausgefüllt und beschäftigt sich erneut mit den gelernten Inhalten (siehe S. 82).

Name: \_\_\_\_\_

# ARBEITSBLATT 1

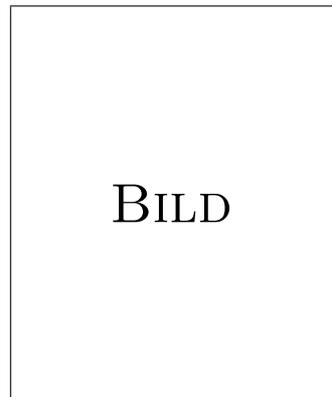
**Skizziere und beschreibe kurz das am Anfang der Stunde durchgeführte Experiment! Was konntest du erkennen?**

**Weshalb könnte es deiner Meinung nach wichtig sein, sich mit der Geschichte der Physik zu beschäftigen?**

Name: \_\_\_\_\_

## ARBEITSBLATT 2

### Mustersteckbrief



**Name:**

**Lebenszeit:**

**Herkunft:**

**Urstoff:**

**Weitere Infos:**

Name: \_\_\_\_\_

## ARBEITSBLATT 3

Welches Aussehen haben die Atome laut Demokrit?

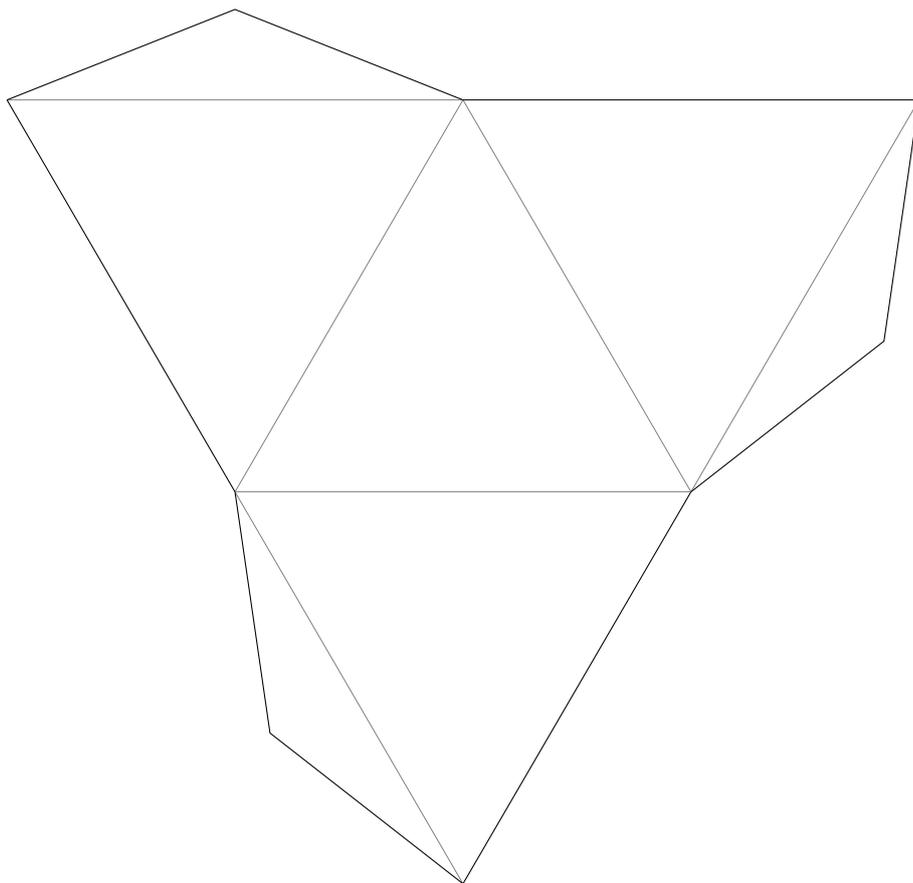
Wie können sich Atome zu größeren Gebilden verbinden?

Welche Unterschiede zum späteren Modell kannst du erkennen?

