

2006

PREPRINT 320

Jürgen Renn, Peter Damerow, Malcolm D. Hyman,
Matteo Valleriani

**Weight, Motion and Force: Conceptual
Structural Changes in Ancient Knowledge
as a Result of its Transmission**

Introduction

The project “Weight, Motion and Force: Conceptual Structural Changes in Ancient Knowledge as a Result of its Transmission” is dedicated to the detailed description and analysis of essential cognitive, social, and material epistemic structures of antiquity and their alteration in the process of transmission to the early modern era. The subject of this analysis in particular is the shifts in the relation between practical and theoretical knowledge of nature, the causes of these shifts, and their consequences.

Two aspects of transformation are the focus of this research: (1) the reception of ancient practical mechanical knowledge by the European technicians of the sixteenth and seventeenth centuries – in particular the question of the means of transmitting this knowledge; (2) the reception in early modernity of the theoretical reflection on this knowledge in the “mechanical” writings of Aristotle, Archimedes, and Hero.

From these two aspects, four primary research topics from the field of early modernity emerge: (1) the role of technical experience in the reception of ancient knowledge; (2) the influence of Aristotle’s mechanics on Renaissance engineer-scientists who were developing scientific theory from practical knowledge; (3) the role of abstraction in the reorganization of ancient knowledge within modern science; (4) the impact of the ancient theoretical tradition of hydrodynamics on the scientific development of the Renaissance.

This project (A6) is the contribution of the Max Planck Institute for the History of Science (MPIWG) to the Collaborative Research Center (CRC) (*Sonderforschungsbereich* – SFB) 644, “Transformations of Antiquity.” CRC 644 brings together personnel from ten humanities disciplines at the Humboldt University in Berlin, from two departments of the Free University

in Berlin, and from the Max Planck Institute for the History of Science in Berlin. In total the CRC comprises about fifty researchers from six different faculties; they are assigned to the sixteen mutually interactive projects of the CRC.

CRC 644 starts from the basic premise that European cultures, arts, and sciences have been formed in a continuation and transformation of the cultures of antiquity. Over the course of centuries, aspects of ancient culture have come, in altered shapes, to serve as the bases of reference for the cultural construction of modern Europe.

The contributions published in this volume constitute working papers of the A6 group members at the MPIWG that were presented originally at a conference at the Humboldt University in December of 2005. These papers address general methodological concerns, such as the roles of mental models and semantic networks in the history of science, as well as specific studies of the early modern reception of ancient mechanical knowledge.

Mentale Modelle als kognitive Instrumente der Transformation von technischem Wissen

Jürgen Renn und Peter Damerow, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte

MENTALE MODELLE

Gegenstand der folgenden Untersuchung ist die Frage, wie Wissen, insbesondere das technische Wissen der Antike, transferiert und transformiert wird, wobei die historische Transformation dieses Wissens in die klassische Mechanik der Neuzeit den Schwerpunkt bilden soll. Unter technischem Wissen soll dabei im weitesten Sinne Wissen über den handelnden Umgang mit materiellen Gegenständen verstanden werden, unabhängig davon, ob es als wissenschaftliches Wissen bereits schriftsprachlich repräsentiert ist oder nicht.

Den Ausgangspunkt der Untersuchung bildet eine bestimmte Form der Repräsentation von Wissen, die mit dem aus der *Cognitive Science* entlehnten Begriff des *mentalen Modells* bezeichnet werden soll. Worum es sich dabei handelt, soll zunächst an einem Paradigma aus dem Bereich des Leseverständnisses verdeutlicht werden.¹ Nehmen wir einmal an, eine Geschichte in einem Kinderbuch beginne mit den folgenden Worten:

Paul hatte Geburtstag. Johanna und Alexander gingen los um Geschenke zu kaufen. Johanna sagte: „Sieh doch, ich werde ihm einen Drachen besorgen.“ „Tu das nicht“, antwortete Alexander, „Er hat bereits einen“. „Er wird Dir sagen, dass Du ihn zurückbringen musst“.

1 Das Paradigma geht auf die Dissertation von Eugene Charniak (1972) über die Frage, wie Kinder Geschichten verstehen, zurück. Marvin Minsky, der Betreuer der Dissertation, verwendete das Paradigma 1974 in einem Memo der Abteilung für künstliche Intelligenz des MIT zur Erläuterung des Begriffs *Frame* (elektronisch publiziert: <http://web.media.mit.edu/~minsky/papers/Frames/frames.html>). Bekannt wurde das Paradigma durch die spätere Veröffentlichung des Memos, Minsky (1975), 241-247. Siehe auch Minsky (1985), 261-265, deutsch: Minsky (1990), 261-265. Wir verwenden hier die Fassung und die Interpretation des Paradigmas von Robert Davis (1984), 45-48.

Nehmen wir nun weiter an, dem Leser würden beispielsweise die folgenden Fragen gestellt:

Warum kauften Johanna und Paul Geschenke?

Wohin gingen Johanna und Paul?

Worauf bezieht sich das Wort „ihn“ im letzten Satz?

Die meisten Menschen aus unserem Kulturbereich werden diese Fragen spontan beantworten können: Johanna und Alexander kauften Geschenke, weil Paul Geburtstag hatte, sie gingen dazu in einen Laden, und das Wort „ihn“ bezieht sich auf den Drachen, den Johanna zurückbringen müsste. Die meisten Menschen werden zudem davon überzeugt sein, dass die Antworten in dem gelesenen Absatz enthalten sind.

Für einen Informationstheoretiker sind beide Tatbestände erstaunlich. Zumindest hat es sich als schwierig erwiesen, einen Computer so zu programmieren, dass er in der Lage ist, die scheinbar so nahe liegenden Antworten aus dem Text abzuleiten. Keine der Antworten ist in dem Text direkt enthalten. Sie müssen aus den gegebenen Informationen erschlossen werden. Die Form, in der dieses Schließen erfolgt, entspricht jedoch nicht dem traditionellen Verständnis von Deduktion, denn die Antworten können nicht ohne weitreichende Zusatzannahmen formallogisch aus den in dem Text enthaltenen Informationen gefolgert werden. Die Antworten werden vielmehr aus den in dem Text enthaltenen Informationen durch Verknüpfung mit vorangegangenen Erfahrungen gewonnen. Der Ablauf der Schlussfolgerungen lässt sich mit Hilfe einer Theorie mentaler Modelle², in denen aus Erfahrung gewonnenes Wissen repräsentiert ist, folgendermaßen beschreiben:

2 Der Begriff des mentalen Modells, wie er hier verwendet wird, greift auf zwei theoretische Traditionen zurück, die die Struktur der Repräsentation von Wissen zum Gegenstand haben; siehe die Stichwörter *Frame-Based Systems* und *Mental Models* in Wilson u. Keil (1999), 324-326, 525-527. In der Mitte der 1970er Jahre wurde der Begriff *Frame* sowohl in der Cognitive Science als auch in der Linguistik zu einem zentralen Begriff einer neuen Theorie von Bedeutungen; siehe Minsky (1975) und Fillmore (1976), siehe hierzu auch Davis (1984), Fillmore (1985) und Lehrer u. Kittay (1992). Etwas weniger als ein Jahrzehnt später erschienen unabhängig voneinander zwei Bücher mit dem Titel *Mental Models*: Gentner u. Stevens (1983) und Johnson-Laird (1983), siehe auch Johnson-Laird (1989) sowie die Website http://www.tcd.ie/Psychology/Ruth_Byrne/mental_models/. In beiden Traditionen werden Strukturen der Kognition und der Sprache, nicht aber deren historische Veränderung thematisiert. Wir betrachten hier mentale Modelle als spezielle Frames und verwenden diesen Begriff zur theoretischen Beschreibung der historischen Veränderung der Struktur von Wissenssystemen.

1. Ein Stichwort löst das Aufrufen des mentalen Modells eines Geburtstages auf.
2. Das Modell enthält freie Variablen, die mit Informationen aus der gegebenen Situation *instantiiert* werden müssen, bevor Schlussfolgerungen gezogen werden können.
3. Das Modell wirft damit Fragen auf, die beantwortet werden müssen, und der Paragraph wird auf Hinweise auf solche Antworten durchsucht: Wer hat Geburtstag? Wer sind die Gäste? Welches sind die Geschenke?
4. Wird eine passende Antwort gefunden, wird sie in die entsprechende Variable des Modells eingefügt.
5. Wird keine passende Antwort gefunden, ersetzt eine sogenannte *Default-Annahme*,³ eine Standardannahme auf Grund früherer Erfahrungen, die fehlende Information.
6. Wenn die wesentlichen Variablen des Modells mit Werten belegt sind, ist das Modell instantiiert und steht für die Informationsverarbeitung zur Verfügung, beispielsweise für die Beantwortung der gestellten Fragen.
7. Mislingt dagegen die Instantiierung des Modells, wird es verworfen. Der Paragraph kann dann nicht als Text über eine Geburtstagsfeier gedeutet werden.

Anhand dieses Beispiels lassen sich einige Grundzüge der Theorie mentaler Modelle erläutern.

1. Mentale Modelle sind Instrumente des Schlussfolgerns im Kontext vorgegebenen Wissens. Die vorliegenden Informationen werden in ein Modell transferiert, bevor solche Schlussfolgerungen gezogen werden. Im vorliegenden Beispiel geht das Denken, auf Grund dessen die gestellten Fragen beantwortet werden können, nicht unmittelbar von den Informationen des Textes aus, sondern von dem mit diesen Informationen instantiierten Modell einer Geburtstagsfeier.

3 Der Begriff der *Default-Annahme* wurde zur Grundlage einer *nichtmonotonen* Logik des Schließens. Die klassische Logik ist *monoton*, das heißt, ein aus bestimmten Annahmen abgeleiteter Satz bleibt auch nach dem Hinzufügen weiterer Annahmen ableitbar. Die klassische Logik ist in diesem Sinne deterministisch. Die Einführung von Default-Annahmen macht dagegen die Gültigkeit eines Schlusses von den vorhandenen Informationen abhängig und macht auf diese Weise die theoretische Beschreibung der Veränderung von Schlussweisen möglich. Siehe hierzu Besnard (1989) und Brewka (1991) sowie das Stichwort *Nonmonotonic Logics* in Wilson u. Keil (1999), 608-611.

2. Mentale Modelle sind kontext-spezifisch und haben keine universelle Gültigkeit. Mit ihnen lassen sich auch solche Schlussfolgerungen erfassen, die die Kenntnis bestimmter Gegenstände und Kontexte voraussetzen. Um den Sinn des im vorliegenden Beispiel gegebenen Textes zu entschlüsseln, muss man mit einer Kultur vertraut sein, in der Geburtstage gefeiert werden und mit bestimmten Handlungen wie dem Mitbringen von Geschenken verbunden sind.
3. Mentale Modelle sind an neue Erfahrungen adaptierbar. Durch sie lassen sich daher Veränderungen von Schlussfolgerungen infolge von Veränderungen des Erfahrungskontexts erfassen. Indem sich beispielsweise die altersspezifischen Vorlieben von Kindern zugunsten elektronischer Spielzeuge, so kann bei gleichbleibendem Modell „Geburtstag“ die Variable „Geburtstagsgeschenk“ eine solche Veränderung erfahren, dass der Text als obsolet und der Zeit nicht mehr angemessen erscheint.
4. Mentale Modelle verknüpfen gegenwärtige mit vergangenen Erfahrungen, indem sie neue Erfahrungen in ein kognitives Netzwerk aus vorangegangenen Erfahrungen einbetten. Sie ermöglichen so Schlüsse aus unvollständigen Informationen. Im vorliegenden Beispiel werden die spärlichen Informationen des Textes in ein komplexes, vergangene Erfahrungen repräsentierendes Bild des Ablaufs einer Geburtstagsfeier integriert und erhalten erst dadurch ihren Sinn.
5. Mentale Modelle überbrücken verschiedene Ebenen des Wissens, die denselben Gegenstand in unterschiedlichen Wissensformen repräsentieren, von der Ebene des Handlungswissens von Praktikern bis zur Ebene der Theorien von Wissenschaftlern. Mit ihnen lassen sich daher insbesondere auch implizite Schlussfolgerungen erfassen, die in der Handlungslogik von Praktikern verkörpert sind und keine explizite Darstellung in sprachlicher oder schriftlicher Form besitzen. Es genügt in dem vorliegenden Beispiel an Geburtstagsfeiern bereits teilgenommen zu haben – ohne sich Gedanken über die Bedeutung der mit der Feier verbundenen Rituale gemacht zu haben –, um den Sinn des kurzen Textes zu entschlüsseln.

Die Theorie mentaler Modelle, die durch das Paradigma des Leseverständnisses repräsentiert wird, ist wegen dieser Eigenschaften besser geeignet, die Transformation von Wissen unabhängig von seiner jeweils wechselnden Form der Repräsentation theoretisch zu

beschreiben und zu erklären, als Theorien, die auf einer strikten Unterscheidung von Denkprozessen und empirischen Erfahrungen beruhen. In der Tat wurde die Theorie mentaler Modelle in Abgrenzung zu der zeitweise weit verbreiteten Grundannahme entwickelt, das menschliche Denken lasse sich letztlich auf die Gesetze einer universellen, formalen Logik oder Sprachtheorie zurückführen. Zumindest in Bezug auf die Geschichte des Wissens und des Denkens hat die Theorie der mentalen Modelle zwei entscheidende Vorteile. Zum einen lassen sich mit ihr gegenstandsspezifische Schlussweisen und ihre historische Veränderung theoretisch beschreiben und erklären, die Gegenstand der traditionellen Philologie und der *metaphysischen* Logik waren,⁴ die jedoch wegen der Erfolge der formalen Logik zu Beginn des 20. Jahrhunderts zunehmend als für die Naturwissenschaften irrelevant angesehen wurden oder sogar in Vergessenheit gerieten. Zum zweiten lassen sich mit dieser Theorie auch Schlussweisen und deren Veränderungen erfassen, die auf unvollständigen Informationen beruhen, so dass mit Hilfe dieser Theorie gängige anachronistische Wertungen der Richtigkeit oder Fehlerhaftigkeit von Erkenntnissen in der Geschichte der Wissenschaft nebst dem durch sie konstituierten Bild einer linearen und kumulativen Erkenntnisentwicklung durch ein adäquateres Modell der Entwicklung und Transformation von Wissen ersetzt werden kann.⁵

4 Eine umfassende Übersicht über die historische Entwicklung der Logik vor ihrer Formalisierung gibt Friedrich Überweg (1882). Den bedeutendsten Versuch, eine Logik zu formulieren, die Veränderungen logischer Strukturen durch Reflexion auf ihre Anwendung einschließt, stellt Hegels *System der Logik* dar. Seinem System war allerdings wegen der Bedeutung, die die formale Logik für die deduktiven Theorien in der Mathematik und in den Naturwissenschaften gewann, nur ein kurzer Erfolg beschieden, siehe hierzu Damerow u. Lefèvre (1980).

5 Eine Wende gegen die von der Fortschrittsgläubigkeit des 19. Jahrhunderts genährte, anachronistische Wissenschaftsgeschichtsschreibung wurde durch Thomas Kuhn (1962, deutsch 1967) mit seiner Arbeit über die *Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* eingeleitet. Kuhn machte erfolgreich auf die Eigenständigkeit von Wissenssystemen aufmerksam, die es unmöglich macht, sie bruchlos in das Modell einer kontinuierlichen und akkumulativen Wissensentwicklung zu integrieren. Grundlegende strukturelle Veränderungen des Wissens werden nach seiner Theorie durch Paradigmenwechsel hervorgerufen, deren Zustandekommen von dieser Theorie jedoch nur sehr unvollkommen erklärt wird.

DAS MENTALE MODELL DER VERURSACHUNG VON BEWEGUNG

DAS INTUITIVE *MOTION-IMPLIES-FORCE-MODELL*

Die auf der Theorie mentaler Modelle beruhende Möglichkeit, die historische Entwicklung und Transformation von technischem Wissen auf die Veränderung mentaler Modelle zurückzuführen, soll zunächst an einem einfachen Beispiel erläutert werden. Kognitionstheoretische Untersuchungen haben gezeigt,⁶ dass die Erfahrung, dass man Objekte nur bewegen kann, wenn man eine Kraft auf sie ausübt, bereits in der frühen Kindheit dazu führt, dass auch umgekehrt jede wahrgenommene Bewegung eines Körpers mit der Vorstellung verknüpft wird, sie sei durch einen Beweger hervorgerufen, der eine Kraft auf ihn ausübt. Zugleich entwickelt sich die Überzeugung, dass unter ansonsten gleichen Bedingungen die größere Kraft auch die stärkere Bewegung hervorruft.

Diese Umkehrung der Erfahrung von Kräften als Ursache von Bewegungen zu einer Interpretation von wahrgenommenen Bewegungen als von einem Beweger durch Kräfte verursacht kann als ein typisches Beispiel der Ausbildung eines mentalen Modells angesehen werden, das hier der Literatur folgend als *Motion-implies-force-Modell* bezeichnet werden soll⁷. Die Erfahrungen, die durch dieses Modell repräsentiert werden, sind so allgemein, dass das Modell wahrscheinlich von den Menschen einer jeden Kultur im Zuge ihrer ontogenetischen Entwicklung erworben wird. Erfahrungen mit der Verursachung von Bewegungen durch die Ausübung von Kräften führen dazu, ein Modell von Bewegungen mental zu konstruieren, dessen wesentliche Variablen der *Beweger*, der *bewegte Körper* und die *ausgeführte Bewegung* sind. Wird dieses intuitiv erworbene und angewendete Modell durch die Wahrnehmung von Veränderungen abgerufen, so verlangt es, den *Beweger*, das *bewegte Objekt* und die *Bewegung* des Objekts in der gegebenen Situation zu identifizieren. Lässt sich eine dieser drei Variablen nicht instantiieren, so scheitert die Anwendung des Modells und die wahrgenommenen Veränderungen werden nicht als Bewegungen eines Körpers erkannt.

6 Zum Zusammenhang kognitionstheoretischer und historischer Untersuchungen siehe Piaget (1978), Piaget u. Garcia (1989), McCloskey (1983).

7 Clement (1983).

Das Modell wird im Verlaufe seiner Anwendung weiter ausdifferenziert. Es erhält eine Reihe weiterer Variablen:

Die *verursachende Kraft*, die der Bewegte ausübt.

Die *potentiellen Kraft*, die der bewegte Körper auf andere auszuüben imstande ist.

Die *Geschwindigkeit* des bewegten Körpers.

Der *Weg*, den der Körper zurücklegt.

Die *Zeit*, die er für die Bewegung benötigt.

Der *Widerstand*, der der Bewegung entgegenwirkt.

Das *Medium*, das den Widerstand gegen die Bewegung verursacht.

Solche Variablen können durch Zuordnung von Elementen der Wahrnehmung in der gegebenen Situation oder aber durch Default-Annahmen instantiiert werden, also durch einleuchtende Standardannahmen, die frühere Erfahrungen mit bewegten Körpern repräsentieren. Durch die Anwendung dieses so ausdifferenzierten Motion-implies-force-Modells einer intuitiven Erfassung von Bewegungen wird die Wahrnehmung einer Bewegung mit dem aus früheren Erfahrungen stammenden, strukturierten Wissen verknüpft. Dieses Wissen ermöglicht Schlussfolgerungen über die gegebene Situation, die weit über das unmittelbar Wahrgenommene hinausgehen.

DAS MENTALE MODELL DER ARISTOTELISCHEN DYNAMIK

Philosophen der griechischen Antike haben elementare Modelle des intuitiven Denkens wie das Motion-implies-force-Modell begrifflich expliziert und schriftlich fixiert. Sie bedienten sich dabei einer Metasprache, die sich nicht mehr auf die wahrgenommene Realität selbst, sondern auf das auf sie gerichtete Denken bezieht. Implizite mentale Modelle des intuitiven Denkens wurden so zu verallgemeinerten Annahmen einer expliziten Naturphilosophie mit universellem Geltungsanspruch.

Ein sprechendes Beispiel für diese Folge eines Medienwechsels bietet die Bestimmung des Verhältnisses von Kraft und Bewegung, die Aristoteles in seiner *Physik* vorgenommen hat. Aristoteles machte das Motion-implies-force-Modell des intuitiven Denkens zum Kern einer Theorie der lokalen Bewegung, die bis ins späte Mittelalter und in die frühe Neuzeit hinein die Bewegungstheorien der Philosophen bestimmte.⁸

In Übereinstimmung mit der intuitiven Wahrnehmung von Bewegungen bestimmte Aristoteles die Geschwindigkeit eines bewegten Körpers als den in einer bestimmten Zeit zurückgelegten Weg. Er bestimmte ferner diesen Weg als proportional zur verursachenden Kraft und als umgekehrt proportional zu dem zu überwindenden Widerstand, der dem Gewicht des zu bewegenden Körpers und dem Medium zugeschrieben wird.

Das Beispiel dieser Aristotelischen Dynamik zeigt, wie ein mentales Modell durch den Wechsel vom Medium des intuitiven Denkens zur schriftlich fixierten Sprache zum Ausgangspunkt und zur Grundlage einer naturphilosophischen Theorie werden kann. Die Aristotelische Dynamik expliziert in der Form von allgemeinen Aussagen die Struktur von intuitiven Schlussfolgerungen, die bei der Anwendung des Motion-implies-force-Modells gezogen werden. Das Beispiel macht darüber hinaus deutlich, dass die sprachliche Explikation intuitiver Schlussfolgerungen, indem sie Bedeutungsspielräume einengt, eine Transformation des solchen Schlussfolgerungen impliziten Wissens bewirken kann. Im vorliegenden Fall werden kausale und funktionale Beziehungen zwischen den zurückgelegten Wegen, den verstrichenen Zeiten, den erforderlichen Kräften und den zu überwindenden Widerständen als Proportionalitäten näher bestimmt und damit auf diejenige mathematische Theorie bezogen, die in der Antike das nahezu einzige Instrument darstellte, mathematische Schlussfolgerungen auf funktionale Zusammenhänge anzuwenden.

8 Zur Theorie der lokalen Bewegung bei Aristoteles siehe Drabkin (1938), Maier (1949) 116ff. und Maier (1952) 284-286.

DIE AUSDIFFERENZIERUNG DES MENTALEN MODELLS DER ARISTOTELISCHEN DYNAMIK

Der Wechsel vom mental repräsentierten Modell des intuitiven Denkens zur schriftsprachlich fixierten Bewegungslehre hatte jedoch nicht nur unmittelbar mit diesem Medienwechsel verbundene Konsequenzen. Die erweiterten Möglichkeiten der Reflexion auf die Schlussfolgerungen und deren Ergebnisse wurde darüber hinaus Ausgangspunkt für die weitere Ausdifferenzierung des Modells. Eine erste Form einer solchen Ausdifferenzierung ergibt sich aus der Verarbeitung von Erfahrungen, die formell unter die verallgemeinerten Begriffsbildungen des schriftlich fixierten Modells fallen, die jedoch an das zugrunde liegende intuitive Modell nicht zu assimilieren sind.

Insbesondere führte schon in der *Physik* des Aristoteles das Versagen des Modells in Bereichen, in denen sich nur schwer ein Beweger identifizieren lässt, zur Definition und Ausgrenzung besonderer Bewegungsarten. Aristoteles grenzte zum einen die Bewegung himmlischer Körper und zum anderen den Fall schwerer Körper in Richtung auf den Erdmittelpunkt sowie das Aufsteigen leichter Körper in entgegengesetzter Richtung aus dem Anwendungsbereich des auf das Motion-implies-force-Modells gestützten Bewegungsbegriffs aus. Die beiden ausgegrenzten Bewegungsarten wurden als *natürliche* Bewegungen, die keiner verursachenden Kraft bedürfen, gegen die *gewaltsamen* Bewegungen abgegrenzt, die allein Gegenstand seiner Theorie der Verursachung von lokalen Bewegungen durch Kräfte sind. Nach seiner Theorie kommt die Bewegung der Himmelskörper durch die natürliche Kreisbewegung des fünften Elements, des *ithers*, zustande, die natürliche geradlinige Bewegung der schweren und leichten Körper durch ihr Bestreben, an ihren natürlichen Ort zu gelangen.

Während diese natürlichen Bewegungen zu einer begrifflichen Differenzierung durch theoretische Ausgrenzung aus dem Anwendungsbereich des Motion-implies-force-Modells führten, gibt es auch ein Bewegungsphänomen, das eine innere Ausdifferenzierung des Modells durch theoretische Reflexion zur Folge hatte, nämlich das Phänomen der Trägheitsbewegung. Wird ein Körper geworfen, dann setzt er seine Bewegung nach dem Verlassen der Hand ohne erkennbare Ursache fort. Das Motion-implies-force-Modell verlangt jedoch, um anwendbar zu sein, die Instantiierung der kritischen Variablen *Beweger* durch einen Körper, der in unmittelbarem Kontakt mit dem bewegten Körper stehen muss, um eine Kraft auf ihn ausüben zu können.

Antike Philosophen, unter ihnen Aristoteles, haben auf verschiedene Weise mit spitzfindigen Argumenten versucht, einer solche Trägheitsbewegung dennoch eine verursachende Kraft zuzuordnen. Solche Argumente laufen im wesentlichen auf die Annahme hinaus, dass die werfende Hand auch Bewegungen des Mediums hervorruft, die ihrerseits durch den unmittelbaren Kontakt des Mediums mit dem bewegten Körper die Fortsetzung der Bewegung verursachen können.⁹ Solche Erklärungen, insbesondere die des Aristoteles selbst, wurden aber allenfalls durch theoretischen Dogmatismus, nicht aber wegen ihrer Erklärungsleistung tradiert. Die Tradierung solcher Reparaturversuche an der Aristotelischen Theorie der lokalen Bewegung war an spezifische soziale Bedingungen geknüpft, die die Etablierung von Dogmen und die Durchsetzung ihrer Gültigkeit garantierten.

Historisch wirksamer wurde eine Lösung des Problems, die nicht nur ein Ergebnis der philosophischen Reflexion war, sondern, wie entwicklungspsychologische Studien zeigen,¹⁰ selbst eine Grundlage in der intuitiven Physik hat, nämlich in der alltäglichen Erfahrung der Trägheitsbewegung. Ein Körper, der durch eine Kraft in Bewegung gesetzt wird, bewegt sich in der Regel auch dann noch eine Weile weiter, wenn die Kraft nicht mehr wirkt, so als würde etwas von der verursachenden Kraft auf den Körper übertragen werden. Diese Erfahrung wurde schon in der Spätantike zur Grundlage einer Anpassung des Motion-implies-force-Modells an die schwer zu integrierenden Trägheitsphänomene, und zwar durch eine Transformation des Kraftbegriffs. Die Kraft, die eine Bewegung verursacht, wird nicht länger als eine nur unmittelbar wirkenden Potenz eines Bewegers begriffen, sondern als eine Entität, die dabei vom Beweger auf das Bewegte übertragen werden kann.¹¹

Diese Anpassung des Motion-implies-force-Modells an Trägheitsphänomene durch Veränderung der Variablen *Kraft* fand im Mittelalter weite Verbreitung und wurde in der frühen Neuzeit zu einem der Ausgangspunkte für die Bewegungslehren der vorklassischen Mechanik Galileis und seiner Zeitgenossen.¹² Zahlreiche Schriften dokumentieren insbesondere die

9 Dijksterhuis (1956) I, 30-31.

10 Piaget (1978), McCloskey (1983).

11 Die Gründe für die Entstehung der Impetustheorie waren komplex und ihre Anwendung war nicht auf physikalische Phänomene beschränkt. Einen Überblick über die verschiedenen Kontexte der Theorie gibt Wolff (1978).

Interpretation der Projekttilbewegung als eine Bewegung, die durch die Übertragung einer Kraft auf das Projektil bewirkt wird, wobei diese übertragene Kraft in der Regel als *eingeprägte Kraft* – *vis impressa* – oder als *impetus* bezeichnet wurde.

TRANSFORMATION DER ARISTOTELISCHEN IN DIE KLASSISCHE PHYSIK

Die Ausdifferenzierung des Motion-implies-force-Modells durch die Transformation des ihm als Variable inhärenten Kraftbegriffs erweiterte nicht nur seinen Anwendungsbereich, sondern auch die Komplexität möglicher Schlussfolgerungen. In Abhängigkeit von Annahmen über die bewegende Kraft ergaben sich differenzierte Erklärungen verschiedener Bewegungsabläufe wie die der Beschleunigung der Fallbewegung, des Ablaufes von Stoßprozessen oder der Form der Bahn eines Projektils.

Solche erweiterten Erklärungsmöglichkeiten bildeten in der frühen Neuzeit den Ausgangspunkt für die Überwindung Aristotelischer Erklärungsmuster, ohne dass zunächst die Aristotelischen Grundannahmen widerrufen werden mussten. Nimmt man beispielsweise an, dass der einem geworfenen Körper eingeprägte *impetus* sich allmählich verbraucht, dann erhält man eine Erklärung dafür, dass sich seine Bewegung verlangsamt. Nimmt man dagegen an, dass der eingeprägte *impetus* nur durch entgegenwirkende Kräfte wie die des Widerstandes eines Mediums verbraucht werden kann, dann bleibt der Körper in Bewegung, solange keine solchen Kräfte auf ihn einwirken. In diesem Fall führt das Motion-implies-force-Modell also zu Schlussfolgerungen, die denen des Trägheitssatzes der späteren klassischen Physik entsprechen.

Auch in anderer Hinsicht schaffte die durch erweiterte Anwendungen des Modells hervorgerufene Veränderung des Kraftbegriffs neue Erklärungsmöglichkeiten, in denen sich die Transformation der Aristotelischen in die klassische Physik manifestierte. So entspricht beispielsweise der Begriff der einem bewegten Körper eingepprägten Kraft, die es ihm

12 Zum Begriff der vorklassischen Mechanik als einer Übergangsphase zwischen der antiken und der klassischen Mechanik, in der die Elemente der klassischen Mechanik unter den durch die antike Mechanik gegebenen Voraussetzungen ausgebildet wurden, siehe Damerow u.a. (2004).

ermöglicht, unter Verlust seiner eigenen Bewegung auf andere Körper Kräfte auszuüben, in seiner Struktur dem Begriff der Bewegungsenergie der späteren klassischen Physik, die durch Wechselwirkungen wie den Stoß von einem Körper auf den anderen übertragen werden kann.

Dass sich die Transformation der Aristotelischen in die klassische Physik tatsächlich durch die Ausdifferenzierung und Veränderung mentaler Modelle historisch vollzog, läßt sich am Beispiel des hier diskutierten Motion-implies-force-Modells gut belegen. So gilt beispielsweise Galilei als ein Pionier der klassischen Physik, der die Spekulationen der Aristoteliker durch Experimente widerlegte und damit die Grundlage für die klassische Physik schuf. Tatsächlich jedoch waren für Galileis „neue Wissenschaft“ der lokalen Bewegung der Begriff des einem bewegten Körper eingeprägten *impetus* und die Aristotelische Unterscheidung von gewaltsamer und natürlicher Bewegung immer noch konstitutiv.¹³ Wie schon seinen Vorgängern ermöglichte ihm die Kombination beider Annahmen, die Anwendung des Motion-implies-force-Modells von der gewaltsamen Bewegung auf die natürliche Bewegung auszudehnen. Bei dem Versuch, mit diesen ihm vorgegebenen Mitteln für eine auf einer schiefen Ebene herabrollende Kugel durch Umleitung in eine Horizontalbewegung die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Neigung der Ebene zu bestimmen, stieß er zwangsläufig auf ein Problem der Trägheit, das ihn veranlasste, eine weitere Bewegungsform anzunehmen, die der *neutralen* Bewegung.

Die Schlussfolgerung, die ihn zu dieser Annahme führte, läßt sich kurz folgendermaßen zusammenfassen: Eine Kugel, die die schiefe Ebene hinunterrollt, wird dabei beschleunigt, weil ihr bei der natürlichen Bewegung ständig mehr *impetus* eingeprägt wird. Eine Kugel, die durch einen Stoß eine schiefe Ebene hochgerollt wird, verlangsamt dabei ihre Bewegung, weil ihr durch die natürliche Bewegung ständig etwas von dem eingeprägten *impetus* entzogen wird. Einer Kugel, die auf einer Ebene parallel zur Erdoberfläche rollt, wird nach diesem Erklärungsschema aber weder *impetus* hinzugefügt noch entzogen. Sie müsste sich also mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn um die Erde bewegen, wenn sie nicht durch Reibung daran gehindert würde.¹⁴ Dies ist die Schlussfolgerung im Rahmen des

13 Zum Verhältnis von Aristotelismus und klassischer Physik im Werk von Galilei siehe Damerow u.a. (2004), Kapitel 3, und Renn u.a. (2000).

ausdifferenzierten Motion-implies-force-Modells, die Galilei zur Annahme einer neutralen Bewegung zwang, der Horizontalbewegung parallel zur Erdoberfläche, die aus der späterer Sicht der klassischen Physik nur einen Spezialfall der Trägheitsbewegung darstellt.

Einige Jahrzehnte später machte Newton in seinen *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* das Trägheitsprinzip als ein allgemeines Prinzip aller Bewegungen zu einem Axiom einer deduktiven Theorie der Bewegung von Körpern. Er wandte das so modifizierte Erklärungsschema der Verursachung der Bewegungen durch Kräfte auch auf die Bewegungen der Himmelskörper an und konnte so die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung mathematisch ableiten.

Aus der Sicht der klassischen Physik erscheint dieser Schritt als die endgültige Überwindung der Aristotelischen Bewegungslehre. Die fehlerhafte Annahme des Aristoteles über die Verursachung von Bewegungen wurde durch die korrekte ersetzt. Tatsächlich jedoch definierte auch Newton wie seine Vorgänger die Bewegung eines Körpers als durch das Einprägen von Kräften verursacht.¹⁵ Vereinfacht man die historische Transformation dieses mentalen Modells

14 Das Argument findet sich, in verblüffender Übereinstimmung mit Galilei, bereits in der *Mechanik* des Heron, und zwar in Verbindung mit einer expliziten Kritik der Annahme des Aristoteles, die zur Bewegung eines Körpers erforderliche Kraft sei seinem Gewicht proportional: „Manche Leute glauben, die auf der Erde liegenden Lasten ließen sich nur durch eine ihnen äquivalente Kraft bewegen, indem sie falschen Anschauungen huldigen. Beweisen wir also, daß in der beschriebenen Weise gelagerte Lasten sich durch eine geringere als jede bekannte Kraft bewegen lassen, und erläutern wir den Grund, aus welchem diese Erscheinung nicht in der That offenbar wird.“ (*Mechanica* 1, 20, 10-16, Übers. Nix u. Schmidt) Da Herons *Mechanik* vor der Publikation der arabischen Übersetzung gegen Ende des 19. Jahrhunderts nur Auszugsweise durch Zitate bei Pappus bekannt war, erscheint es als ausgeschlossen, dass Galilei die Argumentation von Heron gekannt hat. Pappus geht jedenfalls im Gegensatz zu Heron von der Annahme des Aristoteles aus, zur Bewegung eines Körpers sei eine Kraft erforderlich, siehe Cohen u. Drabkin (1948), 194-196. Bei Galilei findet sich das Argument bereits ca. 1590 in seinem Manuskript *De Motu*, siehe Galilei (1960), 66-68. Galilei (1960), 171-175 wiederholt etwa 10 Jahre später in seiner *Mechanik* in Zusammenhang mit seiner Ableitung des Gesetzes der schiefen Ebene das gleiche Argument. Er verbindet es jetzt mit einer expliziten Kritik der Aristotelischen Annahme von Pappus. Später wird die Beobachtung, dass für die horizontale Bewegung keine Kräfte erforderlich sind, zu einer wesentlichen Voraussetzung der in seinen beiden Hauptwerken, dem *Dialogo* und den *Discorsi*, entwickelten Theorien. Er zieht einerseits die kosmologische Konsequenz, dass die Kreisbewegung um einen Himmelskörper keine verursachende Kraft erfordert, andererseits gewinnt er aus der Idee der Umlenkung der beschleunigten Bewegung entlang einer schiefen Ebene in die gleichförmige Bewegung entlang der Horizontalen ein für ihn theoretisch beherrschbares Maß für die sich verändernde Momentangeschwindigkeit der Fallbewegung und gelangt so zum Beweis des Fallgesetzes.