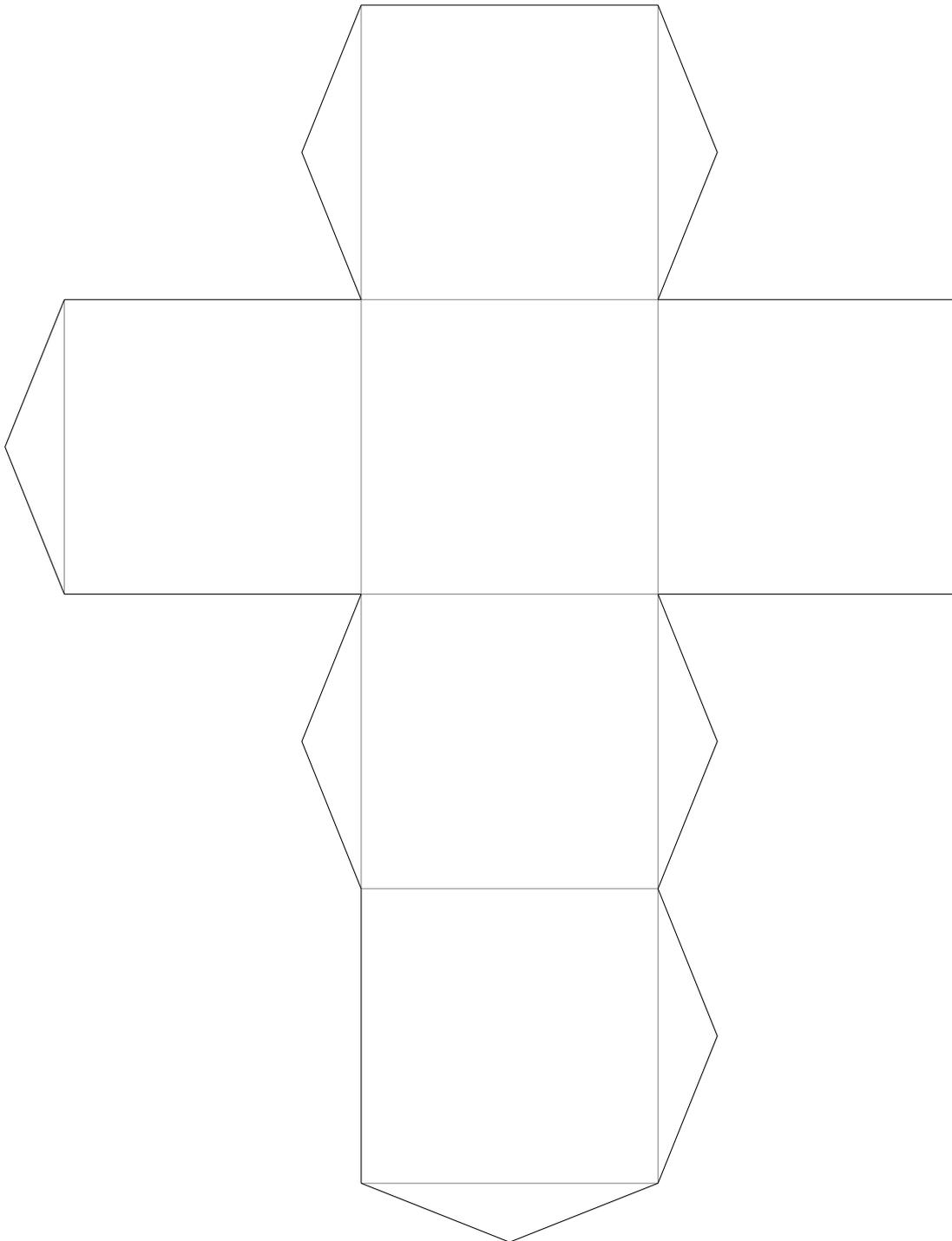
# Anhang C

## Faltvorlagen

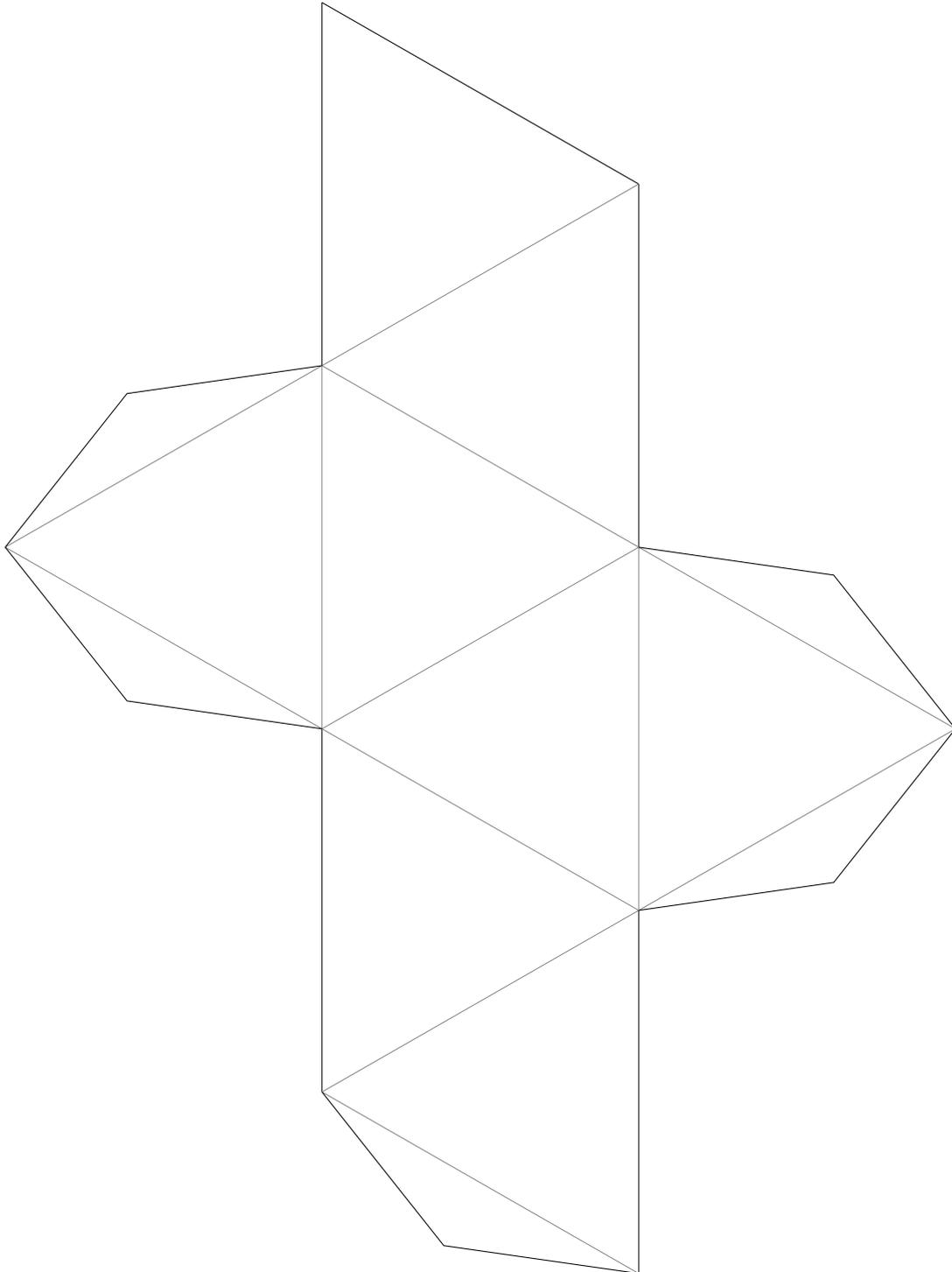
### C.1 Tetraeder



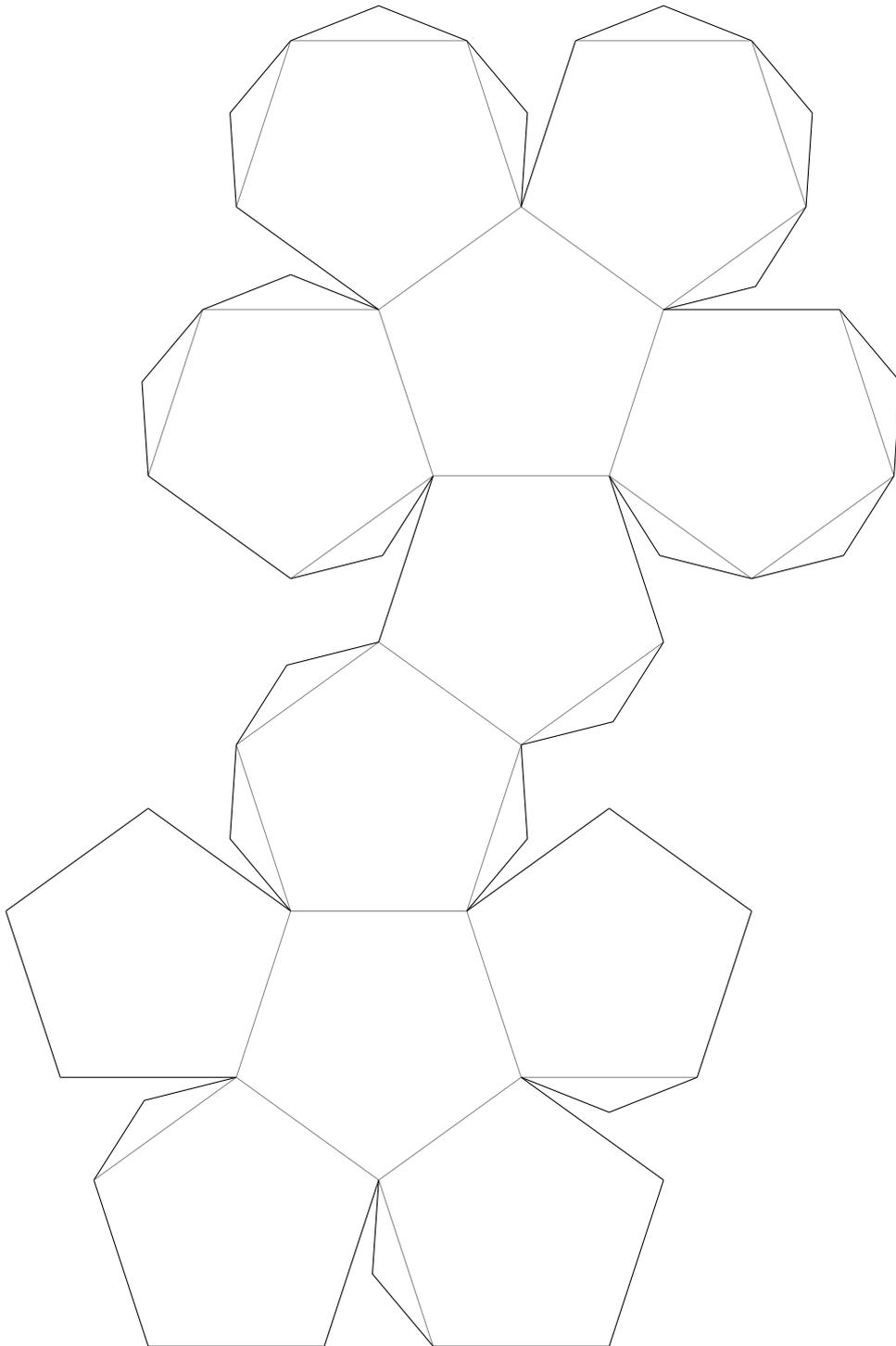
## C.2 Hexaeder



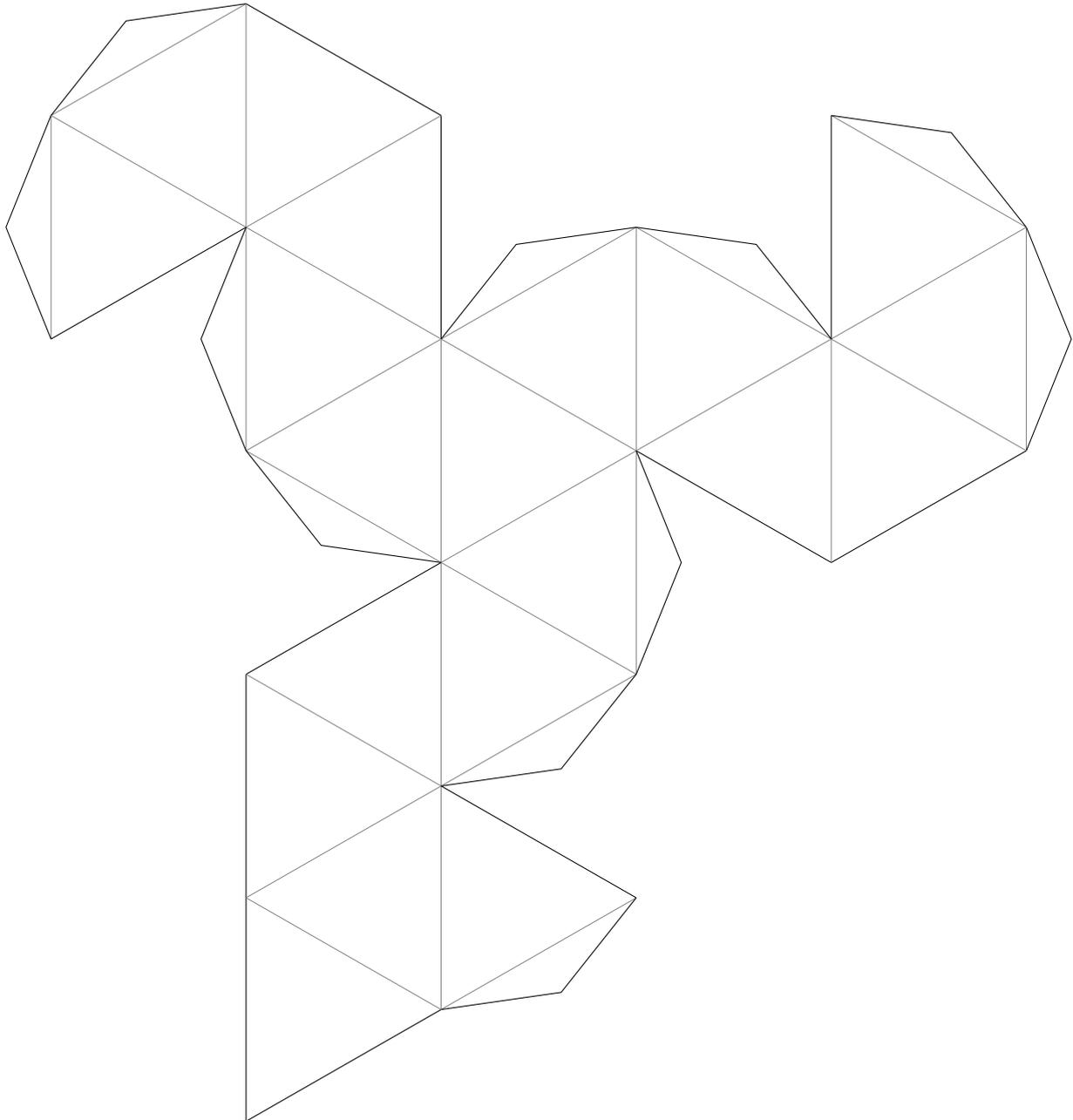
### C.3 Oktaeder



## C.4 Dodekaeder



## C.5 Ikosaeder



## C.6 Quellcode

Der folgende minimale L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Quellcode erzeugt ein Dokument im A4-Format mit einer einzelnen Tetraeder-Faltvorlage. Die Seitenränder wurden mit Hilfe des `geometry`-Pakets festgelegt. Zur Erstellung sämtlicher Faltvorlagen wird das Paket `tikz` sowie dessen spezielle Bibliothek `foldings` benötigt. Der mit `\vspace*` festgelegte vertikale Abstand kann bei Bedarf angepasst oder entfernt werden. Der Ausdruck `tetrahedron folding` legt die Art des geometrischen Körpers fest. Eine Veränderung der Größe der Zeichnung kann durch Variation des Wertes von `folding line length` sowie durch die gleichzeitige Auswahl eines anderen Papierformats (beispielsweise `a3`) erreicht werden. Sollte die Ausrichtung der Grafik nicht optimal sein, kann der L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Befehl `\tikz` um den optionalen Parameter `[rotate=<Grad>]` erweitert werden.

```

1 \documentclass[paper=a4]{scrartcl}
2
3 \usepackage[top=1cm,bottom=1cm,left=1cm,right=1cm]{geometry}
4
5 \usepackage{tikz}
6 \usetikzlibrary{foldings}
7
8 \begin{document}
9
10 \vspace*{5cm}
11 \centering
12   \tikz
13     \path pic[
14       transform shape,
15       folding line length=9cm
16     ] {tetrahedron folding};
17
18 \end{document}

```

Anstelle von `tetrahedron` können noch die folgenden Ausdrücke eingesetzt werden: `cube`, `octahedron`, `dodecahedron'` und `icosahedron`. Der Apostroph bei `dodecahedron'` dient der Auswahl eines alternativen Faltmusters. Das zweite Codebeispiel zeigt die `\tikz`-Befehle zur Generierung der übrigen Vorlagen. Diese können ebenfalls im obigen L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Dokument anstelle des Tetraeder-Befehls verwendet werden.