15 Siehe die Definitionen III und IV in Newton (1999), 23f.

der Verursachung von Bewegungen durch Kräfte zu einer schlichten, von Newton vorgenommenen Korrektur einer fehlerhaften theoretischen Annahme, dann muss Newtons theoretische Bestimmung seiner Grundbegriffe durch impetustheoretische Definitionen als ein irrationales und überflüssiges Beharren auf überlieferten Vorstellungen erscheinen. Tatsächlich jedoch machen diese Definitionen die konstitutiven Entwicklungsbedingungen im Rahmen des mentalen Modells deutlich, in dessen Rahmen sich die Veränderung der Wissensstruktur von der Aristotelischen zur klassischen Physik vollzog.

Descartes zog aus der Annahme, dass Bewegungen durch das Einprägen von Kräften hervorgerufen und erhalten werden, noch weiter reichende Schlüsse. Wenn beim Einwirken eines Körpers auf einen anderen die Bewegung eines Körpers nicht zerstört, sondern nur auf einen anderen Körper übertragen wird, dann muss, so Descartes, die Gesamtmenge aller Bewegung in der Welt konstant bleiben.¹⁶ In dieser Grundannahme seiner *Prinzipien der Philosophie* ist die begriffliche Struktur der Erhaltungssätze der klassischen Physik vorgeprägt. Allerdings konnte diese Schlussfolgerung wegen ihrer Allgemeinheit Descartes nicht unmittelbar auf eine nähere Bestimmung der eingepprägten Kräfte im Sinne der späteren Unterscheidung zwischen der Erhaltung des Impulses und der Erhaltung der Energie führen.

Diese Differenzierung war vielmehr erst ein Ergebnis des *Vis-viva-Streits*, eines Streits um das richtige Maß der lebendigen Kraft, wie die Kraft eines bewegten Körpers in der Folgezeit zumeist bezeichnet wurde.¹⁷ Der Streit wurde 1686 durch eine Kritik von Leibniz an Descartes' Begriff der der Bewegung eines Körpers eingepprägten Kraft ausgelöst. Für Descartes war diese Kraft der Geschwindigkeit des Körpers proportional, für Leibniz dem Quadrat seiner Geschwindigkeit. Den lang anhaltenden Streit, der vielfältige Interpretationen von Bewegungsphänomenen hervorbrachte, die schließlich zur Klärung des Problems führten, wollte d'Alembert 1743 mit der Bemerkung beenden, der Streit sei nur ein Streit um Worte gewesen, was jedoch wenige Jahre später Kant nicht daran hinderte, sich in seiner ersten philosophischen Arbeit *Über die Schätzung der Lebendigen Kräfte* ausführlich weiterhin mit den in diesem Streit vertretenen Auffassungen auseinander zu setzen. Tatsächlich schafften die im Verlaufe des Streits entstandenen Interpretationen von Bewegungsprozessen und die in der

16 Siehe hierzu Damerow u.a. (2004), Kapitel 2, insbesondere 77-82.

17 Zu den vielfältigen Aspekten dieser Kontroverse siehe Hankins (1965), Laudan (1968), Iltis (1970), Papineau (1977), Freudenthal (2002).

Folge geschaffenen begrifflichen Differenzierungen erst die Voraussetzungen für die Formulierung der Erhaltungssätze des Impulses und der Energie, vor deren Hintergrund der Streit im 19. Jahrhundert dem Diktum d'Alemberts folgend allgemein als nur ein Streit um Worte angesehen werden konnte.

Als ein Zwischenergebnis lassen sich an dieser kurzen Übersicht über die Entwicklung des Motion-implies-force-Modells, durch die die Aristotelischen Bewegungslehre in die Bewegungstheorie der klassischen Physik überführt wurde, die Leistungen verdeutlichen, die von einer Theorie mentaler Modelle für das Verständnis der historische Transformation von technischem Wissen zu erwarten sind. Einer Wissenschaftsgeschichte, die die Kategorien zur Beschreibung von Erkenntnisfortschritten einer modernen Wissenschaft wie der klassischen Physik entnimmt, muss der Übergang von der Aristotelischen Bewegungslehre zur Dynamik der klassischen Physik als Korrektur eines zentralen Theorems erscheinen: Die „fehlerhafte“ Aristotelische Annahme, die Geschwindigkeit eines bewegten Körpers sei der verursachenden Kraft proportional, wird durch die in der klassischen Physik „korrekte“ Annahme ersetzt, die Geschwindigkeitsänderung, nicht aber die Geschwindigkeit selbst, werde durch eine Kraft verursacht und sei dieser proportional – nur am Rande sei hier vermerkt, dass gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie der modernen Physik diese Annahme auch nur als eine Näherung gelten kann. Die Transformation der Bewegungslehre im Laufe der Geschichte erscheint einer solchen Wissenschaftsgeschichte als schrittweise Korrektur von Theoremen auf Grund empirischer Erfahrungen im Rahmen eines fiktiven deduktiven Systems, das tatsächlich erst am Ende der Entwicklung als System der klassischen Physik explizit wird und nur aus deren Sicht als Kriterium für richtig und falsch fungieren kann.

Nimmt man dagegen an, dass sich die Schlussfolgerungen, die sich mit Bewegungsvorgängen verbinden, gegenstandsspezifisch im Rahmen historisch sich entwickelnder, mentaler Modelle vollziehen, dann lässt sich schon die Aristotelische Bewegungslehre als eine Theorie deuten, die für den Anwendungsbereich des zentralen mentalen Modells, das in ihr reflektiert wird, adäquate Erklärungen liefert. Zudem lassen sich die Anwendungen dieses mentalen Modells als Entwicklungsbedingungen der Bewegungslehre interpretieren, denn die im Rahmen der Anwendung des mentalen Modells gezogenen Schlussfolgerungen verändern nicht nur die Wissensinhalte, sondern auch deren logische Strukturierung. Transformationsprozesse des Wissens erscheinen so nicht mehr nur als eine Korrektur und Akkumulation von Wissen auf

Grund neuer Erfahrungen. Sie erscheinen vielmehr als die Folge von Entwicklungsprozessen, insbesondere solche der externen Abgrenzung und der internen Differenzierung mentaler Modelle, die im Rahmen vorhandener Strukturen neue Strukturen hervorbringen, um neue Erfahrungen zu integrieren.

NETZWERKE MENTALER MODELLE

FORMEN DER VERNETZUNG MENTALER MODELLE

Wir haben uns, um die Möglichkeiten deutlich zu machen, mit Hilfe einer Theorie mentaler Modelle die historische Transformation von Wissen adäquat zu beschreiben und zu erklären, bisher auf ein einziges Modell konzentriert. Tatsächlich jedoch vollziehen sich Schlussfolgerungen in einem Netzwerk solcher Modelle, die auf verschiedene Weise miteinander kombiniert das Denken bestimmen und durch ihre Interaktion auch ganz andere Entwicklungsmechanismen aufweisen als die bislang thematisierten der Ausgrenzung von Anwendungsbereichen und der inneren Differenzierung einzelner mentaler Modelle.

Um die Darstellung zu vereinfachen und die Grundideen einer Interpretation historischer Entwicklungen im Rahmen einer Theorie mentaler Modelle deutlicher hervortreten zu lassen, blieb beispielsweise unerwähnt, dass die sich ändernden Vorstellungen von den Kräften, die die Bewegung verursachen, selbst wieder das Ergebnis der Veränderung mentaler Modelle waren. Es blieb unerwähnt, dass die Variable der vom Beweger ausgeübten Kraft nicht durch eine isolierte Information instantiiert wurde, sondern durch ein instantiiertes mentales Modell möglicher verursachender Kräfte. Dieses ist ein Beispiel für die wichtigste Form der Vernetzung mentaler Modelle. Die Variablen eines solchen Modells können selbst wieder durch mentale Modelle bestimmt und so in ein Netzwerk mentaler Modelle eingefügt sein. Einer der Entwicklungsmechanismus mentaler Modelle besteht darin, dass ihre Veränderung eine Folge der Veränderung ihrer Variablen durch veränderte mentale Modelle ist.

Eine andere Form der Vernetzung ist die Überlagerung verschiedener mentaler Modelle zu komplexeren Modellen. Beispielsweise können Modelle materieller Einschränkungen von Bewegungen das Motion-implies-force-Modell überlagern. Dies ist etwa bei der Rotation eines

Körpers der Fall, der durch Zwangskräfte der Materialfestigkeit zusammengehalten wird, in ähnlicher Weise beim schwingenden Pendel, das von der Zwangskraft des Fadens auf einer Kugelfläche gehalten wird, sowie bei der Zwangsbewegung eines Körpers entlang vorgegebener Bahnen, etwa bei der Bewegung auf einer schiefen Ebene oder auf einer Schiene.

In allen diesen Fällen kann der Bewegungsvorgang sowohl als eine durch eine Kraft hervorgerufene Bewegung aufgefasst werden, als auch als eine Bewegung, die wegen besonderer materieller Gegebenheiten auf einer bestimmten Bahn erfolgt. Die Bewegung ist also zugleich durch zwei mentale Modelle deutbar. Das eine ist das Motion-implies-force-Modell mit den wesentlichen Variablen *Beweger*, *bewegter Körper* und *ausgeführte Bewegung*. Das zweite ist das Modell einer Zwangsbewegung, beispielsweise einer Rotation mit den Variablen *bewegter Körper* und *Drehachse*. Durch die Überlagerung beider Modelle entsteht ein neues mentales Modell mit eingeschränktem Geltungsbereich und den wesentlichen Variablen *Beweger*, *bewegter Körper*, *Drehachse* und *ausgeführte Bewegung*.

SKIZZE EINER THEORIE DER HISTORISCHEN TRANSFORMATION MECHANISCHEN WISSENS

Die Komplexität der sich aus der Vernetzung von mentalen Modellen ergebenden Möglichkeiten zur Erklärung historischer Entwicklungen des Wissens lässt sich an der wichtigsten Entwicklungslinie verdeutlichen, die von der Entstehung der Mechanik in der Antike und deren Transformation zur klassischen Mechanik der Neuzeit führt.

Mechanisches Wissen ist sehr viel älter als die Entstehung der theoretischen Mechanik. Die frühen Hochkulturen in Mesopotamien und Ägypten beispielsweise verwendeten bereits die meisten der mechanischen Vorrichtungen, die später *einfache Maschinen* genannt wurden.¹⁸ Die schiefe Ebene beispielsweise wird durch die gewaltigen Rampen repräsentiert, die für die Erstellung von Großbauten erforderlich waren. Die Rolle diente der Führung und Umlenkung von Zugseilen beim Transport großer Lasten und für die Realisierung von mechanischen Vorrichtungen wie die der Verschlussmechanismen ägyptischer Königsgräber. Der Hebel existierte in der Form von Gerätschaften wie beispielsweise dem Grabstock, als konstruktives Element von Wein- und Ölpresen oder als Hilfsmittel bei der Fortbewegung und Platzierung

18 Siehe zum Beispiel Russell (1991) und Arnold (1991).

von schweren Lasten. Solchen Werkzeugen ist gemeinsam, dass sie im Widerspruch zur Annahme des Motion-implies-force-Modells, dass gleiche Kräfte gleiche Bewegungen hervorrufen, eine kraft sparende Wirkung haben. Der Gebrauch dieser Werkzeuge durch professionalisierte Handwerker und Ingenieure beruhte auf werkzeug-spezifischen mentalen Modellen, deren Funktion es war, das Verhältnis von eingesetzter und wirkender Kraft zu optimieren.

Mentale Modelle dieser Art können als typisch für ein durch Teilnahme an Arbeitsprozessen erworbenes und tradiertes Handlungswissen von Praktikern angesehen werden, das mit der üblichen abwertenden Kennzeichnung als „empirisch erworbenes Regelwissen“ nur sehr ungenügend theoretisch beschrieben wird. Derartige mentalen Modelle unterscheiden sich von dem diskutierten Motion-implies-force-Modell, das auf universellen Handlungsbedingungen beruht, dadurch, dass sie an historisch sich verändernde materielle Bedingungen gebunden sind, und damit einer andersartigen Entwicklungsdynamik unterliegen als Modelle die durch die historische Veränderung von Rahmenbedingungen nicht oder kaum beeinflusst werden. Die Transformation antiken technischen Wissens in Mittelalter und früher Neuzeit lässt sich weitgehend auf solche Veränderungen von historisch bedingten mentalen Modelle des praktischen Wissens zurückführen.

Auch im Falle von mentalen Modelle, deren Entstehung historisch bedingt ist, haben Philosophen der griechischen Antike die diesen Modellen inhärenten Schlussfolgerungen in einer Metasprache expliziert. Diese Reflexion brachte den Begriff der Mechanik hervor, der die Entstehung eines generalisierten mentalen Modells Kraft sparender Werkzeuge signalisierte. Zugleich entstand die theoretische Mechanik als eigene Disziplin neben der Naturphilosophie.

Das älteste Zeugnis dieser Entwicklung sind die *Mechanischen Probleme* des Aristoteles.¹⁹ Seit dem 19. Jahrhundert wird die traditionelle Zuschreibung dieser Schrift zum Korpus der Schriften des Aristoteles zwar angezweifelt, aber selbst wenn sie von einem seiner Schüler verfasst sein sollte, stellt sie doch zweifellos eine frühere Form der Theoretisierung der mentalen Modelle des Werkzeuggebrauchs dar, als sie aus anderen überlieferten Mechaniktraktaten der Antike, insbesondere denen von Archimedes und Heron, bekannt ist.

19 Zur Datierung dieses Textes siehe Krafft (1970).

Ausgangspunkt für die Theoretisierung des Gebrauchs mechanischer Werkzeuge in der Aristotelischen Schrift war die Erfindung der Waage mit ungleichen Armen, die es durch Identifizierung des Hebels mit dem Balken einer Waage ermöglichte, den Zusammenhang zwischen eingesetzter und wirkender Kraft im Sinne einer Äquivalenz von Ursache und Wirkung verstehbar zu machen. An der Waage mit ungleichen Armen wurden die genauen Bedingungen offenbar, unter denen Kraftdifferenzen durch Längendifferenzen ausgeglichen werden können.²⁰

Das durchgängige Thema der Schrift des Aristoteles ist die bei den meisten der behandelten Probleme gestellte Frage, warum eine kleine Kraft eine große überwinden kann. Bei der Mehrzahl der mechanischen Vorrichtungen, die jeweils im Zentrum eines Problems stehen, wird die Antwort durch eine Identifikation der Vorrichtungen mit einem Hebel gegeben, indem einzelne Elemente als Hebelbalken, als Drehpunkt sowie als eingesetzte und als wirkende Kraft identifiziert werden. Danach wird das gemeinsame Prinzip angewendet, gemäß dem bei der Kreisbewegung der größere Radius sich schneller bewegt als der kleinere, wenn die Bewegung durch die gleiche Kraft hervorgerufen wird. Der mit dem Waagebalken identifizierte Hebel fungiert hier als ein mentales Modell jeder Kraft sparenden Vorrichtung. Als solches integriert das Modell damit alle einzelnen mentalen Modelle mechanischer Vorrichtungen im Rahmen einer generalisierten Wissensstruktur.

Diese Wissensstruktur wurde in der Antike, im Mittelalter und selbst noch in der frühen Neuzeit zum Ausgangspunkt für alle Traktate der theoretischen Mechanik.²¹ Das zentrale Theorem aller dieser Traktate ist das Hebelgesetz, das sich aus einer Ausdifferenzierung des Aristotelischen Prinzips für den Einsatz verschieden großer Kräfte ergibt. Während das Aristotelische Prinzip die verschiedene Wirkung gleicher Kräfte in Abhängigkeit vom Drehpunkt einer Kreisbewegung zum Gegenstand hatte, wurden nun, beginnend mit der Schrift des Archimedes über das Gleichgewicht ebener Flächen,²² aus diesem Prinzip die Bedingungen abgeleitet, unter denen verschiedene Kräfte ins Gleichgewicht gebracht werden können.

20 Damerow u.a. (2002), Kapitel 1.

21 Moody u. Clagett (1952), Clagett (1959), Rose u. Drake (1971).

22 Heath (1953), 189-220.

Diese weitergehende Theoretisierung war von einer weitergehenden Generalisierung begleitet. Eng mit dem Hebelgesetz verbunden ist die Schlussfolgerung des Archimedes, dass jeder Körper einen Punkt besitzt, den so genannten Schwerpunkt, bezüglich dem er sich in jeder Lage im Gleichgewicht befindet. Das mentale Modell des Hebels – genauer, des mit dem Waagebalken identifizierten Hebels – wird damit zu einem auf jeden Körper anwendbaren mentalen Modell, dem *Schwerpunkt-Modell*.