Weitere umfangreiche Erklärungen und Optionen finden sich im Handbuch zu PGF/TikZ (TANTAU, 2013, S. 668ff).

```
1 % Würfel
2 \tikz
3 \path pic[
4   transform shape,
5   folding line length=5.5cm
6 ] {cube folding};
7
8 % Oktaeder
9 \tikz[rotate=90]
10 \path pic[
11   transform shape,
12   folding line length=7cm
13 ] {octahedron folding};
14
15 % Dodekaeder
16 \tikz
17 \path pic[
18   transform shape,
19   folding line length=3.5cm
20 ] {dodecahedron' folding};
21
22 % Ikosaeder
23 \tikz[rotate=30]
24 \path pic[
25   transform shape,
26   folding line length=4cm
27 ] {icosahedron folding};
```



# Literatur

- ALGRA, KEIMPE (2001). *Raum*. In: *Der neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*. Bd. 10: *Altertum. Pol-Sal*. Hrsg. von HUBERT CANKIK und HELMUTH SCHNEIDER. Übers. von E. DÜRR. Stuttgart und Weimar: Verlag J. B. Metzler, S. 788–791. ISBN: 3-476-01480-0.
- Atomism* (2014). Englisch. URL: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Atomism&oldid=615186133> (besucht am 30.08.2014).
- BODNÁR, ISTVÁN (1997a). *Atomismus*. In: *Der neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*. Bd. 2: *Altertum. Ark-Ci*. Hrsg. von HUBERT CANKIK und HELMUTH SCHNEIDER. Übers. von T. HEINZE. Stuttgart und Weimar: Verlag J. B. Metzler, S. 218–219. ISBN: 3-476-01472-X.
- (1997b). *Demokritos*. In: *Der neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*. Bd. 3: *Altertum. Cl-Epi*. Hrsg. von HUBERT CANKIK und HELMUTH SCHNEIDER. Übers. von T. HEINZE. Stuttgart und Weimar: Verlag J. B. Metzler, S. 455–458. ISBN: 3-476-01473-8.
- (1999). *Leukippos*. In: *Der neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*. Bd. 7: *Altertum. Lef-Men*. Hrsg. von HUBERT CANKIK und HELMUTH SCHNEIDER. Übers. von J. DERLIEN. Stuttgart und Weimar: Verlag J. B. Metzler, S. 106. ISBN: 3-476-01477-0.
- DILKE, OSWALD A. W. (2012). *Mathematik, Maße und Gewichte in der Antike*. Aus dem Englischen übers. von REINHARD OTTWAY. Reclams Universal-Bibliothek Nr. 18948. Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co. ISBN: 978-3-15-018948-1.
- EHLERS, DIETRICH (2002a). „Astronomie und physikalisch-technische Kenntnisse“. In: *Geschichte der Physik. Ein Abriss*. Hrsg. von WOLFGANG SCHREIER. 3. Aufl. Berlin und Diepholz: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik, S. 43–64. ISBN: 978-3-928186-62-9.
- (2002b). „Auffassungen zur Struktur der Welt von Thales bis Aristoteles“. In: *Geschichte der Physik. Ein Abriss*. Hrsg. von WOLFGANG SCHREIER. 3. Aufl. Berlin und Diepholz: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik, S. 25–43. ISBN: 978-3-928186-62-9.
- EPIKUR (2000). *Briefe, Sprüche, Werkfragmente*. Griechisch und Deutsch. Hrsg. und übers. von HANS-WOLFGANG KRAUTZ. Reclams Universal-Bibliothek Nr. 9984. Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co. ISBN: 978-3-15-009984-1.
- FORBES, ROBERT J. und EDUARD J. DIJKSTERHUIS (1963). *A history of science and technology. "nature obeyed and conquered"*. Bd. 1: *Ancient times to the seventeenth century*. Englisch. 1. Aufl. Harmondsworth, Middlesex: Penguin Books.