Ein Beispiel für die Leistungsfähigkeit dieses generalisierten Modells bietet seine durch Heron überlieferte, dem Archimedes zugeschriebene komplexe Anwendung zur Bestimmung der Belastung von Säulen, die einen Balken mit oder ohne zusätzlich angehängte Lasten tragen. Das Verfahren zur Berechnung solcher Belastungen beruht auf einer mehrfachen Anwendung des Modells. Im einfachsten Fall, auf den kompliziertere Baukonstruktionen zurückgeführt werden, liegt ein Balken gleichmäßig auf zwei Stützen. Die Gewichte des Balkens und der auf ihr befindlichen Lasten können als im Schwerpunkt konzentriert gedacht werden und jede der Säulen als Drehpunkt eines Hebels, durch den dieses Gewicht auf die jeweils andere Säule übertragen wird.²³

Das eigentliche Anwendungs- und Entwicklungspotential des mentalen Modells des zum Schwerpunkt verallgemeinerten Hebels wurde jedoch erst durch die technologischen Herausforderungen und die damit erweiterten Anwendungen realisiert, die sich den Ingenieuren der Renaissance und der frühen Neuzeit stellten. In Galileis Begründung der Festigkeitslehre, der ersten seiner „zwei neuen Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend“,²⁴ spielte das mentale Modell des verallgemeinerten Hebels eine zentrale Rolle. Die

23 Das Problem, das Gewicht auf zwei Stützen zu bestimmen, wird bereits von Aristoteles in seinen *Mechanischen Problemen* behandelt. Problem 29 (Aristoteles, *Mechanika*, 857b,9–20, Übers. Hett) fragt nach der relativen Belastung der Schultern von zwei Trägern, die eine Last mit Hilfe einer Tragstange tragen, wenn die Last nicht in der Mitte der Stange aufgehängt ist. Die Antwort wird aus der Interpretation der Tragstange als Hebel mit dem Drehpunkt im Aufhängepunkt der Last abgeleitet. Aus moderner Sicht ist diese Lösung kritisiert worden, siehe Heath (1949), 252f. Heron (*Mechanica* 1,25,8-13; Übers. Nix u. Schmidt), beruft sich bei seiner ausführlichen Behandlung zahlreicher Varianten des Problems auf eine Schrift des Archimedes mit dem Titel *Buch der Stützen*, die uns nicht erhalten und über die nichts Näheres bekannt ist. Er betont, dass er nur aus der Schrift übernimmt, was für den Lernenden zur Ausführung der Berechnungen nützlich ist. Tatsächlich fehlt in seiner Darstellung weitgehend die Begründung der Verfahren, so dass sich deren theoretische Rückführung auf das Hebelgesetz nicht mit Sicherheit rekonstruieren lässt.

24 Galilei (1973). Die Festigkeitslehre ist Gegenstand der ersten beiden Tage der Unterredungen. Zur historischen Einordnung von Galileis Theorie der Materialfestigkeit siehe Portz (1994).

Querbelastbarkeit eines einseitig befestigten Balkens wurde von ihm aus seiner Zugfestigkeit dadurch abgeleitet, dass er den Balken als einen Winkelhebel auffasste, dessen Drehpunkt an der Unterkante der Bruchstelle liegt. Gemäß diesem Modell greifen an den gedachten Hebel im rechten Winkel zwei Kräfte an, die Belastung und die Zugfestigkeit des Materials. Die Belastung bestimmte Galilei als das im Schwerpunkt von Balken und angehängtem Gewicht vereinigt gedachte Gesamtgewicht. Die Zugfestigkeit stellte sich Galilei als eine im Schwerpunkt der Bruchfläche angreifende Flächenkraft vor, deren Größe empirisch bestimmt werden kann. Sind beide Kräfte im Gleichgewicht, ist die Grenze erreicht, an der der Balken bei weiterer Belastung brechen würde.

Neben neuartigen Anwendungen überlieferter mentaler Modelle, für die Galileis Festigkeitslehre steht, entstanden bereits im Mittelalter und vermehrt in der frühen Neuzeit in vielen Wissensbereichen auch neue mentale Modelle wie zum Beispiel das der Momentangeschwindigkeit und das einer beschleunigten Bewegung, die sich durch eine wechselnde Momentangeschwindigkeit auszeichnet. Die mentalen Modelle der Antike, von denen die Entstehung der klassischen Physik ihren Ausgang nahm, wurden im Zuge der Entstehung der klassischen Mechanik im 17. Jahrhundert, dem Zeitalter Newtons, und im 18. Jahrhundert, dem Zeitalter seiner Nachfolger, mit einem immer mehr erweiterten Anwendungshorizont konfrontiert. Sie wurden aber in der Auseinandersetzung mit herausfordernden Objekten wie den Feuerwaffen, dem Pendel und den elastischen Federn auch zunehmend mit neuen mentalen Modellen vernetzt. Das vorläufige Ende dieses Prozesses war durch die Entstehung der analytischen Mechanik gekennzeichnet, deren Grundlage ein neuartiges System mentaler Modelle bildete.

Eines der zentralen Modelle der analytischen Mechanik ermöglichte es beispielsweise, das Naturgeschehen auf Minimalprinzipien zurückzuführen. Galilei machte sich bei seiner Arbeit über die Form einer hängenden Kette bereits die Einsicht zunutze, dass diese eine Form annimmt, bei der ihr Schwerpunkt sich am tiefsten möglichen Punkt befindet.²⁵ Fermat formulierte das Minimalprinzip, dass sich ein durch Medien gebrochener Lichtstrahl immer den Weg mit der kürzesten Laufzeit sucht. So unterschiedlich der Gegenstand in beiden Fällen zu

25 Diese Einsicht Galileis findet sich nicht in seinen veröffentlichten Schriften. Erst kürzlich wurde in seinen Manuskripten entdeckt, dass Galilei das Minimalprinzip kannte und geschickt zu nutzen verstand. Siehe Renn u.a. (2000) 374-383.

sein scheint, so folgen sie doch dem gleichen Modell, das von Maupertuis als *Prinzip der kleinsten Wirkung* bezeichnet wurde. Nach diesem, zunächst sehr abstrakten Modell strebt die Natur stets danach, möglichst sparsam vorzugehen.

In der Folgezeit wurde dieses Prinzip auf immer mehr Anwendungsbereiche konkretisiert und erhielt, vor allem durch die Arbeiten von Euler und Lagrange, eine präzise mathematische Form. Als *Hamiltonsches Prinzip* wurde es zu einem allgemeinen Modell physikalischer Systeme, aus dem sich grundlegende Gesetze der klassischen Physik deduzieren lassen.

In ähnlicher Weise wie die mentalen Modelle der antiken Mechanik die Entstehung der klassischen Mechanik in der frühen Neuzeit bestimmten, determinierten die mentalen Modelle der analytischen Mechanik die florierenden analytischen Wissenschaften des 19. und zum Teil auch die des 20. Jahrhunderts. Das mentale Modell des Prinzips der kleinsten Wirkung überlebte selbst die Revolution, aus der die auf Quanten- und Relativitätstheorie gegründete moderne Physik hervorging. So lässt sich beispielsweise der Aufbau stabiler Atome heute daraus erklären, dass bei ihnen die Energie ihres Grundzustands minimal ist, und die Geodäten der Relativitätstheorie, auf denen sich die Körper in gekrümmten Räumen bewegen, sind ebenso wie die Geraden der klassischen Physik Kurven kürzester Entfernung.

Diese kurze Skizze einer Erklärung der Entwicklung des mechanischen Wissens vom impliziten Wissen der praktischen Mechanik bis zur Ablösung der Grundbegriffe der klassischen Mechanik durch die relativistischen Begriffe von Raum, Zeit und Materie der modernen Physik zeigt die Bedeutung vergleichsweise einfache mentaler Modelle, die solche Entwicklungen übergreifende. Den Ausgangspunkt dieser Skizze bildete die Frage, wie technisches Wissen historisch transferiert wird. Die Konzeption mentaler Modelle bietet einen neuen methodischen Zugang zur Beantwortung dieser Frage, weil mentale Modelle kognitive Instrumente der Transformation solchen Wissens darstellen. Die Leistungsfähigkeit dieses methodischen Ansatzes wird daran zu messen sein, inwieweit es gelingt, die Kontinuitäten und Diskontinuitäten der Entwicklung des technischen Wissens von der Antike zur Neuzeit im einzelnen auf Mechanismen der Transformation mentaler Modelle zurück zu führen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Aristoteles (1980): Aristoteles, „Mechanical Problems“, in *Minor Works*, Übers. Hett, Cambridge, Mass.
- Arnold (1991): Dieter Arnold, *Building in Egypt: Pharaonic Stone Masonry*, New York.
- Besnard (1989): Philipp Besnard, *An Introduction to Default Logic*, Berlin.
- Brewka (1991): Gerhard Brewka, *Nonmonotonic Reasoning: Logical Foundations of Commonsense*, Cambridge.
- Charniak (1972): Eugene Charniak, *Toward a Model of Children's Story Comprehension*, Technical Report 266, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- Clagett (1959): Marshall Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages*, Madison.
- Clement (1983): John Clement, „A Conceptual Model Discussed by Galileo and Used Intuitively by Physics Students“, in: Dendre Gentner u. Albert L. Stevens (Hgg.), *Mental Models*, Hillsdale, 325-339.
- Damerow u.a. (2004): Peter Damerow, Gideon Freudenthal, Peter McLaughlin u. Jürgen Renn, *Exploring the Limits of Preclassical Mechanics – A Study of Conceptual Development in Early Modern Science: Free Fall and Compounded Motion in the Work of Descartes, Galileo, and Beeckman*, 2. Aufl., New York.
- Damerow u. Lefèvre (1980): Peter Damerow u. Wolfgang Lefèvre, „Die wissenschaftshistorische Problemlage für Hegels ‚Logik‘“, in: W. R. Beyer (Hg.), *Hegel-Jahrbuch 1979*, Köln, 349-368.
- Damerow u.a. (2002): Peter Damerow, Jürgen Renn, Simone Rieger u. Paul Weinig, „Mechanical Knowledge and Pompeian Balances“, in: Jürgen Renn and Giuseppe Castagnetti (Hgg.), *Homo Faber: Studies on Natur, Technology, and Science at the Time of Pompeii*, Rom, 93-108.
- Davis (1984): Robert B. Davis, *Learning Mathematics: The Cognitive Science Approach to Mathematics Education*, London.
- Dijksterhuis (1956): E. J. Dijksterhuis, *Die Mechanisierung des Weltbildes*, Berlin.
- Drabkin (1938): Israel Edward Drabkin, „Notes on the Laws of Motion in Aristotle“, *American Journal of Philology* 59, 60-84.
- Fillmore (1976): Charles J. Fillmore, „Frame Semantics and the Nature of Language“, *Annals of the New York Academy of Sciences: Conference on the Origin and Development of Language and Speech* 280, 20-32.
- Fillmore (1985): Charles J. Fillmore, „Frames and the Semantics of Understanding“, *Quaderni di Semantica* 6, 222-254.
- Freudenthal (2002): Gideon Freudenthal, „Perpetuum Mobile: The Leibniz-Papin Controversy“, *Studies in History and Philosophy of Science* 33, 573-637.
- Galilei (1973): Galileo Galilei, *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*, Darmstadt.
- Gentner u. Stevens (1983): Dendre Gentner u. Albert L. Stevens (Hgg.), *Mental Models*, Hillsdale.
- Hankins (1965): Thomas L. Hankins, „Eighteenth-Century Attempts to Resolve the Vis Viva Controversy“, *ISIS* 56, 281-297.
- Heath (1949): Thomas Little Heath, *Mathematics in Aristotle*, Oxford.
- Heath (1953): Thomas Little Heath (Hg.), *The Works of Archimedes*, New York.

- Heron (1900): Heron von Alexandria, *Mechanik und Katoptrik*, Übers. Nix u. Schmidt, Leipzig.
- Iltis (1970): Carolyn Iltis, „D'Alembert and the Vis Viva Controversy“, *Studies in History and Philosophy of Science* 1, 135-144.
- Johnson-Laird (1983): Philip N. Johnson-Laird, *Mental Models*, Cambridge Mass.
- Johnson-Laird (1989): Philip N. Johnson-Laird, „Mental Models“, in: M. I. Posner, *Foundations of Cognitive Science*, Cambridge Mass.
- Krafft (1970): Fritz Krafft, *Dynamische und statische Betrachtungsweise in der antiken Mechanik*, Wiesbaden.
- Kuhn (1962): Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago.
- Kuhn (1967): Thomas S. Kuhn, *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt a. M.
- Laudan (1968): Larry Laudan, „A Postmortem on the Vis Viva Controversy“, *ISIS* 59, 130-143.
- Lehrer u. Kittay (1992): Adrienne Lehrer u. Eva Feder Kittay (Hgg.), *Frames, Fields, and Contrasts: New Essays in Semantic and Lexical Organization*, Hillsdale.
- Maier (1949): Anneliese Maier, *Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert*, Rom.
- Maier (1952): Anneliese Maier, *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft*, Rom.
- McCloskey (1983): Michael McCloskey, „Naive Theories of Motion“, in: Dendre Gentner u. Albert L. Stevens (Hgg.), *Mental Models*, Hillsdale.
- Minsky (1975): Marvin Minsky, „A Framework for Representing Knowledge“, in: Patrick Henry Winston (Hg.), *The Psychology of Computer Vision*, New York.
- Minsky (1985): Marvin Minsky, *The Society of Mind*, New York.
- Minsky (1990): Marvin Minsky, *Mentopolis*, Stuttgart.
- Newton (1999): Isaac Newton, *Die mathematischen Prinzipien der Physik*, Berlin.
- Papineau (1977): David Papineau, „The Vis Viva Controversy“, *Studies in History and Philosophy of Science* 8, 111-142.
- Piaget (1978): Jean Piaget, „Die historische Entwicklung und die Psychogenese des Impetusbegriffs“, in: Gerhard Steiner (Hg.), *Die Psychologie des 20. Jahrhunderts*, Band 7, Piaget und die Folgen, Zürich, 64-73.
- Piaget u. Garcia (1989): Jean Piaget u. Rolando Garcia, *Psychogenesis and the History of Science*, New York.
- Portz (1994): Helga Portz, *Galilei und der heutige Mathematikunterricht: Ursprüngliche Festigkeitslehre und Ähnlichkeitsmechanik und ihre Bedeutung für die mathematische Bildung*, Mannheim.
- Renn u.a. (2000): Jürgen Renn, Peter Damerow u. Simone Rieger, „Hunting the White Elephant: When and how did Galileo discover the law of fall?“, *Science in Context* 13, 299-419.
- Rose u. Drake (1971): Paul Lawrence Rose u. Stillman Drake, „The Pseudo-Aristotelian ‚Question of Mechanics‘ in Renaissance Culture“, *Studies in the Renaissance* 18, 65-104.
- Russell (1991): John Malcolm Russell, *Sennacherib's Palast without Rival at Nineveh*, Chicago.
- Überweg (1882): Friedrich Überweg, *System der Logik und Geschichte der logischen Lehren*, 5. Aufl., Bonn.
- Wilson u. Keil (1999): Robert A. Wilson u. Frank C. Keil (Hgg.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, Cambridge Mass.

Wolff (1978): Michael Wolff, *Geschichte der Impetustheorie: Untersuchungen zum Ursprung der klassischen Mechanik*, Frankfurt a. M.

Semantic Networks: A Tool for Investigating Conceptual Change and Knowledge Transfer in the History of Science

Malcolm D. Hyman, Max Planck Institute for the History of Science

Over the past four decades, historians of science have devoted much attention to certain problematic aspects of terms such as *mass* and *force*. The usage and sense of such terms varies between theories, and the meaning of such terms resists explication in language belonging to a different theoretical context. In what follows, we shall consider these phenomena — not in the light of philosophy or psychology — but from a *linguistic* perspective. In this paper, we suggest that *semantic networks* serve as a useful model for understanding the terminology of scientific texts, and we introduce some computational methods that may be of value for the study of conceptual change in the history of science. We then consider: the nature of relations that exist between nodes in a network; the ability of lexicalizations to serve as proxies for concepts; and the application of semantic network analysis to the study of a diachronically extended corpus of texts intended for investigating long-term developments in the history of mechanics. It is our hope that the approaches outlined here may contribute to an understanding of the conceptual structure of mechanical knowledge and its transformations.

1. CONCEPTS, LEXICALIZATIONS, FIELDS, AND MEANING

A single concept may be represented in language in various ways. We call these ways *lexicalizations*. Conversely, a single lexicalization may represent multiple concepts, especially when it occurs in different contexts. As a simple example, we consider two short (English language) texts that deal with FORCE.¹ The first is a sociology paper that discusses police brutality in the United States. The second is a physics paper that deals with the W boson and

¹ We use small capitals to indicate concepts. Lexicalizations are italicized if they are in the Roman alphabet; otherwise they are unmarked.

the weak force. We expect that *force* will mean different things in the two papers. But how do we evaluate or verify this intuition? Using automatic computational techniques, we can find the most frequent lexical *associates* of *force* in the two papers. Figures 1 and 2 represent these associations graphically. In both figures *force* is connected to its five most frequent associates, and these associates are in turn connected to their most frequent associates. The association lines reflect information that is particular to the relevant content domain of each text. *Force*₁ that is *excessive* is *persistently* used against *black males* by the *police*.² The *weak* and *strong* nuclear *forces*₂ are two of the fundamental interactions in physics; the W and Z *bosons* are the quanta of the *vector fields* that mediate the *weak force*₂.

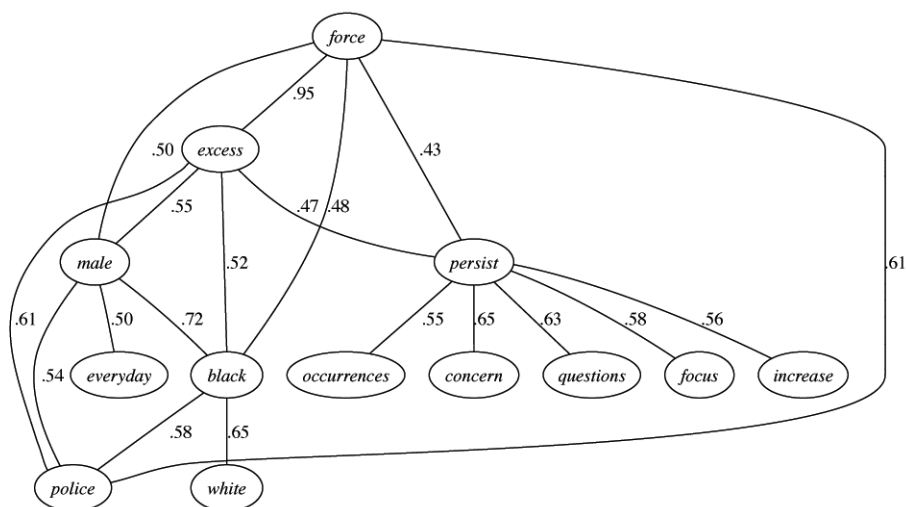


Fig. 1: Associates of *force*₁

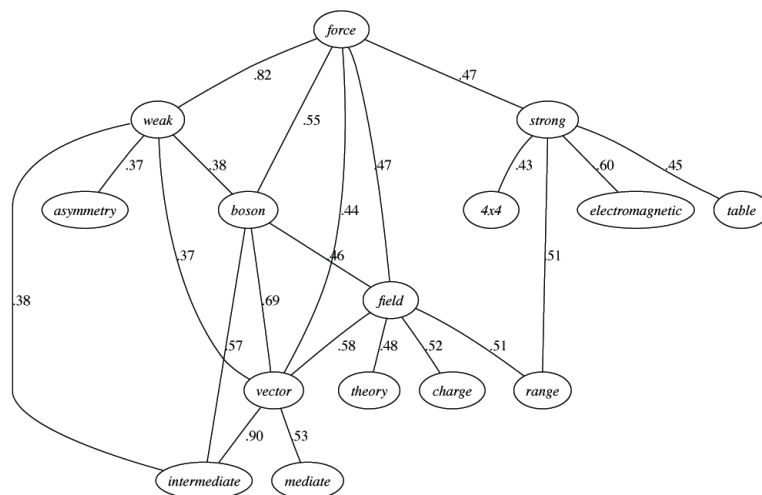


Fig. 2: Associates of *force*₂

2 In the analysis, morphologically related forms such as *persist*, *persistent*, and *persistently* have been conflated according to a modified version of Porter's (1980) algorithm.

The set of lexicalizations applied within a particular content domain is termed a *lexical field* (Lyons 1977, 250–269; cf. Barsalou 1992, 63).³ Lexicalizations within the field participate in relations of contrast and affinity with one another. These relations are both paradigmatic (e.g. synonymy, antonymy, hyponymy, meronymy) and syntagmatic (e.g. agent, patient, instrument, source). In figures 1 and 2 we see both types of relations: paradigmatic (the *strong* and *weak nuclear forces*₂ are exclusive; *black* and *white* are antonyms) and syntagmatic (*police* are the agents that inflict *force*₁ upon *black males*, the patients; W and Z *bosons* mediate the *weak force*₂). Such relations of contrast and affinity are part of our lexical and conceptual knowledge and are constitutive of the *meaning* of lexicalizations within a field. Lexicalizations can be viewed as the *nodes* of a *semantic network*; these nodes are connected by *associative links* that correspond to the paradigmatic and syntagmatic relations.⁴

On this account, the meaning of a lexicalization is a function of its associative links with other lexicalizations (cf. Kuhn 2000, 62–63; Chaffin 1992, 254). Meaning is a holistic property of the semantic network and ceases to be defined in the absence of the network. Obviously, however, there is a difference between meaning in the abstract (that is, divorced from a particular context) and meaning in a context. Here we distinguish, in the network model, between potential and actual meaning. The potential meaning of a word is given by its position within the network: by the words with which it is associated, and the words with which those words are in turn associated, and so on. The actual meaning of a word, however, is given by “the nodes that have actually been activated in the particular context of use” (Kintsch 1998, 413). The actual meaning, then, is related to the potential meaning, but it is determined by the meanings of the words in the syntagmatic context and by the architecture of human linguistic and conceptual processing.

Some links are more important than others. The importance of an inbound link to the meaning of the lexicalization is termed its *criteriality* (Collins & Loftus 1975, 408). The numbers that appear along the edges of our graphs are surrogates of such criterialities; they will be further explained below, section 3.

3 Here we follow Lyons in distinguishing between *lexical field* and *conceptual field* (1977, 253). The distinction is related to that between a lexical memory and a semantic memory for concepts (Collins & Loftus 1975, 411).

4 The notion that memory is associative in nature is a commonplace in psychological literature of the twentieth century (Quillian 1968, 218; Collins & Loftus 1975). We see the notion in inchoate form as early as Aristotle’s *De Memoria* (cf. Cole et al. 2006, 21).

2. FORCE IN (PS.-)ARISTOTLE

We turn now to some historical material, namely, the Aristotelian vocabulary related to the concept FORCE. We concentrate on passages from the *Problemata Mechanica*, a Peripatetic text of unknown authorship that exercised considerable influence on mechanical thinking during the sixteenth and seventeenth centuries (Drake & Drabkin 1969, 11, 14–15). In the relevant lexical field we find three lexicalizations, none of which appear in interchangeable contexts: *ἰσχύς*, *ῥοπή*, and *δύναμις*. The distinction between these lexicalizations resembles nothing that is familiar from Newtonian or contemporary mechanics.

The basic term — and the most frequent — is *ἰσχύς*. It is the closest analogue of the later Arabic *quwwat* and Latin *vis*, with all three terms sharing an ordinary language meaning ‘physical strength’. Alongside *ἰσχύς* (20 occurrences), we find also:

ῥοπή (11 occurrences), the o-grade noun corresponding to *ῥέπω* ‘incline’ (13 occurrences) and

δύναμις (9 occurrences), the standard Aristotelian term for POTENTIAL, which, however, acquires a specialized usage in the context of analyzing motion.

To give a sense of the difficulty posed by this terminology, we might consider that a modern translator (Hett, in the Loeb) renders *ῥοπή* variously as *weight*, *swing*, and *influence*; and *δύναμις* as *power*, *strength*, and *force*.

If we study the *Problemata*, it becomes evident that *ῥοπή* is intrinsically related to the balance-lever model; it refers to the inclination of the beam and the cause of this inclination.⁵ Thus *ῥοπή* involves *disequilibrium* of the balance. ‘*Ῥοπή* is closely associated with weight and results in vertical motion *κατὰ φύσιν* (*per naturam*); by contrast, horizontal motion for Aristotle must always be forced *παρὰ φύσιν* (*contra naturam*).⁶ In analyzing the wheel (for example, of a

5 On the balance-lever model, see Damerow et al. (2002).

6 See esp. 858a14–15 where it is hypothesized that the horizontal motion of a projectile is caused by the *ἰσχύς* of its mover, whereas its downward motion is caused by *ῥοπή* (*ἢ διὰ τὴν ῥοπήν, εἰάν κρείττων ἢ τῆς ἰσχύος τῆς ῥιψάσης*). The fundamental study of the terminology here is Krafft (1970, 47–78); see also Micheli (1995, 64–65) and Carteron (1923, 269–270). Krafft (1970, 147) sees a precedent for the Aristotelian conception of *ῥοπή* in Archytas of Tarentum, but he makes use of a spurious fragment, and his argument is to be regarded with skepticism (Huffman 2005, 78 n. 13).

cart; or a roller upon which a heavy object is moved), the author applies the model of the balance (851b15–852a13). At rest, the wheel touches the ground at a single point; the diameter drawn through that point is vertical and divides the weight of the wheel equally. When the wheel is turned, the weight becomes so distributed that there is more weight (or, to put it differently, greater *ρόπή*) in the direction the wheel is rolling — and thus it is easier to keep pushing it in that direction.

As for *δύναμις* anything so termed should be a CAPACITY — in other words, not yet actualized, in which case it would be an *ἐντελέχεια* or *ἐνέργεια*. While this may be a potential FORCE, it seems at other times to be closer to POWER, which is a concept (from a modern standpoint) related to ENERGY, and which can be exhausted. “[An object in motion] stops when that which is pushing no longer has power to act so as to push the thing in motion, and when the weight of the thing in motion causes (downward) inclination greater than the *power* of that which is pushing forward” (858a20–23). At *Physics* 249b27 ff. Aristotle defines *δύναμις* (POWER) in terms of weight, distance, and time, a relation we might schematize as $P = wd/t$ (cf. Graham 1999, 171). Still, *δύναμις* is not univocal, and even in a single passage both the POWER sense and the FORCE sense may be active.

The foregoing description is of a traditional philological character. Some of the conclusions we have reached, however, are already evident in an automatically produced visualization of the semantic network of the *Problemata*. In the case of *ρόπή* (figure 3) we see strong associations with *εὐκίνητος* ‘easy to move’ (5 occurrences) and *δυσκίνητος* ‘hard to move’ (2 occurrences), terms related to MECHANICAL ADVANTAGE, a highly salient feature of the lever model. There are also direct and indirect links with *ρέπω*, the cognate verb of *ρόπή*. (It is important to note that this association arises via automatic induction from contiguity data; there is no knowledge of derivational morphology built in to the software that produces the model.) The verb *ρέπω*, we can observe, is strongly associated with the adverbs *ἄνω* ‘upwards’ (7 occurrences) and *κάτω* ‘downwards’ (9 occurrences). This affinity reflects the fact that *ρόπή* involves *vertical* motion *κατὰ φύσιν*. The associates of *δύναμις* (figure 4) register its bivalence FORCE and POWER. The associates *ἄνθρωπος* ‘human’ (3 occurrences), *οἴαξ* ‘handle of the rudder’ (2 occurrences), and *πλοῖον* ‘ship’ (14 occurrences) stem from the problem in which the rudder of a ship is modeled as a lever (850b28–851a37). A single *person* (*ἄνθρωπος*) is afforded sufficient mechanical advantage that by moving the *handle of the rudder* (*οἴαξ*) he is able to to

turn the entire *ship* (πλοῖον). The associate παύω ‘stop’ (2 occurrences) relates to the POWER sense and to the Aristotelian idea that projectile motion ceases when the power associated with the force presumed to move the object is exhausted (858a17–23). Finally, the associate μέγεθος ‘quantity’ is connected with both FORCE and POWER senses; these attributes are conceived of as QUANTITIES rather than QUALITIES (cf. Bottechia Dehò 2000, 38; Krafft 1970, 75; Carteron 1923, 17).

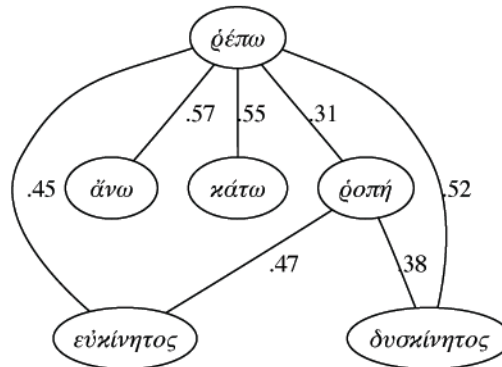


Fig. 3: Associates of *ρόπη*

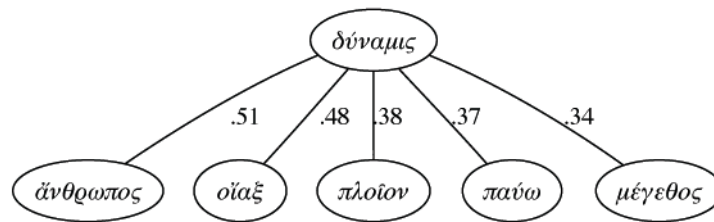


Fig. 4: Associates of *δύναμις*

3. COMPUTATIONAL TOOLS FOR SEMANTIC ANALYSIS

We step back now from this illustrative discussion of Aristotelian terminology and consider some automatic computational techniques related to the view of semantics expounded in section 1. The utility of this view may not be immediately apparent. We should hardly wish to abandon the notion of an essentialist *Grundbedeutung* only to fall back on vague effusions concerning “semantic holism”. Yet with computational techniques we are able quickly and easily to model the semantic network associated with a particular content domain. The resulting visualization of a semantic network is, of course, an artifact that itself demands interpretation. Yet the automatically generated model may serve a valuable function by providing external

confirmation for intuitions we have achieved via another point of departure — and it may also give us a “bird’s-eye view” of the complete set of lexicalizations encountered in a given text or corpus. We attend now to the computational details.

Our method relies on a technique called Latent Semantic Analysis (LSA), which arose in the Information Retrieval (IR) community in the 1990s (Landauer et al. 1998). The technique allows for the automatic, computational construction of a *semantic space* in which lexicalizations correspond to vectors, and the angle between vectors is a measure of the *semantic relatedness* of the corresponding lexicalizations. We begin with a matrix, the columns of which correspond to semantic units we call *containers* (these are typically sentences of one or more texts, but they are actually arbitrarily sized units, where the size is determined by our immediate needs), and the rows to individual lexicalizations. In each cell is the number of occurrences of the given lexicalization in the given container. We then transform this matrix by substituting for the raw frequencies *log-entropy weights*. This preprocessing step is intended (in psychological terms) to reflect the growth function of simple learning and the conditioning rules related to word stimuli (Landauer & Dumais 1997, 216). We now perform a dimensionality reduction on the data, which eliminates dependent dimensions and induces semantic structure that is *latent* in the data. Here we use a mathematical method known as Singular Value Decomposition (Jackson 2003, 189–196). From the resulting matrices of singular vectors and singular values, we can produce a least-squares best approximation of the original matrix for a given dimensionality (Berry et al. 1995). A vector space of several hundred dimensions has been demonstrated empirically to be well-suited for representing the relations between lexicalizations. In this space, it is easy to compute the cosine of the angle between any two lexicalization vectors, which we take as a measure of the strength of association between the pair (or, in other words, as an approximation of the criteriality of the link).

In order to visualize the semantic space, we set a threshold θ and an upper bound n , such that we may define the *immediate neighbors* of a lexicalization w as: 0 – n lexicalizations whose cosine similarity to w is $\geq \theta$. Each of these lexicalizations becomes a node in the semantic network graph, and each shares an edge with the node w . We call the subgraph consisting of w and the immediate neighbors of w the *immediate lexical neighborhood* of w . By generating a graph based on a threshold function from the high-dimensional continuous vector space, we sacrifice a considerable amount of the information contained in the LSA model. We gain, however, a

readily comprehensible visualization that represents semantic distance in part by the number of edges encountered in node traversal. The following discussion involves the neighborhood for *ζυγόν* ‘balance’ in the *Problemata Mechanica* (figure 5).

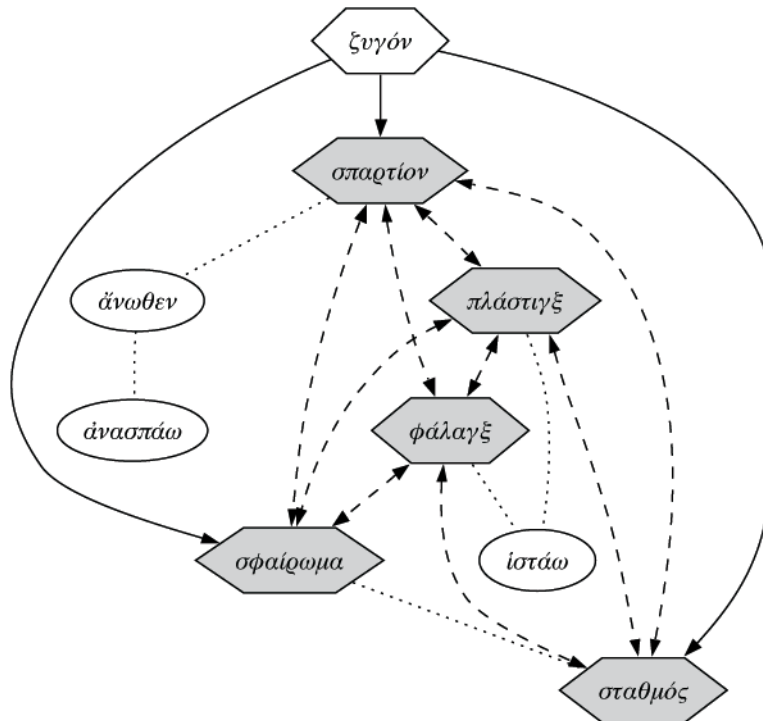


Fig. 5: Semantic neighborhood of *ζυγόν*

4. SEMANTIC RELATIONS

Traditionally, the edges (also called “arcs” or “associative links”) of semantic networks have been labeled with relations, such as IS-A-KIND-OF or IS-A-PART-OF (Chaffin 1992, 254). Fully labeled in such a way, the semantic network becomes equivalent to an *ontology*, a formal structure for representing domain knowledge (Uschold & Gruninger 1996; Morville 1995, 127–134). (Even so constructed, it still falls considerably short of an adequate system for representing human behavior: among the missing constituents are “schema-like structures with default-slots and procedural knowledge that links cognition and action” (Kintsch 1998, 412).⁷) Our automatically constructed networks are simpler structures and have unlabeled edges.⁸ Yet

⁷ For an elaborated account of frame-based semantics, see Barsalou (1992).

it is interesting to note that very many edges can be labeled easily with terms from a standard repertoire. In the lexical neighborhood of *ζυγόν*, five nodes denote parts. Since these nodes are not all connected directly to *ζυγόν*, we must distinguish two relations: (1) the IS-A-PART-OF relation (= meronymy), to label an edge that connects a part directly to *ζυγόν*; (2) the IS-A-CO-MERONYM-WITH relation, used to label an edge that connects a part to another part. In figure 5 the semantic relations are indicated visually (by hand coding): parts of the balance (*σπαρτίον* ‘cord from which the balance is suspended’, *πλάστιγξ* ‘scale pan’, *φάλαγξ* ‘arm’, *σφαίρωμα* ‘round weight’, *σταθμός* ‘weight’) are gray-filled hexagons, and edges of the IS-A-PART-OF type are solid, whereas edges of the IS-A-CO-MERONYM-WITH type are dashed.