- GEMELLI MARCIANO, M. LAURA (2007). *Die Vorsokratiker*. Bd. 1: *Thales, Anaximander, Anaximenes, Pythagoras und die Pythagoreer, Xenophanes, Heraklit*. Düsseldorf: Artemis & Winkler. ISBN: 978-3-7608-1735-4.
- (2009). *Die Vorsokratiker*. Bd. 2: *Parmenides, Zenon, Empedokles*. Düsseldorf: Artemis & Winkler. ISBN: 978-3-538-03500-3.
- (2010). *Die Vorsokratiker*. Bd. 3: *Anaxagoras, Melissos, Diogenes von Apollonia, Die antiken Atomisten: Leukipp und Demokrit*. Düsseldorf: Artemis & Winkler. ISBN: 978-3-538-03502-7.
- HEISENBERG, WERNER (1967a). „Atome und humanistische Bildung“. In: *Texte zur Antike. Von Platon bis Heisenberg*. Hrsg. von OTTO LEGGEWIE, HUBERT LENZEN und JOSEF REINER ZINKEN. Freiburg im Breisgau, Basel und Wien: Herder-Bücherei. Kap. IX: Antike und Naturwissenschaften, S. 164–166.
- (1967b). „Gedanken der antiken Naturphilosophie in der modernen Physik“. In: *Texte zur Antike. Von Platon bis Heisenberg*. Hrsg. von OTTO LEGGEWIE, HUBERT LENZEN und JOSEF REINER ZINKEN. Freiburg im Breisgau, Basel und Wien: Herder-Bücherei. Kap. IX: Antike und Naturwissenschaften, S. 151–156.
- (1967c). „Über die Bedeutung des humanistischen Unterrichts“. In: *Texte zur Antike. Von Platon bis Heisenberg*. Hrsg. von OTTO LEGGEWIE, HUBERT LENZEN und JOSEF REINER ZINKEN. Freiburg im Breisgau, Basel und Wien: Herder-Bücherei. Kap. X: Antike und Gymnasium, S. 167–168.
- HOSSENFELDER, MALTE (1995). *Geschichte der Philosophie*. Bd. 3: *Die Philosophie der Antike. Stoa, Epikureismus und Skepsis*. Hrsg. von WOLFGANG RÖD. München: Verlag C. H. Beck. ISBN: 3-406-39384-5.
- KOSTELECKÝ, V. ALAN, Hrsg. (2011). *Proceedings of the Fifth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry*. Englisch. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. ISBN: 978-981-4327-67-1. URL: <http://books.google.at/books?id=w3G15ILrNu0C> (besucht am 06.09.2014).
- KRAFFT, FRITZ (2005). *Naturwissenschaften*. In: *Der neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*. Bd. 15.1: *Rezeptions- und Wissenschaftsgeschichte. La–Ot*. Hrsg. von HUBERT CANCIK, HELMUTH SCHNEIDER und MANFRED LANDFESTER. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 780–873. ISBN: 3-476-01485-1.
- LAMMEL, HANS-UWE (2005). *Naturwissenschaften*. In: *Der neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*. Bd. 15.1: *Rezeptions- und Wissenschaftsgeschichte. La–Ot*. Hrsg. von HUBERT CANCIK, HELMUTH SCHNEIDER und MANFRED LANDFESTER. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 780–873. ISBN: 3-476-01485-1.
- LANDFESTER, KATHARINA (2005). *Naturwissenschaften*. In: *Der neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*. Bd. 15.1: *Rezeptions- und Wissenschaftsgeschichte. La–Ot*. Hrsg. von HUBERT CANCIK, HELMUTH SCHNEIDER und MANFRED LANDFESTER. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 780–873. ISBN: 3-476-01485-1.

- Leere in der Leere* (2014). URL: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Leere\\_in\\_der\\_Leere&oldid=125816984](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Leere_in_der_Leere&oldid=125816984) (besucht am 24.08.2014).
- Lehrpläne AHS* (2014). *Verordnung des Bundesministers für Unterricht und Kunst vom 14. November 1984 über die Lehrpläne der allgemeinbildenden höheren Schulen; Bekanntmachung der Lehrpläne für den Religionsunterricht an diesen Schulen (BGBl. Nr. 88/1985, Anlage A)*. URL: <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568&FassungVom=2014-08-10> (besucht am 10.08.2014).
- LINDBERG, DAVID C. (1994). *Von Babylon bis Bestiarium. Die Anfänge des abendländischen Wissens*. Aus dem Amerikanischen übers. von BETTINA OBRECHT. Stuttgart und Weimar: Verlag J. B. Metzler. ISBN: 3-476-00958-0.
- Liste lateinischer Phrasen/F* (2014). URL: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste\\_lateinischer\\_Phrasen/F&oldid=133439160](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_lateinischer_Phrasen/F&oldid=133439160) (besucht am 06.09.2014).
- LUKREZ (1924a). *Sonnenstäubchen*. Übers. von HERMANN DIELS. URL: <http://www.textlog.de/lukrez-sonnenstaeubchen.html> (besucht am 20.08.2014).
- (1924b). *Über die Natur der Dinge*. Übers. von HERMANN DIELS. URL: <http://www.textlog.de/lukrez-natur-dinge.html> (besucht am 06.09.2014).
- (2000). *De rerum natura. Welt aus Atomen*. Lateinisch und Deutsch. Hrsg. und übers. von KARL BÜCHNER. Reclams Universal-Bibliothek Nr. 4257. Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co. ISBN: 978-3-15-004257-1.
- Mars Climate Orbiter* (2014). URL: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mars\\_Climate\\_Orbiter&oldid=131729147](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mars_Climate_Orbiter&oldid=131729147) (besucht am 29.08.2014).
- PLATON (2014). *Politeia. Siebentes Buch: Das Höhlengleichnis*. Übers. von FRIEDRICH SCHLEIERMACHER. URL: <http://gutenberg.spiegel.de/buch/4885/1> (besucht am 24.06.2014).
- (1967). „Das Höhlengleichnis“. In: *Texte zur Antike. Von Platon bis Heisenberg*. Hrsg. von OTTO LEGGEWIE, HUBERT LENZEN und JOSEF REINER ZINKEN. Freiburg im Breisgau, Basel und Wien: Herder-Bücherei. Kap. VIII: Besitz für immer, S. 139–142.
- Quanten-Zeno-Effekt* (2014). URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Quanten-Zeno-Effekt&oldid=127410580> (besucht am 24.08.2014).
- SCHMIDT, ERNST A. (2007). *Clinamen. Eine Studie zum dynamischen Atomismus der Antike*. Heidelberg: Universitätsverlag Winter. ISBN: 978-3-8253-5397-1.
- SCHNEIDER, NOTKER (1999). *Materie*. In: *Der neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*. Bd. 7: *Altertum. Lef–Men*. Hrsg. von HUBERT CANCIK und HELMUTH SCHNEIDER. Stuttgart und Weimar: Verlag J. B. Metzler, S. 1005–1009. ISBN: 3-476-01477-0.
- SCHREIER, WOLFGANG, Hrsg. (2002). *Geschichte der Physik. Ein Abriss*. Berlin und Diepholz: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik. ISBN: 978-3-928186-62-9.