That the relation between nodes connected by an edge so often belongs to a recognizable paradigmatic category suggests that the semantic analysis has induced similarity and contrast relations from contiguity relations. The raw data for the analysis consist solely of contiguity (syntagmatic) relations: word collocations. Yet what frequently emerge in the network diagram are standard paradigmatic relations such as ANTONYMY (*μέγας* ‘large’ : *μικρός* ‘small’; *έκτός* ‘outside’ : *έντός* ‘inside’), SYNONYMY (*ήρεμία* ‘rest’ : *στάσις* ‘rest’; *χωρέω* ‘change position’ : *μετακινούμαι* ‘change position’), and PART-WHOLE (*άψίς* ‘rim’ : *τροχός* ‘wheel’; *ύπομόχλιον* ‘fulcrum’ : *μοχλός* ‘lever’). One might compare the fact that children during their second year shift from relying on syntagmatic/contiguity relations and develop a lexicon that is organized around paradigmatic lexical-semantic relations, which have presumably developed out of the earlier syntagmatic relations (Jaeger 2005, 311–384; Markman 1989, 21–26; Quillian 1968, 234).

That some edges (e.g. *σπαρτίον* : *άνωθεν*; *φάλαγξ* : *ίστάω*) cannot be labeled with a relation type drawn from a small set of standard (lexicalized) types is not an aberration; rather, it reflects the fundamental psychology of semantic relations, which encompasses *relation ambiguity* (more than one relation may be identified between a pair) and *relation creativity* (novel relations may be identified) (Chaffin & Herrmann 1988). In fact, the relations are quite perspicuous. The *scale* is suspended *from above* (*άνωθεν*) by a *cord* (*σπαρτίον*). The *scale* is used to *weigh* (*ίστάω*) things, which lie in the *scale pan* (*πλάστιγξ*), suspended from the *arm* (*φάλαγξ*).

8 The edge types cannot easily be induced from the data. Moreover, as Chaffin (1992) has shown, semantic relations are themselves prototypical concepts with complex internal structure. Not all such relations are lexicalized (Chaffin 1992, 265–268).

5. LEXICALIZATIONS AS PROXIES FOR CONCEPTS

In the history of science, however, we are concerned not with *lexical* structure but with *conceptual* structure. These structures are related bidirectionally: language reflects the world of concepts, and the conceptual world is built at least in part through language. In studying historic scientific texts, words serve as *proxies* for concepts. This is not to say that concepts are necessarily acquired through language (they may, for instance, be acquired through a practitioner's direct experience), or that concepts are fundamentally linguistic — although concepts are indeed bound to language in a close way (Markman 1989, 37). But semantic analysis can provide a starting point for the process of reconstructing the conceptual systems reflected in a text. The semantic network approach shifts the focus from *words in isolation* to *words in relation*; thus it offers a method better suited to the study of cognition and conceptual change than the method exemplified by countless philological studies of individual terms.

6. INVESTIGATING LONG-TERM DEVELOPMENTS IN MECHANICS

The next phase of this research project is to apply the techniques described here to the extensive commentary literature on the *Problemata* that appeared roughly during the last quarter of the sixteenth century and the first of the seventeenth. The following texts are available in digitized form that facilitates analysis:

Alessandro PICCOLOMINI, *Parafrasi di Monsignor Alessandro Piccolomini arcivesco di patras, sopra le mecaniche d'Aristotile*, Rome, 1582.

Henri de MONANTHEUIL, *Aristotelis Mechanica, Græca, emendata, Latina facta, & Commentariis illustrata*, Paris, 1599.

Giuseppe BIANCANI, *Aristotelis Loca Mathematica ex universis ipsius Operibus collecta & explicata*, Bologna, 1615.

Bernardino BALDI, *In Mechanica Aristotelis Problemata Exercitationes*, Mainz, 1621.

Giovanni di GUEVARA, *In Aristotelis Mechanicas Commentarii*, Rome, 1627.

In addition, we have available seminal treatises on mechanics from this period — significantly influenced by the content of the *Problemata* —, including most notably Girolamo Cardano’s *Opus Novum de Proportionibus* (1570), Guidobaldo del Monte’s *Mechanicorum Liber* (1577) and Galileo’s manuscript *De Motu Antiquiora* (ca. 1590). This body of texts (roughly 1,800 pages in extent) offers an excellent opportunity for exploring, by means of semantic network analysis, the developing tensions that finally gave rise to the new “classical mechanics” inaugurated by Newton’s *Principia* in 1687.

The work described here is closely integrated with several larger research frameworks. First, it forms a part of sub-project A6 of the SFB 644 »Transformationen der Antike«, entitled “Weight, Energy and Force: Conceptual Structural Changes in Ancient Knowledge as a Result of its Transmission”. Second, it is closely integrated with the working group “Mental Models in the History of Mechanics” at the Max Planck Institute for the History of Science. Third, our work makes use of digital texts and tools developed by the Archimedes Project, an international German-American venture aimed at creating an open digital research library that would allow scholars new and more efficient means of studying long-term developments in the history of mechanics. In much the same way that computational tools have revolutionized many branches of science (e.g., computational molecular biology), we expect that information science techniques will have a salutary effect on research in the historical disciplines (Abbott 2001).

We believe that by studying the semantic networks derived from these texts we can gain insights into the conceptual change that results in a new mechanical world-view. Within the context of semantic network theory, semantic change is a concrete and readily investigable phenomenon, inasmuch as it is just observable change within the network structure. By examining the transformation of the semantic domain corresponding to mechanics, we will be able better to articulate the transformation of mechanical concepts. This type of analysis is not intended as an alternative to the high-level description of scientific history by means of mental models; rather, it serves as a preliminary for that description, and it constitutes a new and powerful way of locating the semantic nexuses that correspond to conceptual structures of interest and of identifying the critical points where concepts conflict, compete, evolve, and are replaced.⁹

⁹ I am immensely grateful to Peter Damerow, Phoebe Pettingell, Matthias Schemmel, Mark Schiefsky, and Ludmila Selemeneva for their comments on drafts of this paper.

BIBLIOGRAPHY

- Abbott (2001): Alison Abbott, "Digital History", *Nature* 409, 556–557.
- Barsalou (1992): Lawrence W. Barsalou, "Frames, Concepts, and Conceptual Fields", in: Adrienne Lehrer and Eva Feder Kittay (Eds.), *Frames, Fields, and Contrasts: New Essays in Semantic and Lexical Organization*, Hillsdale, NJ, 21–74.
- Berry et al. (1995): Michael W. Berry, Susan T. Dumais, and Gavin W. O'Brien, "Using Linear Algebra for Intelligent Information Retrieval", *SIAM Review* 37(4), 573–595.
- Bottechia Dehò (2000): Maria Elisabetta Bottechia Dehò, *Aristotele, Problemi meccanici*, Soveria Mannelli.
- Carteron (1923): Henri Carteron, *La notion de force dans le système d'Aristote*, Paris.
- Chaffin (1992): Roger Chaffin, "The Concept of a Semantic Relation", in: Adrienne Lehrer and Eva Feder Kittay (Eds.), *Frames, Fields, and Contrasts: New Essays in Semantic and Lexical Organization*, Hillsdale, NJ, 253–288.
- Chaffin & Herrmann (1988): Roger Chaffin and Douglas J. Herrmann, "The Nature of Semantic Relations: A Comparison of Two Approaches", in: Martha Walton Evens (Ed.), *Relational Models of the Lexicon: Representing Knowledge in Semantic Networks*, Cambridge, 289–334.
- Cole et al. (2006): Michael Cole, Karl Levitin, and Alexander Luria, *The Autobiography of Alexander Luria: A Dialogue with The Making of Mind*, Mahwah, NJ.
- Collins & Loftus (1975): Allan M. Collins and Elizabeth F. Loftus, "A Spreading-Activation Theory of Semantic Processing", *Psychological Review* 82(6), 407–428.
- Damerow et al. (2002): Peter Damerow, Jürgen Renn, and Simone Rieger, "Mechanical Knowledge and Pompeian Balances", in: Giuseppe Castagnetti and Jürgen Renn (Eds.), *Homo Faber: Studies on Nature, Technology, and Science at the Time of Pompeii*, Rome.
- Drake & Drabkin (1969): Stillman Drake and I.E. Drabkin, *Mechanics in Sixteenth-Century Italy: Selections from Tartaglia, Benedetti, Guido Ubaldo, & Galileo*, Madison.
- Graham (1999): Daniel W. Graham, *Aristotle Physics Book VIII*, Oxford.
- Huffman (2005): Carl A. Huffman, *Archytas of Tarentum: Pythagorean, Philosopher and Mathematician King*, Cambridge.
- Jackson (2003): J. Edward Jackson, *A User's Guide to Principal Components*, Hoboken, NJ.
- Jaeger (2005): Jeri J. Jaeger, *Kid's Slips: What Young Children's Slips of the Tongue Reveal About Language Development*, Mahwah, NJ.
- Kintsch (1998): Walter Kintsch, "The Representation of Knowledge in Minds and Machines", *International Journal of Psychology* 33(6), 411–420.
- Krafft (1970): Fritz Krafft, *Dynamische und statische Betrachtungsweise in der antiken Mechanik*, Wiesbaden.
- Kuhn (2000): Thomas S. Kuhn, "Possible Worlds in History of Science", in: *The Road Since Structure*, Chicago, 58–89.
- Landauer & Dumais (1997): Thomas K. Landauer and Susan T. Dumais, "A Solution to Plato's Problem: The Latent Semantic Analysis Theory of Acquisition, Induction, and Representation of Knowledge", *Psychological Review* 104(2), 211–240.

Landauer et al. (1998): Thomas K. Landauer, Peter W. Foltz, and Darrell Laham, "An Introduction to Latent Semantic Analysis", *Discourse Processes* 25(2/3), 259–284.

López Rúa (2003): Paula López Rúa, *Birds, Colours and Prepositions: The Theory of Categorization and its Applications in Linguistics*, LINCOS Studies in Theoretical Linguistics 33, Munich.

Lyons (1977): John Lyons, *Semantics*, Cambridge.

Markman (1989): Ellen M. Markman, *Categorization and Naming in Children: Problems of Induction*, Cambridge, MA.

Micheli (1995): Gianni Micheli, *Le origini del concetto di macchina*, Florence.

Morville (2005): Peter Morville, *Ambient Findability*, Beijing.

Porter (1980): M.F. Porter, "An Algorithm for Suffix Stripping", *Program* 14(3), 130–137.

Quillian (1968): M. Ross Quillian, "Semantic Memory", in: Marvin Minsky (Ed.), *Semantic Information Processing*, Cambridge, MA, 216–270. [A revised portion of Quillian's 1966 Carnegie Institute of Technology Ph.D. dissertation.]

Uschold & Gruninger (1996): Mike Uschold and Michael Gruninger, "Ontologies: Principles, Methods and Applications", *Knowledge Engineering Review* 11(2), 93–155.

From *Condensation* to *Compression*: How Renaissance Italian Engineers Approached Hero's *Pneumatics*

Matteo Valleriani, Max Planck Institute for the History of Science

The scientific and technological output of the Italian Renaissance is known to be the result of the rediscovery of ancient science. In particular the diffusion and translation of Greek and Arabic texts, which carried Hellenistic science to the early modern period, is used to give historical reason to the Renaissance of the sciences. Recent historical studies recognize the Hellenistic era, in particular the third century BC, as a period of great scientific and technological development. Scientists such as Euclid, Archimedes, Ctesibius, and Philo of Byzantium lived during this age. This phase during which the sciences flourished was temporarily interrupted by the Roman occupation, and continued during the Roman Empire, especially during the first and second centuries AD. From this time scientists such as Hero of Alexandria, Ptolemy, and Galen are particularly well known.

Recently, historians of science have succeeded in reinstating the spirit of the so-called Hellenistic *forgotten scientific revolution*.¹ It has been shown how Hellenistic science gained its results from a methodology and a theoretical investigation whose use, until the modern era, was apparently discontinued. Together with this re-discovery, however, there is a certain common tendency to believe that the first reception of Hellenistic science during the early modern period focused mainly on technical applications. This is because the theoretical approach, which distinguishes ancient science, could not be understood due to its high level of investigation.

1 The expression *forgotten revolution* comes in particular from the work of Lucio Russo, who is author of a detailed reconstruction of what scientists and practitioners of the early modern era retrieved from ancient science and how they interpreted that knowledge. For more details, see Russo (2003).

According to this view, the first recipients of ancient science during the early modern period were practitioners such as engineers, architects, and mechanics, whose understanding of the scientific results of the antiquity was limited to the realization of technical devices. This situation should have changed with the work of Galileo, who paved the way to the scientific formulations of the modern era, when the theoretical developments of antiquity are supposed to have been first understood and their relevance recognized.²

In reference to Hero's *Pneumatics*,³ this view seems to be supported by the evidence left by early engineers who did not yet have Hero's text at their disposal. This first began to circulate substantially towards the end of the sixteenth century. The situation changed dramatically, however, when Italian engineers, especially the hydraulic-engineers, were able to use this text after producing the first Italian translations themselves.

Hero's theoretical approach for explaining pneumatic phenomena and its comparison with the Aristotelian doctrine, which is concerned with the same effects, will provide an instrument for evaluating the theoretical efforts of the Italian engineers; the authors of commented translations of Hero's text. Far from being incomprehensible, the ancient pneumatic scientific principles were reinterpreted and transformed into new scientific ideas by the Italian engineers. In this way, they paved the way for the scientific development of the modern era.

HERONIAN PNEUMATIC DEVICES AND THEIR EARLY RECEPTION

The most commonly quoted early engineers, who first documented the reception of Hero's devices, are Villard de Honnecourt, Conrad Kyeser, Mariano Taccola, Francesco di Giorgio Martini, and Leonardo. The reception of ancient pneumatics that these engineers documented took place at a time when no Latin or vulgar translation of Hero's text was readily available to them. The work of these engineers was based either on other kinds of texts or on real devices, whose functioning and methods of construction was transmitted orally and through

2 See especially Chapter 11 of Russo (2003), pp. 375–454.

3 For Hero's *Pneumatics*, the text as published by W. Schmidt has been used: Hero (1899). The most complete work on the transmission of Hero's *Pneumatics* is Boas (1949).

apprenticeships. In the texts of these engineers, pneumatic devices ‘à la Hero’ have been well identified and seem, in fact, to support the idea that the functioning of ancient pneumatic devices was not completely understood.



Fig. 1: Siphon in the form of a wine-cup. Honnecourt (First half of the XIII century), plate 17, detail

In his *Sketchbook*, compiled during the first half of the thirteenth century, Villard de Honnecourt presents a siphon in the form of a wine-cup to entertain guests (Fig. 1).⁴ This wine-cup, a device that was common during the late Middle Ages, probably gave the impression that a bird drinks wine from the cup.



Fig. 2: Intermittent Fountain. Kyeser (Beginning of the XV century), Vol. 2. folio 64b

Based on the principle of communicating vessels, it was activated when air escaped through the central pipe, eventually being sucked out. At the beginning of the fifteenth century Conrad Kyeser shows his interest for pneumatic devices in his *Bellifortis* (Fig. 2).⁵ He depicts a fountain, from whose upper tower water escapes intermittently. This was probably due to vapor rising from the box placed below it, in which water was heated.

4 Honnecourt (First half of the XIII century), plate 17. The original text reads: “Ves ci une cantepleure c’o(n) puet faire en .i. henap e(n) tal maniere, q’ens en mi le henap doit avoir une torete (et) ens en mi liu de le tourete doit avoir .i. behot, q(u)i tiegne ens el fons del henap; mais q(ue) li behos soit anso lons co(m) li henas (est) p(ar) fons, (et) ens en le torete doit avoir .ii. travecons p(ar) sontre le fons del henap, si q(ue) li vins del henap puist aler al behot, (et) p(ar) deseur le torete doit avoir .i. oiziel q(u)i doit tenir so(n) bieci si bas q(ue) qant li henas iert plai(n)s qu’il boive; adont s’en corra li vins p(ar) mi le behot (et) p(ar) mi le piet del henap q(u)i (est) doubles; (et) s’entendes bien q(ue) li oiziaus doit estre crues.” From Hahnloser (1972), p. 48.

5 Kyeser (beginning of the XV century), Vol. 2, 64b. The original text reads: “Est vas maius vacuum vinto funicolo reclusum/Regit aer cannas infra tendentes adyma/Per spacium scriptum sursum meat aqua secundo/ Cannas per seorsum scaffo recluso bifundo/Infundatur lympha ducillus medius instar/Fundique supremi poros aperit aer reclusus/Descendit ascendit gutta casu non minuetur.” From Kyeser (beginning of the XV century), Vol. 1, p. 42.

Mariano Taccola depicts several pneumatic devices, shortly after Kyeser, for his general collection of images of war and work devices, *De ingeniis* (Fig. 3). One of these is a useful device for irrigation.⁶ The mechanical movement of the man-powered bellows first sucks the water from the natural pool and then expels it into the large barrel.



Fig. 3: Device for irrigation. Taccola (First half of the XV century), Book 1, folio 31v.

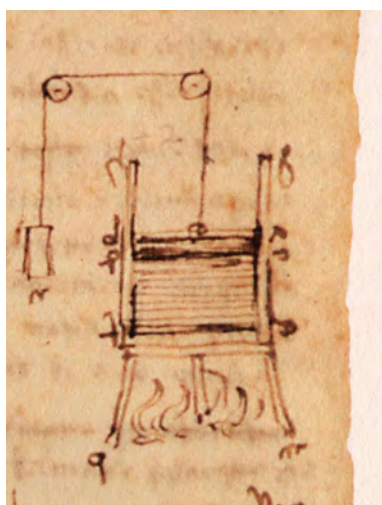


Fig. 4: Experiment to find out the expansion ratio of water to steam. Leonardo (1504-1506), Sheet 10A, folio 10r

Finally an experiment by Leonardo, depicted and described in his *Codex Leicester*, is often quoted to show his interest in Heronian pneumatic devices (Fig. 4).⁷ This experiment is explicitly designed by Leonardo to find out the expansion ratio of water to steam, a relevant topic for pneumatic science, but which does not have any direct relation with the Heronian *Pneumatics*, as transmitted in written form.⁸

Most of Hero's pneumatic devices function on the basis of two principles that he explicitly formulated at the beginning of his *Pneumatics*. The first principle is a simple mechanical one for which air is considered as a body that can occupy a certain and well-defined volume. The body of air is therefore able to move water and, *vice-versa*, to be moved by water. On the basis of this principle, devices such as hydraulic organs function. According to the second principle, which, during the early modern time, turned out to be more problematic from the theoretical point of view, the air is not simply considered as a body, but also as a body that can contract and expand, for example, by means of cooling and heating processes.