- SCHRÖDINGER, ERWIN (1989). *Die Natur und die Griechen*. Übers. von MIRA KOFFKA. Zürich: Diogenes Verlag AG. ISBN: 3-257-21781-1.
- SIMONYI, KÁROLY (2001). *Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute*. Übers. von KLARA CHRISTOPH und KÁROLY SIMONYI. Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH. ISBN: 3-8171-1651-9.
- Staunen* (2014). URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Staunen&oldid=133569548> (besucht am 06.09.2014).
- STÜCKELBERGER, ALFRED, Hrsg. (1979). *Antike Atomphysik. Texte zur antiken Atomlehre und zu ihrer Wiederaufnahme in der Neuzeit*. München: Heimeran Verlag. ISBN: 3-7765-2182-1.
- TANTAU, TILL (2013). *The TikZ and PGF Packages. Manual for version 3.0.0*. Englisch. Institut für Theoretische Informatik der Universität zu Lübeck. URL: <http://ftp.univie.ac.at/packages/tex/graphics/pgf/base/doc/pgfmanual.pdf> (besucht am 23.08.2014).
- VITRUV (2009). *Zehn Bücher über Architektur. De Architectura Libri decem*. Lateinisch und Deutsch. Übers. von FRANZ REBER. Wiesbaden: marixverlag GmbH. ISBN: 978-3-86539-212-1.
- Wissenschaft* (2014). In: *Die Brockhaus Enzyklopädie Online*. Gütersloh und München: F. A. Brockhaus / wissenmedia in der inmediaONE] GmbH. URL: <https://uni-vienna.brockhaus-wissensservice.com/sites/brockhaus-wissensservice.com/files/pdfpermlink/wissenschaft-2e900962.pdf> (besucht am 29.08.2014).

# Bildquellen

Abbildung	Seite	Quelle
1	vi	„Flammarion“ von Anonym – Camille Flammarion, L’Atmosphère: Météorologie Populaire (Paris, 1888), pp. 163. Lizenziert unter Public domain über Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flammarion.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flammarion.jpg</a>
1.1a	3	„Bundesarchiv Bild183-R57262, Werner Heisenberg“ von Unbekannt – Dieses Bild wurde im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Bundesarchiv und Wikimedia Deutschland aus dem Bundesarchiv für Wikimedia Commons zur Verfügung gestellt. Das Bundesarchiv gewährleistet eine authentische Bildüberlieferung nur durch die Originale (Negative und/oder Positive), bzw. die Digitalisate der Originale im Rahmen des Digitalen Bildarchivs. Lizenziert unter Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0-de über Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bundesarchiv_Bild183-R57262,_Werner_Heisenberg.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bundesarchiv_Bild183-R57262,_Werner_Heisenberg.jpg</a>
1.1b	3	„Erwin Schrödinger“. Lizenziert unter Public domain über Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erwin_Schrödinger.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erwin_Schrödinger.jpg</a>
2.1	8	Karte: <a href="http://d-maps.com/carte.php?num_car=1978&amp;lang=de">http://d-maps.com/carte.php?num_car=1978&amp;lang=de</a> – Ergänzungen (Städte, Ortsnamen, Gebietsnamen) selbst eingefügt
2.2	11	„Hoehlengleichnis“ von Liquidian – Eigenes Werk. Lizenziert unter Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 über Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hoehlengleichnis.svg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hoehlengleichnis.svg</a>
2.3	13	Karte: <a href="http://d-maps.com/carte.php?num_car=5860&amp;lang=de">http://d-maps.com/carte.php?num_car=5860&amp;lang=de</a> – Ergänzungen (Städte, Ortsnamen, Gebietsnamen, Zuschnitt) selbst eingefügt
2.4	14	Tablet from Marsiliana d’Albegna – <a href="http://lila.sns.it/mnamon/index.php?page=Esempi&amp;id=10&amp;lang=en">http://lila.sns.it/mnamon/index.php?page=Esempi&amp;id=10&amp;lang=en</a>