6 Taccola (first half of the XV century), Book 1, folio 31v. The original text reads: "Ista camna fissa sub mantacho in fundo. Quando levatur subit aquam et postea in agravantione expuetur aqua per vim acstrictionis." From Taccola (first half of the XV century), Vol. 1, p. 64.

7 Leonardo (1504-1506), Sheet 10A, folio 10r. The original text is in Calvi (1909), p. 50.

8 It is certain, however, that Leonardo knew Hero or, at least, some of his works. For more details, see Boas (1949), p. 41.

To show in detail how Heronian devices work according to both of these principles, the forty-seventh device (Fig. 5) from the Latin translation of Hero's *Pneumatics* of 1575, made by Federico Commandino should be taken into account.⁹

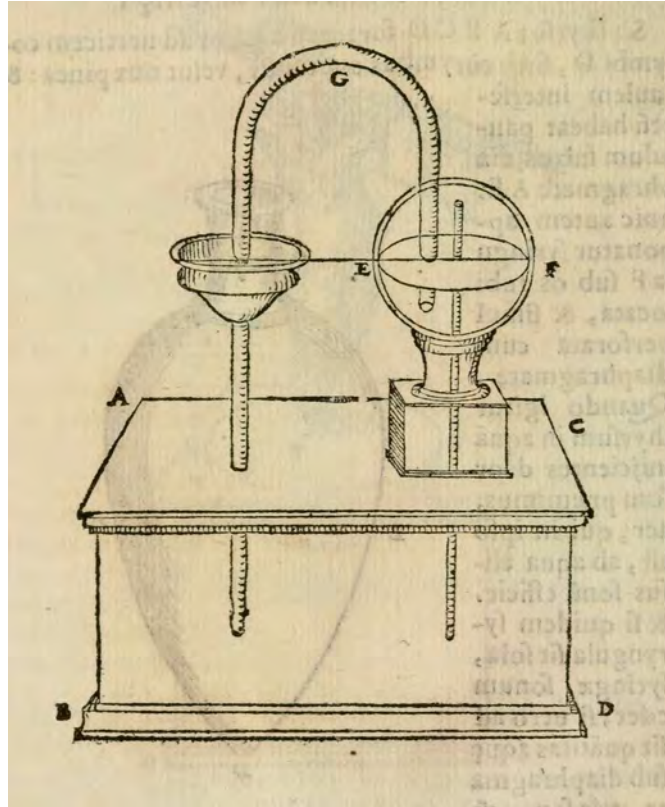


Fig. 5: A fountain that flows due to the action of the sun's rays.
Commandino (1575), p. 5
(source: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>)

The vessel contains water and air. When the device is placed in the sun, that is, when the air is heated and thus expands, it pushes the water through pipe G and, drop-by-drop, the water appears in the funnel. When the device is placed in the shade, the air cools and its volume decreases. The water is then sucked upwards through the other pipe, under the vessel, from the base back into the vessel.

These principles and additional mechanical devices that are propelled by the weight and the motion of the water led to more complex devices eventually being designed. One example is an automatic device that opens the doors of a temple (Fig. 6).¹⁰

⁹ Commandino (1575), p. 50.

¹⁰ Commandino (1575), p. 43.

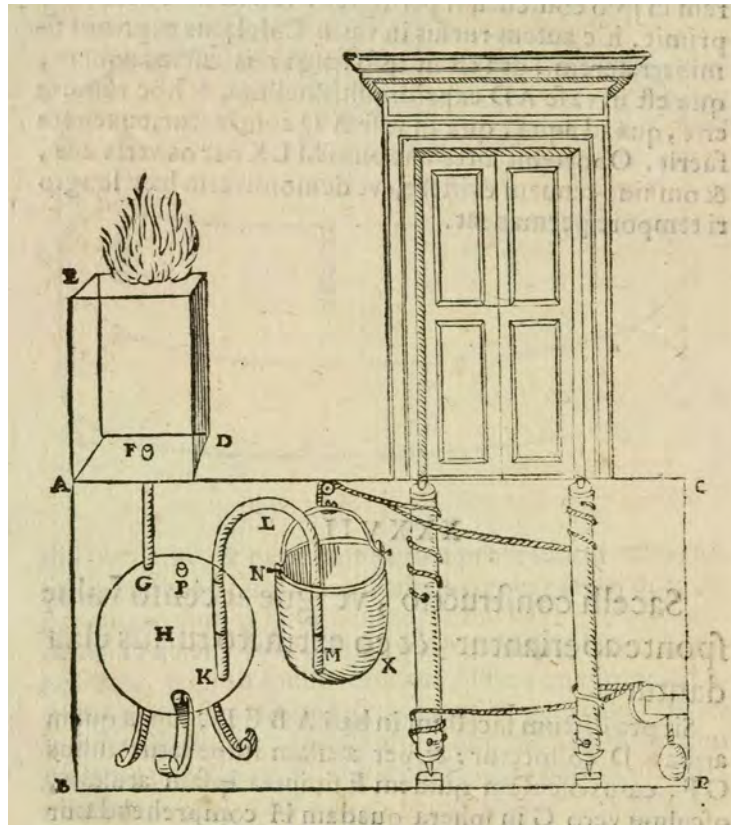


Fig. 6: Pneumatic device to open the doors of a temple.
Commandino (1575), p. 43
(source: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>)

There is a relevant difference between these latter Heronian devices, as described in Commandino's Latin translation of Hero's work, and the devices of Honnecourt, Kyeser, and Leonardo. The pictures and the descriptive texts of pneumatic devices of the early engineers, who did not yet have Hero's work at their disposal, do not show a clear understanding of how those devices functioned. They certainly testify both to the existence of pneumatic devices, which were eventually mechanically reproduced over the centuries, and to the attempt to understand them. However, the evidence seems more to support the idea that ancient science was not understood during the early modern period.

RECEPTION AND MATERIAL TRANSLATION OF HERO'S *PNEUMATICS* BY ITALIAN ENGINEERS AT THE END OF THE SIXTEENTH CENTURY

According to Lucio Russo, even the engineers of the sixteenth century, who did have Hero's text at their disposal, were merely able to reproduce those devices but were not able to give any explanation of how they functioned.¹¹ An analysis of the reception in Italy of Hero's work on *Pneumatics* will, however, change this perspective.

The Italian translation of Hero's *Pneumatics* and its related commentary began towards the end of the sixteenth century by engineers, who used the Latin *editio princeps*, written in 1575 by the engineer-scientist Federico Commandino.¹²

The first two translations are both dated 1582. One was made by Oreste Vannocci of the entire work and the other by Bernardo Davanzati, who translated only the first part of the work, namely Hero's theoretical explanation (Fig. 7).¹³ Oreste Vannocci was taught by his uncle, the engineer usually known as Vannoccio Biringuccio, who was famous for his work on metallurgy.¹⁴ While Oreste was translating Hero's work, he also published the Italian translation of Piccolomini's commentary on Aristotle's *Mechanical Questions*. Oreste Vannocci's translation has been preserved in the form of a manuscript.¹⁵ In his introduction, Vannocci explains that he not only used the Latin translation of Commandino, but also a Greek manuscript that he found in the archives

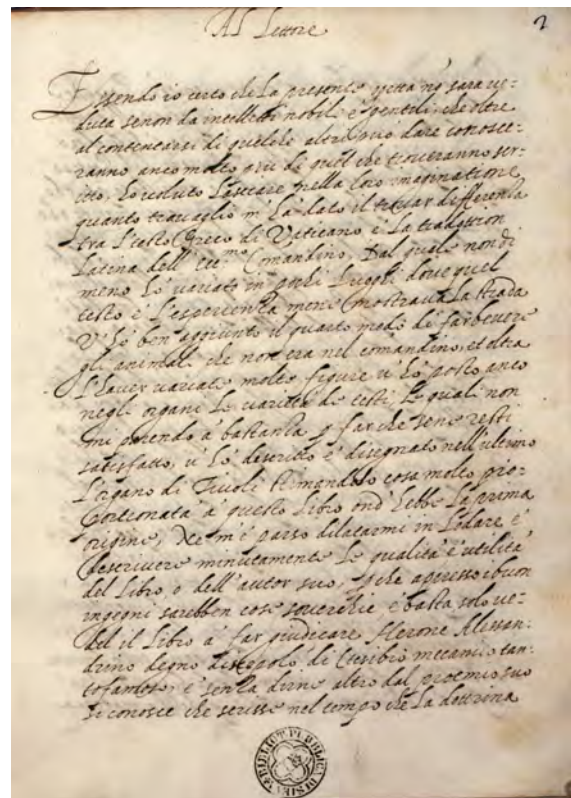


Fig. 7: Dedication page of Oreste Vannocci. Vannocci (1582), folio 1 (source: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>)

11 Russo (2003), pp. 382-392.

12 Commandino (1575).

13 Vannocci (1582), folio 1.

14 Biringuccio (1540).

of the Vatican. From the Greek manuscript Vannocci translates the description of “the fourth way to let the animals drink,”¹⁶ a pneumatic device designed to give the illusion that a bird is drinking water. At the end of the manuscript Vannocci also adds a description of a hydraulic organ, which he saw in action in the garden of Tivoli.¹⁷

Both of the first two Italian translations were made at the request of Bernardo Buontalenti, at that time one of the chief engineers at the Court in Florence. Buontalenti became particularly famous as a military architect owing to the innumerable fortresses he designed and whose building sites he coordinated. But also as a machine maker, painter, builder of theatrical machinery, and hydraulic engineer he is author of many technical and artistic productions of the Florentine Renaissance. In 1569 he was in charge of designing the Villa and the garden of Pratolino. When the villa was completed around 1580, work on its garden began. It is at this time that Buontalenti, due to his poor command of Latin, asked Vannocci and Davanzati to translate Hero’s *Pneumatics* (Fig. 8).¹⁸



Fig. 8: Fountain-Parkway. S. della Bella,
Lo stradone delle fontane in Pratolino, engraving

15 Vannocci’s manuscript and its transcription, made by the author, are available at:
<<http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>> (October 2006).

16 Vannocci (1582), folio 2r.

17 Vannocci (1582), folios 70r-75r.

18 Stefano della Bella, *Lo stradone delle fontane*, engraving.

The garden of Pratolino was a marvelous material translation of many of Hero's suggestions and also a place where the pneumatic principles found new technical interpretations. In later descriptions of the garden, hundreds of water-games and automata-games are listed.¹⁹

After Vannocci's manuscript was produced, Giovanni Battista Aleotti, hydraulic-engineer for the Estensi at the Court in Ferrara, published in 1589 the first commented Italian translation.²⁰ His translation of Hero's *Pneumatics* is made on the basis, he states, of a Latin and of a Greek text, without specifying which texts he eventually used. For the Latin translation, because of the fame achieved by the *editio princeps* of Commandino, it is, however, quite easy to infer that he used this. Aleotti's translation was republished several times and in several languages during the following fifteen years. Finally, the third translation, published in 1592, is by Alessandro Giorgi.²¹ In the works of Oreste Vannocci and Giovanni Battista Aleotti in particular, Hero's theoretical explanation for the functioning of his pneumatic devices is translated, commented, and criticized. To show that early modern engineers were in fact able to approach and to understand Hero's principles, the same theoretical reflections of Hero should first be described in detail.

HERO'S THEORETICAL APPROACH

The first chapter of Hero's work is dedicated to the explanation of his theoretical principles. The first principle, according to which air is to be considered as a solid body,²² though discussed, did not become the core point of the scientific discussions at the end of the sixteenth century. The second principle, according to which air can contract and expand, caused serious disputes as Hero's explanation was in direct opposition to the Aristotelian doctrine.

19 Sgrilli (1742). B. S. Sgrilli was chief plumber at the garden of Pratolino around the mid-eighteenth century.

20 Aleotti (1589).

21 Giorgi (1592). Giorgi was not an engineer but a man of letters. His commentaries on Hero's work, and especially on his theoretical approach, are in fact more of a historiographical general review than an attempt to understand and interpret Hero's conception. For this reason this translation will not be considered in detail.

22 Hero (1899), p. 4. The German translation of W. Schmidt is on p. 5.

According to Hero, air is matter and constituted of particles; among the particles are interstitial vacua, which can evidently become greater or smaller due to the action of external factors.²³ Hero focuses his explanation in particular on the air's capacity to contract. He gives the example of a vessel into which one blows forcefully and then closes its opening with a finger. If one removes the finger from the opening, it is possible to recognize that a certain amount of air exits the vessel violently. According to Hero, if there were no interstitial vacua in the body of air, it would not have been possible to blow more air into the vessel. The violence of the exiting air is due to the tendency of air to return to its natural state, that is, to the natural dimensions of the vacua. The interstitial vacua are not only able to contract, but also to enlarge. If, for example, the air is sucked out from the same vessel, according to Hero it is easy to recognize that a greater vacuum is created, which "pulls," because the vacua tend to return to their natural dimensions.²⁴

If one adds a source of heat, which in modern terms causes a dilatation of the air, the Heronian system becomes a little more complicated. Hero had to take this into consideration because the pneumatic devices functioning on the basis of these characteristics of air worked mostly using sources such as fire or the sun's rays. If the air is heated, it becomes a sort of corrupted body, because of the action of the element Fire, so that the air particles become thinner and eventually exit their container through the pores of the material. For this reason, the interstitial vacua are supposed to become larger because they "compensate" the volume that is reduced due to the loss of particles. When the heating process stops, the enlarged vacua tend back to their natural state and thus "pull" the matter around and towards themselves.²⁵

Although Hero introduces the existence of vacua between the particles that constitute a body, his general frame remains Aristotelian. For Hero the natural state of a body is also directly connected with its natural place. The world in which these phenomena take place is still the Aristotelian sub-lunar one, where bodies are constituted of the four elements and their changing is related to a change of their natural position. Heating the air or sucking it out of a closed vessel are violent actions that interrupt the natural motions of these bodies. Finally Hero completely refutes the idea that an external vacuum, one which is not related to particles constituting a body, can exist.

23 Hero (1899), p. 4. The German translation of W. Schmidt is on p. 5.

24 Hero (1899), pp. 8 and 10. The German translation of W. Schmidt is on pp. 9 and 11.

25 Hero (1899), p. 10. The German translation of W. Schmidt is on p. 11.

ARISTOTLE VS. HERO

During the sixteenth century the Peripatetic view was predominant in natural philosophy and this also represented the theoretical instrument that engineers had at their disposal whilst reading Hero's work.²⁶ In particular, Hero's principles are not in agreement with the Aristotelian doctrine not only with respect to the principles of *condensation* and *rarefaction* but also, and especially, because of the supposed existence of interstitial vacua.

Although Aristotle wrote his *Physics* several centuries earlier, he evidently encountered the doctrines professed by Hero.²⁷ As W. D. Ross translates, Aristotle approaches the problem in the following terms:

Some try to prove the existence of void from that of rarity and density.²⁸

In his doctrine, Aristotle opposes those who believe that a void exists in that which is rare. According to his doctrine, matter has potentially all the qualities such as rarity, density, heaviness, lightness, etc. In fact, matter does not change:

[...] if air contracts or expands, the matter which is potentially smaller or larger becomes either the one or the other. For as the same matter from being cold becomes hot or vice versa, so from being hot it becomes hotter, though nothing in the matter has become hot which was not already hot.²⁹

26 Heronian ideas about the constitution of matter related to its capacity to contract and expand were already stated by Nicholas of Autrecourt during the fourteenth century in his *Exigit ordo executionis*. Autrecourt affirms: "For we do not assert that dense occurs by means of the generation of some new quality which did not exist before, but [rather we declare] that dense occurs only by the retreat [or compacting] of bodies, as in wool; or because the parts come together, that is, because more [parts] are related more closely than before. And rare will not come to be unless the parts of this body are more separated than before. This dense or rare do not come to be except by the local motion of the parts." From O'Donnel (1939), pp. 217ff. English translation of Edward Grant in Grant (1974), Vol. I, p. 353. Unfortunately no study revealed connections between Autrecourt's doctrines and Hero's *Pneumatics*. Also the reception of Autrecourt's work during the Renaissance seems to be still completely unknown.

27 Aristotle poses the question of whether there is a void in bodies in his *Physics*. Aristotle (1960), 216 b 22 - 217 b 27.

28 Aristotle (1960), 216 b 22, p. 382.

29 Aristotle (1960), 217 a 31, p. 383.

With these words Aristotle in practice refers to the principles of condensation and rarefaction, as described in his *Meteorology*. Condensation and rarefaction are processes on whose basis natural motions happen.³⁰ They take place when matter, which exists in a particular form, changes into another form, for example, when water changes into vapor. The extension of the volume, which is a quality of the form and not of the matter, increases while passing from the form of water to the form of vapor. In this sense, when a process of rarefaction takes place, this involves only the form and not the matter. It is not appropriate to speak of rarefaction of matter. The rarefied body becomes lighter than the body from which it originated and this is the reason why it eventually moves upwards. The process of condensation works in the opposite way. Obviously any process of rarefaction is accompanied by an increase in temperature; and processes of condensation with a decrease. According to Aristotle, condensation and rarefaction always involve a change of form, that is, a change of volume, of temperature, and of place. In these terms, the Aristotelian doctrine is also able to explain, at least apparently, the functioning of pneumatic devices.

THE RECEPTION OF HERO'S THEORETICAL APPROACH

Apart from the existence of a sort of vacuum, Hero's doctrine seems to disagree with Aristotle's, especially because of the need to introduce the possibility of air contraction and expansion in relation to changes of temperature caused by a heat source. This aspect leads easily to a comparison between Hero's and Aristotle's principles of condensation and rarefaction. For many characteristics these principles are in fact similar. When the Heronian interstitial vacua change their dimensions, a change of temperature,³¹ a change of extension of the volume, and a motion take place, as in the case of the Aristotelian rarefaction. The only difference is that Hero does not introduce the distinction between form and matter, which means that when all the changes that have been mentioned take place, there is no change of form. The contraction of air is, according to Aristotle, an aspect of the more general process of condensation which causes

30 For Aristotle's *Physics*, the commented edition of W. D. Ross has been used: Aristotle (1960). For the *Meteorology*, Aristotle (1987). For the processes of condensation and rarefaction see, in particular, Aristotle (1987), 369 A 10 – 369 b 3.

31 According to Hero's principles, a change of temperature, however, takes place only when the pneumatic device works by means of a heat source.

a body to change its form. If this solution was still absolutely convincing in reference to meteorological phenomena such as rain, the engineers of the Renaissance soon discovered that it was insufficient to describe and explain how air can contract but still be air, that is, not entering into any general physical process of transformation, such as Aristotelian condensation.

To introduce the reader to Hero's work, Oreste Vannocci undertakes, at the beginning of his 1582 translation, a defense of the Aristotelian doctrine, in particular concerning the question of the vacuum, because "from his *proemium* [Hero's] it is clear that he wrote during a time when the Peripatetic doctrine did not yet have authority."³² Oreste Vannocci first takes for granted that Heronian contraction and expansion are scientific concepts used to explain the same phenomena that the Aristotelian concepts of condensation and rarefaction also explain:

[...] rarefactions and condensations, as established by Aristotle, really make those effects which were [...] ascribed to the vacuum scattered among the atoms, or particles of all the things, and it is clear that the rarefaction and the condensation do not happen because the parts of the bodies receive more or less vacuum among themselves [...], but because, since the rarefied bodies are those which have in themselves less matter in a form which needs great dimensions, and since on the contrary the dense bodies are those which retain a lot of matter in a form which requires small dimensions, the rarefaction of a certain body happens because the matter, when it prepares itself to change into another form, for which greater dimensions and greater quantities are needed, it is obliged to spread out so that it is suitable to that [form], although to the matter, as matter, no determined figure or dimension can be ascribed, because, realizing the accidents, is proper of the form [...].³³

32 Vannocci (1582), folio 2r.

33 Vannocci (1582), folios 2v-3r. The original text reads: "le rarefazioni e condensazioni stabilite da Aristotile fan veramente gli effetti che eron [...] attribuiti al vacuo sparso tra gli atomi, o, particelle di tutte le cose, et è cosa chiara che la rarefazione el condensamento, non si fanno perche le parti de corpi ricevino piu, o, men voto fra di loro [...], ma perche essendo corpi rari quelli che hanno in se poca materia sotto forma bisognosa di gran dimensioni e per il contrario essendo corpi densi espressi quelli che molta materia ritengano sotto forma a chi di piu piccole dimensioni fa di bisogno, il rarefarsi d'alcun corpo succede, perche la materia nel disporsi per passar in altra forma alla qual si ricerca piu ampie dimensioni, et maggior quantità vien per forza a distendersi per adattarsi a quella peroche alla materia in quanto materia non conviene alcuna figura, o dimensione determinata per esser proprio della forma determinarsi gli accidenti [...]."

The parallelism between, on the one side, condensation and rarefaction and, on the other side, contraction and expansion, obliges Oreste Vannocci to take into consideration the case of a body, for instance, water, which changes its form to vapor. Thus, after having explained this process in detail, Oreste Vannocci returns to the general terms taking into account the real problem given by the Heronian vases, where no change of form takes place:

[...] the rarefaction and condensation are enough [...] to explain all the experiments adduced by Heron [...] about cupping-glasses, of the sucked vase, and of the inflated sphere and of whichever other similar vases, which can be adduced and that, either naturally or artificially, become attractive and expulsive, although such effects happen because of rarefaction or *excessive condensation*, which is also hated by nature, and tolerated only because of a temporarily short violence.³⁴

Heronian vases definitely challenged the Aristotelian doctrine, as was known by Oreste Vannocci. He attempts to retain the general structure of the Aristotelian doctrine by adducing the processes of condensation and rarefaction to explain those of contraction and expansion too. Following Hero, however, he focusses in particular on the process of contraction and describes it as being caused by a sort of special condensation, also abhorred by nature, but, if short enough, that can take place due to a violent action. The process of “excessive condensation” is supposed to explain how a body, for instance air, could condense (contract) without changing its form, but in a way that allows it to return to its natural state.

This step is clearly relevant because, first of all, it shows that Oreste Vannocci recognized that the Aristotelian doctrine was not completely adequate to describe the pneumatic phenomena relevant for Hero’s approach. Secondly, Oreste Vannocci admits that processes against nature can be realized. Oreste Vannocci, however, substantially remains within the Aristotelian frame. He only changes it slightly to adapt to the new challenges that realizations such as those of Buontalenti in Pratolino were about to make particularly popular. Finally Oreste Vannocci refuses to take into account the case of when a heat source is applied to the pneumatic device.

34 Vannocci (1582), folio 3v. Italics by the author. The original text reads: “[...] basta la rarefattione el condensamento [...] a salvar tutte l’esperienze addotte da Herone e dagli altri delle ventose, del vaso succhiato, e della sfera gonfia e quant’altre simili se ne potessen addurre di vasi che per natura, o per arte diventino attrattivi o espulsivi, pero che tali effetti avvengano per la rarefattione o, condensamento soverchio che è anch’esso odiato dalla natura e sopportato solo per violenza breve tempo.”

Giovanni Battista Aleotti discusses the same problem again seven years later. He accurately reports Hero's text in a very elegant translation and at the end, adds a new chapter in which he gives his own theoretical interpretation of Hero's doctrine.³⁵ The title of this chapter is "Aleotti's addition concerning the impossibility of the existence of any vacuum, and a claim that the element of Air cannot be compressed." Despite this title, the content of the chapter is much more tolerant towards Hero's doctrine. When Aleotti states in the title that no vacuum can exist, he means in fact that he recognizes that a vacuum can indeed be created if a violent action takes place, although nature abhors it. As soon as the violent action stops, however, the vacuum is filled with matter. Aleotti furnishes some examples of this behavior "in conformity to what Hero said." Since Aleotti, also according to Hero, considers the air as a body, he suggests trying to plunge a well-lathed stick into the barrel of an arquebus. If the stick is already in the barrel, then it is very difficult to take it out "because of the opposition of the vacuum, which will be on the lower part [of the barrel]."³⁶ If, on the other hand, one tries to push the stick into the barrel

[...] we will feel (since the air is a body) that we require effort to do this, and that the air will crowd together [*ammassarsi*], and if, once pushed down as far as is possible, we let it go, the air, subjected to violence, since it cannot remain packed [*constipata*], will break out, and with fury will push out the stick and so return (once the violence stops) to its natural state [...].³⁷

The terms with which the engineers discuss Hero's theories, seven years after the first Italian translation, changed dramatically. In the title of his additional chapter, Aleotti already distinguishes between the phenomena described by the Aristotelian principles of condensation and rarefaction, and those phenomena described by Hero to explain the functioning of his pneumatic devices. Aleotti abandons the Aristotelian frame and accepts the Heronian one when he declares that air can be "compressed," though only for short time. In this sense he also retrieves the temporal characteristic of the effects of the process of "excessive condensation," as postulated by Oreste Vannocci.

35 Aleotti (1589), p. 8.

36 Aleotti (1589), p. 8. The original text reads: "contrastandoci il vacuo, che resterà nella parte da basso."

37 Aleotti (1589), p. 8. The original text reads: "[...] sentiremo (perchè l'Aria è corpo) che lo faremo con fatica, et che esso Aria verrà ad ammassarsi; et se cacciatola giù quanto potremo la rilasceremo liberamente l'aria violentato, non potendo star constipata, errumperà, et con furore scaccierà la bacchetta per ritornar subito (cessata la violenza) in sua natura [...]."

If, according to Aleotti, the air can be compressed, the concept of air compression or even air compressibility is nevertheless far from being defined. In fact the air can also “crowd together” (*ammassarsi*) or “be packed” (*constiparsi*).

However, a relevant difference between Aleotti ideas and Hero’s doctrine itself persists. Although Aleotti admits that air can be compressed and although he believes that an external vacuum can exist, he does not seem to accept that air is constituted of particles and interstitial vacua. Aleotti’s packed air and Hero’s contracted air are two bodies with completely different internal structures.

Aleotti refuses the Aristotelian principles of condensation and rarefaction, the Aristotelian impossibility of the vacuum, and Hero’s interstitial vacua, and retains only the possibility to create an external vacuum by means of a violent action. Apart from the unresolved question of how the air is then constituted, this conceptual system, however, seems sufficient to explain the functioning of many of Hero’s pneumatic devices. But not all of them. In particular Aleotti cannot leave unanswered the question of how a device operated by a heat source works. For this purpose Aleotti involves in his argument a conception of heat which differs significantly from that of Hero. He explains his theory by means of an example, that is, directly describing the functioning of a pneumatic instrument that is operated by a heat source to suck milk from a woman’s breast:

These [the women] take a glass cruet with a neck on the upper part wide enough to be able to contain the nipple of the breast and they warm up its body [of the cruet] very well by means of fire until the heat, penetrating the thinness of the glass through the pores, pushes the air out from it and fills the body of the cruet with a very thin vapor, and when the mentioned body [the cruet] is warm enough, they immediately place the opening of the neck of the cruet at the breast, placing the nipple into it, and since that thin igneous vapor cannot remain in that [the cruet], it exits through the vacua of the glass, through which it [the vapor] penetrated it [the glass], and so begins to rise upwards to its place, although from the air around, it is transmuted into aerial substance, and since through these *meatus*,³⁸ which are very thin, the air cannot enter, and since the vacuum cannot exist, that body, which cannot stay empty, immediately pulls milk from that breast, and by emptying it [the breast], it [the cruet] fills itself, and when it is completely full, it does not pull anymore [...].³⁹

38 The plural of the English term “meatus” with the archaic meaning “small openings,” “holes,” or “pores.” Italics by the author.

While Hero's heat corrupts and make the particles of air thinner so that they escape from the vase, in the case of Aleotti, the heat is a thin vapor that penetrates the vase and pushes away the air.

From the technical point of view, the superiority of Hero's explanation is evident: whereas Hero's approach can explain the behavior of the air independently of the characteristics of its container and in particular whether it is open or closed, it remains completely unclear what happens, if, according to Aleotti's idea, a closed container with air in it is heated: either the igneous vapor cannot penetrate it because the air does not find a way to escape and the container remains cold, or the igneous vapor is able to operate a certain pressure so as to "pack" the air. But connections between pressure and temperature were still far from being discovered. Aleotti, however, paved the way and was followed by the scientists who researched the nature of heat in connection with pneumatic phenomena as, for instance, Galileo did for many years until he arrived at his "atomistic" conception of heat published in the *Saggiatore*.⁴⁰

CONCLUSION

The evidence of a Heronian tradition, concerned with the *Pneumatics* and left by the early engineers who did not yet have at their disposal the ancient text, seems to support the view according to which practitioners such as architects, engineers, and mechanics were not able

39 Aleotti (1589), p. 8. The original text reads: "Queste pigliano una ampolla di vetro con il collo tanto nella parte superiore largo, che sia cappace del capitello della mammella, et riscaldano con il fuoco di essa il corpo ben bene fin che il caldo penetrando per li vacui la sottigliezza del vetro ne scaccia l'Aria riempiendo il corpo dell'ampolla di sottilissimo vapore, et quando è ben bene riscaldato detto corpo subito si pongono la bocca del collo dell'ampolla alla mamella dentro imponendovi il capitello, et perche quel sottil vapore igneo non puo star ivi renchiuso se n'escie fuori per quei vacui del vetro per gli quali entrò, et per levarsi in alto al suo luogo s'invia Se ben dal circomposto aria è trasmutato in sostanza aerea, et perche per questi meati, che sottilissimo sono non vi puo entrar l'aria non potendo esser vacuo subito quel corpo che, non può star voto tira da essa mammella il latte, et votando la viene à riempir se stesso, et ripieno a fatto, non piu tira [...]"

40 The correspondence between Galileo and his Venetian friend Sagredo, in which they discuss the behavior of the thermoscope, shows that Galileo also accepted Aleotti's conception for several years. For more details see, for example, the notes in the margin of the letter written by Giovan Francesco Sagredo to Galileo, April 11, 1615 in Galilei (1968), Vol. XII, p. 171. Galileo declares his heat doctrine in Galilei (1968), Vol. VI, pp. 347-352. This topic is one of the research subjects on which the Dissertation of the author - *Galileo as an Engineer* - focuses. The dissertation will be completed at the end of 2006.

to understand the theoretical apparatus that supported and accompanied such technical realizations during antiquity. The idea, however, that the re-birth of ancient theoretical science first began due to the work of Galileo does not seem to be completely adequate either. Scientists active during the seventeenth century had at their disposal not only the texts of ancient science, often translated into Latin and many other vulgar languages. They could count in particular on the theoretical efforts of engineers such as Oreste Vannocci, Bernardo Buontalenti and Giovanni Battista Aleotti, who first faced the theoretical apparatus of antiquity. The existence of the external vacuum is postulated in the frame of a theoretical debate that emerged among the early modern Italian engineers and characterized, on the one hand, by the ancient statement that only interstitial vacua can exist and, on the other hand, by the Peripatetic statement that no form of vacuum at all can be realized in nature.

These engineers, equipped with “Peripatetic glasses,” but constantly faced with their own practical realizations, are definitely responsible for a theoretical transformation of the ancient scientific concepts into new ideas, which later eventually found their own place in a more organic theoretical structure. This is the case for the general idea that air can be compressed. From the dialectic between the principle of condensation and the Heronian principle of contraction of air, the engineers first arrived at the formulation of a special violent process of “excessive condensation,” later transformed into the idea of air compression. This idea later became a relevant theoretical concept in the frame of a more systematic theory about the elasticity of the air, as formulated by Robert Boyle in 1660 in his *New Experiments physico-mechanicall, Touching the Spring of the Air and its Effects*.

SOURCES

Aleotti (1589): Giovan Battista Aleotti, *Gli artificiosi et curiosi moti spiritali di Herrone*, per Vittorio Baldini, Ferrara.

Aristotle (1960): Aristotle, *Aristotle's Physics*, ed. by W. D. Ross, Clarendon Press, Oxford.

Aristotle (1987): Aristotle, *Meteorologica*, ed. by G. P. Goold, The Loeb Classical Library.

Biringuccio (1540), Vannoccio Biringuccio, *De la pirotechnia*, Venezia.

Commandino (1575): Federico Commandino, *Heroni Alexandrini Spiritalium Liber*, Urbino (Source: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>).

- Galilei (1968): Galileo Galilei, *Le Opere di Galileo Galilei*, ed. by A. Favaro, Giunti-Barbera, Firenze, 20 Voll.
- Giorgi (1592): Alessandro Giorgi, *Spirituali di Herrone alessandrino*, Appresso Bartholomeo e Simone Rag.
- Hero (1899): Hero of Alexandria, *Heronis Alexandrini pneumaticorum libri duo*, in Schmidt (1899), pp. 1-333.
- Honnecourt (First half of the XIII century): Villard de Honnecourt, *Sketchbook*, Ms. fr. 19093, Bibliothèque Nationale, Paris.
- Kyeser (Beginnig of the XV century): Conrad Kyeser, *Bellifortis*, reprinted by VDI-Verlag, Düsseldorf, 1967, 2 Voll.
- Leonardo (1504-1506): Leonardo da Vinci, *Codex Leicester*, reprinted by Haus der Kunst, München and Museum der Dinge, Berlin, 2000.
- Sgrilli (1742): Beernardo Sansone Sgrilli, *Descrizione della regia villa, fontane, e fabbriche di Pratolino*.
- Taccola (First half of the XV century): Mariano Taccola, *De ingeniis*, Ms. Clm 197, Bayerische Stadtbibliothek, München, reprinted by Dr. Ludwig Reichert Verlag, Wiesbaden, 1984, 2 Voll.
- Vannocci (1582): Oreste Vannocci Biringiccio, *Libro de gli artifizii spiritali over di fiato d'Herone Alessandrino*, Ms. L. VI 44, Biblioteca degli Intronati di Siena (<http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>).

LITERATURE

- Boas (1949): Marie Boas, "Hero's Pneumatica: A Study of its Transmission and Influence," in *Isis*, Vol. 40, Nr. 1, pp. 38-48.
- Bowie (1959): Theodore Bowie (ed.), *The Sketchbook of Villard de Honnecourt*, Indiana University Press, Bloomington and London.
- Calvi (1909): Gerolamo Calvi, *Il codice di Leonardo da Vinci della Biblioteca di Lord Leicester in Holkham Hall*, Milano.
- Grant (1974): Edward Grant, *A Source Book in Medieval Science*, Harvard University Press, Cambridge, 2 Volls.
- Hahnloser (1972): Hans R. Hahnloser, *Villard de Honnecourt*, Akademische Druck- und Verlagsanstalt, Graz.
- O'Donnel (1939): Reginald O'Donnel, "Nicholas of Autrecourt," in *Mediaeval Studies*, 1, pp. 179-280.
- Russo (2003): Lucio Russo, *Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt des antiken Wissens*, Springer, Berlin.
- Schmidt (1899): Wilhelm Schmidt, *Heron von Alexandria. Druckwerke und Automatenlehre*, B. G. Teubner, Leipzig.

Table of contents

Introduction	1
Mentale Modelle als kognitive Instrumente der Transformation von technischem Wissen	
Jürgen Renn, Peter Damerow	3
Semantic Networks: A Tool for Investigating Conceptual Change and Knowledge Transfer in the History of Science	
Malcolm D. Hyman	29
From <i>Condensation</i> to <i>Compression</i> : How Renaissance Italian Engineers Approached Hero's <i>Pneumatics</i>	
Matteo Valleriani	43