Abbildung	Seite	Quelle
3.3	28	„Illustrerad Verldshistoria band I Ill 107“ by Ernst Wallis et al – own scan. Licensed under Public domain via Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illustrerad_Verldshistoria_band_I_Ill_107.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Illustrerad_Verldshistoria_band_I_Ill_107.jpg</a>
3.4	29	„AnaximanderRelief“ by Unknown. old art. – Ministry of Cultural Heritage and Activities, Special Superintendence for the Archaeological Heritage of Rome (from C Rovelli „The First Scientist“, Westholme 2011). Licensed under Public domain via Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AnaximanderRelief.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AnaximanderRelief.jpg</a>
3.5	30	„Anaximenes“ by This file is lacking author information. – first upload to de.wikipedia by Dr. Manuel on 10 Mar 2005, cropped from <a href="http://www.sir-ray.com/Anaximenes.jpeg">http://www.sir-ray.com/Anaximenes.jpeg</a> and tagged as Public Domain. Licensed under Public domain via Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anaximenes.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anaximenes.jpg</a>
3.7	31	„Sanzio 01 Heraclitus“ von Raffael – Web Gallery of Art: Image Info about artwork. Lizenziert unter Public domain über Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sanzio_01_Heraclitus.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sanzio_01_Heraclitus.jpg</a>
3.8	33	„Kapitolinischer Pythagoras adjusted“ von Original uploader was Galilea at de.wikipedia – First upload to Wikipedia: de.wikipedia; description page is/was here. (Original text: Fotografiert am 30.03.2005) Second upload to Commons: <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Kapitolinischer_Pythagoras.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Kapitolinischer_Pythagoras.jpg</a> and this is an adjusted version of the second one. Lizenziert unter Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 über Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kapitolinischer_Pythagoras_adjusted.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kapitolinischer_Pythagoras_adjusted.jpg</a>
3.10a	36	„Sanzio 01 Parmenides“. Lizenziert unter Public domain über Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sanzio_01_Parmenides.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sanzio_01_Parmenides.jpg</a>
3.10b	36	„Zenon aus Elea“. Über Wikipedia – <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Zenon_aus_Elea.jpg">http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Zenon_aus_Elea.jpg</a>

---

Abbildung	Seite	Quelle
3.12	40	„Empedocles in Thomas Stanley History of Philosophy“ by Unknown – Thomas Stanley, The history of philosophy, 1655. Licensed under Public domain via Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Empedocles_in_Thomas_St Stanley_History_of_Philosophy.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Empedocles_in_Thomas_St Stanley_History_of_Philosophy.jpg</a>
3.13	41	„Anaxagoras Lebiedzki Rahl“ by Eduard Lebiedzki, after a design by Carl Rahl – <a href="http://nibiryukov.narod.ru/nb_pinacoteca/nbe_pinacoteca_artists_1.htm">http://nibiryukov.narod.ru/nb_pinacoteca/nbe_pinacoteca_artists_1.htm</a> . Licensed under Public domain via Wikimedia Commons – <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anaxagoras_Lebiedzki_Rahl.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anaxagoras_Lebiedzki_Rahl.jpg</a>
5.1	55	Die platonischen Körper. Quelle: Johannes Kepler: „Mysterium Cosmographicum“, 1596 – <a href="https://idw-online.de/de/news87810">https://idw-online.de/de/news87810</a>

Sämtliche der oben angegebenen Hyperlinks wurden zuletzt am 30.07.2014 besucht. Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.



# Nachwort

Am Ende meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meiner Studienzeit unterstützt und mir auch in schwierigen Situationen Mut zugesprochen haben. Mein besonderer Dank gilt Frau Privatdozentin Mag. Dr. Beatrix Hiesmayr, die in mir nicht nur große Begeisterung und ein tiefes Interesse an der Quantenmechanik weckte, sondern sich auch dazu bereit erklärte, die Betreuung meiner Diplomarbeit trotz meines ungewöhnlichen Themenwunsches zu übernehmen. Ich durfte stets auf ihre Unterstützung und Motivation zählen, wobei sie mehr als einmal ein großes Maß an Geduld bewies und mir immer mit Verständnis begegnete. Großer Dank gebührt auch meinen Eltern, Christa und Erwin Schlögel, die immer an mich geglaubt haben und mir stets zur Seite gestanden sind. Ich danke ihnen für ihre finanzielle Unterstützung und dafür, dass sie mir diese Ausbildung ermöglicht haben. Schließlich sei noch allen Kolleginnen und Kollegen sowie Freundinnen und Freunden gedankt, die ich während meines Studiums kennenlernen durfte und die mich in diesem Lebensabschnitt auf meinem Weg begleitet haben.



# Curriculum Vitae

## Persönliche Daten

*Name* David Simon Erwin Schlögel

*Staatsbürgerschaft* Österreich

## Universitäre Ausbildung

*WS 2005 – WS 2008* UF Informatik und Informatikmanagement, Universität Wien  
(pausiert)

*ab WS 2004* Lehramtsstudium UF Physik UF Latein, Universität Wien

## Schulische Ausbildung

*2004* AHS-Reifeprüfung (ausgezeichneter Erfolg)

*1996 – 2004* Gymnasium der Englischen Fräulein, St. Pölten

*1992 – 1996* Volksschule der Englischen Fräulein, St. Pölten

## Zivildienst

*07/2012 – 03/2013* Seniorenwohnheim Stadtwald, St. Pölten

## Berufliche Tätigkeit

*ab 09/2013* Lehrtätigkeit am BG/BRG St. Pölten

*2011 – 2012* Lehrtätigkeit bei LernQuadrat Melk

*10/2007 – 02/2008* Tutorium zu „Algorithmen, Datenstrukturen und Programmieren I“ (MMag. Clemens Bruckmann), Universität Wien

*08/2008 & 08/2006* Feriapraktikum in der Stiftsbibliothek Melk